

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK SICAKLIKTA YANMANIN MOTOR
PERFORMANS VE EMİSYONLARI
ÜZERİNE ETKİLERİ

Onur GEZER

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Şubat, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK SICAKLIKTA YANMANIN MOTOR PERFORMANS
VE EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİLERİ**

Onur GEZER tarafından hazırlanan tez çalışması 27.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tarkan SANDALCI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Orkun ÖZENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ARSLAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Muammer ÖZKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Düşük Sıcaklıkta Yanmanın Motor Performans ve Emisyonları Üzerine Etkileri” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur GEZER



Anneannem Bahriye Doğan

ve

Dayım Mehmet Doğan'ın anısına

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamda, tez konumun belirlenmesinden çalışmam sonlanana kadar desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, yön verici ve ön açıcı önerilerini duymaktan derin memnuniyet duyduğum, gerek doktora çalışmam sırasında gerekse de akademik kariyerimin tamamında desteğini her zaman hissettiğim danışman hocam Prof. Dr. Muammer ÖZKAN'a, çalışmamın önemli kısmında destek ve önerileri ile birçok kere bana yol gösteren ve yardımcı olan Doç. Dr. Orkun ÖZENER'e, tez izleme süreçlerindeki pozitif katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR'a, doktora tez savunması esnasında ön açıcı katkılarını duymaktan memnuniyet duyduğum Prof. Dr. Tarkan SANDALCI ve Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ARSLAN'a, doktora çalışmam esnasında desteğini ve yakınlığını her zaman hissettiren Doç. Dr. Levent YÜKSEK'e, lisansüstü eğitim süreçlerimde akademik yaklaşımın ilk deneyimlerini yaşadığım ve bugüne gelmemde önemli katkıları olan Prof. Dr. Özgen AKALIN ve Doç. Dr. Osman Taha ŞEN'e, içten yanmalı motor teknolojisinin akademik ilgi alanım olmasını sağlayan ve bu günlere gelmenin ilk vesilesi olan Prof. Dr. İrfan YAVAŞLIOL'a, benzer şekilde bilgi ve deneyimlerinden bugüne kadar istifade etmekten memnuniyet duyduğum Dr. Öğr. Üyesi Övün IŞIN'a, Doç. Dr. Alptekin ERGENÇ'e ve Prof. Dr. Hakan KALELİ'ye, çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Özgün Balcı, Dr. Öğr. Üyesi Selman Demirtaş ve Arş. Gör. Eray KARAGÖZ'e, akademik yaşamımda bana katkıları olan Yıldız Teknik Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi'ndeki tüm hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Onur GEZER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
TABLO LİSTESİ	xxix
ÖZET	xxxi
ABSTRACT	xxxiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	82
1.3 Orijinal Katkı	83
2 TEORİK ÇERÇEVE	85
2.1 Dizel Motorlarında Yanma	85
2.2 Dizel Motorlarında Ortaya Çıkan Başlıca Emisyonlar	91
2.2.1 CO Emisyonları	91
2.2.2 THC Emisyonları	93
2.2.3 NO _x Emisyonları	95
2.2.4 PM Emisyonları	98
2.3 Dizel Motorlarında PCCI Stratejisi	101
2.4 Deney Tasarımı Metodolojisi	107
2.5 Yanma ve Emisyon Modellemesi	111
2.5.1 Korunum Denklemleri ve Kütleli Akış Denklemleri	113
2.5.2 Piston ile Krank Konumu Arasındaki Geometrik Bağlılıklar	115
2.5.3 Isı Transferinin Modellemesi	116
2.5.4 Üfleme Gaz (Blow-by) Kaçaklarının Modellemesi	117
2.5.5 Karışım Kontrollü Yanma (Mixture Controlled Combustion-MCC) Teorisi	118

2.5.6 Emisyon Modellemesi.....	120
2.6 Yapay Sinir Ağları ve Geri Dönüşümlü Sinir Ağları.....	122
3 TEK FAZDA ELDE EDİLEN DENEYSEL SONUÇLAR, MODEL DOĞRULAMASI VE YSA MODELLEMESİ	130
3.1 Deneysel Kurulum ve Test Ekipmanlarının Tanıtılması.....	130
3.2 Deney Noktalarının Belirlenmesi ve Deney Tasarımı Sonuçları.....	133
3.3 Tek Fazda Yürütülen Deneysel Çalışmalarda Hata Analizi	137
3.4 Tek Fazda Elde Edilen Deneysel Verilerin Yorumlanması	139
3.4.1 Motor Efektif Güç Değerlerinin İncelenmesi.....	140
3.4.2 Özgül Yakıt Sarfıyatı Değerlerinin İncelenmesi.....	143
3.4.3 Silindir İçi Maksimum Basınç Değerlerinin İncelenmesi.....	145
3.4.4 Ortalama İndike Basınç Değerlerinin İncelenmesi.....	147
3.4.5 Mekanik Verim Açısından İrdeleme.....	148
3.4.6 CO Emisyonlarının İncelenmesi.....	150
3.4.7 THC Emisyonlarının İncelenmesi.....	152
3.4.8 NO _x Emisyonlarının İncelenmesi.....	153
3.4.9 PM Emisyonlarının İncelenmesi.....	155
3.4.10 NO/NO _x Oranlarının İncelenmesi.....	156
3.4.11 Özgül CO Emisyonlarının İncelenmesi.....	158
3.4.12 Özgül THC Emisyonlarının İncelenmesi.....	159
3.4.13 Özgül NO _x Emisyonlarının İncelenmesi.....	160
3.4.14 Özgül PM Emisyonlarının İncelenmesi.....	162
3.5 Termodinamik Modelin Doğrulanması.....	163
3.5.1 Enjeksiyon Profillerinin Çıkarılması.....	163
3.5.2 Yanma Modelinin Kurulması.....	169
3.5.3 AVL-Boost Ortamında MCC Modelinin Doğrulanması.....	171
3.6 Yapay Sinir Ağı Modellemesi Sonuçları	186
3.7 Çift Fazda Yürütülen Deneysel Çalışmaların Hata Analizi	209
3.8 Çift Fazda Elde Edilen Deneysel Verilerin Yorumlanması	212
3.8.1 Motor Efektif Güç Değerlerinin İncelenmesi.....	213
3.8.2 Özgül Yakıt Sarfıyatı Değerlerinin İncelenmesi.....	216
3.8.3 Silindir İçi Maksimum Basınç Değerlerinin İncelenmesi.....	217

3.8.4 Ortalama İndike Basınç Değerlerinin İncelenmesi.....	218
3.4.5 Mekanik Verim Açısından İrdeleme	220
3.8.6 CO Emisyonlarının İncelenmesi	221
3.8.7 THC Emisyonlarının İncelenmesi.....	222
3.8.8 NO _x Emisyonlarının İncelenmesi.....	222
3.8.9 PM Emisyonlarının İncelenmesi.....	225
3.8.10 NO/NO _x Oranlarının İncelenmesi.....	226
3.8.11 Özgül CO Emisyonlarının İncelenmesi.....	228
3.8.12 Özgül THC Emisyonlarının İncelenmesi.....	229
3.8.13 Özgül NO _x Emisyonlarının İncelenmesi.....	229
3.8.14 Özgül PM Emisyonlarının İncelenmesi.....	231
3.9 Çift Fazda Püskürtme Şartında Termodinamik Modelin Doğrulanması..	234
3.9.1 Çift Fazda Enjeksiyon Profillerinin Çıkarılması.....	234
3.9.2 Çift Fazda Elde Edilen Verilerin Termodinamik Modelde Doğrulanması	237
4 TEK FAZDA YAKIT PÜSKÜRTME ŞARTINDA ORTAYA ÇIKAN TERMODİNAMİK MODEL SONUÇLARI	240
4.1 Tutuşma Gecikmesi Süresi Verilerinin İncelenmesi.....	241
4.2 Yanma Süreci Verilerinin İncelenmesi	250
4.3 KYK50 Verilerinin İncelenmesi	260
4.4 Yanma Başlangıcındaki Sıcaklık Verilerinin İncelenmesi	268
4.5 Pik Yanma Sıcaklığı Değerlerinin İncelenmesi	275
4.6 Silindir İçi Pik Basınç Değerlerinin İncelenmesi.....	287
4.7 Krank Konumuna Bağlı Anlık Basınç Verilerinin İncelenmesi	295
4.8 Isı Açığa Çıkış Hızı Verilerinin İncelenmesi	304
4.9 Ortalama İndike Basınç Verilerinin İncelenmesi.....	312
4.10 İndike Termik Verim Değerlerinin İncelenmesi	324
4.11 İndike Özgül Yakıt Sarfıyatı Değerlerinin İncelenmesi	335
4.12 Egzoz Gaz Sıcaklıklarının İncelenmesi	346
4.13 CO Emisyonlarının İncelenmesi	357
4.14 NO _x Emisyonlarının İncelenmesi.....	369
4.15 PM Emisyonlarının İncelenmesi	381

4.16 İndike Özgöl CO Emisyonlarının İncelenmesi	392
4.17 İndike Özgöl NO _x Emisyonlarının İncelenmesi.....	402
4.18 İndike Özgöl Partikül Madde Emisyonlarının İncelenmesi	411
5 ÇİFT FAZDA ELDE EDİLEN SİMÜLASYON SONUÇLARI	422
5.1 Tutuşma Gecikmesi Sürelerinin Yorumlanması	422
5.2 Çift Fazda Elde Edilen Yanma Süreci Değerleri	424
5.3 Çift Fazda Elde Edilen KYK50 Konumları	425
5.4 Pik Yanma Sıcaklığı Değerlerinin İncelenmesi	427
5.5 Silindir İçi Anlık Basınç Değerlerinin İncelenmesi	428
5.6 Isı Açığa Çıkış Hızlarının İncelenmesi	429
5.7 İndike Verim Değerlerinin İncelenmesi.....	430
5.8 Egzoz Gaz Sıcaklıklarının İncelenmesi	431
6 SONUÇ	433
6.1 Tek Fazda Yakıt Püskürtme Şartında Elde Edilen Sonuçlar.....	433
6.2 Çift Fazda Yakıt Püskürtme Şartında Elde Edilen Sonuçlar.....	438
6.3 Gelecek Çalışma Önerileri	441
KAYNAKÇA	443
A TEK FAZDA TERMODİNAMİK MODEL DOĞRULAMASINDA OLUŞAN P-α DİYAGRAMLARININ KARŞILAŞTIRMASI	464
B TEK FAZDA SİMÜLASYON SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN P-α DİYAGRAMLARI	482
C TEK FAZDA SİMÜLASYON ÇALIŞMASINDA ELDE EDİLEN ISI AÇIĞA ÇIKIŞ HIZI DİYAGRAMLARI	495
D ÇİFT FAZDA GERÇEKLEŞTİRİLEN TERMODİNAMİK DOĞRULAMA ESNASINDA OLUŞAN P-α DİYAGRAMLARI	508
E ÇİFT FAZDA SİMÜLASYON ÇALIŞMASI SONUCUNDA ELDE EDİLEN P-α DİYAGRAMLARI	515
F ÇİFT FAZDA YAKIT PÜSKÜRTME ŞARTINDA ELDE EDİLEN ISI AÇIĞA ÇIKIŞ HIZI GRAFİKLERİ	518
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	521

SİMGE LİSTESİ

K	Adyabatik üs değeri
A	Ağırlıklandırma faktörü
P_2	Alt akış statik basıncı
LCV	Alt ısı değeri
$x(k)$	Ara katman çıktısı
M	Ara katman sayısı
p	Basınç
$d_{d,0}$	Başlangıç damlacık çapı
l	Biyel küçük baş ve büyük başı merkezleri arasındaki uzunluk
h_{BB}	Blow-by entalpisi
m_{bb}	Blow-by kaçak kütlesi
H_{BB}	Blow-by kaynaklı entalpi akışı
m_{ev}	Buharlaşan yakıt kütlesi
v_e	Buharlaşma hızı
Q_{wi}	Cidar ısı transferi
C_{Diss}	Dağılım sabiti
λ_{diff}	Difüzyonlu yanma için hava fazlalık katsayısı
Q_w	Duvar ısı kaybı
T_{wi}	Duvar sıcaklığı
A_{eff}	Efektif akış alanı
C_{EGR}	EGR (egzoz gazı resirkülasyonu) etki sabiti
m_e	Egzoz gaz kütlesi
m_i	Emme havası kütlesi
v_{in}	Emme portu hava akış hızı
p_c	Emme sonu silindir basıncı
$T_{c,1}$	Emme supabı kapanışı silindir içi sıcaklık
h	Entalpi
d_d	Gerçek damlacık çapı

A^g	Geri yönlü ağırlıklandırma faktörü
G	Girdi
N	Girdi eleman sayısı
W_{air}	Havanın kütle kesri
α_w	Isı transfer katsayısı
R_o	İdeal gaz sabiti
A^i	İleri yönlü ağırlıklandırma faktörü
dm_{is}	İs emisyonu değişim miktarı
$dm_{is,oksidasyon}$	İs emisyonu oksidasyonu değişim miktarı
$dm_{is,oluşum}$	İs emisyonu oluşumu değişim miktarı
m_{is}	İs kütlesi
$T_{A,oksidasyon}$	İs oksidasyonu için baz sıcaklık
A_0	İs oksidasyonu sabiti
$T_{A,oluşum}$	İs oluşumu için baz sıcaklık
A_B	İs oluşum sabiti
T_c	İş gazı gaz sıcaklığı
T_d	İzotermal damlacık kaynama denge sıcaklığı
l/τ_{char}	Karakteristik karışma faktörü
Q_{MCC}	Karışım kontrollü yanmada açığa çıkan ısı miktarı
Ψ	Kesit kayıp katsayısı
α_{KMA}	Krank açısı
ψ	Krank ile perno arasındaki ofset açısı
r	Krank yarıçapı
$\dot{m}$	Kütle akış oranı
NET	Net girdi değeri
p_{O_2}	Oksijenin kısmi basıncı
c_m	Ortalama piston hızı
Q_{PMC}	Ön karışım kontrollü yanmada açığa çıkan ısı miktarı
$\Delta\alpha_c$	Ön karışımli yanma süresi
u	Özgül iç enerji
e	Piston pimi-krank merkezi eksenine ofset mesafesi
s	Pistonun üst ölü noktadan uzaklığı
$\mu\sigma$	Port akış katsayısı
T_d	Port bölgesi aşağı akım sıcaklığı
T_u	Port bölgesi yukarı akım sıcaklığı

T_w	Port cidar sıcaklığı
A_w	Port yüzey alanı
α_p	Porttaki ısı transfer katsayısı
$w_{\text{Oxygen,a}}$	Püskürtme başlangıcında mevcut oksijenin kütle kesri
α_{soi}	Püskürtme başlangıç avansı
m_f	Püskürtülen yakıt kütlesi
Q_{ref}	Referans aktivasyon enerjisi
p_{ref}	Referans basınç
T_{ref}	Referans sıcaklığı
x	Relatif strok
c_p	Sabit basınçta özgül ısı
T	Sıcaklık
T_L	Silindir cidar sıcaklığı
$T_{L,\text{BDC}}$	Silindir cidarının alt ölü noktadaki sıcaklığı
$T_{L,\text{TDC}}$	Silindir cidarının üst ölü noktadaki sıcaklığı
D	Silindir çapı
m_c	Silindir dolgu kütlesi
f	Silindir dolgusu buharlaşma ısı kesri/oranı
V	Silindir hacmi
p_c	Silindirin içerisindeki basınç
λ_c	Silindirin termal kondüksiyon katsayısı
$u(k)$	Sistem bilgi girdisi
h_v	Supap deplasmanı
m	Şekil parametresi
m_{stoich}	Taze dolgunun stokiyometrik kütlesi
α_{id}	Tutuşma gecikmesi faz aralığı
I_{id}	Tutuşma gecikmesi integrali
τ_{id}	Tutuşma gecikmesi periyodu
k	Türbülans yoğunluk parametresi
C_{Turb}	Türbülanslı enerji üretim sabiti
δ	Üfleme (Blow-by) açıklığı
V_{TDC}	Üst ölü hacim
d_{vi}	Valf oturma yüzeyi iç çapı
α	Vibe parametresi
W_{FV}	Yakıt buharının kütle kesri/oranı

Q_F	Yakıt ısı enerjisi
E_{kin}	Yakıt jeti kinetik enerjisi
V_F	Yakıt püskürtülme hızı
q_{ev}	Yakıtın buharlaşma ısısı
A_i	Yanma odası yüzey alanı
C_{Comb}	Yanma sabiti
AF_{CP}	Yanma ürünlerinin hava yakıt oranı
w_{CP}	Yanma ürünlerinin kütle kesri/oranı
T_{UB}	Yanmamış bölgenin sıcaklığı
w_{FB}	Yanmış yakıtın kütle kesri/oranı
$y(k)$	Yapay sinir ağı çıktısı
p_{01}	Yukarı akış stagnasyon basıncı
T_{01}	Yukarı akış stagnasyon sıcaklığı

KISALTMA LİSTESİ

CDC	Konvansiyonel dizel yanması
CFD	Hesaplama akışkanlar dinamiği
CN	Setan sayısı
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
DMC	Dimetil karbonat
DME	Dimetil eter
DoE	Deney tasarımı metodu
DSY	Düşük sıcaklıkta yanma
EGR	Egzoz gaz resirkülasyonu
FSN	Filtre duman sayısı
GDYSA	Geri dönüşümlü yapay sinir ağı
g-OİB	Gross ortalama indike basınç
HCCI	Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli yanma
HECC	Yüksek verimli temiz yanma
HO ₂	Hidroperoksil
HRR	Isı açığa çıkış hızı
KMA	Krank mili açısı
KYK50	%50'lik kütleli yanma kesri
NO	Azotmonoksit
NO _x	Azot oksitler
NO ₂	Azotdioksit
N ₂	Azot molekülü
OEB	Ortalama efektif basınç
OH	Hidroksil
OHYBPS	Ortak hatlı yüksek basınçlı püskürtme sistemi
OİB	Ortalama indike basınç
O ₂	Oksijen molekülü
PAH	Polisiklik aromatik hidrokarbon
PCCI	Ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli yanma
PM	Partikül madde

PPC	Kısmi ön karışımli yanma
RCCI	Reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli yanma
SCCI	Kademeli dolgulu sıkıştırma ateşlemeli yanma
TG	Tutuşma gecikmesi
THC	Toplam yanmamış hidrokarbon
ÜÖN	Üst ölü nokta
YSA	Yapay sinir ağı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Krank-biyel mekanizması elemanları ve ortaya çıkan açılar.....	115
Şekil 2.2 Elman ağı sembolik gösterimi	127
Şekil 2.3 Elman ağı hiyerarşik yapısı.....	128
Şekil 3.1 Test odası görseli.....	131
Şekil 3.2 Motor test sistemi şematik yapısı.....	132
Şekil 3.3 Tek fazda deneysel çalışmada ortaya çıkan motor hızı hata değeri.....	138
Şekil 3.4 Tek fazda deneysel çalışmada ortaya çıkan yakıt enjeksiyonu hata değeri.....	138
Şekil 3.5 Tek fazda deneysel çalışmada ortaya çıkan püskürtme avansı hata değeri.....	139
Şekil 3.6 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre efektif güç çıkışı değerleri.....	143
Şekil 3.7 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	145
Şekil 3.8 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre silindir içi pik basınç değerleri.....	147
Şekil 3.9 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre OİB değerleri.....	148
Şekil 3.10 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre mekanik verim değerleri.....	150
Şekil 3.11 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre CO emisyonu.....	152
Şekil 3.12 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre THC emisyonu.....	153
Şekil 3.13 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre NO _x emisyonu.....	155
Şekil 3.14 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre PM emisyonu.....	156
Şekil 3.15 Farklı püskürtme basıncı ve püskürtme avanslarına göre NO/NO _x oranları.....	158
Şekil 3.16 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre özgül CO emisyonu.....	159
Şekil 3.17 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre özgül THC emisyonu.....	160
Şekil 3.18 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre özgül NO _x emisyonu.....	162

Şekil 3.19 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değerlerine göre özgül is emisyonu.....	163
Şekil 3.20 600 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları.....	164
Şekil 3.21 800 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları.....	164
Şekil 3.22 1000 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları.....	165
Şekil 3.23 1200 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları.....	165
Şekil 3.24 1400 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları.....	165
Şekil 3.25 1000 dev/dak ve 15 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	166
Şekil 3.26 1000 dev/dak ve 20 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	166
Şekil 3.27 1000 dev/dak ve 25 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	167
Şekil 3.28 1500 dev/dak ve 15 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	167
Şekil 3.29 1500 dev/dak ve 20 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	167
Şekil 3.30 1500 dev/dak ve 25 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	168
Şekil 3.31 2000 dev/dak ve 15 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	168
Şekil 3.32 2000 dev/dak ve 20 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	168
Şekil 3.33 2000 dev/dak ve 25 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri.	169
Şekil 3.34 AVL-Boost ortamında oluşturulan motor modeli.....	169
Şekil 3.35 T18 Noktasında deneysel ve matematiksel veriye bağlı P-alfa karşılaştırması.....	171
Şekil 3.36 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki OİB yüzdesel hata oranları.....	172
Şekil 3.37 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki silindir içi pik basınç değeri yüzdesel hata oranları.....	173
Şekil 3.38 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki egzoz gaz sıcaklığı değeri yüzdesel hata oranları.....	174
Şekil 3.39 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki NO _x emisyonu değeri yüzdesel hata oranları.....	175
Şekil 3.40 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki CO emisyonu değeri yüzdesel hata oranları.....	176
Şekil 3.41 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki PM emisyonu değeri yüzdesel hata oranları.....	177
Şekil 3.42 Çift fazda püskürtme şartında elde edilen deneysel verilerdeki motor hızı yüzdesel hataları.....	210
Şekil 3.43 Çift fazda püskürtme şartında elde edilen deneysel verilerde püskürtülen yakıt miktarı yüzdesel hataları.....	211

Şekil 3.44 Çift fazda püskürtme şartında elde edilen deneysel verilerdeki ana püskürtme avansı yüzdesel hataları.....	211
Şekil 3.45 Çift faz püskürtme şartında elde edilen deneysel verilerdeki pilot püskürtme avansı yüzdesel hataları.....	212
Şekil 3.46 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı efektif güç değeri değişimi.....	215
Şekil 3.47 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı ortalama özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	216
Şekil 3.48 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı silindir içi pik basınç değerleri.....	218
Şekil 3.49 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı ortalama indike basınç değeri değişimi.....	219
Şekil 3.50 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı OEB/OİB değerleri.....	220
Şekil 3.51 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı CO emisyonu değerleri.....	221
Şekil 3.52 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı THC emisyonu değerleri.....	222
Şekil 3.53 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı NO _x emisyonu değerleri.....	225
Şekil 3.54 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı PM emisyonu değerleri.....	226
Şekil 3.55 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı NO/NO _x oranları.....	227
Şekil 3.56 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgül CO emisyonu değerleri.....	228
Şekil 3.57 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgül THC emisyonu değerleri.....	229
Şekil 3.58 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgül NO _x emisyonu değerleri.....	231

Şekil 3.59 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgül PM emisyonu değerleri.....	233
Şekil 3.60 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 800 bar püskürtme basıncı, 10 KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında ortaya çıkan enjeksiyon profilleri.....	235
Şekil 3.61 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 800 bar püskürtme basıncı, 10 KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında ortaya çıkan enjeksiyon profilleri.....	235
Şekil 3.63 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 800 bar püskürtme basıncı, 20 KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında ortaya çıkan enjeksiyon profilleri.....	236
Şekil 3.64 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 800 bar püskürtme basıncı, 20 KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında ortaya çıkan enjeksiyon profilleri.....	236
Şekil 3.65 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 800 bar püskürtme basıncı, 20 KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karışım oranında ortaya çıkan enjeksiyon profilleri.....	236
Şekil 3.66 Çift fazda enjeksiyon şartında termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki OİB yüzdesel hata oranları.....	237
Şekil 3.67 Çift fazda enjeksiyon şartında termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki pik basınç yüzdesel hata oranları.....	238
Şekil 3.68 Çift fazda enjeksiyon şartında termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki egzoz gaz sıcaklığı yüzdesel hata oranları.....	238
Şekil 4.1 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	242
Şekil 4.2 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	243
Şekil 4.3 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	244
Şekil 4.4 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	245
Şekil 4.5 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	246

Şekil 4.6 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	247
Şekil 4.7 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	248
Şekil 4.8 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	249
Şekil 4.9 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri.....	250
Şekil 4.10 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	252
Şekil 4.11 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	253
Şekil 4.12 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	254
Şekil 4.13 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	255
Şekil 4.14 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	256
Şekil 4.15 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	257
Şekil 4.16 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	258
Şekil 4.17 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	259
Şekil 4.18 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri.....	260
Şekil 4.19 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	262
Şekil 4.20 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	263
Şekil 4.21 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	263
Şekil 4.22 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	264
Şekil 4.23 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	265
Şekil 4.24 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	266

Şekil 4.25	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	266
Şekil 4.26	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	267
Şekil 4.27	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları.....	268
Şekil 4.28	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	270
Şekil 4.29	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	271
Şekil 4.30	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	272
Şekil 4.31	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	273
Şekil 4.32	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	273
Şekil 4.33	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	274
Şekil 4.34	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	274
Şekil 4.35	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	275
Şekil 4.36	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri.....	275
Şekil 4.37	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	277
Şekil 4.38	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	278
Şekil 4.39	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	280

Şekil 4.40 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	281
Şekil 4.41 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	282
Şekil 4.42 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	283
Şekil 4.43 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	284
Şekil 4.44 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	286
Şekil 4.45 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri.....	286
Şekil 4.46 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri.....	288
Şekil 4.47 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri.....	289
Şekil 4.48 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri.....	290
Şekil 4.49 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri.....	291
Şekil 4.50 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri.....	291
Şekil 4.51 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri.....	292
Şekil 4.53 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri.....	294
Şekil 4.54 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri.....	295
Şekil 4.55 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değerleri.....	314

Şekil 4.56 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değeri.....	315
Şekil 4.57 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değeri.....	317
Şekil 4.58 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değeri.....	318
Şekil 4.59 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değeri.....	320
Şekil 4.61 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değeri.....	322
Şekil 4.62 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değeri.....	323
Şekil 4.63 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değeri.....	324
Şekil 4.64 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	326
Şekil 4.65 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	327
Şekil 4.66 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	328
Şekil 4.67 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	330
Şekil 4.68 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	331
Şekil 4.69 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	332
Şekil 4.70 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	333
Şekil 4.71 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	334
Şekil 4.72 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değeri.....	335

Şekil 4.73 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	337
Şekil 4.74 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	339
Şekil 4.75 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	339
Şekil 4.76 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	341
Şekil 4.77 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	342
Şekil 4.78 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	343
Şekil 4.79 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	344
Şekil 4.80 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	345
Şekil 4.81 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri.....	345
Şekil 4.82 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	347
Şekil 4.83 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	349
Şekil 4.84 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	350
Şekil 4.85 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	351
Şekil 4.86 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	352
Şekil 4.87 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	353
Şekil 4.88 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	354
Şekil 4.89 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	356

Şekil 4.90	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları..	356
Şekil 4.91	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	359
Şekil 4.92	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	360
Şekil 4.93	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	362
Şekil 4.94	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	363
Şekil 4.95	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	365
Şekil 4.96	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	366
Şekil 4.97	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	367
Şekil 4.98	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	368
Şekil 4.99	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları.....	369
Şekil 4.100	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	371
Şekil 4.101	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	373
Şekil 4.102	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	375
Şekil 4.103	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	376
Şekil 4.104	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	377

Şekil 4.105	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	378
Şekil 4.106	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	379
Şekil 4.107	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	380
Şekil 4.108	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları.....	381
Şekil 4.109	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	383
Şekil 4.110	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	384
Şekil 4.111	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	385
Şekil 4.112	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	386
Şekil 4.113	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	388
Şekil 4.114	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	389
Şekil 4.115	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	389
Şekil 4.116	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	390
Şekil 4.117	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları.....	391
Şekil 4.118	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	393

Şekil 4.119	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	394
Şekil 4.120	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	396
Şekil 4.121	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	397
Şekil 4.122	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	398
Şekil 4.123	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	399
Şekil 4.124	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	400
Şekil 4.125	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	401
Şekil 4.126	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları.....	402
Şekil 4.127	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO _x emisyonları.....	403
Şekil 4.128	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO _x emisyonları.....	404
Şekil 4.129	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO _x emisyonları.....	406
Şekil 4.130	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO _x emisyonları.....	407
Şekil 4.131	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO _x emisyonları.....	408
Şekil 4.132	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO _x emisyonları.....	409

Şekil 4.133	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları.....	409
Şekil 4.134	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları.....	410
Şekil 4.135	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları.....	411
Şekil 4.136	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	413
Şekil 4.137	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	414
Şekil 4.138	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	415
Şekil 4.139	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	416
Şekil 4.140	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	417
Şekil 4.141	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	418
Şekil 4.142	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	419
Şekil 4.143	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	420
Şekil 4.144	Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları.....	421
Şekil 5.1	1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre tutuşma gecikmesi verileri.....	423
Şekil 5.2	1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre yanma başlangıcı ile ana püskürtme avansı arasındaki süre.....	424

Şekil 5.3	1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre yanma süreci uzunlukları.....	425
Şekil 5.4	1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre %50'lik kütleli yanma kesri konumları.....	426
Şekil 5.5	1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre pik yanma sıcaklıkları.....	428
Şekil 5.6	1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre indike termik verim değerleri.....	431
Şekil 5.7	1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre egzoz gaz sıcaklıkları.....	432

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 NO _x oluşum denklemleri	120
Tablo 2.2 CO oluşum reaksiyonları	121
Tablo 3.1 Deney motoru ve teknik özellikleri	130
Tablo 3.2 Ölçüm ekipmanlarının hassasiyetleri.....	132
Tablo 3.3 Tek fazda püskürtme şartında belirlenen araştırma uzayı	133
Tablo 3.4 Deneysel veri alınacak noktalar ve işletme parametreleri	134
Tablo 3.5 Tek fazda püskürtme şartında işletme parametreleri	177
Tablo 3.6 Tek fazda püskürtme şartında performans doğrulama parametreleri .	180
Tablo 3.7 Tek fazda püskürtme şartında emisyonlara ilişkin doğrulama parametreleri	183
Tablo 3.8 YSA'nın öğrenme sürecinde ortaya çıkan regresyon değerleri	187
Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları	188
Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları	196
Tablo 3.11 Çift fazda yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan parametrik katsayılar	239



Düşük Sıcaklıkta Yanmanın Motor Performans ve Emisyonları Üzerine Etkileri

Onur GEZER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Dizel motorlarında yanma sonrası emisyon indirgeme ünitelerinin tüm işletme şartlarında yeterli azot oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) dönüşüm verimine sahip olmaması, regülasyonlara uyum açısından yanma esnasında ortaya çıkan NO_x ve PM emisyonlarını azaltmayı zorunlu kılmaktadır. Aynı anda iki emisyonu da azaltan yanma stratejisi düşük sıcaklıkta yanma (DSY) olarak adlandırılmaktadır. Yakıt olarak sadece motorin kullanıldığında, ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli yanma stratejisi dizel motorlarını için en uygun DSY stratejisidir. Bu çalışmada tek ve çift fazda püskürtme stratejilerini kapsayacak şekilde ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli yanma incelenmiştir. Tek fazda püskürtmede literatür yardımıyla araştırma uzayı belirlenmiş, buna bağlı olarak deney tasarımı yapılmış, sonrasında önerilen noktalarda deneysel veriler elde edilmiş, deney sonuçları tek boyutlu simülasyon programında (AVL-Boost) doğrulanmış, doğrulama sonuçları ile yapay sinir ağı modeli kurulmuş ve deneysel verisi bulunmayan noktalar için AVL-Boost program girdisi olan parametrik katsayılar yaratılmış, nihayetinde 288 farklı nokta için sonuçlar elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Tek fazdaki çalışma üç yakıt püskürtme kütlesi, üç motor hızı, dört püskürtme basıncı ve sekiz püskürtme

avansının değişimini içermektedir. Çift fazda yakıt enjeksiyonda ise 18 noktadan deneysel veri alınmış ve bunlar AVL-Boost ortamında modellenmiştir. Bu aşamada iki ana püskürtme avansı, üç ön püskürtme avansı ve üç ön karışım oranı seçilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde simülasyon çıktısı olarak tutuşma gecikmesi, yanma süreci, %50'lik kütleli yanma kesri, yanma başlangıç sıcaklığı, pik yanma sıcaklığı, silindir içi pik basınç değeri, anlık basınç verileri, ısı açığa çıkış hızları, ortalama indike basınç, indike verim, indike özgül yakıt sarfıyatı, egzoz gaz sıcaklığı, karbon monoksit, NO_x ve PM emisyonları ve bunların özgül emisyonları incelenmiştir. Aynı zamanda deneysel verilerde NO/NO_x oranları da incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre DSY bölgesinde motor gücünden bir miktar feragat ederek NO_x ve PM'de düşüş sağlanabildiği, fakat PM emisyonlarında arzu edilen düşüşün tam olarak elde edilemediği, motor yükü arttıkça ortaya çıkan kazancın gerilediği ve hatta zaman zaman hiçbir kazanç elde edilemediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dizel motorları, düşük sıcaklıkta yanma, ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli yanma, termodinamik modelleme, emisyon

ABSTRACT

Effects of Low Temperature Combustion on Engine Performance and Emissions

Onur GEZER

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

In diesel engines, after-treatment units don't ensure sufficient NO_x and PM conversion efficiency under all operating conditions. Therefore, it is mandatory to reduce NO_x and PM emissions during combustion to comply with the regulations. A combustion strategy that reduces NO_x and PM simultaneously is called as low temperature combustion (LTC). If only diesel fuel is used, the premixed charge compression ignition strategy (PCCI) is the most suitable LTC strategy for diesel engines. In this study, PCCI strategy is investigated for both single and two-phase injection. In single-phase injection, the design space was determined with the help of the literature, the design of experiment was built depending on design space, then experiments were carried out at the suggested points, the experimental results were validated in a one-dimensional simulation program (at AVL-Boost environment), an artificial neural network was built with the validated results, AVL-Boost parametric input coefficient was modelling for whole design space, and finally results were obtained and evaluated for 288 different points. The single-phase research included three fuel injection masses, three engine speeds, four injection pressures and eight injection advances. In dual-phase fuel injection, experimental data was taken from 18 points and modelled in the AVL-Boost environment. In this part, two main injection advances, three pre-injection advances and three premixing

ratios were specified. In the evaluation of the results, ignition delay, combustion duration, 50% mass burned fraction, start of combustion temperature, peak firing temperature, peak in-cylinder pressure, pressure-crank angle diagrams, heat release rates, mean indicated pressure, indicated efficiency, indicated specific fuel consumption, exhaust gas temperature, carbon monoxide, nitrogen oxide and particulate matter emissions and their specific emissions were analysed as simulation outputs. NO/NO_x ratios were also discussed in the experimental investigation section. According to the results, nitrogen oxide and particulate matter emissions can be reduced with sacrificing engine power in the low-temperature combustion zone, but the PM reduction is not at the desired level. As the engine load increases, NO_x and PM reduction decreases and sometimes even no gain can be observed.

Keywords: Diesel engine, low temperature combustion, premixed charge compression ignition, thermodynamic modelling, emission

1.1 Literatür Özeti

İnsanlığın, alet kullanma becerisinin gelişimiyle ve bu bilgilerin gelecek nesillere aktarılmasıyla medeniyet hızlı bir şekilde gelişmiştir. Söz konusu alet ve gereçler, başlarda doğa içerisinde şans eseri elde edilen ve belli amaçları yerine getirmek adına kullanılan nesnelerdir. Medeniyetin ilerleyişiyle, pozitif bilimlerin yarattığı bilgi birikiminin bu alana dahil edilmesini sağlayan mühendisler ve mühendisliğin ataları sayesinde gelişkin yüksek teknoloji ürünleri ortaya çıkmıştır. Orta çağ dogmatik otoritesinin sarsılması, modern bilimin büyük bir ivme kazanmasına imkan tanımıştır. Başta fizik olmak üzere temel ve uygulamalı bilimlerdeki gelişmeler, insanlığa çağ atlatan sanayi devrimine ortam hazırlamıştır. Sanayi devriminin ortaya çıkışıyla üretim ilişkileri büyük oranda değişmiş, atölye tarzı üretim oldukça sınırlı bir alana hapsolmuş, üretimin önemli kısmı sanayi kentlerindeki büyük üretim tesislerine kaymıştır. Böylelikle hem maliyetler düşüş göstermiş hem de insan ve hayvan gücüyle başıaramayacak prosesleri yerine getirebilmek adına hızla makineleşmeye geçilmiştir. Tam da bu dönemin başlarında mekanik enerji üreten kuvvet makinaları tarih sahnesine çıkmıştır. Bu ana kadar kuvvet makinaları genel olarak rüzgardan faydalanan basit değirmen tipi makinalardan ibarettir. Ancak bu dönemde kimyasal enerjiyi ısıya dönüştüren, bu ısıyı da mekanik enerjiye dönüştüren kuvvet makinaları ortaya çıkmıştır. Bu alanda milat buhar makinasının icadı olarak alınabilir. Dıştan yanmalı bu motorların kullanıma girmesinden bir süre sonra içten yanmalı motorlar icat edilmiştir.

İçten yanmalı motorlar 19. yüzyılın yaklaşık olarak son çeyreğinde hayatımıza giren makinelerdir. 1876 yılında Nicolas Otto tarafından geliştirilen kıvılcım ateşlemeli motor patent olarak kullanıma geçmiştir. Devamında 1896 yılında

Rudholf Diesel tarafından sıkıştırma ateşlemeli motorlar icat edilmiştir. İcatlarının üzerinden kısa bir süre geçtikten sonra içten yanmalı motorların taşıt tahrikinde de kullanılabileceği fikri ortaya atılmıştır. Bu gelişme, zaman içerisinde içten yanmalı motorları günümüz medeniyetinin en yaygın kullanılan makineleri haline getirmiştir.

Motorlu taşıtların günümüz toplumlarında bu denli yaygın kullanımı fosil yakıt rezervlerinin hızla azalmasına ve çevre kirliliğinin artmasına sebep olmaktadır. Dünya enerji ihtiyacının çok büyük bir kısmı yenilenebilir olmayan fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Bu yenilenebilir olmayan enerji tüketiminin takribi %90'lık kısmı enerji üretimi ve ulaşımda tüketilmektedir [1]. Taşımacılık ise %95 oranında petrol bazlı yakıtların enerjisinden faydalanılarak gerçekleştirilmektedir [2]. Ulaşım atmosferdeki sera gazı emisyonunun %25'inden sorumlu olup bu pay içerisinde %60 binek ve hafif ticari araç, %22 orta ve ağır vasıta, %8 havayolu taşımacılığı, %4 deniz yolu taşımacılığı kaynaklıdır [3]. Bu rakamlar göz önüne alındığında içten yanmalı motorların yakıt sarfiyatında ve emisyon değerlerinde elde edilecek küçük düşüşler dahi kayda değer iyileşmelere açacaktır. Bu amaca yönelik olarak mühendisler ve bilim insanları hem kıvılcım ateşlemeli hem de sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yakıt sarfiyatının ve emisyonların düşürülmesine yönelik sayısız çalışma yürütmektedir.

İçten yanmalı motorlar, sisteme ısı giriş mekanizmasına göre kıvılcım ateşlemeli ve sıkıştırma ateşlemeli olarak iki ana başlıkta incelenmektedir. Çevrim karakteristikleri gereğince her iki çevrim için daha kullanışlı yakıtlar tercih edilmektedir. Gerek motor çevriminin karakteristikleri neticesinde ortaya çıkan performans parametreleri, gerekse de ham petrolün içerisinde konvansiyonel iki yakıtın da kayda değer oranda bulunması motorini yakıt olarak kullanan sıkıştırma ateşlemeli ve benzini yakıt olarak kullanan kıvılcım ateşlemeli motorları, kullanım amacına yönelik olarak daha cazip kılmaktadır. Dizel motorları daha yüksek tork ve daha düşük özgül yakıt sarfiyatı sebebiyle kıvılcım ateşlemeli motorlardan üstündür, daha düşük karbondioksit (CO_2) salımları sebebiyle küresel iklim değişikliği açısından da avantaj sağlamaktadırlar. İklim değişikliğine sebep olan sera gazı etkisinin önemli kısmı CO_2 kaynaklıdır [4]. Bu da daha düşük CO_2 salımlı dizel motorlarını cazip kılmaktadır. Dizel motorları aynı zamanda karbon monoksit (CO) ve toplam yanmamış hidrokarbon (THC) emisyonları açısından da avantaj

sağlamaktadır. Fakat partikül madde (PM) ve azot oksitler (NO_x) açısından dezavantajlı durumdadırlar [5]. Ulaşım alanındaki PM ve NO_x salımlarının %90'ından dizel motorları sorumludur [6]. Dizel motorlarının sorun boyutundaki emisyonu olan NO_x ve PM'nin azaltılması ve veriminin iyileştirilmesine dönük olarak özellikle 1970'li yıllardan bu yana yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Dizel motorlarında ilk emisyon sınırlamaları da 1970'li yıllarda ağır vasıtalarda başlamıştır [7].

Taşıt emisyonlarının sınırlandırılmasına dönük olarak farklı kuruluşlar emisyon regülasyonları yayınlamaktadır. EURO emisyon regülasyonları ülkemiz de içinde olmak üzere birçok ülkenin benimsediği sınırlayıcı regülasyondur. EURO regülasyonu 1992 yılında EURO1 adı altında yürürlüğe girmiştir. Günümüzde EURO6 regülasyonu uygulanmaktadır. EURO regülasyonları motor tipi, taşıt sınıflandırması ayrımı gözetilerek oluşturulmaktadır. EURO1 regülasyonunda binek taşıtlar için dizel motorlarının izin verilen CO emisyonları 2,72 g/km, NO_x ve HC toplamı 0,97 g/km, PM emisyonları ise 0,14 g/km ile sınırlandırılmıştır. EURO-5b ile beraber PM emisyonları sadece kütle olarak değil aynı zamanda tanecik sayısı olarak da sınırlandırılmıştır. EURO6 regülasyonunda dizel motorlarında hala daha THC emisyonlarına dönük bir sınırlama bulunmamaktadır. EURO6 regülasyonları gereğince CO emisyonları 0,5 g/km [8], NO_x emisyonları 0,05 g/km, PM emisyonları 0,008 g/km ile sınırlandırılmıştır [9].

EURO1 ve EURO6 emisyon regülasyonlarına bakıldığında dizel motorlarında, özellikle NO_x ve PM emisyonlarında merteye bazında düşüşler göze çarpmaktadır. Gelecek projeksiyonda yürürlüğe girmesi beklenen EURO7 regülasyonunda izin verilen PM salımının, EURO6'ya göre %39 daha düşük olması öngörülmektedir [10]. Bu gibi büyük düşüşleri sağlamak için mevcut yanma sonrası emisyon indirgeme ekipmanlarının kendi başına yetersiz kalması olası bir sonuçtur [11]. Bu denli büyük oranlı düşüşleri yaratmak oldukça güç ve yüksek maliyetli ek ekipmanlar gerektirmektedir. Yanma sonrası emisyon indirgeme ekipmanlarının da tüm çalışma aralıklarında benzer ve yeterli dönüşüm verimleri sunmadığı bilinmektedir. Ayrıca düşük egzoz gaz sıcaklıklarında selektif katalitik konvertör içerisinde tepkime veriminin düşüşüne bağlı olarak üre kalıntısı (urea deposit) birikimi ortaya çıkabilmektedir [12]. Düşük motor yüklerinde dizel motorlarında egzoz gaz sıcaklıkları 200° C seviyesine kadar düşmekte [13] ve bu çalışma

rejimlerinde belirtilen mahsur ortaya çıkabilmektedir. Oysa homojen dolgulu benzinli motorlarda NO_x ve PM salımlarına yönelik sorun daha kabul edilebilir düzeyde olup PM emisyonları Euro5 ile sınırlandırılmaya başlanmıştır [14]. Daha önceki EURO emisyonlarında bu alanda bir sınırlama dahi bulunmamaktadır. Kıvılcım ateşlemeli motorlar NO_x salımı açısından dizel motorlarına göre daha avantajlıdır. NO_x ve PM emisyonlarının kontrolü diğer emisyonların kontrolüne göre oldukça güçtür. Bahsi geçen bu sorun 2000’li yılların sonları ve 2010’lu yılların başlarında araç parkında hızlı bir ilerleme kaydeden dizel motorlarının günümüzde binek araçlarda popülaritesini tekrardan kaybetmeye başlamasına yol açmıştır. Ham petrolün rafinasyonu esnasında bol miktarda motorin yakıtı ortaya çıkmakta ve elde edilen yakıtın da tüketilmesi kaynak yönetimi ve iktisadi açıdan bir zorunluluk doğurmaktadır. Bu sebeple mevcut dizel motorları popülaritesini kaybetmeye başlasa da yeni teknolojik gelişmelerle daha çevreci dizel motorlarının ortaya çıkarılması hedeflenmektedir.

Dizel motorlarında karışım oluşumunun yapısı gereği yanma prosesi karmaşık bir süreçtir. Yanma belirgin olarak birbirinden ayrılmış belli fazlar halinde gerçekleşmektedir. Bu fazlar tutuşma gecikmesi (TG), kontrolsüz yanma, kontrollü yanma ve art yanma fazlarıdır. Yakıtın hava ile uygun şartlarda tutuşabilir karışım oluşturması ile yanmanın başlangıç anı arasında geçen süre dizel yanma fazlarının tamamını ve motor performans parametrelerini yakından etkilemektedir. Aynı zamanda emisyonlar da bu duruma sıkı sıkıya bağlıdır. Dizel motorlarında yakıt ile havanın karışımı ve atomizasyon için sahip olunan süre oldukça kısadır. Bu sebeple homojen bir makro karışım oluşturmak konvansiyonel işletme parametreleri ile mümkün değildir. Sıkıştırma stroğunun sonlarına doğru silindir içerisine püskürtülen yakıt çok sayıda tanecik halinde yanma odası içerisinde farklı bölgelere yönelerek karışım oluşturur. Yakıt ile hava karışımının niteliği temel olarak yakıt jetinin atomizasyon kabiliyetine bağlıdır. Atomizasyon kabiliyeti yanma prosesi ile emisyonlar üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple yakıt enjeksiyonunun optimizasyonu motor çıktılarını yakından etkilemektedir [15].

Dizel motorlarında, yakıtın yanma odası içerisinde çok bölgede tutuşmaya hazırlanma süreci yaşamakta ve çok bölgeli yanma gerçekleşmektedir. Konvansiyonel dizel motorlarında enjektörden yanma odasına sevk edilen yakıt demeti incelendiğinde, hava fazlalık katsayısı zenginden fakire doğru geniş bir

aralıkta değişkenlik göstermektedir [16]. Konvansiyonel dizel yanmasında TG'nin kısa olması sebebiyle yakıtın küçük bir kısmı yanma öncesinde karışım oluşumu gerçekleştirmektedir. Bu yakıt büyük oranda kontrollü yanma fazında ve heterojen karakterde yanmaya katılmaktadır [17]. Ortaya çıkan yanma her ne kadar yaklaşık stokiyometrik bölgelerde başlayıp gelişse de yanma odasında lokal olarak heterojen dolgu karakteri mevcuttur [18]. NO_x ve is emisyonları lokal hava fazlalık katsayısına sıkı sıkıya bağlıdır [19]. Yakıt demetinin çekirdek bölgesi yakınlığında karışımın aşırı düzeyde zengin olduğu, alev çekirdeklerinin olduğu bölgenin ise yaklaşık stokiyometrik karışım oranına sahip olduğu bilinmektedir. Aşırı zengin çekirdek bölgeleri yüksek is emisyonlarına, stokiyometrik orana yakın bölgelerde oluşan yanma ise NO_x emisyonlarının artışına yol açmaktadır [20]. Özellikle bu yanma merkezlerinden dış kısımlara gidildikçe yanma odasında soğuk bölgelerin varlığı oluşan NO_x'un geri yönlü tepkimesini durdurmaktadır. Dizel motorlarında oluşan PM ve NO_x arasında bir ters ilişki vardır [21]. Dizel açmazı olarak bilinen bu karışıklık özellikle kontrollü yanma fazında kendini göstermektedir. Dizel motorlarında yakıt tüketiminin bir miktar artışını göze almaksızın her iki emisyonu da indirmek oldukça güçtür [22]. Söz konusu açmazın üstesinden gelmek adına gelişmiş yanma sonrası emisyon indirgeme üniteleri kullanılmaktadır. Dizel motorlarının özellikle NO_x ve PM emisyonları açısından EURO regülasyonlarını başlangıçta basit yanma sonrası emisyon indirgeme ekipmanları ve basit kontrolcüler ile sağlanabilmesi mümkündü. Fakat EURO5 regülasyonu ile yanma prosesine müdahale zorunlu haline getirmiştir [23].

Dizel motorlarında yakıt enjeksiyonu sıkıştırma stroğu sonuna doğru yapılmaktadır. Krank mili açısı cinsinden püskürtme yapılan sürenin oldukça kısa olması sebebiyle püskürtmenin yüksek basınçta ve türbülans seviyesi yüksek hava hareketlerinin yaratıldığı ortama yapılması gerekmektedir. Motorinin buharlaşma ve karışım oluşturma yeteneğinin de pek iyi olmaması sebebiyle yakıt püskürtme işlemi yanma sürecini yakından etkilemektedir. Günümüzde dizel yakıt enjeksiyon sistemleri klasik püskürtme sistemleri ve ortak hatlı yüksek basınçlı püskürtme sistemler (OHYBPS) olarak iki ana başlıkta sınıflandırılmaktadır. Klasik yakıt püskürtme sistemleri mekanik tahrikli sistemler olup, püskürtme süresince belli mekanik müdahaleler ile püskürtülen yakıt debisinde değişkenlik yaratılabilse de püskürtme tek fazda gerçekleşmekte ve püskürtme avansının değiştirilmesi ciddi

bir sorundur. Klasik dizel püskürtme sistemlerinde püskürtme basıncı en fazla 400 bar seviyesine kadar çıkmaktadır [1]. Ancak bu püskürtme basınç değerine çoğu mekanik püskürtme sisteminde erişilememektedir. OHYBPS ‘common-rail’ ticari adıyla bilinmektedir. Bu sistemlerde püskürtme elektronik kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir. Elektronik kontrol ünitesinin değerlendirmesine göre tayin edilen püskürtme miktarı ve avansı enjektörlere tetikleyici gerilim gönderilmesi ile enjeksiyonun başlamasını sağlamaktadır. OHYBPS’nin kullandığı enjektörler elektronik kontrol sayesinde çok kısa zaman aralıklarında açılıp kapanabilmektedir. Böylelikle püskürtmenin fazlandırılması mümkün hale gelir. Bu sistemlerde püskürtme avansı da rahatlıkla kontrol edilebilir. Klasik dizel enjeksiyon sistemleri ile OHYBPS enjeksiyon sistemleri arasındaki temel fark püskürtme basıncı ve zamanlamasının OHYBPS sistemlerde değişen rejim şartlarına göre değiştirilebilmesi ve püskürtmenin fazlara ayrılabilmesidir [24].

Çok fazlı püskürtmede, püskürtme birden fazla kademede gerçekleşebilir olmakla beraber püskürtme fazları pilot, ana ve post püskürtme olarak üç kategoride incelenmektedir. Çok fazlı püskürtmede konvansiyonel yanma rejimi için püskürtme sonrası yanma veya ön reaksiyonların başlangıcı, ardından tekrar püskürtme ve yanma gerçekleştiği söylenebilir. Bu esnada ilk ısı açığa çıkışı esnasında nispeten uzun bir tutuşma gecikmesi süreci gözlemlenir ve ciddi düzeyde PM oluşmamaktadır. Aynı zamanda karışım homojenliğinin nispeten yüksekliği ve yüksek olmayan düzeyde ısı girişi neticesinde sıcaklık artışının sınırlı kalması sebebiyle bu fazda açığa çıkan NO_x ve PM emisyonları düşük düzeydedir. NO_x ve PM temel olarak ana püskürtme fazında yakıtın yanmaya hazırlık süresinin çok kısa olması ve bu süre dahilinde dolgunun iyi bir karışım sağlayamamasından kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır [25]. Post enjeksiyon ana püskürtme fazından belli bir süre sonra silindir içerisine küçük miktarda yakıtın sevk edilmesi ile gerçekleşmekte olup özellikle yüksek yüklerde PM emisyonlarını ciddi düzeyde düşürmektedir. Post enjeksiyonun ortaya çıkarttığı geç yanma THC emisyonlarını arttırmaktadır [26]. Post enjeksiyon ile yaratılan yanma, PM taneciklerinin yüksek oranda hava ile karışmasına olanak tanımakta, böylelikle PM tanecikleri okside olabilmekte ve PM salımı düşmektedir. Post püskürtme temel olarak PM kontrolü için yapılırsa da genişleme sürecinde soğuma hızının düşüşüne bağlı olarak NO_x geri yönlü tepkimesinin devamlılığını da desteklemekte ve NO_x emisyonlarını da bir

miktar daha makul bir banda çekmektedir. Fakat termodinamik açıdan verimli olarak değerlendirilemeyecek bir anda silindire yakıt sevki gerçekleştirildiği için özgül yakıt sarfıyatı artış gösterecektir.

NO_x ve is oluşumu hava fazlalık katsayısı ya da eşdeğerlik katsayısı ve sıcaklık haritası ile açıklanabilmektedir. Bu iki boyutlu grafiğe göre NO_x çok büyük oranda yüksek sıcaklık ve stokiyometrik karışım oranına yakın bölgelerde, is ise fazla zengin bölgelerde ve yüksek sıcaklıklarda oluşmaktadır [27]. Bu iki bölgeden uzak durulduğu takdirde dizel motorlarının sorun boyutundaki emisyonları olan NO_x ve is büyük oranda bertaraf olacaktır. Ancak konvansiyonel dizel yanmasında ve yaygın motor yönetim sistemlerine bakıldığında sık sık bu bölgede çalışıldığı görülmektedir. Aynı anda hem NO_x hem de PM bölgeleri dışında kalarak bu iki emisyonu düşürmeyi hedefleyen yanma stratejisi düşük sıcaklıkta yanma (DSY) (low temperature combustion - LTC) olarak adlandırılmaktadır [28]. DSY için farklı tanımlamalar yapmak mümkün olsa da temel amaç NO_x ve PM emisyonlarının oluşumunu sağlayan zincir reaksiyonlarını engellemektedir [29]. DSY lokal zengin karışım bölgelerini elemine ederek yanma sıcaklığının düşmesini sağlamakta, böylece NO_x ve PM emisyonlarını kontrol altına tutulmasını mümkün kılmaktadır [30]. Eğer yanma sıcaklığı 1650 K değerinden düşürülürse NO_x ve PM'nin yüksek konsantrasyonlarda olduğu bölgeden kaçınılmış olur [31], DSY stratejisi de bu sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Tüm DSY stratejilerinde yanma sıcaklığı, tutuşabilir karışımın seyreltilmesiyle düşürülmektedir [32]. Söz konusu seyreltme işlemi erken bir zamanda püskürtme gerçekleştirip daha fakir karışım yaratarak, yüksek EGR oranları ile çalışarak, supap zamanlamasının değiştirilmesi sonucunda efektif sıkıştırma oranının düşürülmesi ve püskürtme yapılan ortamın sıcaklığının düşüşüne bağlı olarak [33], dolgunun kademelendirilmesiyle, doğrudan hava fazlalık katsayısının yüksek seçilmesi gibi metotlarla TG sürecinin uzatılması ile sağlanabilmektedir [34]. Tüm Dizel DSY stratejilerinde yakıt hava karışımının homojenliğinin artırılması hedeflenmektedir [35]. Bunun için de püskürtmenin sona ermesi ile yanmanın başlangıcı arasında bir süreç geçmesi (positive dwell) hedeflenmektedir [36]. Daha uzun TG süreci yakıt ve havanın daha iyi karışması için daha fazla süre tanımakta ve bunun neticesinde yakıtça zengin karışım bölgelerini azaltarak is oluşumunu baskılamaktadır [37]. Dizel yanmasının optik görünürlüğünün nedeni büyük oranda isli yanmaya bağlı olup, yanma esnasında

oluşan is arttıkça optik geçirgenlik davranışı kötüleşerek görülür alev miktarı artış sergilemektedir. DSY uygulamalarında görülebilir alev konvansiyonel yanmaya göre daha az is olduğu için daha zayıf olarak ortaya çıkmaktadır [38]. Lokal hava fazlalık katsayısı dengesizliklerinin azalması ve daha yüksek karışım homojenliği neticesinde DSY uygulamalarında adyabatik alev sıcaklığı konvansiyonel dizel yanmasından daha düşüktür [38]. Burada karışımın mikro düzeyde fakirleşmesinin büyük önemi olduğunu unutmamak gerekir. Konvansiyonel dizel yanması ile karşılaştırıldığında DSY uygulamalarında hem NO_x hem de PM emisyonlarında iyileşme gözlemlenmesinin sebebi bir yandan yanma başlamadan önce oluşan ön karışım seviyesindeki artış bir yandan da yanma sıcaklığındaki düşüştür [39]. DSY uygulamalarında PM emisyonları kayda değer düşüş gösterse de belli çap altındaki PM değerlerinin azalışına dönük aynı şeyi söylemek mümkün değildir [40]. Bu avantajlarına rağmen motorinin düşük uçuculuğu, yüksek oranlara çıkabilen EGR ve fakir alev karakteristiğinde belirginleşme neticesinde düşen yanma verimi sonucunda DSY uygulamalarında CO ve THC emisyonları artış göstermektedir [41]. Konvansiyonel dizel yanmasında %99.5'i aşabilen yanma verimi, DSY uygulamalarında %90 ile %95 bandına kadar düşebilmektedir [41]. Yanma veriminin düşüşü bir yandan alevin zayıflamasına bir diğer yandan da piston oyuğu dışına taşan yakıt miktarının artışına bağlıdır. THC emisyonlarının artışına yol açan en önemli faktör artan püskürtme avansı neticesinde yakıtın piston oyuğu dışına çıkması, hatta cidarlara çarpmasıdır. Ayrıca püskürtme avansının fazlaca arttırıldığı işletme şartlarında yakıtın yağlama yağına karışmaması için özel tasarımı enjektörlere ihtiyaç duyulmaktadır. [42].

DSY uygulamaları PCC (kısmi ön karışımli yanma - partially premixed combustion), HCCI (homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli yanma – homogenous charge compression ignition), PCCI (ön karışımli sıkıştırma ateşlemeli yanma – premixed charge compression ignition), RCCI (reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli yanma – reactivity controlled compression ignition), HECC (yüksek verimli temiz yanma - high efficiency clean combustion), kademeli dolgulu sıkıştırma ateşlemeli yanma (SCCI – stratified charge compression ignition) olarak kategorize edilebilir [43]. Bunların yanında MUDLIC ve kinetik modülite gibi yanma stratejileri de mevcuttur. PPC stratejisi homojen karışımli yanma ile difüzyonlu yanmanın birleşimi olarak değerlendirilebilir. Bu stratejide nispeten

ÜÖN'ye daha yakın yapılan ikincil bir püskürtme ile yanma başlatılır [44]. Bu stratejide yakıt genellikle yanmanın başlaması hedeflenen noktadan yaklaşık 40° KMA öncesine kadar bir zamanda silindir içerisine sevk edilir [45]. PPC stratejisinde NO_x ve PM düşüşünün yanında termik verimde de iyileşme görülür. Fakat strateji düşük oktan sayılı yakıtta ihtiyaç duymaktadır, bu sebeple de ticarileşmesinin önünde engeller bulunmaktadır [46]. Benzinin yakıt olarak kullanıldığı DSY uygulamalarında fakir karışımla çalışma sonucunda emme sürecindeki negatif iş düşüş gösterir ve daha yüksek sıkıştırma oranlarıyla çalışmayı mümkün kılar [47]. PPC'deki termik verim artış imkanının gerekçesi temel olarak kısımla kayıplarının azalmasına bağlanmaktadır [48]. Kademeli dolgu sıkıştırma ateşlemeli yanma uygulamalarından en popülerleri ICCI (akıllı dolgu yaratımlı sıkıştırma ateşlemeli yanma - intelligent charge compression ignition) uygulamalarıdır. Bu stratejide emme ve sıkıştırma sürecinde düşük reaktiviteli yakıt birden çok faza bölünerek silindir içerisine sevk edilmekte, böylelikle dolgu kademelendirilmekte ve yanma yüksek reaktiviteli yakıtın silindir içerisine enjekte edilmesiyle başlamaktadır [49]. Ancak bu tip motorlarda her bir silindir için çift enjektör ve yakıt sisteminin bulunması ve bunların her ikisinin de direkt enjeksiyon formunda oluşu uygulanabilirliği güçleştirmektedir. Bu sebeple de ilgili stratejiye yönelik literatürde oldukça sınırlı yayın bulunmaktadır. Kinetik modülite stratejisi geç-PCCI olarak da adlandırılmaktadır. Bu stratejide geç püskürme sayesinde yakıtın yağlama yağına karışması büyük oranda önlenmiş olur [50]. Ancak yanmanın daha büyük oranda genişlemeye kayması sebebiyle eksik yanma ürünleri artış gösterir [51].

Dizel motorlarında DSY stratejisi büyük oranda HCCI, PCCI ve RCCI stratejileri ile oluşturulmaktadır [52]. Dizel motorlarında uygulanan temel DSY stratejilerinden HCCI, PCCI ve RCCI temel prensip olarak aynı metodolojiye dayanmaktadır, ancak temel hedefin ortaya çıkarılma metodolojisi farklılık göstermektedir [53].

RCCI metodolojisi esas olarak yüksek uçuculuğa ve düşük reaktiviteye sahip yakıtın genellikle silindir dışında emme havası ile karışımı sağlanarak, sıkıştırma sonlarına doğru yüksek reaktiviteli dizel yakıtının pilot hüzmeye formunda yanma odasına sevk ile yanmanın başlatılması prensibine dayanmaktadır [54]. RCCI uygulamalarında ön karışım yaratacak yakıt gaz fazda ya da yüksek uçuculuğa

sahip sıvı fazda yakıt olabilir. RCCI uygulamasında ön karışım yaratacak yakıtın oktan sayısının yüksek, yanmayı tetikleyecek pilot hüzmeyi yaratacak yakıtın ise setan sayının yüksek olması beklenmektedir. DSY stratejisinin iki farklı yakıtla ortaya konması RCCI yanmayı tek yakıt uygulamalarında birazdan bahsedilecek zorlukları ortadan kaldırması açısından avantaj sağlar ve konvansiyonel yanma ile daha üstün rekabet ortamı oluşturur [55]. Ayrıca lokal olarak düşük oksijen konsantrasyonlu bölgelerin çok az oluşu sebebiyle çok çok düşük PM değerleri gözlemlenebilmektedir [56].

Dizel motorlarında HCCI uygulamasında püskürtme avansının konvansiyonel yanma stratejisinde uygulanan püskürtme avansından çok daha yüksek tutularak yakıtın tamamının yanma öncesinde silindir içerisine sevki sağlanmaktadır. Yakıtın buharlaşma ve kendi kendine tutuşma sıcaklıkları arasındaki fark yardımıyla da bu sürede yüksek homojenlikte karışımın yaratılması [57], ardından yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığına erişerek homojen karışımlı bir yanma ortaya koyması hedeflenmektedir. Bu sebeple yanma karışım oluşumu itibariyle kıvılcım ateşlemeli motorlara, yanma başlangıcı ise sıkıştırma ateşlemeli motorlara benzerlik gösterir [58]. Homojen karışımın elde edilebilmesi için yakıt enjeksiyonu sonrasında yanma başlayana kadar yeterli sürenin geçmesi gerekmektedir. Bu durum esas itibariyle yüksek oktan sayılı yakıtların stratejiye daha uygun olduğu sonucunu doğurmaktadır [59]. Yanma odasında oluşan yüksek homojenlikteki yakıt hava karışımının hava fazlalık katsayısı genelde 4'ten büyüktür [60]. HCCI stratejisinde zaman zaman bir katalizöre gerek kalmaksızın NO_x emisyonları oldukça düşük seviyelere düşürülebilir [61]. Püskürtmenin çok erken yapılması sebebiyle yanmanın başlangıcı hava fazlalık katsayısı gibi karakteristik faktörlere [62] bağlı olarak kontrol edilmekte, konvansiyonel yanmanın aksine püskürtme başlangıcı ile kontrol edilememektedir [63]. HCCI stratejisinde yanma başlangıcı kinetik kontrollü olarak ortaya çıkmakta ve böylece püskürtme başlangıcından yaklaşık bağımsız bir TG görülür [64]. HCCI yanmada yanma süreci kısadır ve nispeten yüksek ısı açığa çıkış hızları gözlemlenir [65]. HCCI stratejisinde yakıtın tamamı ön karışımli yanma karakteristiğinde olduğu için karışım oldukça fakirdir. Bu da farklı motor yüklerinde stratejinin uygulanabilirliği sınırlandırmaktadır [66]. Çünkü yüksek motor yüklerinde ısı açığa çıkış süresi son derece kısadır ve yanma sabit hacimli yanmaya yakınsar, bu da yüksek basınç gradyanlarına yol açar ve dizel

vuruntusuna sebebiyet verir [67]. Buna ilaveten HCCI stratejisi düşük hızlarda beklenenden daha erken kendi kendine tutuşma eğilimine yol açabilmekte ve vuruntu eğilimi göstermekte, yüksek hızlarda ise tutuşma güçlükleri ortaya çıkabilmekte ve yanmanın stabilizasyonu sağlanamamaktadır [8].

Yukarıda belirtilen olumsuzluklar HCCI stratejine göre PCCI stratejisini dizel DSY uygulamalarında daha cazip ve uygulanabilir kılmaktadır. PCCI yanma stratejisi HCCI ile konvansiyonel yanmanın ara formu olarak değerlendirilebilir. PCCI esas olarak yanma başlangıcını daha iyi kontrol edebilmek adına HCCI stratejisinden evrimleşmiştir [68]. PCCI yanmada yanmanın başlangıcı, konvansiyonel dizel yanmasının karışım kontrollü yanma başlangıcı ile HCCI yanmadaki reaksiyon kinetiği kontrollü yanma başlangıcının rolleri birbirine yakındır [69]. PCCI stratejisinde tek veya çok fazlı püskürtme ile yakıtın uzun bir tutuşma gecikmesi sürecine sahip olacağı bir anda yanma odasına sevki ve konvansiyonel yanmaya göre daha yüksek homojenliğe sahip dolgunun yaratılması hedeflenmektedir.

PCCI stratejisi yakıtın silindir içerisine erken zamanda püskürtülmesiyle oluşturulur [20]. Stratejide özellikle CFD bazlı çalışmalarda çok fazlı püskürtmede ilk püskürtme başlangıcı 110° KMA [70] gibi oldukça yüksek püskürtme avans değerlerine çıksa da erken püskürtme ile oluşturulacak PCCI stratejisinde yakıt enjeksiyonu sıkıştırmanın kabaca son 1/3'lük kısmında gerçekleşmektedir. Püskürtmenin yapıldığı bu aralık yakıtın kendi kendine tutuşması için oldukça yetersizken buharlaşmaya yetecek düzeydedir [71]. PCCI stratejisinde yanmanın ortaya çıkışı buharlaşma ve tutuşabilir karışım oluşumu ile kontrol edilmekte ve bu sebeple de PCCI motorlar geniş bir püskürtme avans aralığında yönetilebilir [72]. PCCI uygulaması yakıtın büyük kısmı ön karışımli yanma karakteristiğinde yanmaya katılır [73]. Karmaşık yanma kontrolü sorunlarının tam olarak aşılabilmesi sebebiyle PCCI yanma stratejisi düşük motor yüklerinde uygulanabilmektedir [74, 75]. Bunun yanında değişken yük ve hız şartlarına uyum sağlamada bazı güçlükler bulunmakta olup tüm motor çalışma bölgelerinde ilgili strateji uygulanamamaktadır [76]. DSY stratejilerinde değişken geçiş rejimlerinde yanma karmaşıklık ve zorluklarına uyum sağlamak oldukça güçtür [77]. Nispeten orta yük bölgelerinde de uygulanabilen PCCI stratejisi yüksek yük bölgesinde çalışmaya pek elverişli değildir.

PCCI stratejisinde, alev çekirdekleri yakınlarında karışımın fakirleşmesine bağlı olarak alev sıcaklıklarında görülen düşüş [78] yanma sürecinin uzamasına ve ortalama efektif basıncın (OEB) düşmesine yol açmaktadır. Aynı zamanda PCCI stratejisi yüksek yüklerde kuvvetli dizel vuruntusu riski barındırmaktadır [79]. Benzer şekilde yüksek yük bölgesinde yanma hızının artışına bağlı olarak ÜÖN öncesindeki ısı giriş miktarının yüksek oluşu termik verimde de düşüşe yol açar [80]. Konvansiyonel dizel yanmasında TG sürecini kısaltan püskürtme şartları tutuşabilir karışım oluşumu için ihtiyaç duyulan süreyi kısaltmaktadır. Böylelikle yüksek ısı açığa çıkış hızı ve büyük basınç gradyanlarından kaçınılır [81]. Fakat PCCI’de yanma büyük oranda ön karışımlı karakterde olduğu için yüksek yüklerde kuvvetli dizel vuruntusu görülür. Ju vd. [82] yaptıkları çalışmada PCCI çalışma bölgesinde, fakat yüksek motor yükünde çalışmışlardır. Tam yük şartında elde edilen verilerde motor gücünde ortaya çıkan ciddi düşüşün yanında püskürtme avansı arttıkça özgül NO_x değerlerinde de kayda değer artışlar ortaya çıkmıştır. Motor gücü ve özgül emisyon değerlerine bakıldığında NO_x emisyonları sadece özgül olarak değil aynı zamanda konsantrasyon olarak da artış sergilediği çıkarımını yapmak mümkündür. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi yüksek yüklerde performans ve vuruntunun yanında emisyonlar açısından da durum kötüleşmektedir.

PCCI stratejisinde salınan is ve NO_x emisyonları HCCI stratejisinden daha yüksektir. Fakat konvansiyonel dizel yanma stratejisinden oldukça düşük is ve NO_x emisyonu ortaya çıkmaktadır [83]. CO ve THC emisyonları ise PCCI stratejisinde HCCI’ye göre daha düşüktür [53]. Çünkü püskürtme avansının daha düşük olması sebebiyle cidar ısılatma eğilimi daha düşük ve yanma sıcaklıkları da HCCI’ye göre daha yüksektir [84]. HCCI uygulamalarda hava fazlalık katsayısı lokal olarak da her yerde 1’den büyüktür, ancak PCCI uygulamalarında lokal hava fazlalık katsayısının 1’den küçük olduğu yerler yani zengin karışım bölgeleri gözlemlenebilir [85]. Dolgu homojenliğinin aynı olmaması sebebiyle HCCI’ye göre daha fakir karışım bölgelerinin de görülmesi mümkündür [5]. Aynı zamanda PCCI uygulamalarında HCCI uygulamasındaki ani yanma ve hızlı basınç artışı sonucu ortaya çıkan yüksek yanma gürültüsü de daha makul seviyelerdedir [85]. Dizel motorlarında HCCI uygulaması NO_x ve PM üzerinde oldukça etkili düşüşler sağlamaktadır. Fakat yanmanın başlangıcı, THC ve CO emisyonları açısından ciddi

artışlar ve belirsizlikler içermekte olup bu zorluklar dizel motorlarında DSY uygulaması olarak PCCI stratejisini ön plana çıkartmaktadır [79]. HCCI stratejisi lokal zengin karışım bölgelerini ortadan kaldırmakta, yanma sıcaklığını düşürmekte ve daha düşük PM ve NO_x emisyonlarına ortam hazırlamaktadır. Ancak bunun karşısında farklı işletme koşulları ve yakıt özelliklerine oldukça hassas bir stratejidir. PCCI stratejisi, HCCI aksine tam olarak homojen dolgulu değildir ve PM emisyonlarını homojen dolguda olduğu gibi eser düzeye çekmez, ancak kabul edilebilir bantlara geriletir [86]. PCCI stratejisinde yanma karakteristiği tıpkı konvansiyonel dizel yanması gibi çok bölgeli kendi kendine yanma prensibine dayanmaktadır. Fakat TG sürecinin artmasının istendiği bu stratejide daha geniş bir yelpazede yakıt seçeneği ile çalışılabilmektedir [87]. HCCI stratejisinde motor yük ve devrine karşı hassasiyet oldukça yüksektir. Değişen işletme şartlarına göre yanmanın oldukça sağlıklı bir forma bürünmesi olasıdır. HCCI oldukça düşük motor yüklerinde uygulanabilir. PCCI stratejisi ise daha yüksek motor yüklerine uygulanabilmektedir. Pandain vd. [88] bir dizel motorunda sabit motor hızında yaptıkları çalışmadan elde ettikleri verilere göre HCCI stratejisi %40 motor yüküne kadar, PCCI stratejisi ise %60 motor yüküne kadar uygulanabilir görülmüştür. Bunun yanında RCCI stratejisi ise çok daha geniş motor yüküne uygulanabilir durumdadır [89].

DSY uygulamalarında düşük ve orta yüklerde karışım oranı dengesizlikleri düşük olup dolgu yüksek homojenliğe sahiptir. Ancak yüksek motor yüklerinde enjeksiyon kütlesinin artması sebebiyle aynı homojenliği sağlamak zorlaşmaktadır. Motor yükü artışıyla paralel olarak yakıt püskürtme kütlesinin artışıyla ile tutuşabilir karışım bölgeleri oluşturma kabiliyeti artacak ve yanma başlayana kadar geçen sürede oluşacak ön karışım oranı düşüş gösterecektir [90]. Öztürk vd. [91] 180 bar püskürtme basıncında püskürtme avansını sabit tutarak farklı motor yüklerinde ön karışımli yanma ve difüzyonlu yanma fazlarında ortaya çıkan yanmaya yönelik çalışma yürütmüştür. 2200 dev/dak motor hızında 3,75 Nm tork çıkışı için yanmanın %35'i aşan, 7,5 Nm için %30'u bandında, 11,25 Nm için %25'in üzerinde, 15 Nm tork çıkışı için de %20'nin biraz altında ön karışım fazında yanma gözlemlenmiştir. Yüksek motor yüklerinde TG sürecinin kısaldığı bilinmektedir. Tıpkı diğer DSY uygulamalarında olduğu gibi PCCI stratejisine göre karışım tevzii sağlandığında da yüksek yüklerde ani yanmalar ortaya çıkacak olup

bu durum PCCI stratejisinin uygulanabilirliğini motor yükü açısından sınırlamaktadır [92].

İçten yanmalı motorlarda yanmanın başlangıç anı tüm performans ve emisyon değerlerini yakından etkilemektedir. Dizel motorlarında diğer şartlar sabit tutulduğunda yanmanın başlangıcını püskürtme basıncı ve püskürtme avansı tayin etmektedir. Konvansiyonel dizel yanmasında, emisyon normlarına uyumsuzluk yaratmayacak seviyede, en yüksek OEB çıktısını verecek avans değerinde püskürtme yapılması hedeflenmektedir. Bu optimum değerden daha küçük püskürtme avanslarında yanma genişlemeye kayacağı için OEB düşüş gösterecektir. Daha büyük püskürtme avanslarında ise üst ölü nokta (ÜÖN) öncesi silindire girecek ısı artış göstereceği için OEB düşüş gösterecektir. Dizel motorlarda, her ne kadar en büyük OEB değerini verecek avans değerinde püskürtme yapılması hedeflense de bu şartta oluşacak olan NO_x salımı çok büyük değerlere çıkmaktadır. Bu sebeple regülasyonlara tabi araç motorlarının kalibrasyonlarında genellikle bu püskürtme avansında çalışılmamaktadır. Çünkü en büyük OEB çıktısını sağlamak termodinamik olarak ideale daha yakın anda ısı açığa çıkışını sağlamayı gerektirmektedir. Bu şart NO_x oluşumuna oldukça elverişlidir. Bir başka deyişle konvansiyonel dizel yanmasında OEB ile NO_x arasında bir paralel ilişkiden bahsetmek mümkündür. Carlucci vd. [93] yaptıkları çalışmada belirlenen aralıkta püskürtme avansının artışına bağlı olarak OEB değerinin düşüş gösterdiğini, hatta fazlaca artan püskürtme avanslarında OEB düşüşünün oldukça dramatik boyuta ulaştığını göstermiştir. Buna ilaveten artan püskürtme avansı değerlerinde maksimum moment devrinin de daha küçük bir motor devrine hapsediği görülmüştür. Bir diğer yandan ÜÖN civarından belli bir püskürtme avans değerine kadar artan avanslarda ise Plomondon ve Seers [94] tarafından da belirtildiği üzere OEB ve NO_x salımları artış gösterecektir. Plomondon ve Seers [94] ÜÖN öncesi $8,75^\circ$ KMA avans ile ÜÖN sonrası 5° KMA gecikmeli püskürtme şartında püskürtmenin avanslı yapılmasında ve avansın arttırılması durumunda NO_x emisyonlarının arttığını, özgül yakıt sarfiyatının düşüş gösterdiğini, püskürtmenin genişlemeye kaydırılması durumunda ise her iki değer de belirgin düşüş gözlemlendiğini belirtmiştir.

PCCI stratejisi ile konvansiyonel dizel yanmasının mukayesesi ve püskürtme avansına bağlı değişimlerin motor performans ve emisyon çıktıları üzerine

etkilerini değerlendirmek görünenden daha karmaşık ilişkiler barındırmaktadır. Çünkü yanmanın karakteristiği ve fazları konvansiyonel yanmaya göre farklılık göstermektedir. Konvansiyonel dizel yanmasında yanma odası karışım oranı açısından ciddi düzeyde heterojenliğe sahiptir. PCCI stratejisinde ise karışımın homojenliği artmaktadır. Aynı zamanda yanmaya iştirak eden bölge artmıştır. Bu durum daha önceden de belirtildiği üzere NO_x ve PM emisyonlarını düşürmekte, CO ve THC emisyonlarını arttırmaktadır. Motor performansında g ve tork çıkışı açısından PCCI stratejisinde bir düşüş yaşanacağı açıktır. Ancak motor kalibrasyonu esnasında bu stratejinin uygulandığı işletme şartlarında TG sürecinin uzun oluşu sebebiyle daha düşük püskürtme basıncılarında çalışmak mümkündür. Bu durum ortalama indike basınç (OİB) değerinde ortaya çıkacak düşüşün OEB değerine daha düşük oranda yansıyacağı sonucunu çıkartmaktadır. Diğer yandan stratejinin yarattığı NO_x ve PM düşüşleri post enjeksiyona olan ihtiyaı azaltacak veya ortadan kaldıracaktır. Bilindiği üzere post enjeksiyon genişleme fazında yapılmakta ve motor momentini arttırmada oldukça yetersiz kalmaktadır. Stratejinin uygulanabilirliği bu faktörleri de göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. PCCI stratejisinde yanma odasında oluşan karışım kompozisyonu, yanma safhaları, yanma odası içerisinde oluşan şartlar, emisyon ve performans çıktılarına dönük olarak yürütülmüş çalışmalar stratejinin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymak adına aşağıdaki paragraflarda sunulmuştur. Daha anlaşılabilir bir ereve çizmek amacıyla öncelikle daha dar kapsamda yürütülen çalışmalara ve PCCI stratejisinin genel yapısını belli açılardan değerlendiren çalışmalara yer verilmiş, ardından daha kapsamlı çalışmalar literatür özetine dahil edilmiştir.

Bu kısımda PCCI stratejisinin doğrudan içten yanmalı motorlara uygulanmasından ziyade püskürtme yapılan ortam şartlarının nasıl bir TG süreci doğuracağı, püskürtmenin ne zaman ve hangi püskürtme basıncında yapıldığına dair yanma odalarında yapılan çalışmalar incelenmiş, tutuşma gecikmesi prosesi ve yakıt nüfuziyetine dair sonuçlar sunulmuştur. Shi vd. [95] sabit hacimli yanma odasında yaptıkları deneylerde 840 K sıcaklığındaki ortama farklı püskürtme basıncılarında 45 mg/strok yakıt enjekte etmiştir. 40 MPa püskürtme basıncı altında 1,91 ms TG gözlemlenmiştir. 60 MPa püskürtme basıncında 1,79 ms TG ortaya çıkmıştır. Bu değerler 80 MPa için 1,48 ms ve 100 MPa 1,66 ms değerindedir. Buna ilaveten aynı

püskürtme basınçlarında farklı yakıt miktarları ile yapılan incelemede ise püskürtülen yakıt kütlesi azaldıkça ve püskürtme basıncı arttıkça yanmaya katılamayan yakıt miktarı artış göstermektedir. Tonini vd. [96] farklı püskürtme avanslarında gerçekleştirilen püskürtme sonucunda ortaya çıkacak nüfuziyet derinliklerini incelemek adına matematiksel çalışma yürütmüştür. Yakıt püskürtme basıncını 1100 bar, enjektör nozül çapını 0,094 mm, yakıt sıcaklığını 373 K olarak modellenmiş, püskürtme avansı ise 5° KMA adımlar halinde ÜÖN öncesi 20° KMA ile 40° KMA arasında değiştirilmiştir. ÜÖN öncesi 40° KMA konumunda yanma odası 601 K sıcaklık değerinde ve 5,2 kg/m³ özkütlededir. ÜÖN öncesi 20° KMA konumunda ise 768 K sıcaklık ve 10,5 kg/m³ özkütleye sahip ortam görülmüştür. 20° KMA püskürtme avansında 40 mm, 25° KMA püskürtme avansında 50 mm civarında, 30° KMA püskürtme avansında 60 mm üzerinde, 35° KMA püskürtme avansında 80 mm civarında ve 40° KMA püskürtme avansında ise 100 mm değerine yaklaşan nüfuziyet derinlikleri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ortam yoğunluğu ve sıcaklık değerlerinin penetrasyon derinliğine ciddi düzeyde etkisi olduğu görülmüştür. Püskürtme avansı arttıkça yakıt, enjektörden daha uzak bölgelere ulaşabilmekte ve böylelikle daha fazla hava ile daha büyük bir etkin hacimde karışım oluşturabilmektedir. Zirngibl and Wachtmeister [97] yaptıkları çalışmada enjektör tetik gerilimi süresi 140 ms ile 200 ms arasında, püskürtme basıncı ise 400 bar ile 1800 bar arasında değiştirilmiştir. 140 ms tetikleme sinyali gönderilmesi durumunda 400 bar ile 1000 bar püskürtme basınçları arasında penetrasyon derinliği açısından belirgin fark ölçülememiş, 1400 bar ve 1800 bar püskürtme basınçları altında penetrasyon derinliği artış göstermiştir. Enjektör enerjilendirme süresi arttıkça yüksek basınçlarda görülecek penetrasyon derinliği tahmin edileceği üzere artış sergilemiştir. Fakat oransal olarak bakıldığında fazlaca arttırılmış püskürtme basınçlarının daha düşük bir artış hızı ile penetrasyon derinliğini arttırdığı görülmüştür. Chen ve diğ. [98] sabit hacimli bir yanma odasında 160 MPa aralığında 20 MPa adımlar ile püskürtme basıncını ve 720 K ile 780 K aralığında da 20 K aralıklarla yanma odası sıcaklığını değiştirerek çalışma yürütmüştür. Yanma odası basıncı ise 6 MPa değerindedir. Ortam sıcaklığının 760 K olarak sabitlendiği şartta yakıt demetlerinin sıvı ve gaz fazdaki penetrasyon derinlikleri incelenmiştir. Sıvı fazda penetrasyon derinliğine bakıldığında püskürtme başladıktan kısa bir süre sonra yüksek püskürtme basıncının daha büyük penetrasyon derinliklerini ortaya koyduğu, yeteri süre geçtikten sonra ise düşük

püskürtme basınçlarında sıvı fazda penetrasyon derinliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Penetrasyon derinliği, püskürtme başlangıcından 0,5 ms sonra 40 MPa püskürtme basıncında 30 mm'nin bir miktar altında iken 140 MPa için 40 mm'nin biraz üzerinde gözlemlenmiştir. Bu aralıkta 40 MPa ve 60 MPa püskürtme basınçları arasında ciddi bir fark varken devam eden püskürtme basıncı artım adımlarında daha küçük farklar ortaya çıkmıştır. Gaz fazda penetrasyon derinliğinin ise püskürtme basıncı arttıkça artış sergilediği görülmektedir. Püskürtme basıncının 100 MPa değerinde sabit tutularak ortam sıcaklığının değiştirildiği durumda ise püskürtme sonrası 0,4 ms süresince sıvı faz penetrasyon derinliğinde gözle görülebilir farklılıklar ortaya çıkmamıştır. Ancak 0,7 ms püskürtme yapıldığında ortam sıcaklığına bağlı olarak belirgin farklar oluşmaya başlamıştır. Püskürtme başladıktan 1 ms sonra 800 K sıcaklıktaki ortamda sıvı penetrasyon derinliği 36 mm iken 720 K sıcaklıktaki ortamda sıvı penetrasyon derinliği 52 mm dolaylarına erişmiş ve devamında sıvı penetrasyon derinliği süreye bağlı olarak pek bir değişiklik sergilememiştir. Gaz fazın penetrasyon derinliği ise ortam sıcaklığı arttıkça sürekli olarak daha yüksek değerler almıştır. Kuti vd. [99] yaptıkları hesaplamalı akışkanlar dinamiği (computational fluid dynamics-CFD-) bazlı çalışmada aynı ortama daha yüksek basınçlı motorin ve biyodizel sevki ile sıvı fazdaki penetrasyon derinliğinin püskürtme basıncı arttıkça düşüş gösterdiğini, buna mukabil gaz fazdaki penetrasyon derinliğinin artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Bunun tersi şekilde püskürtme basıncı azaldıkça sıvı faz penetrasyon derinliğinin bir miktar arttığı, ancak gaz fazdaki penetrasyon derinliğinin düşüş sergilediği görülmüştür. Shi vd. [100] 15 l sahip sabit hacimli bir yanma odasında 4 MPa ortam basıncı ve 423 K cidar sıcaklığında 40 MPa, 60 MPa, 80 MPa ve 100 MPa püskürtme basınçlarıyla silindire yakıt sevk etmiş ve yakıtın atomizasyon kabiliyeti üzerine çalışma yürütmüştür. 750 K ortam sıcaklığında yanma odasına 45 mg yakıt gönderildiği şartta 40 MPa püskürtme basıncı için 3,5 ms üzerinde buharlaşma süresi, 60 MPa püskürtme basıncı için 3 ms civarında buharlaşma süresi gözlemlenmiştir. Benzer şekilde 80 MPa için 2,5 ms üzeri ve 100 MPa için yaklaşık olarak 2,2 ms bandında değerler görülmüştür. 850 K sıcaklıktaki ortama 40 MPa, 60 MPa ve 80 MPa püskürtme basınçlarında 30 mg ve 45 mg olarak iki farklı kütlede yakıt enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. 45 mg yakıt püskürtme şartında 40 MPa püskürtme basıncında yaklaşık olarak 3,4 ms, 60 MPa püskürtme basıncında 3,3 ms ve 80 MPa püskürtme basıncında yaklaşık 2,7 ms TG süreci

gözlemlenmiştir. Aynı şartlar altında 30 mg yakıt püskürtülmesi durumunda 40 MPa püskürtme basıncında 2,5 ms TG gözlemlenirken 60 MPa ve 80 MPa püskürtme basınçlarında 2,4 ms'ye oldukça yakın TG değerleri ortaya çıkmıştır. Buradan çıkarılacak bir başka sonuç ise püskürtülen yakıtın kütlesi azaldıkça püskürtme basıncının TG süresi üzerindeki etkisi azalmasıdır. Zhao et al. [101] sabit hacimli bir yanma odasında 1 MPa, 2 MPa ve 3 MPa ortam basıncında 80 MPa, 100 MPa, 120 MPa ve 140 MPa püskürtme basıncında enjeksiyon gerçekleştirmiş ve püskürtme basıncı arttıkça Sauter ortalama çapının düşüş gösterdiğini, ortam basıncı arttıkça ise Sauter ortalama çapının daha büyük değerler aldığını görmüştür. Ortam basıncının artışıyla Sauter ortalama çapı artışı nispeten düşük seyrederken belirtilen aralıkta püskürtme basıncının artışıyla Sauter ortalama çapı değerinde %25 civarlarında düşüş ortaya çıkmıştır.

Tüm dizel DSY uygulamalarında olduğu gibi PCCI stratejisinde de mümkün mertebe yüksek düzeyde ön karışım oluşturmak gerektiğinden bahsedilmiştir. Böylelikle NO_x ve PM emisyonlarının kontrol altına alınacağı birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuş durumdadır. PCCI stratejisini uygulanırken en sık başvuru yöntemlerinden biri yüksek EGR oranı ile çalışmaktır. DSY uygulamalarında kullanılan yakıtın oktan sayısının artışı ve setan sayısının düşüşüyle düşük sıcaklıkta reaksiyon başlangıcı ve devamı kolaylaşmaktadır [102]. Motorinin yüksek setan sayısı nedeniyle DSY uygulamalarında yanma başlangıcını yakıtın reaktivitesi nedeniyle kontrol etmek oldukça güç olduğu için PCCI stratejisi sıklıkla yüksek EGR oranları ile desteklenmektedir [103]. EGR oranı arttıkça yanma hızı düşecek gerek karışımın seyrilmesi gerekse de özgül ısı artışı sebebiyle yanma öncesi ve yanma esnasında daha düşük ortam sıcaklıkları oluşacaktır. Feng vd. [104] yaptıkları çalışmada EGR oranı arttıkça egzoz giden enerji yüzdesinin artış sergilediğini gözler önüne koymuştur. %15 EGR oranına kadar egzoz giden enerji miktarı pek bir değişim göstermezken daha büyük EGR oranlarında egzoz giden enerji oranı ciddi tırmanışa geçmiştir. Bu sonuçlar ışığında, egzoz giden ısı enerjisinin artışı yanma hızının düşerek yanmanın daha geç sona ermesiyle açıklanabilir. EGR oranı arttıkça bir yandan TG artmakta ve yakıtın kendi kendine tutuşma kabiliyeti düşmekte [105], bir yandan da yanma odası içerisindeki sıcaklık değerleri düşüş göstermektedir [106]. Yanma odasındaki sıcaklığın düşüş sebebi tepkimeye girmeyecek ve daha yüksek özgül ısıya sahip gaz oranının artmasıdır.

Prabhakar vd. [107] yaptıkları çalışmada motorinin farklı motor yüklerinde ve farklı EGR oranları ile yakılması durumunda tek silindirli bir motorda performans çıktılarını incelemiştir. EGR oranı %0 ile %30 aralığında değiştirilmiştir. 0 kW efektif güç çıkışında %0 EGR'de yanma odası pik basıncı 57 bar iken %30 EGR şartında bu değer 53 bar seviyesine gerilemiştir. 1,1 kW efektif güç çıkışında bu değerler sırası ile 63 bar ve 58 bar, 2,2 kW efektif güç çıkışında 66 bar ve 62 bar, 3,3 kW efektif güç çıkışında 69 bar ve 65 bar olarak ortaya çıkmıştır. Tüm sonuçlarda %0 EGR ile %10 EGR arasında gözle görülür farklılık saptanmıştır. Fakat %10 ile %20 EGR şartı arasında büyük farklılıklar ortaya çıkmamış ve maksimum silindir içi basınç yakın değerler almıştır. Sonrasında artan EGR oranlarında ise silindir içi maksimum basınç değerleri daha büyük farklılıklar barındırmaya başlamıştır. Yani EGR kullanımıyla silindir içi pik basınç değeri düşüş göstermektedir. Bu aynı zamanda basınç artış gradyanı hakkında da bilgi vermektedir. Yüksek oranda EGR kullanımı aynı zamanda dizel vuruntusu riskini de düşürmektedir. Ma vd. [108] konvansiyonel motorin ve farklı yakıt karışımları ile yaptığı çalışmada %25 - %30 oranında EGR uygulanmasının TG sürecini ciddi şekilde arttırdığını göstermiştir. Belirli işletme şartında %20 EGR oranında 7,5° KMA olan TG süresi %50 EGR şartında 18° KMA ile 19° KMA aralığına kadar çıkmıştır. Aynı çalışmada EGR oranının %30'u aştığı durumlarda ise indike termik verimde ciddi düşüşler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu durumda NO_x emisyonlarının azalacağı şüphe götürmez bir gerçek olacakken PM emisyonları için biraz daha karmaşık bir durum ortaya çıkacaktır. Her ne kadar kesin bir kanıya varmak mümkün olmasa da yüksek EGR oranları ile artan karışım homojenliğin yanmanın bozulmasına bağlı olarak ortaya çıkacak PM artışının önüne geçtiği ve genelde PM artışı gözlemlenmediği [109] yönünde savlar bulunmaktadır.

PCCI üzerine gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir kısmı yüksek EGR oranı ile yürütüldüğü şu ana kadar belirtilmiş ve bazı çalışmalara yer verilmiştir. EGR etkisinin tekil olarak incelendiği PCCI çalışmalarına [110 - 114] dönük olarak EGR'nin PCCI stratejindeki rolü bu paragraf altında aktarılmaya çalışılmıştır. EGR'nin, PCCI stratejisi açısından önemi görüldüğü üzere küçümsenmeyecek düzeydedir. Ancak EGR'nin sebep olduğu karışım seyrelmesi sebebiyle diğer işletme parametrelerinin strateji üzerindeki etkisi azalmaktadır. Aşağıdaki

paragraflarda EGR uygulanmayan veya EGR uygulansa da diğer işletme parametrelerinin etkisinin tam olarak sönümlenmediği çalışmalara yer verilmiştir.

Ren vd. [115] yaptıkları çalışmada sıkıştırma bir motorda püskürtme avansını ÜÖN öncesi 18° KMA ile 25° KMA aralığında değiştirmiştir. 1200 dev/dak motor hızı, 0,14 MPa OEB değerinde 25° KMA püskürtme avansında 7° KMA TG süreci, 18° KMA püskürtme avansında 6° KMA dolaylarında; 1200 dev/dak motor hızı ve 0,7 MPa OEB için 25° KMA püskürtme avansında takriben 6,8° KMA, 18° KMA püskürtme avansında 5° KMA civarında TG ortaya çıkmıştır. 1800 devir için yapılan sonuçlarda ise püskürtme avansına bağlı olarak TG süresi değişimini bir miktar daha düşük bantta gerçekleştiği görülmüştür.

Jung vd. [63] tek silindirli, 981 cc³ silindir hacmine sahip, 17,4 sıkıştırma oranlı, OHYBPS'li bir motorda konvansiyonel motorin kullanarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma 1200 dev/dak motor hızında, 160 MPa püskürtme basıncında, 30 mg/strok yakıt enjeksiyon kütlesiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 20° KMA, 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avanslarında sonuçlar elde edilmiştir. %0 EGR oranında ve 20° KMA püskürtme avansında TG süresi 3° KMA, 25° KMA püskürtme avansında 6° KMA TG, 30° KMA püskürtme avansında ise 8° KMA TG gözlemlenmiştir. Aynı püskürtme avanslarında ve %30 EGR oranında sırasıyla yaklaşık olarak 6° KMA, 10° KMA ve 12° KMA TG ortaya çıkmıştır. %50 EGR oranında ise bu değerler yaklaşık olarak 13° KMA, 16,5° KMA ve 19,5° KMA değerindedir.

Pradeep ve Anand [116] yaptıkları deneysel çalışmada farklı motor yükleri ve püskürtme avanslarında konvansiyonel dizel yanması ile PCCI'yı karşılaştırmıştır. 1500 dev/dak motor hızında yürütülen çalışmada konvansiyonel yanmada püskürtme avansı 12° KMA olarak belirlenmiştir. PCCI şartı için ise püskürtme avansı 30° KMA ile 70° KMA arasında değiştirilmiştir. Motor yükü ise %20, %40, %60 ve %80 değerlerindedir. %20 ve %40 motor yüklerinde EGR olmaksızın PCCI stratejisinde çalışmanın mümkün olduğu görülmüştür. Fakat %60 ve %80 motor yükünde çok şiddetli dizel vuruntusu gözlemlenmesi sebebiyle işletme şartına bağlı olarak en az %15 - %25 bandında EGR uygulamak gerekmiştir. %20 motor yükü en uzun TG süreçlerini vermektedir. Ancak püskürtme avansı çok arttırıldığında sağlıklı bir yanma ortaya konamamıştır. %20 motor yükünde püskürtme avansı

arttıkça pik yanma odası basıncı düşüş sergilemiş, fakat diğer motor yüklerinde püskürtme avansı arttıkça silindir içi pik basınç artmıştır.

Jo vd. [117] tek silindirli, 0,5 litre strok hacimli, 17,7 sıkıştırma oranlı ve OHYBPS'ne sahip bir motorda 1800 dev/dak motor hızı, 1000 bar püskürtme basıncı, 29,05 kütleli hava/yakıt karışım oranında deneysel çalışma yürütmüştür. Bu karışım oranı için enjektörler 0,458 ms enerjilendirilmiş ve 4,95° KMA boyunca püskürtme yapılmıştır. Çalışmada püskürtme avansı ÜÖN öncesi 24° KMA ve 6° KMA aralığında 3° KMA'lık adımlar ile değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 6° KMA ve 9° KMA püskürtme avanslarında yanmanın pratik olarak tamamen genişlemede stroğunda gerçekleştiği söylenebilir ve pik silindir içi basınç değerleri oldukça düşük değerler almıştır. 18° KMA, 21° KMA ve 24° KMA püskürtme avanslarında ise pik silindir içi basınç değeri birbirine yakın seyretmiştir. 6° KMA püskürtme avansında elde edilen TG süreci 13° KMA civarında gözlemlenmiş, ardından 15° KMA püskürtme avansına kadar 12° KMA civarında birbirine çok yakın TG değerleri ortaya çıkmış, ardından püskürtme avansı arttıkça düzenli olarak TG süreci artış göstermiş ve 25° KMA püskürtme avansında yaklaşık 15,5° KMA TG gözlemlenmiştir. Yanmanın başlangıcından maksimum silindir içi basıncın elde edilmesine kadar geçen süre 6° KMA püskürtme avansında 6° KMA civarındadır. Bu değer 15° KMA ile 21° KMA püskürtme avansı aralığında 4° KMA değerine düşmüş ve 24° KMA püskürtme avansına gelindiğinde ise belli belirsiz bir artış ortaya çıkmıştır.

Kiplimo vd. [118] 781,7 cm³ silindir hacimli, tek silindirli bir motorda farklı püskürtme stratejilerinin yol açacağı çıktıları incelemiştir. Yapılan çalışma 1000 dev/dak motor hızında, 80 MPa ve 140 MPa olarak iki farklı püskürtme basıncında, 5° KMA adımlar halinde 10° KMA ile 30° KMA püskürtme avans değerleri arasında gerçekleştirilmiştir. Hava fazlalık katsayısı ise 5 olarak belirlenmiş ve püskürtme tek fazda gerçekleştirilmiştir. %0 EGR uygulanması şartında 140 MPa püskürtme basıncında püskürtme süreci 7,4° KMA sürmüştür. Bu şartta ortaya çıkan TG süreçlerine bakıldığında 10° KMA püskürtme avansında 5° KMA altında TG, 15° KMA püskürtme avansında 6° KMA üzerinde TG, 20° KMA püskürtme avansında 8,5° KMA dolaylarında TG, 25° KMA püskürtme avansında 11° KMA üzerinde TG, 30° KMA püskürtme avansında 15° KMA üzerinde TG gözlemlenmiştir. Çalışmadaki bu verilere göre TG süreçlerine bakılarak 20° KMA üzeri püskürtme

avanslarında püskürtme sürecini aşan TG değerleri elde edildiği için, yani püskürtmenin sonra ermesiyle yanmanın başlangıcı arasında pozitif faz açısı olduğu için, 20° KMA püskürtme avansı PCCI geçiş bölgesi olarak tanımlanmıştır. Farklı püskürtme zamanlamaları için penetrasyon derinlikleri ölçülmüş ve püskürtme başlangıcından 1° KMA sonrasında 10° KMA püskürtme avansında elde edilen penetrasyon derinliğine göre 15° KMA püskürtme avansında 2 kat, 30° KMA püskürtme avansında da 3 kata yakın penetrasyon derinliği elde edilmiştir. Püskürtme sonlandıktan 2° KMA sonrasına bakıldığında ise aradaki fark büyük oranda ortadan kalkmış ve püskürtme başlangıcından 4° KMA sonrasında gidildiğinde aradaki fark artık belirsizleşmiştir. 20° KMA'ya kadar olan püskürtme avanslarında 80 MPa püskürtme basıncı, 140 MPa püskürtme basıncına göre daha uzun TG sürecine yol açarken 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avanslarında bu fark büyük oranda ortadan kalkmıştır. Püskürtme avansı arttıkça %50'lik ısının açığa çıktığı nokta da bu durumdan etkilenmektedir. 10° KMA püskürtme avansı ve 140 MPa püskürtme basıncında ÜÖN öncesi 2° KMA dolaylarında, 80 MPa püskürtme basıncında ÜÖN civarında yakalanan %50'lik ısı girişi, 30° KMA püskürtme avansında ÜÖN öncesi 11° KMA bandında gözlemlenmiş ve püskürtme avansı arttıkça püskürtme basıncına duyarlılık azalmıştır.

Terragosa vd. [74] yaptıkları çalışmada direk enjeksiyonlu, dört silindirli, 18 sıkıştırma oranına sahip bir motor kullanmış ve püskürtme basıncını 800 bar değerinde sabit tutmuşlardır. Püskürtme avansı 18° KMA ile 38° KMA arasında değiştirilmiştir. Çalışmada elde edilen verilere göre, püskürtme avansı arttırıldıkça silindir içi pik basınç değeri düşüş göstermiş ve ÜÖN öncesi basınç artışı daha büyük değerlere ötelenmiştir. Ancak birim KMA başına basınç artışı ($dP/d\alpha$) düşük püskürtme avanslarında daha yüksek seyretmiş durumdadır. Bir başka deyişle yüksek püskürtme avanslarında basınç artış gradyanı ($dP/d\alpha$) değerleri daha küçük değerler almıştır.

Diwakar ve Singh [119] tek silindirli, 0,825 litre strok hacimli, OHYBPS'li bir dizel motoru kullanarak deneysel ve matematiksel bazlı çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada yer alan bir senaryoya göre 1890 dev/dak motor hızı, 4 bar OEB, 800 bar püskürtme basıncı, 21,6 mg/strok yakıt enjeksiyon miktarı, 135 kPa doldurma basıncı şartlarında püskürtme avansı 15° KMA ile 35° KMA aralığında değiştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre püskürtme avansı arttıkça 27,5°

KMA püskürtme avansına kadar silindir içi pik basınç değeri artış göstermiş, ardından yaklaşık sabit bir banda oturmuştur. Isı açığa çıkış hızlarına bakıldığında 15° KMA püskürtme avansında 100 J/°KMA ısı açığa çıkış hızı gözlemlenirken bu değer 25° KMA püskürtme avansında 150 J/°KMA değerine çıkmış ardından yaklaşık sabit seyretmiştir.

Jochin vd. [80] 1,9 litre silindir hacmine sahip, 4 silindirli, 17,5 sıkıştırma oranlı bir motorda dizel yakıtı kullanarak, 2000 dev/dak motor hızında ve farklı motor yüklerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Püskürtülen yakıt kütlesi tek fazda 11,25 mg/strok olarak, EGR oranı %25'te sabit tutularak, püskürtme avansının 5° KMA ile 45° KMA arasındaki değişimi incelenmiştir. 5° KMA püskürtme avansında yanma başlangıcı ve basınç artışının ÜÖN sonrasına kaydığını, 35° KMA püskürtme avansında değerinde en yüksek pik basınç değerinin elde edildiği, ardından silindir içi pik basınç değerlerinde tekrar düşüş yaşandığı, 45° KMA püskürtme avansında silindir içi pik basınç verilerine bakıldığında 25° KMA ve 35° KMA püskürtme avanslarına göre daha küçük sıkıştırma işine ihtiyaç duyulduğu görülmüştür.

Deep vd. [120] 17,5 sıkıştırma oranına sahip, 661 cc³ silindir hacimli bir motorda püskürtme basıncını 200 bar, 250 bar ve 300 bar olarak, püskürtme avansını da 21° KMA, 23° KMA ve 25° KMA olarak B20 kastor biyodizel kullanarak deneysel çalışmalar yürütmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ÜÖN'ye daha yakın başlatılan enjeksiyonlarda, püskürtme basıncının efektif verim üzerindeki etkisi belirginken, büyük püskürtme avanslarında bu skalada daha yüksek püskürtme basınçlarında efektif verim üzerinde bir iyileşme sağlanamamıştır.

Babu vd. [121] tek silindirli, 553 cc³ strok hacmine sahip, 16,5 sıkıştırma oranlı bir dizel motorunda ayçiçeği atık yağından üretilmiş biyodizel kullanarak farklı motor yüklerinde ve farklı püskürtme basınçlarında, püskürtme avansının verim üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada %0, %10, %25, %50, %75, %100 motor yüklerinde, püskürtme basıncı 100 barlık artımlar ile 200 bar ile 600 bar arasında değerler almıştır. Püskürtme avansı ise 19° KMA, 21° KMA, 23° KMA, 25° KMA ve 27° KMA değerlerini almıştır. Termik verim değerlerine bakıldığında %10 motor yükünde ve düşük püskürtme basınçlarında en düşük termik verim 19° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. Püskürtme basıncı arttıkça bu farklılık oldukça dar küçük bir farka sıkışmıştır. %25 ve %50 motor yüklerinde püskürtme

avansının verime etkisi nispeten düşük seyretmiş, ancak artan motor yüklerinde püskürtme avansının değişimine bağlı ortaya çıkan verim farklılıkları belirginleşmiştir. Püskürtme basıncı artışı da verim farklılıkları üzerinde belirgin farkları daha küçük değerlere indirgemıştır.

Kumar vd. [122] tek silindirli, 17,5 sıkıştırma oranlı bir dizel motorunda biyodizel kullanarak farklı motor yükü ve püskürtme avanslarının termik verim ve silindir içi basınç verileri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan testler 1500 dev/dak sabit motor hızında ve 205 bar sabit püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir. Motor yükü %0 ile %100 arasında %20'lik adımlar halinde değiştirilmiş, püskürtme avansı ise 19° KMA, 23° KMA 27° KMA ve 30° KMA olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre motor yükü arttıkça silindir içi pik basınç değeri tahmin edileceği üzere artış göstermiştir. Aynı motor yükü için farklı püskürtme avansları ile çalışılması durumunda elde edilecek pik basınç değeri %0, %20 ve %40 motor yükü şartlarında birbirine oldukça yakın seyrederken bu değeri aşan motor yüklerinde püskürtme avansının değişimine bağlı ortaya çıkan pik basınç değerindeki farklılık belirginleşmiştir. Efektif termik verim değerleri açısından da benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Buna ilaveten düşük motor yüklerinde ve yüksek püskürtme avanslarında belli belirsiz olarak daha yüksek verim artışı gözlemlenmiştir. Buna mukabil yüksek motor yükleri ve tam yükte bu eğilim ortadan kalkmıştır.

Kiplimo vd. [86] yaptıkları çalışmada aşırı doldurmalı 781 cm³ silindir hacmine sahip, tek silindirli bir motorda 80 MPa ve 140 MPa püskürtme basınçlarında, tek fazlı püskürtme yaparak, püskürtme avansını 2° KMA ile 40° KMA arasında değiştirmiştir. Her iki püskürtme basıncında da değişen püskürtme avansına bağlı olarak ortaya çıkan indike verim değerleri 10° KMA ve 25° KMA püskürtme avans aralığında kayda değer farklılıklar barındırmaktadır. Ancak 25° KMA ile 35° KMA püskürtme avansı aralığında iki püskürtme basıncı arasındaki indike verim farkları birbirine oldukça yakın seyretmektedir. Farklı olarak %0 ve %40 EGR için yapılan çalışmada 15° KMA altındaki püskürtme avanslarında indike verimde ciddi düşüşler gözlemlenmiş, bu değerlerin üzerindeki püskürtme avanslarında ise indike verim değerleri nispeten birbirine yakın değerler almıştır.

Yoon vd. [123] tek silindirli, 373,3 cc³ silindir hacmine sahip ve OHYBPS'li bir dizel motorunda farklı sıkıştırma oranı ve farklı enjektör koni açısının PCCI yanma

üzerindeki etkilerini gözlemlemiştir. Enjektör demet koni açısı 60° ve 156° olarak iki değer almaktadır. İlk şartta 17,8 sıkıştırma oranı ve 156° enjektör demet koni açısı, ikinci şartta ise 15 sıkıştırma oranı ve 60° demet koni açısı bulunmaktadır. Çalışmada püskürtme avansı 0° KMA ile 70° KMA gibi geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. Küçük enjektör koni açısında püskürtme avansı artışına bağlı indike verim düşüşü oldukça hızlı seyretmekte ve özellikle 40° KMA sonrası bu durum belirginleşmiştir. Daha dar demet koni açısında ise bu değer 60° KMA püskürtme avansına kadar uzamış, özellikle 10° KMA ile 50° KMA püskürme avans değeri aralığında indike verim değerleri birbirine oldukça yakın seyretmiştir. İlk şarta göre, 20° KMA'dan daha büyük püskürtme avanslarında sıkıştırma oranının daha düşük olmasına rağmen ikinci şartta indike termik verim değeri daha büyük değerler almıştır.

Wei vd. [124] yapmış oldukları deneysel çalışmada 17,5 sıkıştırma oranına sahip, 2982 cc³ silindir hacimli sahip bir motorda, 1800 dev/dak motor hızı, %30 motor yükü, 110 kPa doldurma basıncı, 110 MPa püskürtme basıncında testler gerçekleştirmiştir. Testlerde püskürtme avansı ÜÖN öncesi 25° KMA'dan ÜÖN sonrası $2,5^\circ$ KMA'ya kadar değiştirilmiştir. Bu aralıkta püskürtme avansı azaldıkça basınç-krank açısı grafiği altında kalan alan azalmaktadır. 25° KMA püskürtme avansında 10 MPa bandında pik basınç gözlemlenirken, $2,5^\circ$ KMA gecikmeli püskürtme şartında 6 MPa bandında pik basınç gözlemlenmiştir. Tutuşma gecikmesi için en ideal şart 7° KMA ile 8° KMA bandındaki TG süreciyle $12,5^\circ$ KMA ve 15 KMA püskürtme avanslarında elde edilmiştir. 25° KMA püskürtme avansında TG 13° KMA, $2,5^\circ$ KMA gecikmeli püskürtme şartında ise 15° KMA TG süreci gözlemlenmiştir. Efektif termik verim değeri %35 ile $12,5^\circ$ KMA püskürtme avansında en yüksek değerini almıştır. Skala içerisindeki uç püskürtme başlangıç zamanlamalarında efektif verimde %31 seviyesine kadar düşüş gözlemlenmiştir.

Ramalingam ve Mahalakshmi [125] hava soğutmalı, 661 cc³ deplasman hacimli, 17,5 sıkıştırma oranına sahip bir dizel motorunda, tam yük şartında püskürtme avansını 15° KMA ile 25° KMA aralığında 2° KMA adımlarla, püskürtme basıncını da 300 bar ile 600 bar arasında 100 barlık adımlar ile değiştirmiş ve termik verim davranışını incelemiştir. Konvansiyonel motorin için elde edilen sonuçlara bakıldığında düşük püskürtme basınçlarında püskürtme avansı arttıkça termik verimde iyileşmeler görülürken artan püskürtme basınçlarında püskürtme avansına

bağımlılığın azaldığı görülmüş, fazlaca arttırılan püskürtme basıncında ise efektif verimde bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. 300 bar püskürtme basıncında ve 15° KMA püskürtme avansında %32 bandında olan efektif termik verim 25° KMA püskürtme avansında %39 seviyesine çıkmıştır. 400 bar püskürtme basıncında ve 15° KMA püskürtme avansında %36 olan efektif verim 25° KMA püskürtme avansında %39 seviyesine çıkmıştır. Ancak daha da artan püskürtme basınçlarında, püskürtme avansının artışı ile belirgin verim artışı gözlemlenememiştir. 500 bar püskürtme basıncında ve 15° KMA püskürtme avansında %38'in biraz altında olan efektif verim 17° KMA püskürtme avansında %38'in biraz üzerine çıkmış ancak püskürtme avansının daha arttırılmasıyla belirgin efektif verim farklılıkları gözlemlenememiş olup birbirine yakın efektif verim değerleri görülmüştür. Diğer şartlar sabit kalmak koşuluyla 600 bar püskürtme basıncında, tüm püskürtme avanslarında 500 bar püskürtme basıncına kıyasla %2 bandında efektif verim düşüşü ortaya çıkmıştır.

Kumar ve Saravanan [126] tek silindirli, doğal emişli, 700 cc³ silindir hacimli, 17,5 sıkıştırma oranına sahip bir motorda 21 MPa püskürtme basıncı, 1500 dev/dak motor hızı ve 5,3 bar OEB şartında, hacimce %15 dimetil karbonat (DMC) ve motorin içeren yakıt karışımı ile çalışma yürütmüştür. Çalışmada püskürtme avansı 21° KMA, 23° KMA ve 25° KMA değerlerindedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre basınç-krank açısı ve ısı açığa çıkış hızı grafiklerine bakıldığında püskürtme avansı artışının yanma sürecini uzattığı gözlemlenmektedir. Dahası bu çalışmaya özgü olarak püskürtme avansı arttırıldıkça daha büyük pik basınç değerleri elde edilmiştir. Termik verim değişimlerine bakıldığında DMC15 kullanımı ile termik verimin konvansiyonel motorin kullanımına göre bir miktar düştüğü gözlemlenmektedir. Ancak üç farklı EGR oranı olan %0, %15, %30 EGR şartlarında püskürtme avansı arttıkça termik verimde az da olsa iyileşme gözlemlenmiştir. EGR'nin %30'a kadar arttırılması ile efektif termik verimdeki düşüş 25° KMA püskürtme avansında yaklaşık olarak %39'dan %36'ya gerilemekten ibarettir. Püskürtme avansının arttırılması tüm EGR oranlarında düzenli olarak egzoz gaz sıcaklıklarının bir miktar artmasına yol açmıştır.

Kim vd. [127] 373,3 cc³ silindir hacimli, OHYBPS enjeksiyonlu, 17,8 sıkıştırma oranına sahip bir motorda farklı püskürtme avansı ve enjektör demet koni açılı enjektörler ile çalışma yürütmüştür. Çalışma 600 bar ve 1200 bar olarak iki farklı

püskürtme basıncı, 6 mg/strok enjeksiyon kütlesi, 1400 dev/dak motor hızı, 10° KMA, 20° KMA, 30° KMA ve 40° KMA püskürtme avans değerleri altında 60° ve 156° demet koni açılı enjektörler için sonuçlar elde etmişlerdir. Çalışmada elde edilen sonuçlarına göre enjektör demet koni açısı azaldıkça daha büyük püskürtme avanslarında silindir içi pik basınç artış göstermiştir. Maksimum yanma basıncı özellikle 10° KMA püskürtme avansı harici senaryolarda dar enjektör demet koni açısı ile artış göstermiştir. Bu değer 40° KMA püskürtme avansında 10 bar'ın üzerinde, 30° KMA püskürtme avansında 5 bar'ın biraz üzerinde, 20° KMA püskürtme avansında 5 bar'ın biraz altında pik basınç artışına yol açmıştır. Maksimum ısı açığa çıkış hızı değerleri de maksimum basınç verileri ile paralellik görülmüştür. TG süreçleri değerlendirildiğinde 40° KMA püskürtme avansında 60° demet koni açılı enjektör kullanımıyla 32° KMA ile 33° KMA bandında TG süreci takribi 23° KMA ile 24° KMA arasında, 20° KMA püskürtme avansında ise bu değer yaklaşık 12° KMA değerinden yaklaşık 9° KMA TG süresine düşmüştür. OİB değerleri açısından bakıldığında 40° KMA püskürtme avansında 156° demet koni açılı enjektörler aynı koşullarda 1 bar OİB çıktısı verirken 60° demet koni açılı enjektör ile 2,5 bar üzeri OİB değeri elde edilmiştir. 20° KMA püskürtme avansında bu değerler sırasıyla 2 bar, 2,6 bar civarı, 10° KMA püskürtme avansında ise 2,3 ve 2,7 bandında seyretmiştir. ÜÖN'de yapılan püskürtme sonucunda iki enjektör kullanımı arasındaki fark artmış ve 60° yakıt koni açılı enjektörlerin getirisi yükselmiştir.

Geng vd. [128] 6 silindirli, aşırı doldurmalı, 7,8 litre strok hacimli, 17,5 sıkıştırma oranlı bir dizel motorunda farklı püskürtme basınçları ve püskürtme avanslarının etkisini incelemek üzere deneysel çalışma yürütmüştür. Çalışmada püskürtme avansı 2° KMA ile 18° KMA arasında, püskürtme basıncı ise 70 MPa ve 100 MPa olarak belirlenmiştir. Motor yükü 0,32 MPa, 0,81 MPa ve 1,21 MPa değerlerindedir. Yakıt olarak konvansiyonel motorin ve F-T sentezi ile elde edilen sentetik dizel yakıtı kullanılmıştır. 1400 dev/dak motor hızı ve 100 MPa püskürtme basıncında konvansiyonel motorin için elde edilen sonuçlara bakıldığında 0,32 MPa OEB şartında 2° KMA püskürtme avansında 6° KMA'nın biraz üzerinde seyreden TG, 10° KMA püskürtme avansında 5° KMA değerinin biraz üzerinde, 18° KMA püskürtme avansında da 7° KMA bandında seyretmiştir. 0,81 MPa OEB şartında 2° KMA püskürtme avansında 4° KMA bandında seyreden TG süreci 10° KMA

püskürtme avansında kadar pek bir değişiklik göstermezken 18° KMA püskürtme avansında 5° KMA TG ortaya çıkmıştır. 1,29 MPa OEB şartında ise TG süreci tüm püskürtme avanslarında 2° KMA ile 3° KMA arasında TG vermekte ve püskürtme avansı arttıkça TG süreci düzenli artış göstermiştir. 0,32 MPa OEB ve 2° KMA püskürtme avansında 260 g/KWh olan özgül yakıt tüketimi, 10° KMA püskürtme avansında 250 g/kWh değerine kadar düşmüş, 18° KMA püskürtme avansında ise tekrardan 260g/kWh değerine çıkmıştır. 1,21 MPa OEB şartında ise özgül yakıt sarfiyatındaki dalgalanmalar daha küçük değerlere sıkışmış ve 215 g/kWh bandında değerler ortaya çıkmıştır. Bu şartta ise en düşük özgül yakıt sarfiyatı yine 10° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir.

Dumitrescu vd. [129] tek silindirli, 2,44 litre strok hacmine sahip, 16,25 sıkıştırma oranlı bir dizel motorunda 900 dev/dak motor hızında, 150 MPa püskürtme basıncında, düşük motor yükü şartlarına karşılık gelen 2,6 bar ve 3,1 bar OEB değerinde püskürtme avansının ÜÖN'den 30° KMA'ya kadar 2,5° KMA adımlar ile değiştirmiş ve setan sayısı 28 ile 54,2 arasında yer alan yakıtlar için sonuçlar elde etmişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre genel olarak en büyük OİB 10° KMA püskürtme avansı civarında elde edilmiştir. Bu çalışmada setan sayısı 32'nin altında olan yakıtlar için 15° KMA altındaki püskürtme avansı verilerine yer verilmemiştir. Fakat bu püskürtme avansının hemen öncesinde, püskürtme avansının azalması ile %10 üzerinde OEB düşüşü görülmüştür. Nispeten yüksek setan sayılı yakıtların kullanılması durumunda püskürtme avansının değişimine bağlı olarak OEB değişimi sınırlı kalmıştır. Belirtilen tüm püskürtme avansı aralıklarında kararlı çalışabilen setan sayılı yakıtların sonuçlarına bakıldığında en yüksek OEB değerinin elde edildiği 10° KMA püskürtme avansına kıyasla, püskürtme avansının artırılması sonucunda, püskürtme avansının azaltılmasına kıyasla ortaya çıkacak olan OEB düşüşü daha makul seviyelerde seyretmiştir. Yüksek setan sayılı yakıtlarda tüm püskürtme avanslarında %50'lik ısı girişi daha erken elde edilirken düşük setan sayılarında %50'lik ısı girişi daha geç ortaya çıkmıştır. Bu durum TG'nin yanı sıra yanma hızları ile de ilgilidir. 30° KMA püskürtme avansında 50 ve üzeri setan sayılı yakıtlarda %50'lik ısı girişi ÜÖN öncesi 5° KMA ile 10° KMA arasında elde edilirken, düşük setan sayılı yakıtlarda ÜÖN sonrası 5° KMA civarında bu değerler elde edilmiş.

Lee vd. [130] 1500 dev/dak motor hızı, 45 MPa püskürtme basıncı, %45 EGR oranı, 0,36 yakıt eşdeğerlik katsayısında püskürtme avansını ÜÖN'den 30° KMA ÜÖN öncesine kadar değiştirerek deneysel çalışma yürütmüştür. Püskürtme avansı arttıkça TG sürecinin tahmin edileceği üzere artış sergilemiştir. Hatta PCCI bölgesinde püskürtme avansında gerçekleştirilen KMA cinsinden artım adımlarına kıyasla TG sürecinde KMA cinsinden daha büyük artışlar ortaya çıkmıştır. Bir başka deyişle PCCI bölgesinde püskürtme avansı arttıkça yanma ÜÖN'ye daha yakın bir bölgede başlamıştır. 20° KMA'dan daha büyük püskürtme avanslarında bu eğilim belirgin olarak gözlemlenmiştir. Yanma sürecinin ise 20° KMA püskürtme avansından sonra hızlı bir artış içerisine girdiği gözlemlenmiştir. PCCI rejimi baskınlaştıkça yani püskürtme avansı belli bir değerin üzerine çıkınca kapalı çevrimin pozitif iş alanı (gross-IMEP) düşüş göstermiş, eksik yanma kaynaklı enerji kayıpları artmış, ısı transfer miktarı azalmış, buna mukabil egzoz giden ısı artış sergilemiştir.

Liu vd. [131] 1081,8 cc³ silindir hacimli, 16 sıkıştırma oranına sahip bir sıkıştırma ateşlemeli motorda 1500 dev/dak motor hızında farklı yakıt ve yanma parametrelerinin manipülasyonu ile dizel DSY uygulamasına dönük olarak deneysel ve nümerik bazlı çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada enjeksiyon başlangıcı 65° KMA avanslı ve 5° KMA gecikmeli (ÜÖN sonrası) püskürtme aralığında manipüle edilmiştir. Çalışmanın bir kısmı konvansiyonel motorin kullanımına ait verilerin elde edilmesini kapsamaktadır. Bu sonuçlara göre 30° KMA değerinden büyük püskürtme avanslarında yanma verimindeki düşüşün gözle görülür bir hale geldiği, özellikle de 50° KMA püskürtme avansından sonra düşüşün hızlandığı görülmektedir. 35° KMA püskürtme avansında TG süreci 15° KMA civarında iken 65° KMA püskürtme avansında 55° KMA TG süreci gözlemlenmiştir. Bu iki veriye bakıldığında yanmanın, fazlaca arttırılmış püskürtme avansı neticesinde ÜÖN'ye daha yakın bir yerde başladığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Isı emisyonları ise 40° KMA püskürtme avansına kadar pek değişiklik göstermezken ve dar bir bantta değerler alırken, bu değeri aşan püskürtme avansında artış görülmüştür. Bu durum atomizasyonun zayıflığına bağlanabilir. Emme havası sıcaklığı arttıkça diğer şartlar sabit tutulduğunda ısı emisyonlarında iyileşme gözlemlenmiştir.

Qui vd. [20] yürüttükleri deneysel çalışmada dört silindirli, aşırı doldurmalı, OHYBPS enjeksiyon sistemine sahip, 17,5 sıkıştırma oranlı bir motorda, motor hızı 1500 dev/dak, püskürtme basıncı ise 100 MPa değerinde seçilmiştir. Püskürtme 18° KMA avanslı, 3° KMA avanslı ve 5° KMA gecikmeli (ÜÖN sonrası) olarak üç farklı koşulda gerçekleştirilmiştir. Motor yükü ise 0,43 MPa ve 0,86 MPa olarak iki farklı değer almıştır. EGR oranı ise %25 seçilmiştir. 0,86 MPa motor yükünde enjeksiyon zamanlamasının motor yüküne bağımlılığı nispeten düşük çıkmıştır. 18° KMA püskürtme avansında 7° KMA civarında TG, 3° KMA püskürtme avansında da 6° KMA TG gözlemlenmiştir. Ancak 0,43 MPa motor yükünde fark bir miktar daha açılmıştır. Özellikle gecikmeli püskürtmede iki yük şartı arasındaki fark artmaktadır. Püskürtmenin avanslı yapıldığı şartlarda, iki yük arasında 1° KMA gibi TG fark değerleri gözlemlenmişken 5° KMA gecikmeli püskürtme şartında 4° KMA TG süreç farkı gözlemlenmiştir. Çalışmanın kademeli püskürtme yapıldığı kısmında ana püskürtme zamanlaması 3° KMA ÜÖN öncesinde sabit tutularak pilot püskürtme ile ana püskürtme arasındaki faz açısı arttırılmıştır. Bu şartta yüksek yükte PM emisyonları belli belirsiz bir düşüş göstermiştir. Düşük yükte ise ciddi düşüşler sağlanmıştır, öyle ki 10° KMA olan pilot püskürtme ile ana püskürtme arasındaki faz açısı, 60° KMA değerine çıkartıldığında is emisyonları %75 oranında azalmıştır.

Wang vd. [132] 2 silindirli, 2,078 litre silindir hacimli, sıkıştırma oranı 17 olan bir motorda farklı püskürtme avanslarında konvansiyonel motorin ve farklı oranlarda, setan sayısı yüksek bir yakıt olan, dimetil eter (DME) ile motorinin yanma odasına gönderilmesi şartlarında deneysel çalışma yürütmüştür. Yapılan çalışmalar 3° KMA ile 10° KMA püskürtme avansı aralığında, 1300 dev/dak ve 1700 dev/dak motor hızında, 0,24 MPa ve 0,48 MPa OEB şartında gerçekleştirilmiştir. DME oranı enerjiği açısından %20, %30 ve %40 olarak değiştirilmiştir ki bu kütleli olarak daha büyük bir yüzdeliğe karşılık gelmektedir. Gerek konvansiyonel motorin gerekse yakıt karışımı uygulamasında püskürtme avansı arttıkça toplam PM konsantrasyonu düşüş göstermiştir. 1700 dev/dak motor hızı ve 0,48 MPa OEB şartında püskürtme avansının 3° KMA'dan 10° KMA'ya arttırılması ile konvansiyonel motorin için %40 civarı, enerji içeriği açısından %30 DME içeren örneklem için ise %50 civarı PM azalışı gözlemlenmiştir. Belirtilen motor yükleri

kısmi yük koşullarında olup motor yükünün 0,24 MPa OEB değerinden 0,48 MPa OEB şartına çıkartılması ile düşük miktarda PM artışı gözlemlenmiştir.

Singh ve Paul [OG240] tek silindirli bir motorda motor efektif güç çıkışını 3kW'ye sabitleyerek ve püskürtme basıncını 300 bar değerinde tutarak çalışma yürütmüştür. Çalışmada püskürtme avansı 15° KMA ile 30° KMA arasında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 15° KMA püskürtme avansında 20° KMA dolaylarında, 20° KMA püskürtme avansında 20,5° KMA dolaylarında, 25° KMA püskürtme avansında 25,7° KMA dolaylarında ve 30° KMA püskürtme avansında da 28° KMA dolaylarında TG süreci gözlemlenmiştir. Püskürtme avansının 15° KMA'den 20° KMA'ya çıkışıyla efektif verimde ciddi artış ortaya çıkmış, sonrasında ise püskürtme avansı arttıkça az da olsa termik verim artışı ortaya çıkmıştır. Her ne kadar termik verimde püskürtme avansı arttıkça bir artış gözlemlense de benzer eğilim egzoz gaz sıcaklıklarında da ortaya çıkmış ve püskürtme avansının artışı egzoz gaz sıcaklıklarını artırıcı etki göstermiştir. Her ne kadar 30° KMA püskürtme avansı büyük bir değer olsa da yüksek püskürtme avanslarında özgül NO_x emisyonu düşüşü gözlemlenememiştir. Fakat is opasitesinde iyileşmeler ortaya çıkmıştır.

Su vd. [114] 425cm³ silindir hacimli, tek silindirli, 15 sıkıştırma oranlı, OHYBPS'li sahip bir motorda konvansiyonel dizel yanması ve erken püskürtme şartlarındaki PM emisyonlarının yapısını irdelemiştir. Yapılan çalışma 1500 dev/dak motor hızında ve 600 kPa OİB şartında gerçekleşmiştir. PCCI stratejisinde tek fazda püskürtme yapılmış olup püskürtme basıncı 100 MPa değerindedir. Emme havası sıcaklığının 65° C, soğutucu akışkanın 80° C, yağlama yağı sıcaklığının 83° C'de sabit tutulduğu çalışmada dizel, biyodizel ve biyodizel-E20 (etanol) yakıtı ile çalışılmıştır. Farklı yakıtlar farklı oksijen içerikleri vermektedir. Konvansiyonel dizel yakıtının pratik bir yaklaşımla oksijen içermediği kabul edilebilir. Biyodizelde %10,8, biyodizel-E20 yakıtında ise %15,17 oranında kütleli olarak oksijen bulunduğu belirtilmiştir. Yakıtın farklı oksijen içeriğine sahip olması farklı PM emisyonlarını doğuracaktır. Çalışmada EGR oranı da değiştirilmiştir. Az önce belirtilen çalışma şartlarında ve motorda %36 EGR oranına kadar yanma veriminde kayda değer değişimler söz konusu değildir. Özellikle konvansiyonel motorin kullanımında verim farkı %0,5'lik düşüşün altında kalmış, diğer yakıt örneklerinde ise %1 civarında seyretmiştir. Fakat EGR oranı bu sınırı aşarak %44'e doğru gittikçe hızlı düşüşler gözlemlenmiştir. EGR oranının %36'ya kadar

artışı FSN (filtre duman sayısı) olarak PM miktarını pek değiştirmemiş, bu değeri aşan EGR oranlarında konvansiyonel motorin kullanımı ile PM çok kızılı artış göstermiştir. %0 ile %36 EGR aralığında 0,4 FSN dolaylarında olan PM salımı %44 EGR oranında 1,8 FSN değerine kadar çıkmış, oksijence zengin diğer yakıtlarda ortaya çıkan artış daha düşük seyretmiştir. Püskürtme avansı arttıķa NO_x emisyonları düzenli olarak düşük göstermiştir. Konvansiyonel motorin için 13° KMA püskürtme avansında 0,9 g-NO_x/kg-yakıt emisyon gözlemlenirken 21° KMA püskürtme avansında 0,6 g-NO_x/kg-yakıt emisyon değeri llmştir.

Valentino vd. [133] dört silindirli, aşırı doldurmalı, 1910 cm³ silindir hacmine ve 17,5 sıkıştırma oranına sahip, OHYBPS'li bir motorda tek fazlı püskürtme yaparak deneysel çalışma yrtmştir. Yapılan çalışmada düşük kkrtli (<10 ppm) konvansiyonel motorin, hacmen %20 n-bütanol ve %40 n-bütanol ile motorin karışımları yakıt olarak kullanılmıştır. Farklı yakıt numunelerinin özelliklerine bakıldığında setan indeksi birbirine oldukça yakıt seyretmiş, yakıt yoğunlukları da çok yakın değerler almış, ancak bütanol kullanımı ile viskozite düşük göstermiştir. EGR uygulanmayan çalışmada püskürtme avansı 0° KMA ile 20° KMA aralığında değiştirilmiş, 80 MPa ile 160 MPa püskürtme basınçları için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 80 MPa ve 100 MPa püskürtme basınçlarında 8° KMA'dan büyük püskürtme avanslarında TG süreci püskürtme avansından pek etkilenmeyerek 8° KMA ile 9° KMA arasında seyretmiştir. Özgül yakıt sarfiyatı açısından bakıldığında en düşük değer tüm püskürtme basınçları için yaklaşık olarak 12° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir. Ancak 12° KMA zeri püskürtme avanslarında düşük püskürtme basıncı değerleri daha düşük özgül yakıt sarfiyatı ortaya koymuş, N'ye yaklaşan püskürtme avanslarında ise değişim eğilimi tamamen tersine dönmüş ve %10 dolaylarında özgül yakıt sarfiyatı düşüşü grlmştir. Bütanol ilavesi ile özgül yakıt sarfiyatı değerinde bir miktar artış, NO_x emisyonlarında ve PM emisyonlarında ise düşük gözlemlenmiştir.

Li vd. [28] dört silindirli, OHYBPS enjeksiyon sistemine sahip, aşırı doldurmalı, 4,75 litre silindir hacimli, sıkıştırma oranı 17,8 olan bir motorda deneysel çalışma yrtmştir. Deneyler 1450 dev/dak motor hızında ve %25 motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada EGR oranı %0 ile %40 arasında değişmektedir. Püskürtme basıncı 80 MPa değerinde olup püskürtme zamanlaması N ncesi 23° KMA ile N sonrası 8° KMA aralığında değiştirilmiştir. Çalışmada emme

havası 40° C, soğuma suyu 80° C’de sabitlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre belirtilen püskürtme başlangıcı aralığı içerisinde püskürtme avans yerine gecikmeli olarak yapılırsa pik sıcaklıklarda ciddi düşüşler gözlemlenmiştir. Silindir içi basınç değerlerinde ise daha dramatik farklar ortaya çıkmıştır. Çalışmada belirtilen püskürtme aralığında silindir içi pik basınç değeri ÜÖN’ye yaklaştıkça başlarda sabit kalmış ardından sürekli olarak düşüş göstermiştir. %0 EGR şartında 15° KMA ile 0° KMA püskürtme avans değeri aralığında TG birbirine oldukça yakın değerler almış, özellikle gecikmeli püskürtme olmak üzere bu aralık dışında TG süresi artış göstermiştir. Çalışma sonuçlarında göre özgül yakıt sarfiyatı ve termik verim için 5° KMA püskürtme avansı en iyi değerleri vermektedir. Bu noktadan uzaklaştıkça her iki parametre de kötüleşmektedir. Fakat püskürtme avansının arttırılması sonucunda elde edilen değişimleri bir miktar daha kabul edilebilir düzeydedir. CO ve THC emisyonları farklı püskürtme avanslarına bağlı olarak değişim gösterse de aynı mertebe içerisinde kalmaktadır. Gecikmeli yapılan püskürtmede ise bu iki emisyon katbekat artış göstermiştir.

Parks vd. [113] 4 silindirli, 1,7 litre silindir hacimli bir motorda 1500 dev/dak motor hızı ve 2,6 bar OEB şartında çalışma gerçekleştirilmiştir. Kısmi yükte gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarına göre %40 EGR oranına kadar motor veriminde oldukça küçük değişimler gözlemlenmiş, bu oran aşıldıktan sonra verim sert bir düşüş göstermiştir. Emisyon çıktıları PCCI modunda konvansiyonel moda göre oldukça dramatik NO_x düşüşü sağlamış, grafik üzerinde yapılan veri işlemeye göre NO_x emisyonları %80’in üzerinde bir oranda düşüş sergilemiştir. CO emisyonları ise takribi 2 katına çıkmış, THC ise %50’nin üzerinde artış göstermiştir. PCCI stratejisinde aldehit emisyonları ciddi artışlar göstermiştir.

Jain vd. [134] yaptıkları deneysel çalışmada tek silindirli, OHYBPS enjeksiyon sistemine sahip, sıkıştırma oranı 17,5 olan bir motorda çalışmıştır. Çalışmada yakıt püskürtme basıncı 400 bar, 700 bar ve 1000 bar olarak üç farklı değer almıştır. %15 EGR oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında ana püskürtme avansı 12° KMA ile 24° KMA arasında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ana püskürtme avansı arttıkça ve püskürtme basıncı azaldıkça yanma süreci artmıştır. Ana püskürtme avansı arttıkça efektif verim değeri azalmaktadır. Fakat püskürtme avansı arttıkça daha düşük püskürtme basınçlarında aynı efektif verim yakalanabilmekte ve hatta efektif verim değerinde iyileşme dahi

gözlemlenebilmektedir. Özgöl yakıt sarfiyatı açısından da aynı eğilim ortaya çıkmıştır. Ana püskürtme avansı arttıkça özgöl yakıt sarfiyatı artış göstermekte, ancak düşük püskürtme basınçlarına iniş mümkün olduğu için aynı veya bir miktar daha iyi özgöl yakıt sarfiyatı şartlarını yakalamak da farklı püskürtme basınçlarında mümkün hale gelmektedir. Bu çalışmada sabit püskürtme basıncı için ana püskürtme fazının avansı arttıkça özgöl CO emisyonları düşüş göstermiş, THC emisyonları artmış, hatta düşük püskürtme basınçlarında THC emisyonları %30 civarında artmış, ancak yüksek püskürtme basınçlarında bu durum perdelenmiştir. PM emisyonlarında ise dramatik düşüşler ile karşılaşmıştır. Püskürtme avansının 12° KMA den 24° KMA'na arttırılması sonucunda 400 bar püskürtme basıncında PM emisyonlarında yarıdan daha fazla iyileşme, 1000 bar püskürtme basıncında ise üç katın üzerinde iyileşme sağlanmıştır.

Szymkawicz ve Benajes [112] PCCI yanma stratejisini 1500 dev/dak motor hızında, 3 bar OİB şartında, yakıt enjeksiyonunu tek fazda ve 550 bar püskürtme basıncında gerçekleştirerek deneysel olarak incelemiştir. Çalışma tek silindirli, 0,4 litre hacimli ve sıkıştırma oranı 16 olan bir motorda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bir yandan %60'a kadar artan EGR oranının etkisi incelenirken, diğer yandan da püskürtme zamanlamasının etkisi incelenmiştir. Püskürtme zamanlamasının etkisi %50'lik ısı girişinin gerçekleştiği ana referans ile belirtilmiştir. Diğer şartlar sabit tutularak EGR etkisinin incelendiği kısımda EGR'nin sabit püskürtme başlangıcı için %0 ile %60 arasında değişimi sonucunda TG yaklaşık olarak 5° KMA artmış, yanma süreci ise 10° KMA artmıştır. %50'lik ısı girişinin gözlemlendiği bölge uygulanan stratejiye göre ÜÖN sonrası 6° KMA ile 15° KMA arasında konumlanmıştır. Bu aralıkta TG süreci 2 KMA artış göstermekte, yanma verimi %5'in üzerinde düşüş sergilemekte, özgöl CO emisyonları 2 katın, özgöl THC emisyonları ise 4 katın üzerinde artış sergilemiştir. Diğer şartlar sabit tutulduğunda EGR oranının fazlaca artışıyla özellikle 10 nm üzeri çaptaki PM emisyonları mertebe bazında artış göstermiştir.

Agarwal vd. [135] konvansiyonel dizel yanmasında püskürtme avansını 4° KMA'da, PCCI stratejisinde yakıtın %10'luk kısmını 35° KMA püskürtme avansında ve kalan kısmını 12° KMA püskürtme avansında, RCCI stratejisinde ise enerji içeriği açısından %50'lik ön karışımı metanol ile oluşturarak kalan kısmını 17° KMA püskürtme avansında gerçekleştirerek deneysel çalışma yürütmüştür.

Çalışma 1500 dev/dak motor hızında ve 500 bar püskürtme basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Motor yükü ise 1 bar, 2 bar, 3 bar ve 4 bar OEB olarak belirlenmiştir. Daha yüksek motor yüklerinde ise DSY şartında dizel vuruntusu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda en düşük PM salımı kütlesi PCCI stratejisinde ortaya çıkmış, bunun biraz üzerinde PM salım kütlesi RCCI stratejisinde ortaya çıkmıştır. Konvansiyonel dizel yanmasında ise ortaya çıkan PM, PCCI stratejisinde ortaya çıkan PM'ye kıyasla yaklaşık iki katı kadardır. Motor yükü arttıkça konvansiyonel dizel yanmasında özgül NO_x emisyonları düşüş göstermiştir. NO_x emisyonlarında, PCCI stratejisinde ise önceleri kayda değer düşüş, ardından da belli belirsiz bir düşüş ortaya çıkmıştır. Burada motor yükünün oldukça düşük oluşu sebebiyle artan OEB şartında oluşan değişimlerin, oransal etkisini kaybettiği söylenebilir. Fakat her şartta özgül NO_x emisyonları PCCI şartında konvansiyonel dizel yanmasına göre daha düşük çıkmıştır. Genel olarak PCCI şartında %20 ile %30 bandında daha düşük özgül NO_x düşüşü görülmüştür. RCCI stratejisinde ise özgül NO_x salımları bir miktar daha düşük değerler almış ve motor yüküne bağlılık biraz daha düşük düzeyde seyretmiştir. PM ise belirtilen OEB aralığında PCCI ve RCCI stratejisinde yaklaşık sabit seyretmiştir. PCCI stratejisinin bu açıdan bir miktar daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Chaichan [75] farklı püskürtme zamanlamasının performans ve emisyon değerleri üzerine etkilerini konvansiyonel motorin ve motorin ile etanol karışımları için deneysel olarak incelemiştir. Yapılan çalışma dört silindirli, doğal emişli, 3,666 l motor hacmine sahip ve sıkıştırma oranı 17 olan bir motorda gerçekleştirilmiştir. Püskürtme basıncı ise 400 bar değerindedir. Yakıt olarak konvansiyonel motorin ve hacimsel olarak %10, %30 ve %50'lik etanol ve motorin karışımları kullanılmıştır. Çalışmada püskürtme avansı 17° KMA ile 32° KMA aralığında değiştirilmiştir. 1500 dev/dak motor hızı, tam yük şartı ve %45 EGR oranında elde edilen özgül yakıt sarfiyatı verilerine göre %10'luk etanol ve motorin karışımı yüksek püskürtme avansı değerlerinde çalışmaya daha yatkındır. Genel olarak tüm yakıt karışımları, konvansiyonel motorine göre daha yüksek püskürtme avansı değerlerinde minimum özgül yakıt sarfiyatı değerleri vermiştir. Konvansiyonel motorin en düşük özgül yakıt sarfiyatını 20° KMA püskürtme avansında ortaya koymuştur. Bu noktadan uzaklaştıkça özgül yakıt sarfiyatı uç avans değeri olarak seçilen 32° KMA avans değerinde %25 civarında artış göstermiştir. Bu kötüleşmede

motor yükü ve yüksek EGR oranı önemli rol sahibidir. Etanol ve motorin karışımlarının performans açısından optimum püskürtme avansı değerinden uzaklaştıkça özgül yakıt sarfiyatındaki değişim daha küçük bir yüzdelik farka karşılık gelmiştir. Püskürtme avansı artışına bağlı olarak egzoz gaz sıcaklıklarında düzenli artış gözlemlenmiştir. Konvansiyonel motorin için 17° KMA ve 32° KMA püskürtme avans değerleri karşılaştırıldığında ölçüm noktasında takribi 200° C sıcaklık farkı tespit edilmiştir. Etanol ve motorin karışımlarında bu sıcaklık farkı daha küçük farklılıklar barındırmaktadır. THC emisyonları konvansiyonel motorin kullanımında 20° KMA püskürtme avansında en düşük değerini almıştır. 32° KMA püskürtme avansında 20° KMA püskürtme avansına kıyasla takriben 2 kat yüksek THC emisyonu gözlenmiştir. CO emisyonları açısından da birebir aynı eğilim gözlemlense de aradaki fark %50'nin altında kalmıştır.

Yun vd. [136] 15 sıkıştırma oranlı, 499 cm³ strok hacimli ve OHYBPS püskürtme sistemli bir motorda 1500 dev/dak motor hızında, 700 bar püskürtme basıncında, 3 bar OİB şartlarında deneysel çalışma yürütmüştür. Çalışmada 3 bar OİB şartı için 2° KMA ile 34° KMA arasında değişen püskürtme avansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre NO_x emisyonları ppm cinsinden 20° KMA püskürtme avansına kadar artarken ardından hızlı bir düşüşe geçmiştir. 20° KMA püskürtme avansında 1300 ppm bandında olan NO_x emisyonu 25° KMA püskürtme avansında 400 ppm olarak oluşurken, 34° KMA avans değerinde ise 100 ppm bandına kadar düşmüştür. PM emisyonlarının düşüşü için daha uzun TG sürecine ihtiyaç duyulması sebebiyle 25° KMA değerine kadar artış, ardından düşüş gözlemlenmiştir. Bu değer NO_x emisyonunun tepe noktasının elde edildiği püskürtme avansından 5° KMA daha büyüktür. Bu püskürtme avansının ardından kayda değer düşüş gözlemlenmiştir. THC ve CO emisyonları ise 10° KMA püskürtme avansında en küçük değerini alırken 15° KMA püskürtme avansı sonrasında belirgin artışa geçmiştir. 15° KMA ile 30° KMA püskürtme avansı aralığında THC emisyonları daha hızlı artış gösterirken, ardından CO emisyonları büyük bir artış hızına sahip olmuştur. Aynı şartlar altında TG süreçleri incelendiğinde 10° KMA'yı biraz aşan püskürtme avanslarında yanmanın başlangıcı ÜÖN sonrasında gerçekleşmektedir. 15° KMA ve daha büyük püskürtme avansında yanma ÜÖN öncesinde başlamaktadır. 30° KMA püskürtme avansında yanma başlangıcı 10° KMA ÜÖN olurken, 34° KMA püskürtme avansında ÜÖN

öncesi 7° KMA ile 8° KMA aralığında yanma başlamıştır. Bu değer 25° KMA püskürtme avansında yanmanın başladığı ana denk gelmektedir. Püskürtme basıncının TG sürecine etkisi incelendiğinde 700 bar, 1100 bar ve 1500 bar için sonuçlar elde edilmiş ve 25° KMA'dan küçük püskürtme avanslarında yüksek püskürtme basıncı daha kısa TG verirken, bu değerden yüksek avanslarda eser miktarda fark olduğu göze çarpmıştır.

Kim vd. [137] tek silindirli, 498 cc³ strok hacimli, sıkıştırma oranı 17,7 olan bir dizel motorunda 1800 dev/dak sabit motor hızında, çevrim başına 14 mg yakıtı 1000 bar püskürtme basıncı ve ÜÖN öncesi 6° KMA ile 24° KMA aralığında değişen püskürtme avanslarında silindir içerisine sevk etmiştir. 6° KMA püskürtme avansından başlayarak 18° KMA püskürtme avansına kadar 11° KMA civarında TG gözlemlenirken, 21° KMA püskürtme avansında 13,09° KMA, 24° KMA püskürtme avansında da 14,65° KMA TG gözlemlenmiştir. Özgül CO emisyonları 12° KMA püskürtme avansında en düşük değerini 3 g/kWh değerinin biraz üzerinde almakta, 6° KMA püskürtme avansında bu değer yaklaşık 5 g/kWh iken, 24° KMA püskürtme avansında 6 g/kWh değerine yaklaşmıştır. Özgül THC emisyonları 9° KMA püskürtme avansında en düşük değerini 1 g/kWh'nin bir miktar altında alırken, 24° KMA püskürtme avansında ise 2,5 g/kWh değerine yaklaşıldığı görülmüştür. Özgül NO_x emisyonları 21° KMA püskürtme avansında en yüksek seviyeye ulaşmış, ancak püskürtme avansının 3° KMA arttırılması ile yani 24° KMA püskürtme avansına getirilmesi ile %25 düşüş sağlanmıştır.

Choi vd. [138] yaptıkları çalışmada püskürtme avansını referans değerden 2° KMA adımlar ile 6° KMA farka kadar arttırmıştır. Bu şartta özgül NO_x emisyonlarında düzenli düşüşler ortaya çıkmıştır. 6° KMA daha erken yapılan püskürtmede takriben %20 özgül NO_x düşüşü ortaya çıkmıştır. Fakat 2° KMA arttırılan püskürtme avansı şartında PM emisyonunda belli belirsiz düşüş gözlemlenirken, ardından püskürtme avansı arttıkça FSN cinsinden PM emisyonu %30'a yakın artış göstermiştir. Bu aralıkta indike termik verim %46 civarından %42 civarına gerilemiştir. Yani %10 dolayında indike verim kaybı ortaya çıkmıştır. Pik ısı açığa çıkış hızı değerinde ise daha küçük bir azalma ortaya çıkmıştır. Referans değerde 1450 J/°KMA olan pik anlık ısı açığa çıkış hızı değeri püskürtme avansının 6° KMA arttırıldığı durumda 1380 J/°KMA dolaylarına gerilemiştir. EGR oranının artışına bağlı olarak da beklendiği üzere NO_x emisyonları düşüş göstermiş fakat PM

emisyonları FSN skalasına göre artış sergilemiştir. Referans değere göre %20 arttırılan EGR ile NO_x emisyonu 4 ile 5 kat civarında düşüş gösterirken, PM emisyonu yaklaşık 3 kat artış sergilemiştir.

Lieang vd. [139] yaptıkları çalışmada sıkıştırma oranı 17 olan bir dizel motorunda ve 105 MPa püskürtme basıncında çalışma yürütmüştür. Çalışmada püskürtme avansı 10° KMA, 30° KMA ve 50° KMA olarak belirlenmiştir. 30° KMA ve 50° KMA püskürtme avansı değerlerinde yakıt piston oyuğu dışına çıkmakta, hatta silindir cidarları ile temas etmektedir. 10° KMA püskürtme avansında 400 ppm dolaylarında olan NO_x emisyonları 30° KMA püskürtme avansında 300 ppm dolaylarına, 50° KMA püskürtme avansında ise 270 ppm seviyesine düşmüştür. THC için bu değerler sırasıyla 24 ppm, 17 ppm ve 13 ppm bandındadır. CO emisyonu ise %0,14, %0,06, %0,01 seviyelerindedir. Püskürtme avansı arttıkça oluşan PM emisyonu düşmekle beraber ortalama PM çapı da azalma göstermektedir.

Kim vd. [140] DSY ve konvansiyonel dizel yanmasının emisyon çıktılarına dönük farklılıklarını tayin etmeye dönük deneysel çalışma yürütmüştür. Çalışma 5 silindirli, silindir başına 539 cm³ strok hacmi olan, sıkıştırma oranı 17,5 olan bir dizel motorunda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada diğer dört silindir konvansiyonel şartta çalışırken beşinci silindir farklı bir kontrolcü ile DSY stratejisine göre çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma içerisinde motor yükü 0,45 MPa OİB şartında sabit tutulmuş, motor hızı 1200 dev/dak, yakıt enjeksiyonu 40 MPa basınçta ve tek fazda gerçekleştirilmiş, EGR oranı %60 alınarak, püskürtme avansının 40° KMA ve 18° KMA arasında değişiminin çıktıları incelenmiştir. Elde edilen verilere göre THC emisyonları 26° KMA ve 20° KMA püskürtme avansı aralığında en düşük değerini vermiştir. Püskürtme avansı küçüldükçe THC salımlarında hızlı bir artış gözlemlenmiştir. Diğer tarafta, püskürtme avansının 32° KMA'yı aştığında dramatik THC artışları gözlemlenmiştir. NO_x emisyonları bu bandta genel olarak birbirine yakın seyretmiş olmakla beraber püskürtme avansı küçüldükçe az da olsa artış eğilimi görülmektedir. PM emisyonları 20° KMA ve altındaki püskürtme avanslarında fazlaca yüksek olmakla beraber gereğinden fazlaca arttırılmış püskürtme avanslarında tekrardan artış eğilimine girmiştir.

Weber vd. [141] 1,9 litre, OHYBPS'ye sahip, sıkıştırma oranı 17,5 olan bir motorda deneysel çalışma yürütmüştür. Yapılan çalışma 2000 dev/dak motor hızında, 700

bar püskürtme basıncında ve $15 \text{ mm}^3/\text{strok}$ yakıt enjeksiyon kütlesinde gerçekleştirilmiştir, 4,5 bar OİB şartında, %0 EGR oranında ve enjeksiyon tetikleme enerjisi 40° KMA ile 5° KMA avans aralığında gerçekleşmiştir. Belirtilen enjektör enerjilendirme zamanlarına göre 5° KMA avans için konvansiyonel motorin kullanımı şartında yaklaşık olarak 3 g/kg-yakıt NO_x salımı gözlemlenmiştir. 30° KMA avansta enjektör enerjilendirilmesi durumunda bu değer 10 g/kg-yakıt değerine yaklaşmıştır. Ardından artan enjektör enerjilendirme avans değerlerinde hızlı bir düşüşe geçerek 40° KMA avans değerinde tetik geriliminin oluşturulması şartında 4 g/kg-yakıt NO_x salımı gözlemlenmiştir. PM emisyon miktarı 10° KMA avanslı tetikleme gerilimi oluşturulması şartında $0,1 \text{ g/kg-yakıt}$ mertebesinde iken daha büyük avans değerlerinde düşüşe geçmiş ve 35° KMA avans değerinde PM salımı %20 ile %25 seviyesine gerilemiştir. CO emisyonlarına bakıldığında 5° KMA avans değerinde 200 ppm bandında olan salım 15° KMA ile 25° KMA bandında 100 ppm altında yaklaşık sabit bir bandta değerler almış, ardından hızlı bir artışa geçmiş ve 40° KMA avans değerinde 600 ppm üzerine çıkmıştır. THC emisyonlarına bakıldığında CO ile benzer eğilim görülmekle beraber avansa karşı hassasiyet daha düşük seyretmiş, 5° KMA ile 25° KMA bandında yaklaşık olarak 4 g/kg-yakıt THC salımı gözlemlenirken 40° KMA avans şartında takribi olarak %50 artış ortaya çıkmıştır.

Horibe vd. [142] tek silindirli, 857 cc^3 silindir hacmine sahip, sıkıştırma oranı 15,5 olan bir motorda 120 MPa püskürtme basıncı altında 1300 dev/dak, 1800 dev/dak ve 2300 dev/dak motor hızlarında PCCI stratejisine yönelik çalışma gerçekleştirmiştir. 20 mm^3 yakıt sevki ve %45 EGR oranında, 5° KMA ile 40° KMA arasında değişen püskürtme avanslarında ve tek fazlı püskürtmede testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre 20° KMA püskürtme avansı dolaylarında her üç devir için de en düşük THC ve CO salımı ortaya çıkmıştır. Motor hızı yükseldikçe artan püskürtme avansına uyumun daha iyi olduğu gözlemlenmiş ve yüksek motor hızlarında artan püskürtme avansı ile CO ve THC emisyonlarındaki kötüleşme daha makul sınırlarda seyretmiştir. NO_x salımları 1300 dev/dak ve 1800 dev/dak motor hızlarında 20° KMA püskürtme avansı yakınlarında en yüksek seviyeye erişmiş, 2300 dev/dak için ise 30° KMA püskürtme avansı bandında en yüksek değere erişmiş, bu püskürtme avansı aşıldıktan sonra hızlı düşüş gözlemlenmiştir. OİB ve indike verim değerlerine

bakıldığında belirtilen aralıklarda motor hızı arttıkça OİB değerleri düşük püskürtme avanslarında birbirine oldukça yakın seyretmiş, artan püskürtme avanslarında ve yüksek hızda daha küçük bir değişim göze çarpmış, artan püskürtme avanslarında ve düşük hızlarda ise daha hızlı bir kötüleşme ortaya çıkmıştır.

Pradeep ve Madras [64] tek silindirli, hava soğutmalı bir dizel motorunun sıkıştırma oranını piston üst yüzeyinde modifikasyon ile 17,5'ten 15'e düşürmüş deneysel veriler elde etmiştir. Yapılan testlerde motor hızı 1500 dev/dak değerinde sabit tutulmuş, %20 ve %40 olmak üzere iki farklı motor yükü seçilmiş, EGR oranı %0 ile %50 arasında farklılık göstermiş, püskürtme basıncı 300 bar ile 900 bar arasında seçilerek tek fazda püskürtme yapılmıştır. Püskürtme avansı ise 12° KMA ile 50° KMA aralığındadır. Püskürtme basıncının 300 bar seçilerek %20 motor yükü, farklı EGR oranları ve farklı püskürtme avanslarında elde edilen sonuçlara göre %0 EGR şartında 12° KMA ve 20° KMA püskürtme avanslarında birbirine oldukça yakın TG süreci elde edilmiştir. 13° KMA ile 14° KMA arasında gözlemlenen bu TG süreci 30° KMA püskürtme avanslarında 20° KMA üzerine, daha da artan püskürtme avanslarında ise 30° KMA ve üzeri TG süreçlerine yol açmıştır. Aynı püskürtme avanslarında artan EGR oranlarıyla beraber TG sürecindeki artış ve püskürtme avansı arttıkça TG'deki uzama daha belirgin olarak gözlemlenmiştir. Yanma süreci ise %0 EGR şartında 12° KMA püskürtme avansında 30° KMA'nın biraz üzerindeyken, 20° KMA püskürtme avansında 35° KMA'nın biraz üzerine çıkmış ardından artan püskürtme avanslarında 45° KMA civarında bir banda oturmuştur. Artan EGR oranları püskürtme avansına bağlı yanma süreci değişimini daha küçük bir banda hapsetmiş ve püskürtme avansına karşı duyarsızlık doğurmuştur. 30° KMA püskürtme avansına kadar %0 EGR şartında birbirine çok yakın verim değerleri elde edilirken daha da artan püskürtme avansında termik verimde düşüş gözlemlenmiştir. Burada ortaya çıkan enteresan sonuç ise 40° KMA ve 50° KMA püskürtme avansında en yüksek verim değerinin %40 ve %50 gibi yüksek EGR şartlarında gözlemlenmiş olmasıdır. NO_x salımları %0 EGR şartında pik değerini 20° KMA püskürtme avansında 600 ppm dolaylarında göstermiş, bu değer 30° KMA püskürtme avansında 350 ppm dolaylarına, 40° KMA püskürtme avansında ise 100 ppm civarına kadar düşmüştür. Tahmin edileceği üzere EGR oranındaki artış ile NO_x salımında düzenli düşüşler görülmüş, yüksek püskürtme avansında da

EGR etkisi kendini belirgin şekilde göstermiştir. PM emisyonları ise %0 EGR şartında ve 30° KMA püskürtme avansında FSN skalasında pik değere ulaşmış, ardından püskürtme avansındaki artışla düşüşe geçmiştir. Püskürtme avansının 40° KMA değerinde sabit tutularak, püskürtme basıncının 300 bar değerinden 600 bar ve 900 bar değerine çıkartılmasıyla %20 motor yükü için bir miktar PM düşüşü gözlemlenmiş olup %40 motor yükünde bu düşüş daha da belirgin bir durumdadır. Yine püskürtme basıncının artmasıyla NO_x salımlarında düşüş, THC ve CO emisyonlarında artış görülmüştür.

Wang vd. [143] bir dizel motorunda 1500 dev/dak motor hızı, 30 mg/strok yakıt enjeksiyon miktarı, 80 MPa enjeksiyon basıncında farklı püskürtme avanslarında çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada püskürtme avansı 5° KMA ile 60 arasında değiştirilmiştir. Püskürtme avansı ve TG ilişkisi incelendiğinde karşımıza büyük püskürtme avanslarında birinci türevi daha büyük değerler alan bir eğri çıkmaktadır. Yani püskürtme avansı arttıkça TG'deki artış daha büyük değerlere doğru gitmektedir. Bu durumda, belli bir değer üzerinde püskürtme avansı ile çalışmak aslında ÜÖN'ye daha yakın başlayan bir yanmayı ortaya çıkartmıştır. Yanma veriminde ise 35° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra belirgin düşüşler ortaya çıkmıştır. 55° KMA üzerindeki püskürtme avanslarında ise yanma verimindeki düşüş son derece dramatik değerlere ulaşmış ve yaklaşık %75 bandına kadar gerilemiştir. Özgül THC emisyonları 25° KMA püskürtme avansına kadar az da olsa düşüş sergilemiş, fakat ardından büyük bir hızla artmaya başlamıştır. NO_x emisyonları, THC emisyonunun artmaya başladığı aralıktan bir miktar sonra düşmeye başlamıştır. PM emisyonlarının düşüşe geçmesi ise biraz daha büyük püskürtme avanslarında ortaya çıkmıştır.

Rohani vd. [144] yaptıkları deneysel çalışmada PCCI yanma stratejinde OİB, THC ve NO_x çıktılarını incelemiş, buna ilaveten, sabit bir OİB şartında konvansiyonel ve PCCI stratejisinde çalışmaya göre karşılaştırma yapmışlardır. Deneysel çalışma doğal emişli, OHYBPS'ye sahip, tek silindirli, 981 cc³ silindir hacimli ve sıkıştırma oranı 17,4 olan bir motorda gerçekleştirilmiştir. PCCI stratejisinde EGR oranı %60, enjeksiyon miktarı 30 mg/strok, enjeksiyon basıncı 160 MPa ve motor hızı 1400 dev/dak olarak belirlenmiştir. PCCI yanmaya dönük olarak tek kademede yapılan püskürtmede püskürtme avansı 20° KMA ile 40° KMA aralığında değiştirilmiştir. Grafikler üzerinden görüntü işlemeyle elde edilen sonuçlara göre OİB değerleri 20°

KMA püskürtme avansında 0,54 MPa, 25° KMA püskürtme avansında 0,56 MPa, 30° KMA püskürtme avansında 0,57 MPa, 35° KMA püskürtme avansında 0,59 MPa ve 40° KMA püskürtme avansında 0,57 MPa olarak seyretmiştir. OİB değerlerinden görüleceği üzere 25° KMA ile 40° KMA arasındaki püskürtme avanslarında oldukça küçük bir değişim söz konusudur. THC emisyonları ise 20° KMA püskürtme avansında 280 ppm, 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avansında 250 ppm dolaylarında, 35° KMA püskürtme avansında 320 ppm ve 40° KMA püskürtme avansında 350 ppm değerlerini almıştır. Çalışmada sunulan THC emisyonları 30° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra daha hızlı olmak üzere 25° KMA püskürtme avansından sonra kötüleşmektedir. NO_x emisyonları 20° KMA püskürtme avansında 10 ppm, 25° KMA püskürtme avansında 15 ppm, 30° KMA püskürtme avansında 80 ppm, 35° KMA püskürtme avansında 45 ppm ve 40° KMA püskürtme avansında 20 ppm olarak ölçülmüştür. Sonuçların bütününe bakıldığında ilgili çalışmada 30° KMA üzeri püskürtme avanslarının PCCI stratejisine dahil olduğu söylenebilir. Çalışmada yazarlar 35° KMA püskürtme avansını PCCI stratejisi optimum avans olarak belirlemiş ve konvansiyonel dizel yanması ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada OİB 0,59 MPa değerinde sabit tutulmuştur. PPCI stratejisinde 30 mg/çevrim ve 35° KMA püskürtme avansında yakıt enjeksiyonu gerçekleştirilmiş, konvansiyonel şartta ise 24 mg/çevrim ve 12° KMA püskürtme avansında enjeksiyon gerçekleştirilerek aynı OİB değeri elde edilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre aynı OİB değerini yakalamak için PCCI stratejisinde %25 daha fazla yakıt silindir içerisine yollanmıştır. Fakat PCCI stratejisinde %60 EGR uygulanırken, konvansiyonel çalışma şartında EGR uygulanmamıştır. Dolayısıyla ticarileşmiş ya da optimize edilmiş şartlarda bu denli yüksek yakıt sarfiyat farkları beklenmemektedir.

Cheng vd. [145] dört silindirli, sıkıştırma oranı 17,5 olan, OHYBPS'li sahip bir motorda püskürtme zamanlaması, püskürtme basıncı ve motor yükünün değiştirildiği şartlara dönük olarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada konvansiyonel motorine yönelik sonuçlar elde edildiği gibi n-bütanol ve motorin karışımlarına dönük da sonuçlar elde edilmiştir. B00, B10 ve B30 karışımlarına dönük olarak inceleme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 1500 dev/dak motor hızı, 0,43 MPa püskürtme basıncı ve 100 MPa enjeksiyon basıncında konvansiyonel motorin için en düşük TG süreci 8° KMA püskürtme avansında 9°

KMA olarak kaydedilmiş, TG süreci 33° KMA püskürtme avansında 16° KMA civarında ölçülmüş, gecikmeli yapılan püskürtmelerde ise TG artışı daha hızlı seyretmiş ve 5° KMA gecikmeli püskürtme şartında 16° KMA üzerinde TG gözlemlenmiştir. Genel olarak n-bütanol kullanımı ile takribi 2° KMA daha uzun TG kaydedilmiştir. PM emisyonları ise 3° KMA püskürtme avansında en yüksek seviyeyi gösterirken 20° KMA ile 26° KMA püskürtme avansı aralığında PM emisyonu yaklaşık 2/3 oranında azalmıştır. N-bütanol karışımları daha düşük PM emisyonu yaymış ve püskürtme avansına bağlı ciddi değişimler sergilememiştir. CO ve THC emisyonları ppm cinsinden elde edilmiş olup püskürtme avansının artışına bağlı kayda değer artış gözlemlenememiş, buna karşın gecikmeli püskürtmede dramatik artışlar göze çarpmaktadır. Termik verim ve özgül yakıt sarfiyatı değerleri incelendiğinde 3° KMA ile 25° KMA arasındaki püskürtme avanslarında oldukça yakın değerler göze çarpmaktadır. Ancak bu skalanın dışına çıktığında termik verim ve özgül yakıt sarfiyatındaki kötüleşme belirginleşmiştir. Püskürtme basıncının 100 MPa değerinden 140 MPa değerine kadar çıkartılması ile NO_x emisyonlarında belirgin değişimler gözlemlenememiştir. Ancak 20° KMA püskürtme avansına kadar PM ve CO emisyonları püskürtme basıncı artışıyla yer yer 3 ile 4 kata kadar düşüş göstermiştir. Belirtilen püskürtme basıncı aralığında 20° KMA püskürtme avansından sonra PM üzerinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiş ve püskürtme basıncının etkisi önemsizleşmiştir.

Li vd. [146] 2,982 litre silindir hacimli, 4 silindirli, sıkıştırma oranı 17,5 olan, OHYBPS'li bir sıkıştırma ateşlemeli motorda püskürtme avansının 22,5° KMA ve 2,5° KMA arasında değişiminin etkisini dört farklı yakıtı dönük olarak incelemiştir. Yakıt olarak konvansiyonel motorin, %30 benzin ve %70 motorin (D70G30) karışımı, %15 benzin ve %15 n-bütanol ile %70 motorin (D70G15B15) karışımı, %30 n-bütanol ve %70 motorin (D70B30) karışımları kullanılmıştır. Deneyler esnasında motor yükü %50'de sabit tutulmuş (0,63MPa OEB şartı) ve 1800 dev/dak motor hızında testler gerçekleştirilmiştir. Tüm yakıt örnekleri için en kısa TG süreci 12,5° KMA püskürtme avansında elde edilmiş, püskürtme avansının bu değerden uzaklaşması ile TG süreci uzamıştır. En düşük TG süreci konvansiyonel motorinde gözlemlenmiştir. D70G30 karışımı, konvansiyonel motorine yakın bir TG eğrisi çizerken n-bütanol ve motorin karışımında TG süreci konvansiyonel motorine göre 1,5° KMA ile 3° KMA daha uzun seyretmiştir. Düşük setan sayılı ve yüksek oktanlı

katkıları ile TG düşüş göstermiş, ancak kontrolsüz yanma fazında basınç gradyanı artmıştır. Yanmanın başlangıcı yakıtı göre farklılık gösterse de %50'lik ısı girişinin gerçekleştiği konum farklı yakıtlar için birbirine yakın seyretmiştir. Belirtilen tüm püskürtme avanslarında konvansiyonel motorin kullanımında %50'lik ısı girişi noktasına biraz daha geç ulaşılmıştır. Tüm yakıt örnekleri için en düşük özgül yakıt sarfiyatı 12,5° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. Buna ilaveten D70B30 karışımı tüm püskürtme avanslarında, diğer yakıt numunelerine kıyasla en düşük özgül yakıt sarfiyatını vermiştir. Termik verim ise n-bütanol ilavesi ile daha iyi sonuçlara evrilmiştir. Her ne kadar verim değerleri birbirine yakın olsa da en kötü sonuç konvansiyonel motorinde gözlemlenmiştir. Konvansiyonel motorin kullanımında özgül CO emisyonları daha yüksek, yakıt karışımlarında ise özgül THC emisyonları daha yüksek değerler almıştır. Konvansiyonel motorin kullanımında tüm püskürtme avanslarında PM oluşumunun ilk safhasında ortaya çıkan parçacıkların birleşmiş ve topaklanmış hali olan aglomere mod PM emisyonu daha yüksektir. Nükleotit mod PM için ise yüksek püskürtme avanslarında benzinli katkılarda daha yüksek nükleotit mod PM üretimi gözlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan yakıt karışımlarının püskürtme avansı değişimine bağlı PM emisyonu hassasiyeti konvansiyonel motorine göre daha düşüktür.

Horibe ve Ishiyama [147] tek silindirli, doğal emişli, 857 cc³ strok hacimli ve sıkıştırma oranı 15,5 olan bir dizel motorunda, 1800 dev/dak motor hızında, %25 ile %55 arasında değişen EGR oranlarında, 40° KMA ile 0° KMA püskürtme avansı aralığında incelemelerde bulunmuştur. Çalışmada püskürtme basıncının 1200 barda ve püskürtme miktarının tek fazda ve 20 mm³/strok olarak gerçekleştirildiği durumda 0,25 MPa OEB gözlemlenmiş, 10° KMA değerinden küçük püskürtme avansında düşük EGR oranları efektif verim açısından daha iyi çıktılar vermiş, 40° KMA püskürtme avansında yüksek EGR oranları daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak 10° KMA püskürtme avansına kıyasla efektif verimde kayda değeri düşüş gözlemlenmiştir. THC ve CO emisyonlarında artan EGR her daim daha yüksek emisyon salımları ortaya çıkartmıştır. THC emisyonları 10° KMA, CO emisyonları ise 20° KMA püskürtme avansından sonra artışa geçmiştir. NO_x emisyonları 20° KMA püskürtme avansı civarında en yüksek değerini alırken artan EGR oranıyla püskürtme avansının etkisi oldukça sönümlenmiştir. Çalışmada 20 mm³/strok (0,25MPa OEB), 25 mm³/strok, 30 mm³/strok ve 35 mm³/strok (0,45 MPa OEB)

olmak üzere dört farklı püskürtme kütlesi üzerinde de durulmuştur. Belirtilen püskürtme avans aralıklarında EGR sabit kalmak şartıyla motor yükü arttıkça her bir noktadaki termik verim artış göstermiştir. Artan motor yüküyle maksimum verimin elde edildiği püskürtme avansı az da olsa artış gösterse de 40° KMA olan uç püskürtme avans değeriyle aradaki verim farkı, yükün artışına bağlı olarak daha hızlı değişmiştir. Düşük püskürtme avansında artan verim ile diğer püskürtme avans bölgesinde verimde gözlemlenen düşüş daha küçük değişim oranlarıyla gerçekleşmiştir. EGR oranının %55, püskürtülen yakıt miktarının 19.2 mm³/strok değerinde sabit tutulup püskürtme basıncının 20 MPa adımlar ile 40 MPa ve 120 MPa aralığında değiştirildiği şartta daha küçük püskürtme avanslarında krank açısı başına basınç artış hızının farklılık gösterdiği, ancak yüksek püskürtme avanslarında bu farkın ortadan kalktığı, 20° KMA'dan küçük püskürtme avanslarında yüksek püskürtme basınçları daha yüksek efektif verim değerleri verirken daha yüksek püskürtme avans değerlerinde düşük püskürtme basınçlarının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. 30° KMA püskürtme avansında 40° MPa püskürtme basıncında elde edilen efektif verim değeri, 120 MPa püskürtme basıncında elde edilen değerden %3 daha yüksektir. THC emisyonlarında artan püskürtme avansı ile daha düşük püskürtme basınçlarında çalışmak, daha düşük emisyon konsantrasyonları sağlarken farklılıklar ciddi boyutlara ulaşamamıştır. CO emisyonlarında daha belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Büyük püskürtme avanslarında PM emisyonu açısından püskürtme avansının ciddi farklılıklar doğurmadığı, NO_x emisyonları açısından da küçük püskürtme avanslarında düşük püskürtme basınçlarının, büyük püskürtme avanslarında da yüksek püskürtme basınçlarının daha düşük NO_x konsantrasyonlarına yol açtığı gözlemlenmiştir.

Vanegas vd. [148] 4 silindirli, 1900 cm³ strok hacimli, sıkıştırma oranı 18,3 olan ve OHYBPS'li bir motorda konvansiyonel motorin kullanarak 2000 dev/dak motor hızı, 700 bar püskürtme basıncı, %30 EGR şartında 50° KMA ile 5° KMA arasında değişen püskürtme avanslarında, 100°, 120° ve 148° enjektör yakıt püskürtme demet açılı enjektörler ile deneysel çalışma yürütmüştür. Elde edilen sonuçlara göre özgül NO_x salımı küçük enjektör demet koni açıları daha büyük püskürtme avanslarında düşüşe geçmiştir. Belirtilen püskürtme avans aralıklarında 148° demet koni açısında pik NO_x salım değeri 6 g/kWh ile 30° KMA püskürtme avansında görülürken 40° KMA püskürtme avansında ve daha büyük püskürtme avanslarında

2 g/kWh değerine düşmüştür. 120° demet koni açısında pik NO_x değeri 35° KMA püskürtme avansında yaklaşık 10 g/kWh olarak, 100° demet koni açılı şartta 16 g/kWh civarında NO_x salımı ortaya çıkmış, püskürtme avansının bu değerlerden sonra artışıyla NO_x salımlarında hızlı düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. THC emisyonları 100° demet koni açısında daha geç artışa geçmiş ve daha düşük THC emisyonları gözlemlenmiştir. Özgül yakıt sarfiyatı açısından bir miktar daha karmaşık bir ilişki ortaya çıkmıştır. 10° KMA püskürtme avansında üç farklı enjektör demet koni açısında da 170 g/kWh civarında yakın özgül yakıt sarfiyatları gözlemlenmiştir. Bu değer en düşük yakıt sarfiyatının elde edildiği an olarak ortaya çıkmıştır. 148° demet koni açılı enjektör kullanımı durumunda püskürtme avansının artışıyla sürekli olarak ve diğer örneklere göre daha büyük bir değişim oranı ile özgül yakıt sarfiyatı artmış ve 50° KMA avans değerinde 260 g/kWh değeri gözlenmiştir. 120° demet koni açısında belirtilen püskürtme avans aralığının büyük çoğunluğunda daha iyi özgül yakıt sarfiyatı değerleri elde edilmiş ve püskürtme avansına bağlı değişimler de daha küçük değerler almış, belirtilen püskürtme avans aralığında belli dalgalanmalar gözlemlense de 50° KMA püskürtme avansında 180 g/kWh özgül yakıt sarfiyatı görülmüştür. 100° demet koni açılı enjektörlerde hiçbir zaman en düşük özgül yakıt sarfiyatı değeri elde edilememiş, artan püskürtme avanslarında büyük değişimler ortaya çıkmamış, 10° KMA püskürtme avansından sonra 45° KMA püskürtme avansında 210 g/kWh değeri üzerine çıkan özgül yakıt sarfiyatı, 50° KMA püskürtme avansına doğru gidildikçe tekrar düşüşe geçmiş ve 200 g/kWh değerinin altına düşmüştür.

Zheng vd. [149] 6 silindirli, 8,42 litre strok hacmine sahip, sıkıştırma oranı 17,5 olan, OHYBPS'li bir motorda farklı püskürtme basıncı ve püskürtme avansının etkilerini incelemiştir. Çalışmada motorinin tekrardan destilasyonu sonucunda dört farklı motorin elde edilmiştir. Yakıt numunelerinde kaynama noktası arttıkça aromatik hidrokarbon oranı artış göstermiş ve setan sayısı artmıştır. Yakıt numunelerinin ısı değerleri birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Dört farklı yakıt numunesinin setan sayıları 41, 44,4, 50,8 ve 59'dur. 1200 dev/dak motor hızı, %25 motor yükü ve 800 bar püskürtme basıncında püskürtme avansı arttıkça farklı yakıtların TG süreçleri arasındaki fark düşüş göstermiştir. Ancak püskürtme avansının azalmasıyla özellikle setan sayısı 40 olan numunede TG süreci hızla artmış, yüksek setan sayılı numunede ise TG süresinde artış daha kabul edilebilir

bir bantta kalmıştır. Aynı şartlarda motor yükü %75'e çıkarıldığında ise TG süreçleri arasındaki fark belirgin olarak gözlemlenememiştir. 1200 dev/dak motor hızı, 800 bar püskürtme basıncı ve %25 motor yükünde ve tüm püskürtme avanslarında düşük setan sayılı yakıtlar yüksek özgül yakıt sarfiyatı değeri vermektedir. Püskürtme avansı arttıkça aradaki fark %1 civarına düşmüş olsa da küçük püskürtme avanslarında %4 ile %5 bandına kadar yakıt sarfiyatı artışı göze çarpmaktadır. %75 motor yükünde ise aradaki fark belirsizdir. Hatta yüksek setan sayılı yakıt eser miktarda da olsa daha yüksek özgül yakıt sarfiyatına yol açmıştır. Yüksek setan sayılı yakıt kullanımında ve %25 motor yükünde daha düşük özgül NO_x emisyonları gözlemlenmiş olup püskürtme avansının değişimiyle NO_x değerleri düşük setan sayılı yakıt numunesine göre daha az düşüş göstermiştir. %75 motor yükünde ise püskürtme avansına hassasiyet tüm yakıt numuneleri için oldukça yüksektir. Yüksek setan sayılı yakıtta bir miktar daha fazla özgül NO_x emisyonu gözlemlenmiştir. Setan sayısı arttıkça hem düşük hem de yüksek yüklerde özgül THC emisyonunun püskürtme avansına bağlı değişimi daha kabul edilebilir sınırlarda değerler almıştır. Buna karşın düşük setan sayılı yakıtta püskürtme avansına bağımlılık yüksektir. Özgül CO emisyonları da özgül THC emisyonlarına benzer eğilim göstermektedir. Düşük motor yükü şartında püskürtme basıncının 800 bar ile 1600 bar arasında değişimiyle farklı püskürtme avansları için püskürtme basıncı düştükçe büyük püskürtme avanslarında daha düşük özgül yakıt sarfiyatı değerleri elde edildiği görülmüştür. Ancak püskürtme avansı küçüldükçe büyük püskürtme basınçlarında daha iyi özgül yakıt sarfiyatı değerleri gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, yakıtın setan sayısı arttıkça özellikle yüksek püskürtme avanslarında olmak üzere özgül yakıt sarfiyatı farklılıkları oldukça azalmıştır.

Minato vd. [150] tek silindirli, 1,298 litre strok hacimli, sıkıştırma oranı 16,5 olan bir motorda EGR olmaksızın, doğal emişli çalışma şartında motorin kullanımı ile farklı püskürtme basınç ve avansının etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma 100 MPa ve 400 MPa arasında değiştirilen püskürtme basınçlarında çalışma yürütülmüştür. 120 MPa püskürtme basıncında ve 10° KMA püskürtme avansında 0,6 ms ve 4° KMA TG, 20° KMA püskürtme avansında yaklaşık olarak 1,2 ms ve 7° KMA TG, 30° KMA püskürtme avansında 1,9 ms ve 12° KMA TG, 40° KMA püskürtme avansında 3,2 ms ve 19° KMA TG gözlemlenmiştir. 90 MPa

ve 240 MPa püskürtme basınçlarında ve ÜÖN ile ÜÖN öncesi 50° KMA arasında değişen püskürtme avanslarında elde edilen verilere göre 30° KMA püskürtme avansında özgül yakıt sarfıyatı en büyük değerini gösterirken artan püskürtme avanslarında tekrardan düşüş yaşanmıştır. Bu fark küçük püskürtme avanslarında oldukça belirsizdir. 30° KMA civarından itibaren artan püskürtme avanslarında yüksek püskürtme basıncının özgül CO ve THC emisyonlarını arttırıcı etkiye sahip olduğu görülmüştür. 20° KMA püskürtme avansında ise çok yakın değerler gözlemlenmiştir. 30° KMA üzerindeki püskürtme avanslarında püskürtme basıncı arttıkça daha düşük, 30° KMA altındaki püskürtme avanslarında ise püskürtme basıncı arttıkça daha yüksek özgül NO_x salımı gözlemlenmiştir. 30° KMA'dan büyük püskürtme avanslarında özgül NO_x emisyonlarındaki düşüş eğiliminde olan değişim hızı diğer bölgeye göre oldukça yüksektir.

Srivatsa vd. [151] doğal emişli, tek silindirli, 0,435 litre strok hacimli ve sıkıştırma oranı 21,2 olan bir motor kullanarak farklı püskürtme avanslarının performans ve emisyon değerlerine etkilerini incelemiştir. Yapılan deneyler 1800 dev/dak motor hızında ve kısmi yük şartında gerçekleştirilmiştir. Baz kalibrasyonda ilgili noktadaki tam yük şartında püskürtme avansı 12,5° KMA olup bu noktada 18 Nm tork elde edilmiştir. Püskürtülen yakıt kütlesi ise 48 mg/çevrim değerindedir. Karşılaştırma çalışmada ise püskürtme avansı 12,5° KMA ile 80° KMA arasında değiştirilmiş, çevrim başına 21 mg/strok yakıt püskürtülmüş ve bu şartta elde edilen en yüksek efektif tork değeri 9 Nm olarak ölçülmüştür. Bu şartlar altında elde edilen verilere göre 12,5° KMA püskürtme avansında yanmanın büyük oranda genişlemeye kaydığı ve pik basıncın düşüş gösterdiği görülmektedir. 20° KMA ile 35° KMA püskürtme avansı aralığında silindir içi pik basıncın elde edildiği krank konumu bir değişkenlik göstermemiş ve pik basınç değeri de yaklaşık 70 bar değer almıştır. Fakat bu değer 40° KMA püskürtme avansında 65 bar civarına inerken daha da artan püskürtme avanslarında 55 bar civarına kadar inmiştir. 17,5° KMA'dan büyük püskürtme avanslarının tümünde pik basınç ÜÖN öncesi 0 KMA ile 5° KMA aralığında elde edilmiştir. Maksimum ısı açığa çıkış hızı değeri de 17,5 KMA püskürtme avansına kadar artış göstermekte, ardından daha da artan püskürtme avansı neticesinde eğrinin tepe noktası düşüşe geçmekte ve daha pürüzsüz bir forma dönüşmektedir. 12,5° KMA püskürtme avansında 200 ppm yakınlarında olan NO_x emisyonu 25° KMA püskürtme avansına kadar artış

göstermiş ve 350 ppm bandına çıkmıştır. Püskürtme avans artışının devam etmesiyle beraber hızlı bir düşüş görülmüş ve 35° KMA püskürtme avansında 60 ppm bandında NO_x salımı ortaya çıkmıştır. 40° KMA'yi aşan püskürtme avanslarında salınan NO_x mertebe olarak oldukça azalmıştır. PM emisyonlarının ise 25° KMA püskürtme avansına kadar FSN skalasına göre düşüş gösterdiği, ardından 60° KMA püskürtme avansına kadar artışa geçtiği ve daha da artan püskürtme avanslarında tekrardan düşüş trendi gösterdiği görülmüştür. CO emisyonları ise 20° KMA püskürtme avansı dolaylarında en düşük değerine ulaşmış, sonrasında 60° KMA püskürtme avansına kadar yaklaşık 10 kat artış göstermiş, devamında tekrar düşüşe geçmiştir. THC emisyonları ise püskürtme avansı artışına bağlı olarak CO emisyonuna göre daha kuvvetli bir fonksiyon olarak 60° KMA püskürtme avansına kadar artış sergilemiş ardından ppm cinsinden sabit bir değerde kalmıştır.

Jia vd. [152] 0,5 hacimli, sıkıştırma oranı 16 olan bir motorda KIVA ortamında CFD çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada EGR oranı %50, doldurma basıncı 1,8 bar, doldurma havası sıcaklığı 360 K, püskürtme avansı ise 5° KMA ile 35° KMA arasında seçilmiştir. Enjeksiyon basıncı 150 MPa olup yanma odasına 21,8 mg/çevrim yakıt püskürtülmüştür. Bu şartlarda motor kısmi yükte ve OİB 5 bar değerindedir. Çalışmada püskürtme avansının değişimiyle en yüksek silindir içi pik basınç 25° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir. 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avansında bir miktar pik basınç düşüşü yaşanmış ve basınç-krank açısı eğrisi altında kalan alan bir miktar azalsa da bu fark makul bir seviyede olup 25° KMA'dan küçük püskürtme avanslarına göre daha iyi durumdadır. Püskürtme avansı arttıkça PM emisyonları düzenli olarak artış göstermiştir. Bunun yanı sıra emme supabı kapanma gecikmesini arttırmak PM emisyonlarını arttırıcı etki göstermiştir. Püskürtme avansının değişimine bağlı olarak CO emisyonlarında değişken bir trend gözlemlenmiştir. Püskürtme avansının artışına bağlı olarak özellikle 10° KMA püskürtme avansına kadar CO emisyonları kayda değer düşüş sergilemiştir. Fakat 30° KMA püskürtme avansı seviyesine gelindiğinde CO emisyonlarında tekrardan artış eğilimi gözlemlenmiştir. Çalışmada emme supabı kapanma gecikmesi de değiştirilmiş ve yakıtın cidarları ıslatma miktarı tayin edilmiştir. Sonuçlarda küçük püskürtme avanslarında emme supabı kapanma gecikmesi değerine bağımlılık gözlemlenememiştir. Ancak artan püskürtme avanslarında özellikle kapanma gecikmesi artınca dramatik artışlar saptanmıştır.

Su ve Yu [153] altı silindirli bir motorun tek silindire dönüştürerek farklı püskürtme avansları ve EGR oranlarında emisyon değerlerinin değişimini incelemiştir. Çalışmada kullanılan motorun sıkıştırma oranı 17'dir ve enjeksiyon basıncı 160 MPa değerinde sabit tutulmuştur. Doldurma basıncının 0,159 MPa ve g-OİB değerinin 0,5 MPa olduğu şartta EGR oranı %10 ile %70 arasında ve püskürtme avansı da 26° KMA, 30° KMA, 35° KMA, 40° KMA ve 45° KMA olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında 35° KMA, 40° KMA ve 45° KMA püskürtme avansında özgül NO_x değerlerinin oldukça düşük çıktığı ve EGR oranının bu emisyonlar üzerinde oldukça küçük bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiş, %60 ve üzeri EGR oranlarında ise püskürtme avansının etkisi EGR'nin çok baskın olması sebebiyle oldukça düşük kalmıştır. Fakat %40'ı aşmayan EGR oranlarında püskürtme avansının artırılması ile özgül NO_x düşüşü oldukça belirgindir. Özgül PM emisyonlarında püskürtme avansı artışına bağlı olarak düşüş gözlemlense de özellikle 45° KMA olmak üzere 40° KMA ve 45° KMA püskürtme avansında PM emisyonlarının tekrardan artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada püskürtme avansı arttıkça özgül CO ve THC emisyonlarının arttığı fakat EGR oranına karşı hassasiyetin, özgül CO emisyonlarında biraz daha belirgin olmak üzere, bu iki emisyon için daha düşük olduğu ve pek değişim göstermediği gözlemlenmiştir. Püskürtme avansı arttıkça tüm EGR oranlarında egzoz giden ısı artış gösterdiği gözlemlenmiş, cidarlara olan ısı transferi düşüş göstermiştir. Yanma verimi büyük püskürtme avanslarında EGR oranından pek fazla etkilanmemiştir. Fakat 26° KMA ve 30° KMA püskürtme avanslarında ve yüksek EGR oranlarında yanma verimi bozulmaya başlamıştır. %30 ve %40 gibi dizel DSY uygulamalarında yaygın kullanılan EGR oranlarında yanma esnasında enerji kaybı 45° KMA püskürtme avansında %3 seviyelerine ulaşmış iken, 26° KMA ve 30° KMA püskürtme avansında bu kayıp %1 ve biraz altındadır.

Jung vd. [154] tek silindirli, OHYBPS'li, 980 cc³ silindir hacimli, sıkıştırma oranı 17,4 olan bir motorda 1200 dev/dak motor hızında evsel atık yağlardan elde edilmiş biyodizel ve konvansiyonel motorin kullanarak deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Yürütülen çalışma farklı püskürtme avans ve basınçlarında düşük sıcaklıkta yanmanın çıktılarını incelemeye yöneliktir. Bu araştırma kapsamında üç farklı durum için inceleme gerçekleştirilmiştir. Birinci durumda 80 MPa püskürtme basıncı, 30 mg/strok yakıt enjeksiyonu, 5° KMA püskürtme avansı; ikinci durumda

50 MPa püskürtme basıncı, 40 mg/strok yakıt enjeksiyonu, 10° KMA püskürtme avansı; üçüncü durumda 160 MPa püskürtme basıncı, 30 mg/strok yakıt enjeksiyonu, 25° KMA püskürtme avansında gerçekleşmiştir. Buna ilaveten üçüncü durumda %60 EGR uygulanmış, diğer şartlarda EGR uygulanmamıştır. Yakıt miktarının eşit olması sebebiyle birinci ve üçüncü şartlardaki sonuçları değerlendirmek daha makul çıkarımlara olanak tanıyacaktır. Her iki durumda 8 MPa değerinin biraz altında pik basınç değeri elde edilmiş olup pik basıncın elde edildiği krank konumu da birbirine oldukça yakındır. Ancak krank konumu ve silindir içi basınç eğrilerine bakıldığında 5° KMA püskürtme avansında yapılan enjeksiyonda daha fazla indike iş elde edileceği açıkça görülmektedir. Buna karşın 25° KMA püskürtme avansında daha pürüzsüz bir dalga formunda ısı açığa çıkış hızı görülmektedir. Emisyonlara bakıldığında CO ve THC emisyonlarında mertebe seviyesinde farklılıklar bulunmaktadır. NO_x için birebir tersi durum söylenebilmektedir. Yani püskürtme avansının artışı sonucunda NO_x keskin bir düşüş sergilemiştir. PM emisyonlarında ise hem konvansiyonel motorinde hem de biyodizelde kabaca yarı yarıya bir düşüş meydana gelmiştir. Konvansiyonel motorin kullanımında PM düşüşü oransal olarak biyodizele göre daha fazladır. 25° KMA püskürtme avansında 5° KMA püskürtme avansına göre daha düşük FSN değerleri elde edilmiş olsa da 10 nm'den küçük çaptaki partikül sayısı bir miktar daha yüksek seyretmektedir. Fakat daha büyük parçacık dağılımlarında oldukça avantajlı duruma geçilmiştir.

Park vd. [68] tek silindirli, dört stroklu, doğal emişli, 510,7 cc³ strok hacminde, sıkıştırma oranı 17,1 olan, OHYBPS ile donatılmış bir dizel motorunda konvansiyonel motorin kullanımı ile farklı püskürtme stratejilerinin performans ve emisyon parametreleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmanın atıf yapılan kısımlarında püskürtme basıncı 500 bar olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bir bölümünde enjeksiyon tek fazda gerçekleştirilmiş ve 14 mg/strok yakıt 3° KMA'lık adımlar ile 0° KMA (ÜÖN'ye denk gelmektedir) ile 27° KMA püskürtme avansı arasında yanma odasına püskürtülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre 12° KMA üzerindeki püskürtme avanslarında yanma ÜÖN öncesinde başlamıştır. 18° KMA değerinden büyük püskürtme avanslarında ise ısı girişinin önemli kısmı ÜÖN öncesinde gerçekleşmiştir. Püskürtme avansı azaldıkça OİB ve OEB arasındaki fark düzenli olarak azalmıştır. Belirlenen aralıktaki özgül yakıt sarfiyatı değerlerine

bakıldığında alt ve üst değerin birbirine göre %15 farklılık içerdiği görülmektedir. 27° KMA püskürtme avansında maksimum basınç 85 MPa değerindedir. ÜÖN’de yakıt enjeksiyonunun başlatılması durumuna 45 - 50 bar seviyesinde silindir içi pik basınç elde edilmiştir. Bu şartta yanmanın ÜÖN sonrası 10° KMA’yı aşan bir gecikmeyle başladığı not edilmelidir. En düşük özgül yakıt sarfıyatının elde edildiği kısımda ise maksimum basınç değerinin 75 bar üzerinde olduğu görülmektedir. THC emisyonları 15° KMA püskürtme avansında en düşük seviyeyi göstermekle beraber uç avans değerlerinde 5 ppm seviyesinden 35 ppm seviyesine yükselmiştir. CO emisyonları bu denli farklılık göstermese de püskürtme avansının değişimine bağlı birebir aynı eğilim gözlemlenmiştir. PM emisyonları ise 5° KMA püskürtme avansında en yüksek seviyeye ulaşmış, 24° KMA avans değerinde ise en düşük değerini almış olup aralarında kütleli olarak 5 ile 10 kat arasında fark bulunmaktadır. Bir başka enjeksiyon stratejisine göre ana püskürtme 3° KMA avans değerinde sabit tutularak yakıtın %50’lik kısmı bu süreçte silindir içerisine sevk edilmiş, kalan %50’lik kısım ise ana püskürtme fazından 8° KMA ile 18° KMA arasında değişen püskürtme avansı farkıyla yani 11° KMA ile 21° KMA püskürtme avansı ile silindir içerisine sokulmuştur. Bu şartta ise ilk hüzmenin avans değeri artıkça özgül yakıt tüketiminin düştüğü gözlemlenmiştir.

Srivatsa vd. [155] tek silindirli, doğal emişli, 0,435 litre strok hacmine sahip, sıkıştırma oranı 21,2 olan bir motorda 1800 dev/dak motor hızı ve 47 MPa püskürtme basıncı altında 0,5 Nm, 1 Nm ve 1,5 Nm gibi düşük motor yüklerinde, baz püskürtme avansının 12,5° KMA olduğu şartta, püskürtme avansını 25 ° KMA değerinden 35° KMA değerine kadar 2,5° KMA adımlar halinde manipüle ederek silindir içi basınç ve emisyon değerlerini incelemiştir. Çalışmada setan sayısı 40 olan motorin kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre tüm yük şartlarında PCCI çalışma stratejisinde ÜÖN öncesinde başlayan yanmada piston ÜÖN’ye ilerlerken yanma odasında ortaya çıkan basınç konvansiyonel şarta göre önemli miktarda artmıştır. Fakat püskürtme avansı arttıkça yanmanın başladığı noktalar ve basınç eğrilerinin formu birbirine yakın izlemiştir. Buna ilaveten 35° KMA püskürtme avansına gelindiğinde 25° KMA ve 27,5° KMA püskürtme avanslarına göre az da olsa ÜÖN öncesi basınç-krank açısı diyagramı altında kalan alan azalmış, yine az da olsa genişlemede basınç düşüşü daha yavaş seyretmiştir. Özgül NO_x emisyonları 30° KMA püskürtme avansının üzerinde hızlı düşüş eğilimine girmiştir. 35° KMA

püskürtme avansında, 30° KMA püskürtme avansına kıyasla belirlenen üç farklı motor yükü için %50 ve üzerinde özgül NO_x düşüşü gözlemlenmiştir. PM emisyonları g/kWh olarak 25° KMA'dan 32,5° KMA püskürtme avansına kadar düşüş göstermiş, ardından 35° KMA püskürtme avansında düşüş gözlemlenememiştir. Özgül CO ve özgül THC emisyonları 27,5° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra artış eğilimine girmiş ve püskürtme avansına karşı hassasiyetin özgül CO emisyonlarında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Pradeep ve Krishnasamy [156] tek silindirli, sıkıştırma oranı 15 olan, 662 cm³ strok hacimli bir dizel motorunda matematiksel modele dayalı çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada %20 motor yükü ve %40 EGR ile %40 motor yükü ve %50 EGR olmak üzere iki çalışma noktasında inceleme yapılmıştır. Püskürtme avansının 20° KMA ile 50° KMA aralığında 10° KMA aralıklar ile değiştirildiği şartta püskürtme basıncı 300 bar değerinde sabit tutulmuştur. Püskürtme avansının artışına bağlı olarak TG sürecinde düzenli bir artış ortaya çıkmıştır. Hatta 30° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında %10'luk ısı girişinin tespit edildiği konum neredeyse çakışık çıkmış, %50 ısı girişinin ortaya çıktığı nokta ise ÜÖN'ye daha yakın gerçekleşmiştir. Buradan yola çıkarak püskürtme avansının artmasıyla yanmanın başlangıcının yer yer püskürtme avansı fark değerinin daha büyük farklılık göstermesinin yanı sıra yanma hızının da düşüş gösterdiği görülmektedir. TG süreçlerindeki bir başka farklı sonuç ise %40 motor yükünde ortaya çıkan TG değerlerinin daha uzun olmasıdır. Burada EGR oranının da bir miktar yüksek oluşu gözden kaçmamalıdır. Fakat yine de %40'tan %50'ye çıkan EGR oranının bu durumun tek sebebi olamayacağı açıktır. Yüksek seviyedeki ön karışım oranının yanma başlayana kadar silindir içerisinden çekeceği ısı miktarı önem arz etmektedir. İndike termik verimin ise 20° KMA ve 30° KMA püskürtme avanslarında yaklaşık olarak aynı değerleri aldığını ve ardından yaklaşık olarak 1/3'lük bir düşüş sergilediği görülmüştür. Emisyonlar incelendiğinde 30° KMA püskürtme avansında pik seviyeye ulaşan özgül NO_x değerleri 40° KMA püskürtme avansında yaklaşık olarak yarı değerine gerilemiş, 50° KMA püskürtme avansında ise oldukça önemsiz seviyelere gerileyen bir değer almıştır. %20 yük şartında 30° KMA püskürtme avansında pik değerine ulaşan özgül PM emisyonları 40° KMA püskürtme avansında ciddi bir düşüş sergilese de 50° KMA püskürtme avansında tekrar artış eğilimine girmiştir. %40 motor yükünde ise PM emisyonlarında yeniden artış eğilimine geçiş ortaya çıkmamıştır. CO ve

THC emisyonları ise eş karakter göstererek püskürtme avansı arttıkça artış göstermiş ve THC deki artış miktarı daha yüksek seyretmiştir. Çalışmanın püskürtme basıncının etkisinin incelendiği kısımda ise püskürtme avansı 40° KMA'da sabit tutulmuş ve püskürtme basıncı 300 bar, 600 bar ve 900 bar olarak üç farklı değer almıştır. Elde edilen sonuçlar tahmin edilecek değerlerin aksi sonuçlar ortaya koymuştur. Püskürtme basıncının artmasıyla TG süreci artış sergilemiştir. İndike termik verim en düşük püskürme basıncı değerinde en yüksek seviyede iken püskürtme basıncı arttıkça indike termik verim düşüş sergilemiştir.

Jung vd. [157] yaptıkları çalışmada tek silindirli, 981cm³ strok hacimli, sıkıştırma oranı 17,4 olan bir motorda farklı enjektör tiplerinin ve farklı püskürtme avanslarının etkilerini incelemiştir. Bu amaca dönük olarak 1200 dev/dak motor hızında, tek kademedeki ve 160 MPa püskürtme basıncı altında, püskürtme başlangıcını ÜÖN sonrası 5° KMA ile ÜÖN öncesi 100° KMA aralığında değiştirilerek çalışma gerçekleştirilmiştir. Çevrim başına silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı 30 mg/çevrim olarak belirlenmiştir. Bu şartta hava/yakıt kütleli oranı 32 değerindedir. 0% EGR durumunda %10, %50 ve %90'lık ısı girişinin ortaya çıktığı anlara bakılmıştır. 40° KMA püskürtme avansına kadar yanma başlangıcından %50'lik ısı girişi gerçekleşene kadar geçen süre oldukça kısadır. 25° KMA püskürtme avansında yanma başlangıcından %50 ısı girişi gerçekleşene kadar geçen süre 1,6° KMA, 30° KMA püskürtme avansında 2,2° KMA, 40° KMA püskürtme avansında 2,8° KMA süreç gözlemlenmiştir. %50'lik ısı girişi ile %90'lık ısı girişi arasında geçen süre 20° KMA püskürtme avansında kadar nispeten uzun sürmüştür, 20° KMA ile 50° KMA püskürtme avansı arasında geçen sürede oldukça kısa sürmüştür, ardından artan avans değerlerinde %50 ile %90'lık ısı girişi arasında geçen süre tekrardan artışa geçmiştir. ÜÖN öncesi 5° KMA avans değerinde en yüksek OİB değeri elde edilirken, 20° KMA püskürtme avansına kadar püskürtme avansı arttıkça düşüş gerçekleşmiş, ardından tekrar daha düşük bir eğilim ile 80° KMA püskürtme avansında kadar bir miktar artış gözlemlenmiştir. Çalışmanın bir başka kısmında üç farklı enjektör kullanılmıştır. Enjektör demet koni açısı ve delik sayısı olarak 8 delikli ve 146° demet koni açılı, 8 delikli ve 70° demet koni açılı, 14 delikli ve 70° demet koni açılı enjektör numuneleri kullanılmıştır. Emisyon çıktılarına bakıldığında 25° KMA püskürtme avansına kadar en düşük CO emisyon değerlerini 8 delik ve 146° demet koni açılı

enjektör verirken, ardından 70° KMA püskürtme avansının biraz üzerine kadar 8 delik ve 70° demet koni açılı enjektör en düşük CO değerini vermiş ardından 14 delik 70° demet koni açılı enjektör en avantajlı duruma gelmiştir. ÜÖN'ye yakın noktalarda yapılan püskürtmelerde düşük enjektör demet koni açısı daha yüksek CO emisyonlarına yol açmıştır. THC emisyonları için de benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Fakat dar demet koni açılı enjektör kullanmak THC emisyonları için biraz daha yüksek püskürtme avanslarına kadar avantajlı olmuş ve 35° KMA püskürtme avansından sonra 70° demet koni açılı enjektörler avantajlı hale gelmiştir. PM emisyonlarında 40° KMA üzerindeki püskürtme avanslarında yüksek demet koni açısı kötü sonuçlar vermiş, daha küçük püskürtme avanslarında ise küçük demet koni açıları çok daha kötü sonuçlar doğurmuştur. NO_x emisyonlarının püskürtme avansı arttıkça düşmeye başladığı tepe noktası ise enjektör demet koni açısı arttıkça daha büyük püskürtme avans değerine ötelenmiştir.

Su vd. [158] bir dizel motorunda pilot püskürtme ile ana püskürtme arasındaki faz açısının 6° KMA ile 12° KMA aralığında değiştirmiş ve ana püskürtme avansını 8° KMA'da sabit tutarak farklı motor yüklerinde konvansiyonel motorin ve farklı biyodizel yakıtlarında deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada püskürtme avansları sabit tutularak motor yükü değiştirilmiştir. 0,14 MPa OEB motor yükünde konvansiyonel motorin kullanımında yaklaşık 8,5° KMA olan TG süreci, motor yükünün artışıyla 0,98 MPa OEB motor yükünde 6° KMA TG gözlemlenmiştir. Aynı noktada motor yükü arttıkça yanma süreci yaklaşık 35° KMA seviyelerinden 70° KMA değerine kadar çıkmıştır. Benzer şekilde NO_x emisyonları ise 200 ppm seviyesinin biraz üzerinden 1400 ppm yakınlarına kadar artış sergilemiştir. NO_x emisyonlarına bakıldığında motor yükü artış oranına benzer bir oranda NO_x emisyonlarının arttığı görülmüştür. Çalışmanın bir diğer kısmında ise pilot püskürtme ile ana püskürtme arasındaki faz açısı artışına bağlı olarak öncesinde bir miktar NO_x artışı gözlemlenmiş, ardından düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır.

Lui vd. [159] dört silindirli, aşırı doldurmalı, sıkıştırma oranı 17,5 olan bir dizel motorunda konvansiyonel motorin ve n-bütanol dizel karışımlarının PCCI stratejisine uygulanmasını incelemişlerdir. Yakıt olarak konvansiyonel dizel yakıtı, %30 ve %50 n-bütanol dizel karışımlarına ait sonuçlara yer verilmiştir. Bütanol oranı her ne kadar %60 ve %70 oranında denense de stabil yanma elde edilememiş ve bu sonuçlar değerlendirilmemiştir. Çalışmada püskürtme basıncı 100 MPa, EGR

oranı %30, motor hızı ise 1500 dev/dak olarak seçilmiştir. OEB ise 0,73 MPa değerinde sabit tutulmuştur. Tek fazda gerçekleştirilen yakıt enjeksiyonunda püskürtme avansı 0° KMA ile 20° KMA arasında değiştirilmiştir. Çift fazda püskürtme senaryosunda ise pilot hüzmeye 20° KMA ile 75° KMA arasında değişen püskürtme avansında gerçekleştirilmiştir. Tek fazda püskürtmede elde edilen sonuçlarda PM ortalama çapının bütanol ve dizel karışımları için püskürtme avansına pek bağımlı olmadığı görülmüştür. PM ortalama çapı 0° KMA ile 20° KMA püskürtme avansı aralığında 25 nm ile 30 nm arasında değerler almıştır. Konvansiyonel dizel yakıtı için ise 0° KMA ile 5° KMA püskürtme avansı aralığında ortalama çapta bir artış ardından da düşüş gerçekleşmiştir. Özellikle 13° KMA değerinden büyük püskürtme avanslarında büyük çap düşüşleri elde edilmiştir. 5° KMA püskürtme avansında ortalama PM çapı 70 nm dolaylarında iken 20° KMA püskürtme avansında bu çap 25 nm değerine kadar düşmüştür. Konvansiyonel dizel yakıtı için 13° KMA püskürtme avansında en düşük toplam PM sayısını elde edilmiştir. Ardından toplam PM sayısı az da olsa artış göstermiştir. Ancak toplam PM emisyonu kütlesi 5° KMA üzerindeki püskürtme avanslarında, özellikle 15° KMA püskürtme avansına kadar düzenli olarak azalmıştır. İki kademeli püskürtmede, ön hüzmeye toplam enjeksiyon kütlesinin %50'si seçilmiştir. Burada ön püskürtme avansı 45° KMA üzerindeyken ortalama PM çapında belirgin değişim gözlemlenememiştir. Ön püskürtme avansı 25° KMA değerinde sabit tutulup ön püskürtme miktarı %20 ile %50 arasında değiştirildiğinde ise ortalama PM çapında %15 oranına kadar düşüş gözlemlenmiştir.

Lui vd. [160] dört silindirli, aşırı doldurmalı, sıkıştırma oranı 17,5 olan, OHYBPS'ye sahip bir motorda deneysel çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada hem tek kademeli hem de iki kademeli püskürtme üzerinde çalışılmış ve PM formasyonu incelenmiştir. Tüm testler 1500 dev/dak motor hızı, 0,73 MPa OEB, %30 EGR, 30° C emme havası sıcaklığı, 84° C soğutma suyu sıcaklığı, 80 MPa ile 140 MPa arasında değişen püskürtme basıncı şartında gerçekleştirilmiştir. Tek kademede ve 100 MPa basınç altında enjeksiyon gerçekleştirilerek yapılan testlerde püskürtme avansı 0° KMA ile 20° KMA arasında değiştirilmiştir. Bu şartlar altında toplam PM kütlesi 5° KMA püskürtme avansına kadar artış göstermiş, ardından artan püskürtme avanslarında özellikle 16° KMA püskürtme avansına kadar hızlı olmak üzere düzenli düşüş göstermiştir. Ortalama PM çapı incelendiğinde ise yine 0°

KMA püskürtme avans değerinden 5° KMA püskürtme avansına doğru gidildikçe 55 nm ortalama PM çapı, 70 nm ortalama PM çapına kadar çıkmış, ardından artan püskürtme avansı ile ortalama çap düşüş eğilimine girmiştir. 13° KMA püskürtme avansında 60 nm civarında olan ortalama PM çapı, 16° KMA püskürtme avansında takriben 32 - 33 nm değerlerine, 20° KMA püskürtme avansında ise 26 - 27 nm değerlerine düşmüştür. PM kütlelerinin normal dağılımlarına bakıldığında da 5° KMA püskürtme avansı en kötü sonuç gözlemlenmiş, 20° KMA püskürtme avansında ise daha homojen bir kütle ve çap dağılımı gözlemlenmiştir. Kademeli püskürtme stratejisinde ana enjeksiyon 2° KMA püskürtme avansında sabit tutulmuş, buna mukabil ön püskürtme zamanlaması ve miktarı geniş bir bantta değiştirilmiş, püskürtme basıncı ise 100 MPa değerini almıştır. Çalışmanın bu kısmından alınan sonuçlara göre toplam PM sayısı kabaca 45° KMA püskürtme avansına kadar düşüş göstermiş, fakat ardından yaklaşık sabit seyreden bir banda oturmuştur. Ön püskürtme kütlelerini %10'dan %50'ye çıkartmak PM toplam sayısında yarıdan fazla düşüş sağlamıştır. Kütleli olarak bakıldığında PM kütlesi 1/4'üne kadar düşüş göstermiştir.

Mei vd. [161] 0,537 litre silindir hacmine sahip, sıkıştırma oranı 15,88 olan, tek silindirli, bir motorda püskürtme basıncını 60 MPa değerinde sabit tutarak üç fazlı püskürtme ile erken püskürtmenin etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışma 0,4 MPa OİB şartında ve 1200 dev/dak motor hızında yürütülmüştür. İlgili motorun OİB olarak anma değeri 2,05 MPa değerindedir. Çok kademede püskürtme iki ön püskürtme ve ardından ana püskürtme fazından oluşmaktadır. Püskürtme sürelerine bakıldığında iki ön püskürtmenin eşit miktarlarda yapıldığı ve ana püskürtme fazında çevrim başına silindire sokulan yakıtın %50'sinden biraz fazla olduğu görülmektedir. Çalışmada iki ön püskürtme arasında 10,1° KMA sabit faz farkı, ikinci ön püskürtme ile ana püskürtme arasında da 9,2° KMA faz farkı bulunmaktadır. İlk püskürtme ise 26,4° KMA, 23,5° KMA, 21° KMA, 19° KMA ve 17,6° KMA püskürtme avanslarında gerçekleşmiştir. Bu senaryoda ana püskürtmenin başlangıcı 7,1° KMA avans ile 1,6° KMA gecikme (ÜÖN sonrası) aralığında değişmiştir. Elde edilen verilere göre konvansiyonel dizel kullanımında 23,5° KMA ilk kademe püskürtme avansında en yüksek indike termik verim değeri takriben %42 olarak gözlemlenmiştir. İlk püskürtme fazının 26,4° KMA püskürtme avansında yapılması durumunda bu değere oldukça yakın bir termik verim

gözlemlenmiştir. Daha küçük püskürtme avanslarına özellikle de ilk fazın $17,6^\circ$ KMA püskürtme avansında yapılması şartında geç-DSY rejimi gözlemlenmesi neticesinde indike termik verim %40 değerine kadar düşmüştür. Belirtilen püskürtme zamanlaması aralığında püskürtme avansının arttırılması sonucunda PM emisyonlarına bakıldığında, termik verimin en yüksek çıktığı püskürtme avansı olan $23,5^\circ$ KMA ilk ön püskürtme avansında, $0,04 \text{ g/kWh}$ özgül PM emisyonu elde edilmiştir. Püskürtme avansının $2,1^\circ$ KMA arttırılması ile PM emisyonlarında %20'nin üzerinde düşüş gözlemlenmiş ve belirtildiği üzere iki şart arasındaki termik verim farkı önemsiz düzeyde seyretmiştir.

Mei vd. [162] tek silindirli, aşırı doldurmalı, $0,537$ litre strok hacmine sahip, sıkıştırma oranı $15,8$ olan bir motorda %36 EGR oranı, 1900 dev/dak motor hızı ve $0,8 \text{ MPa}$ OİB şartında üç kademeli püskürtmenin sabit faz farkları ve değişen püskürtme avanslarındaki davranışını matematiksel modele dayalı olarak incelemiştir. Birinci ön püskürtme kütlesi $3,29 \text{ mg/strok}$, ikinci ön püskürtme kütlesi $1,95 \text{ mg/strok}$ olarak belirlenmiş, ana püskürtme kütlesi püskürtme avansının azalmasına hatta ana püskürtme başlangıcının genişlemeye kaymasına bağlı olarak $16,84 \text{ mg/strok}$ ile $17,86 \text{ mg/strok}$ arasında değerler almıştır. En büyük püskürtme avansı ilk püskürtme fazı için 50° KMA, ikinci ön püskürtme için 32° KMA püskürtme avansı ve ana püskürtme için de 9° KMA püskürtme avansı değerinde gerçekleşmiştir. Tüm püskürtme faz açılarını 3° KMA geciktirilerek 5 farklı püskürtme stratejisi oluşturulmuş ve burada sırasıyla 38° KMA avanslı, 20° KMA avanslı ve 3° KMA gecikmeli püskürtmeye kadar gidilmiştir. Ana püskürtme avansının genişlemeye kaydığı fazda en düşük indike verim gözlemlenmiş, püskürtme avansının artışına bağlı olarak başlarda daha belirgin, artan püskürtme avanslarında ise daha küçük bir banda sıkışan verim artışları gözlemlenmiştir. PM miktarı ise ana püskürtme avansının ÜÖN'ye kadar küçültülmesiyle artış göstermiş, ana püskürtme fazının gecikmesi ile tekrar düşüşe geçmiştir. Silindir içerisinde konuma bağlı anlık PM konsantrasyon miktarı değişimine bakıldığında büyük püskürtme avanslarında PM'nin daha az oluşmasının yanı sıra daha yüksek oranda PM yanma odası içerisinde oksitlenerek, PM'nin düştüğü gözlemlenmiştir.

Kishna vd. [163] biyodizel ile motorin karışımını yakıt olarak kullanarak düşük sıcaklıkta yanma uygulamasına dönük deneysel çalışma yürütmüştür. Deneylerde kullanılan yakıt hacmen %20 oranında biyodizel barındırmaktadır. Bu durumda

konvansiyonel motorine göre setan sayısı bir miktar yükselmiştir. Yapılan deneyler tek silindirli, OHYBPS'li, 661 cc³ silindir hacmine sahip, sıkıştırma oranı 17,5 olan bir motorda yürütülmüştür. Veriler 1500 dev/dak motor hızında, 600 bar püskürtme basıncında, %10, %25 %50, %75, %100 olarak beş farklı motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Ön püskürtme 25° KMA sabit püskürtme avansında %5, %10 ve %15 olmak üzere üç farklı miktarda gerçekleşmiş, ana püskürtme ise 15° KMA sabit avans değerinde gerçekleştirilmiştir. EGR sadece %15 ön püskürtme oranında %0, %10 ve %20 olarak uygulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen termik verim değerlerine göre ön püskürtme oranı arttıkça tüm motor yüklerinde termik verim artmıştır. %25 motor yükünde elde edilen iyileşme pek belirgin değilken %10 ve %50 motor yüklerinde oransal olarak daha yüksek iyileşmeler sağlanmıştır. %25 motor yükünde artan EGR'nin verimi düşürücü etkisi oldukça kısıtlıdır. Ancak çok düşük yük şartı olan %10 ve %50 ile üzeri yüklerde artan EGR oranının verim düşürücü etkisi belirginleşmiştir. Tam yük şartında ve %15 ön püskürtme oranında belirtilen aralıklarda EGR uygulanmasının, EGR uygulanmayan şarta göre oransal olarak %6,22'e kadar daha düşük verim değerleri ortaya çıkarttığı gözlemlenmiştir. Özgül yakıt sarfiyatı için de tahmin edileceği üzere benzer eğilim gözlemlenmiştir. Tam yük şartında ön püskürtme oranı %15 değerindeyken 0,22 kg/kWh özgül yakıt sarfiyatı elde edilmiştir. Bu değer %10 ön püskürtme oranından oransal olarak %4,34, %5'lik ön püskürtme oranından ise %8,33 daha düşüktür. Ön püskürtme oranı arttıkça silindir içi pik basınç değeri artış göstermiş ve bu değerler ÜÖN sonrasında elde edilmiştir.

Deiz ve Zhao [164] tek silindirli, 499 cm³ strok hacimli, sıkıştırma oranı 16 olan OHYBPS'li bir motorda 2000 dev/dak motor hızı, %60 EGR oranı, 1200 bar püskürtme basıncı ve %27 motor yükünde, setan sayısı 49.1 olan motorini ilk fazda %70, ikinci fazda %30 oranında silindir içerisine püskürterek farklı püskürtme zamanları ve farklı püskürtme faz açısı farklarının etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma kapsamında 10 farklı püskürtme stratejisi incelenmiştir. İlk faz püskürtme avansı 19° KMA, 17° KMA, 15° KMA, 13° KMA, 11° KMA'dır. İkinci püskürtme fazı ise ilk püskürtme başlangıcından 8° KMA ve 10° KMA sonra başlamıştır. Bu şartta ikinci püskürtme avansı 11° KMA ile 1° KMA arasında farklılık göstermektedir. Deney matrisinde püskürtme avansı arttırıldıkça düzenli olarak PM emisyonlarında düşüş gözlemlenmiştir. Belirtilen aralıkta ikinci

püskürtme fazı için verilen ilave 2° KMA enjeksiyon faz farklı açısı PM emisyonlarında diğer stratejiye göre %70'e varan oranda düşüşe yol açmıştır. Ancak NO_x emisyonları için aynı eğilim gözlemlenmemiştir. Bu çalışmada püskürtme avansı arttıkça NO_x emisyonlarında artış ortaya çıkmıştır. Bu durum püskürtme avansının yanı sıra ilk püskürtme fazında oldukça fazla yakıtın silindir içerisine girmesinden de kaynaklanmaktadır. En yüksek OİB değerleri ise belirtilen püskürtme aralığının orta bölgelerindeki püskürtme avanslarında gözlemlenmiştir.

Kokjohn ve Reitz [165] 1,9 litre silindir hacminde ve sıkıştırma oranı 16,5 olan bir motorda, 2000 dev/dak motor hızında, 5,5 bar OİB ve 1,62 bar doldurma basıncı şartında matematiksel bazlı PCCI çalışması yürütmüşlerdir. Çalışmada hem tek fazda hem de çift fazda püskürtmeye dair sonuçlar elde edilmiştir. Tek fazda püskürtmede %67 EGR şartında 860 bar püskürtme basıncında ve 21° KMA ile 39° KMA arasında değişen püskürtme avansında yakıt yanma odasına sokulmuştur. Tek fazda gerçekleştirilen püskürtmede elde edilen sonuçlara göre PM emisyonları püskürtme avansının artışıyla 24° KMA değerine kadar artış göstermiş, ardından 30° KMA püskürtme avansına kadar hızlı bir düşüş göstererek oldukça düşük bir salım seviyesinde belli bir banda oturmuş, 36° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra ise yeniden artışa geçmiştir. NO_x emisyonları da püskürtme avansının arttırılması ile 25° KMA püskürtme avansı dolaylarına kadara artış göstermiş, ardından tekrar düşüşe geçmiştir. 35° KMA'yı aşan püskürtme avanslarında az da olsa tekrar artış göze çarpmaktadır. 33° KMA püskürtme avansından sonra THC emisyonlarında daha hızlı olmak üzere THC ve CO emisyonları artış göstermiştir. Çift kademedeki yapılan püskürtmedeki ilk püskürtme fazı 300 bar püskürtme basıncında, toplam püskürtülen yakıt kütlesinin %20 kadarı 52° KMA püskürtme avansında, geriye kalan yakıt ise 4° KMA püskürtme avansının değeri ile ÜÖN arasında silindir içerisine sevk edilmiştir. İkinci püskürtme fazı ÜÖN'ye yaklaştıkça NO_x emisyonları hızlı bir düşüş sergilemiş, PM emisyonları da bir miktar düşüş ortaya çıkmış, THC emisyonları artmış ve CO emisyonlarında belirgin bir eğilim elde edilememiştir.

Nishijama vd. [166] yaptıkları deneysel çalışmada birbirlerine göre çapraz konumlandırılmış çift yakıt enjektörü kullanarak deneysel çalışma yürütmüştür. Çalışma 2004 cc³ silindir hacimli, sıkıştırma oranı 16,5 olan tek silindirli bir motorda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada püskürtme basıncı 100 MPa, emme basıncı

ise 100 kPa olarak seçilmiştir. 1000 dev/dak motor hızında, tek fazda yapılan püskürtme şartında yakıt enjeksiyon kütlesi 30 mm³/strok olarak belirlenmiş ve püskürtme avansı ÜÖN ile 90° KMA arasında değiştirilmiştir. Çift fazlı püskürtmede ise ilk püskürtme fazı 30° KMA ile 60° KMA aralığında ve ikinci püskürtme fazı da ÜÖN'de gerçekleştirilmiştir. Tek fazlı püskürtme şartında elde edilen sonuçlara göre FSN cinsinden PM emisyonları 20° KMA püskürtme avansına kadar bir miktar düşüş göstermiş, ardından 20° KMA ile 30° KMA püskürtme avansı aralığında artışa geçmiş ve daha büyük püskürtme avansı değerlerinde düzenli olarak düşüş sergilemiştir. Özgül yakıt sarfiyatı değeri 20° KMA ile 70° KMA püskürtme avansı aralığında yaklaşık sabit bir banda oturmuştur. Ancak 70° KMA ile 90° KMA püskürtme avans aralığında özgül yakıt sarfiyatı değerlerinde %25'in üzerinde artış yaşanmıştır. Püskürtme avansı artışına bağlı olarak CO emisyonları ppm skalasına göre düzenli artış göstermiştir. NO_x emisyonları ise 20° KMA püskürtme avansında pik yapmış, daha da artan püskürtme avans değerlerinde özellikle 50° KMA püskürtme avansına kadar hızlı düşüş sergilemiştir. Çift fazda yapılan püskürtmede ise PM ve özgül yakıt sarfiyatı değerleri önemli bir değişim gözlemlenmezken püskürtme avansının artışına bağlı olarak, tek fazda püskürtmeye kıyasla daha küçük değişim oranlarıyla CO ve THC artışı ve NO_x düşüşü gözlemlenmiştir.

Liu vd. [167] 16 sıkıştırma oranlı, 477 cm³ strok hacimli bir dizel motorunda iki fazda püskürtmenin farklı püskürtme avanslarında gerçekleştirilmesi şartındaki etkilerini numerik olarak incelemiştir. Çalışma 2500 dev/dak motor hızı, 360 K emme havası sıcaklığı, %35 EGR oranı, 30 mg/çevrim yakıt enjeksiyon kütlesinde gerçekleştirilmiştir. Çift fazda gerçekleştirilen püskürtmede ilk püskürtme fazı 40° KMA püskürtme avansında sabit tutulmuş, ikinci püskürtme fazı 5° KMA ile 30° KMA püskürtme avansları arasında değiştirmiştir. İlk püskürtme fazında yakıtın %20'lik kısmının silindir içerisine sokulduğu şartta, ikinci püskürtme fazının 5° KMA değerinden 20° KMA püskürtme avansına kadar artışı ile NO_x emisyonları 3 kat mertebesinde artış göstermiş ve 8 g-NO_x/kg-yakıt değerine yaklaşmıştır. Ardından NO_x emisyonlarında azalma eğilimi başlamış, özellikle 25° KMA püskürtme avansından sonra oldukça hızlı bir düşüş göze çarpmış ve 30° KMA avans değerinde 2 g-NO_x/kg-yakıt bandına gerilemiştir. Aynı püskürtme stratejisinde PM emisyonları 5° KMA püskürtme avansında 25 g-PM/kg-yakıt

seviyesinin üzerinde değer almış, 15° KMA ikinci faz püskürtme avansına kadar hızlı bir düşüş gerçekleştirmiş ve devamındaki avans aralıklarında 1 g-PM/kg-yakıt değerinin oldukça altında seyretmiştir. CO ve THC emisyonları 15° KMA püskürtme avansına kadar düşüş gösterirken artan püskürtme avanslarında daha küçük bir ortalama gradyanla artış eğilimine girmiştir.

Li vd. [168] yaptıkları çalışmada püskürtme basıncını 150 MPa, motor hızını 1800 dev/dak ve biyodizel kullanarak çalışma yürütmüştür. Yapılan çalışmada ana püskürtme avansı 8° KMA'da sabit tutulmuş, ön püskürtme avansı ise 24° KMA ile 40° KMA arasında 4° KMA adımlarla değiştirilmiştir. Ön püskürtme yüzdesi ise %20 değerindedir. Yapılan deneyler 0,42 MPa OEB şartında gerçekleştirilmiştir. Ana püskürtme zamanlamasının sabit tutularak ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak düzenli TG artışı gözlemlenmiştir. Yanma sürecinde ise 32° KMA püskürtme avansına kadar ciddi değişim ortaya çıkmamış, fakat ardından 40° KMA püskürtme avansına kadar artış yaşanmıştır. NO_x emisyonları ise 28° KMA püskürtme avansında pik değere erişirken ardından daha hızlı bir düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. 28° KMA püskürtme avansından 40° KMA püskürtme avansına geçildiğinde NO_x salımlarına %50 dolaylarında düşüş ortaya çıkmıştır. PM emisyonlarında ise 32° KMA püskürtme avansına kadar hızlı bir düşüş yaşanmış, ardından daha düşük değişimler ile bu değişim devam etmiştir. THC ve CO emisyonlarında ise 36° KMA püskürtme avansında kadar giderek artan farklarla emisyon artışı ortaya çıkmış, sonrasında ise birçok literatür verisine aykırı olarak 40° KMA püskürtme avansına geçildiğinde bu artış eğilimi düşüş sergilemiştir.

Ge vd. [169] setan sayısı 57,3 olan palm yağından elde edilen biyodizel ve setan sayısı 55,8 olan motorinin farklı oranlardaki karışımlarını yakıt olarak kullanarak sıkıştırma oranı 17,7 olan dört silindirli ve OHYBPS püskürtme sistemine sahip bir dizel motorunda çalışma yürütmüştür. Çalışmada %25 ve %75 olarak iki farklı motor yükü seçilmiştir. %25 motor yükünde hava fazlalık katsayısı 3,6, %75 motor yükünde ise 1,9 değerindedir. İki kademedeki yapılan püskürtmede ana püskürtme avansı 4° KMA değerinde sabit tutulmuş, ön püskürtme avansı ise 14° KMA, 24° KMA ve 34° KMA'da gerçekleştirilmiştir. EGR uygulanmayan şartta ve konvansiyonel motorin kullanımında ön püskürtme avansı 14° KMA iken 300 g/kWh özgül yakıt sarfiyatı değeri gözlemlenmiştir. Bu değer 24° KMA ön püskürtme avansında bir miktar düşüş sergilemiş, ardından 34° KMA ön püskürtme

avansında özgül yakıt sarfiyatı bir miktar artarak 14° KMA ön püskürtme avansında ortaya çıkan özgül yakıt sarfiyatı değerine yaklaşmıştır. Özgül yakıt sarfiyatı değerindeki farklılıklar biyodizel kullanımında tahmin edileceği üzere artmaktadır. Aynı zamanda püskürtme avansının değişimi sonucunda ortaya çıkan farklılıklar daha büyük oranlarda değişimlere yol açmıştır. %75 motor yükünde daha düşük olan yakıt sarfiyatının püskürtme avansına olan hassasiyeti de daha düşük seyretmiştir. %25 motor yükünde NO_x emisyonları ppm cinsinden incelendiğine konvansiyonel motorin için, 34° KMA püskürtme avansında daha belirgin olmak üzere, düşüş gözlemlenmiştir. Bu püskürtme avansı bölgesinde biyodizel ve motorin karışımlarında NO_x düşüşü daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. PM emisyonlarında konvansiyonel motorinin püskürtme avansı artışına bağlı salım düşüşü daha yüksektir. Belirtilen püskürtme avans aralıklarında %25 bandında bir düşüş gözlemlenmiştir.

Pandey vd. [170] 4 silindirli ve sıkıştırma oranı 17,5 olan bir motorda 1400 dev/dak motor hızında, %25 motor yükünde, %20 EGR oranında, iki kademeli enjeksiyon şartında motorin kullanarak çalışma yürütmüştür. Çalışmada birinci püskürtme fazı zamanlaması 20° KMA ile 90° KMA püskürtme avans aralığında değiştirilmiş, ikinci püskürtme fazının ise 3° KMA püskürtme avansında sabit tutulmuştur. Çalışmada birinci püskürtme fazı kütleli olarak oldukça yüksek tutulmuştur. Belirtilen zamanlama aralığında yakıtın %88'i ilk püskürtme fazında silindir içerisine sokulmuştur. Kalan %12'lik kısım ise 3° KMA püskürtme avansında silindir içerisine sevk edilmiştir. 20° KMA birinci faz püskürtme avansı için 14° KMA civarı TG gözlemlenirken, 30° KMA püskürtme avansında 17° KMA avans gözlemlenmiştir. 30° KMA ve 60° KMA püskürtme avansı aralığında TG üzerinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu sınırı aşan püskürtme avanslarında hem TG hızlıca artmış hem de yanmanın başlangıcı ÜÖN'ye daha yakın bir konuma yerleşmiştir. İlk püskürtme fazının püskürtme avansı 40° KMA değerindeyken yanma süreci en kısa değerini almış, bu püskürtme avansından iki tarafa doğru gidildikçe yanma süreci uzamıştır. İlk püskürtme fazı püskürtme avansının 40° KMA'ya kadar artışına dek CO ve THC emisyonlarında ciddi değişimler gözlemlenmemiş, bu noktadan sonra özellikle CO emisyonları olmak üzere her ikisi de hızlı bir artış eğilimine girmiştir. NO_x emisyonları 60° KMA püskürtme avansına

kadar düşüş sergilemiş, ardından yaklaşık sabit seyretmiştir. PM emisyonları ise 50° KMA değerini aşan ön püskürtme avansında artışa geçmiştir.

Lee vd. [171] tek silindirli, 500 cc³ silindir hacmine sahip, sıkıştırma oranı 16 olan bir motorda farklı püskürtme zamanlamaları ve EGR oranlarının etkisini inceleyen bir çalışma ortaya koymuştur. Yapılan testler 1500 dev/dak motor hızında, 6 bar OİB değerindeki düşük yük şartında, 725 bar püskürtme basıncında ve üç fazlı püskürtme ile gerçekleştirilmiştir. Püskürtme iki ön, bir de ana püskürtme fazından oluşmaktadır. İlk ön püskürtmede 1,2 mg, ikinci ön püskürtmede 1,4 mg, ana püskürtmede ise 10,9 mg yakıt enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. İlk ön püskürtme 22,24° KMA püskürtme avansında, ikinci ön püskürtme 13,51° KMA püskürtme avansında gerçekleştirilmiştir. Ana püskürtmenin baz püskürtme avansı 2,3° KMA'dır. Çalışmada ana püskürtme fazı 6,3° KMA avans değeri ile 1,7° KMA gecikme değeri arasında 2° KMA adımlar halinde, EGR oranı ise %23,8 ile %38,8 aralığında %5'lik artımlarla değiştirilmiştir. Baz ana püskürtme şartına göre daha büyük püskürtme avanslarında silindir için pik basınç ve pik HRR değeri artış göstermiştir. EGR oranının artışıyla yanma başlangıcının geciktiği, %38,8 EGR oranında yanmanın büyük bölümünün genişleme stroğuna kaydığı ve pik HRR değerinin ÜÖN sonrası 10° KMA ile 15° KMA aralığında görüldüğü tespit edilmiştir. Baz EGR oranında, en küçük TG süreci 4,3° KMA püskürtme avansında ve yaklaşık 8° KMA olarak gözlemlenmiştir. 6,3° KMA püskürtme avansında ise takriben 10° KMA TG gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, püskürtme avansı arttırılsa da yanmanın birbirine çok yakın bir bölgede başladığı söylenebilir. Ana püskürtme avansı arttırıldıkça yanma odası cidarlarına olan ısı transfer miktarı artış göstermiştir. Baz kalibrasyon değeri olan 2,3° KMA püskürtme avansında cidarlara geçekleşen ısı transfer miktarı ile 6,3° KMA püskürtme avansı arasında aritmetik olarak %2,29 fark bulunmaktadır.

Jung vd. [172] tek silindirli, 981 cm³ strok hacmine sahip, sıkıştırma oranı 17,4 olan bir motorda 1200 dev/dak motor hızında, 160 MPa püskürtme basıncında, 0,6 MPa motor yükünde, kütleli hava/yakıt oranının 32 olduğu şartlarda, püskürtme başlangıcını 100° KMA püskürtme avansından başlayarak 5° KMA gecikmeli püskürtmeye kadar değiştirmiştir. Çalışmada üç farklı tip enjektör kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan enjektörler 8 delikli ve 146° demet koni açılı, 8 delikli ve 70° demet koni açılı, 14 delikli ve 70° demet koni açılı enjektörler olup tüm

enjektörlerin debi kapasitesi aynıdır. 146° demet koni açılı enjektörle 10° KMA, 40° KMA ve 80° KMA püskürtme avanslarında elde edilen basınç değerlerine bakıldığında en yüksek iş elde etme kabiliyetinin 10° KMA püskürtme avansında gözlemlendiği ortaya çıkmıştır. 40° KMA ve 80° KMA püskürtme avanslarında ölçülen basınç değerleri incelendiğinde, ÜÖN civarında görülen basınç pikinden sonra genişleme esnasında basınç hatları birbirine çok yakın izlemiş hatta iç içe girmiştir. Ancak ÜÖN öncesinde 80° KMA püskürtme avansında kayda değer basınç artışı gözlemlenmiştir. Bu sebeple 40° KMA püskürtme avansının daha makul bir çalışma noktası olduğu ortaya çıkmıştır. Püskürtme başlangıcının 100° KMA avanstan başlayarak 5° KMA gecikmeli şartta başlatılması arasında yanma hızları incelendiğinde, 20° KMA ile 40° KMA püskürtme avans aralığında en kısa yanma sürecinin ortaya çıktığı, bu püskürtme avans değerinin altında ısı girişinin %50'lik kısmına çok kısa bir sürede erişildiği, 40° KMA püskürtme avansı üzerinde ise %50'lik ısı girişinin yakalandığı an ile yanma başlangıcından itibaren geçen sürenin arttığı, aynı zamanda yanmanın geri kalan kısmına ayrılan sürenin de arttığı gözlemlenmiştir. Aynı enjektör nozul sayısında büyük demet koni açılı enjektör kullanılarak elde edilen sonuçlara göre tek fazlı püskürtmede 10° KMA püskürtme avansı civarında en büyük OİB değeri gözlemlenmiş, ardından 30° KMA püskürtme avansına kadar OİB değeri düşüş göstermiştir. Fakat püskürtme avansı daha da arttırıldığında OİB tekrardan az da olsa iyileşme eğilimine girmiş, 80° KMA gibi çok büyük püskürtme avansından itibaren tekrar kötüleşme gözlemlenmiştir. Özgül CO ve özgül THC emisyonlarında 30° KMA püskürtme avansına kadar pek bir değişim gözlemlenmemiş ve oldukça düşük salımlar ortaya çıkmıştır. Ancak daha büyük püskürtme avansına gidildikçe özellikle özgül THC emisyonlarında olmak üzere hızlı bir artış gözlemlenmiştir. Özgül NO_x emisyonları 30° KMA püskürtme avansında en yüksek seviyeye ulaşmış ardından hızlı bir düşüşe geçmiş olup 60° KMA püskürtme avansı ve sonrasında eser miktarda NO_x salımı göze çarpmaktadır. 40° KMA püskürtme avansında ve 146° demet koni açılı enjektör kullanımı durumunda EGR etkisi incelenmiş ve EGR %0 ile %57 aralığında değiştirilmiştir. %0 EGR oranında 20° KMA'nın biraz üzerinde olan TG süreci %40 üzeri EGR oranına kadar pek değişim göstermemiş, bu değer aşıldığı durumda ise TG süreci hızlı artışa geçmiştir. %57 EGR oranında TG 35° KMA'nın üzerine çıkmıştır. Farklı enjektörler kullanılması durumunda ve %0 EGR oranında 20° KMA'dan küçük püskürtme avans değerlerinde 146° demet koni açılı enjektör kullanıldığı durumda

yanma hızının arttığı tespit edilmiştir. 20° KMA ile 40° KMA arasındaki püskürtme avansları birbirine çok yakın sonuçlar ortaya koymuştur. Artan püskürtme avanslarında ise 70° demet koni açılı enjektörler ile yanma daha kısa sürede tamamlanmıştır. Nozul çapının küçülmesi her şartta yanma sürecini uzatmıştır.

Yu vd. [173] 4 silindirli, sıkıştırma oranı 17,5 olan bir motorda 2000 dev/dak motor hızında, 2,01 bar doldurma basıncı, 340 K doldurma havası sıcaklığı, 550 K piston ve silindir kafası sıcaklığı, 475 K silindir cidar sıcaklığı şartlarından AVL-Fire programında simülasyon bazlı çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada ana püskürtme 10° KMA püskürtme avansında gerçekleştirilmiştir. Ön püskürtme ise ana püskürtmenin 20° KMA ile 50° KMA öncesinde gerçekleştirilmiştir. Ön püskürtme fazında yakıt enjeksiyonu %10 ile %90 arasındaki geniş banttaki kütle oranlarda değişime tabi tutulmuştur. Tüm testlerde toplam yakıt kütlesi sabit tutulmuştur. Sonuçlara bakıldığında ön püskürtmenin 30° KMA püskürtme avansında, ana püskürtmenin ise 10° KMA püskürtme avansında yapıldığında indike özgül yakıt sarfiyatı değerinin %40'a kadar artan ön püskürtme oranlarında iyileşme sergilediği görülmüştür. %10 ön püskürtme şartında 220 g/kWh indike özgül yakıt sarfiyatı değeri görülürken, %40 ön püskürtme şartında bu değer 210 g/kWh değerine düşmüş, ön püskürtme oranı %90'a çıktığında ise 225 g/kWh değerine çıkmıştır. Ön püskürtmenin 30° KMA püskürtme avansında yapıldığında ön püskürtme oranının artışına bağlı olarak NO_x ve PM'de düzenli düşüş, CO ve THC de ise düzenli artış gözlemlenmiştir. Özellikle %40 ve %90 ön püskürtme oranlarında NO_x emisyonları 300 ppm değerinden 50 ppm seviyesine düşmüştür.

Suzuki ve Ogawa [42] tek silindirli, doğal emişli, 1007 cm³ silindir hacmine sahip ve sıkıştırma oranı 16 olan bir motorda, 1320 dev/dak motor hızında, 120 MPa püskürtme basıncında, 32 mg/strok yakıt enjeksiyon kütlesinde, %50 motor yükünde, %50 ve %60 EGR oranları için iki kademeli püskürtmede farklı püskürtme avanslarının emisyonlar üzerine etkisini incelemiştir. Yakıt yüksek setan sayılı n-parafinler ve düşük setan sayılı iso-parafinlerin karıştırılması ile elde edilmiştir. Test yakıtlarının farklı püskürtme zamanları ve EGR oranları altındaki TG süreçleri incelendiğinde şu sonuçlar gözlemlenmiştir. Setan sayısı 94 gibi oldukça yüksek olan yakıt numunesinde %50 EGR oranında püskürtme avansının değişimine bağlı yeterli seviyede TG değişimi gözlemlenememiş ve yakıt hızlıca yanmaya katılarak ön karışım oluşturamamıştır. Aynı yakıt miktarı %60 EGR şartında 20° KMA

üzerindeki püskürtme avansında belirli bir TG süresine ihtiyaç duymaktadır. Yakıtın setan sayısı düştükçe düşük püskürtme avanslarında ciddi bir TG farkı gözlemlenemese de artan püskürtme avanslarında bu fark belirginleşmektedir. 34 gibi oldukça düşük setan sayılı yakıt numunesi için %50 EGR oranında belli bir püskürtme avansının üzerinde, %60 EGR oranında ise belirtilen püskürtme avans aralığı olan ÜÖN yakınlarından 35° KMA püskürtme avansına kadar dolgunun tutuşamaması (misfiring) sorunu ortaya çıkmıştır. Yakıtların TG süreçleri kıyaslanarak inceleme yapıldığında yüksek setan sayılı yakıtlarda daha fazla PM, düşük setan sayılı yakıtlarda daha az PM emisyonları gözlemlenmiştir. Birbirine çok yakın TG süreci veren yakıtlardan setan sayısı yüksek olan yakıt numunesinin yanması sonucu daha fazla PM salımı ile karşılaşmıştır. Setan sayısı 42 olan yakıt ile ilk püskürtmenin 35° KMA püskürtme avansında ikinci püskürtme fazının ise 15° KMA, 20° KMA, 24° KMA, 29° KMA püskürtme avansında yapıldığı şartta sırasıyla 15° KMA, 20° KMA ve 24° KMA püskürtme avansları için maksimum ısı açığa çıkış hızı artmış ve bu değer görüldüğü yer ÜÖN'ye yaklaşmıştır. İkinci faz püskürtme avansının 29° KMA olduğu şartta pik değerinin daha büyük ve daha önce ortaya çıkması beklenen bir durumdur. Fakat 24° KMA püskürtme avansında elde edilen pik değerden daha sonra maksimum ısı açığa çıkış hızı gözlemlenmiştir. Bu durum püskürtme avansının belli bir değer üzerine çıkışı ile yanmanın yavaşlaması sonucunu ortaya çıkartmıştır. İlk püskürtme fazını 35° KMA püskürtme avansında, iki püskürtme başlangıcı arasındaki faz açısını da 5° KMA'da sabit tutulup ilk püskürtme fazında silindir içerisine giren yakıt miktarı %20 ile %80 arasında değiştirildiği taktirde; ön püskürtme fazında silindir içerisine giren yakıt miktarının %50'ye kadar artışı ile özgül THC ve özgül CO emisyonları bir miktar artış göstermiş, ardından yaklaşık sabit bir bantta değerler ortaya çıkmıştır.

Yoon vd. [174] dimetil eter kullanarak farklı püskürtme avanslarında ve farklı püskürtme demet koni açısına sahip enjektörler kullanarak dizel motorlarında performans ve emisyon değişimini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada tek silindirli, doğal emişli, 373,3 cm³ strok hacmine sahip, sıkıştırma oranı 17,8 olan, OHYBPS ile donatılmış bir motor kullanılmıştır. Motor hızı 1400 dev/dak, püskürtme basıncı 60 MPa ve püskürtülen yakıt kütlesi 10 mg/stok olarak sabit tutulmuştur. Çalışmada yakıt olarak karbon - karbon bağı olmayan ve setan sayısı 55 ile 60 bandında olan, alt ısı değeri konvansiyonel motorinin %65'i civarında

olan dimetil eter kullanılmıştır. Çalışmada enjektör demet koni açısı 156° , 70° ve 60° olan üç farklı enjektör tek fazlı ve iki fazlı püskürtme altında incelenmiştir. Tek fazda püskürtmede püskürtme avans değeri 5° KMA ile 35° KMA arasında değiştirilmiştir. 5° KMA püskürtme avansında enjektör demet koni açısı küçüldükçe pik basınç düşüş göstermiş, 35° KMA püskürtme avansında ise en iyi sonuç 70° demet koni açısı için elde edilirken 156° demet koni açısı en kötü sonucu vermiştir. Tek fazda püskürtme avansının değişimi ile püskürtme avansı arttıkça daha düşük OİB değerleri gözlemlenmiştir. 156° demet koni açısında düzenli olarak düşüş ortaya çıkmış, özellikle 25° KMA üzeri püskürtme avansından sonra OİB oldukça hızlı bir düşüş sergilemektedir. Belirtilen püskürtme avans aralığında 60° ve 70° demet koni açıları için 25° KMA püskürtme avansı değerine kadar daha az bir düşüş gözlemlenmiş ve bu püskürtme avansının üzerinde OİB sabit bir banda yerleşmiş ve belli belirsiz bir iyileşme sergilemiştir. Özgöl NO_x emisyonları 156° demet koni açısı için 15° KMA, 70° demet koni açısı için 20° KMA ve 60° demet koni açısı için 25° KMA'yı aşan püskürtme avanslarında hızlı düşüşe geçmiştir. THC emisyonları 25° KMA püskürtme avansına kadar üç enjektör için de birbirine çok yakın değerler almış, artan püskürtme avanslarında ve küçük demet koni açılarında aynı eğilim gözlemlenirken 156° demet koni açısı için 50 kata yaklaşan özgül THC emisyonu artışı saptanmıştır. Özgöl CO emisyonları ise püskürtme avansı arttıkça düşük demet koni açılarında daha kabul edilebilir artışlar ortaya koyarken, 156° demet koni açısı sonuçlarında ise düşük püskürtme avansına kıyasla 25 katın üzerinde artış saptanmıştır. Çalışmanın bir bölümünde püskürtme %20 ön püskürtme, %80 ana püskürtme olarak iki faza ayrılmıştır. Ön püskürtme avansı 15° KMA, 25° KMA ve 35° KMA değerlerinde değiştirilmiş, ana püskürtme avansı ise 5° KMA değerinde sabit tutulmuştur. 60° demet koni açısında ön püskürtmenin 15° KMA'dan 25° KMA'ya çıkması OİB değerinde düşüşe yol açarken, 35° KMA avansa geçişte OİB trend değiştirerek artış eğilimine geçmiştir. 70° demet koni açısı için ön püskürtme avansı arttıkça önce makul OİB düşüşü gözlemlenmiş, ardından az da olsa artış görülmüştür. Kademeli püskürtme rejiminde ön püskürtme avansı arttıkça özgül NO_x emisyonları düzenli düşüş sergilemiştir. Düşük demet koni açılarında ön püskürtme avans artışının özgül THC emisyonları üzerindeki etkisi sınırlıyken, 156° demet koni açısında püskürtme avansının artışına bağlı hassasiyet yüksek seyretmiştir. Ancak tek fazlı püskürtmeye nazaran daha küçük oransal artışlar ortaya çıkmıştır. Benzer durum özgül CO emisyonları için de söylenebilir.

Mobasheri [24] 2,44 litre strok hacminde, sıkıştırma oranı 15,1 olan bir dizel motorunda 184 kPa OİB şartında ve 1600 dev/dak motor hızında matematiksel modele dayalı çalışma yürütmüştür. Çalışmada farklı enjektör demet koni açılarının, farklı püskürtme zamanlamalarının ve kademeli püskürtmedeki enjeksiyon oranlarının etkileri incelenmiştir. Aerodinamik etkiler ihmal edildiğinde 145° enjektör demet koni açısı için 20° KMA'dan daha düşük bir avansta püskürtme piston oyuğu dışına taşmaktadır. 125° demet koni açısında 20° KMA püskürtme avansı sınır değer olmakta ve bunun üzerinde oyuk dışına yakıt sevki gerçekleşmektedir. 105°'lik demet koni açısı için bu değer 30° KMA püskürtme avansı karşılık gelirken 90°'lik demet açısı için çok daha büyük avans değerlerinde yakıt demeti piston oyuğuna odaklanmış durumdadır. Ön püskürtme oranının %20 olduğu, ön püskürtme avansının 15° KMA, 20° KMA, 25° KMA ve 30° KMA aralığında değiştiği ve ana püskürtme avansının 9° KMA sabit avans değerinde gerçekleştirildiği şartta 15° KMA püskürtme avansı en düşük özgül yakıt sarfiyatını ortaya koymuştur. Bu şartlarda enjektör demet koni açısı değişimine bağlı ciddi farklılık gözlemlenemese de artan püskürtme avanslarında bir miktar daha düşük özgül yakıt sarfiyatı elde edilmiştir. Püskürtme avansı arttıkça enjektör demet koni açısına bağımlılık artmış ve püskürtme avansı artıkça daha küçük enjektör demet koni açıları nispeten kullanışlı hale gelmiştir. Ancak 90°'lik demet koni açısına doğru gidildikçe tekrardan özgül yakıt sarfiyatı artış göstermiştir. Diğer şartlar sabit tutulmak kaydıyla, püskürtme avansı arttıkça özgül yakıt sarfiyatı 25° KMA püskürtme avansına kadar artış göstermiş, fakat 30° KMA püskürtme avansında 25° KMA püskürtme avansına kıyasla daha düşük özgül yakıt sarfiyatı gözlemlenmiştir. Ön püskürtme veya birinci kademedeki yapılan püskürtme oranının artışı da çalışmada incelenmiş ve 29° KMA püskürtme avansında yakıtın %70, %80 ve %90'lık kısmı ilk püskürtme fazında, geri kalan kısmı da 9° KMA sabit püskürtme avansında silindir içerisine sokulmuştur. Buradan elde edilen sonuçlara göre ön karışım oranı arttıkça PM emisyonları düzenli düşüş göstermiştir. Aynı şekilde ön karışım oranı arttıkça özgül yakıt sarfiyatında da düşüş gözlemlenmiştir. Bu fark düşük demet koni açılarındaki daha belirgin olup büyük demet koni açısına doğru gidildikçe aradaki fark oldukça küçük bir banda sıkıştığı tespit edilmiştir.

Lencher vd. [175] 1,7 litre silindir hacimli, 4 silindirli, OHYBPS'li bir motorun sıkıştırma oranını 19'dan 16'ya düşürerek deneysel veriler elde etmiş ve ardından

matematiksel modelde deneysel verileri doğrulayarak farklı enjektör koni açılarının motor parametreleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada 1400 dev/dak sabit motor hızı, 15 mm³/strok yakıt püskürtme miktarı, 1000 bar püskürtme basıncında çalışılmıştır. Baz kalibrasyonda bu işletme şartı 3,5 bar OEB şartına denk gelmektedir. Yakıt olarak özellikleri motorine oldukça yakın olan 50 setan sayılı tetradekan kullanılmıştır. Çalışma 115°, 80° ve 60° enjektör demet koni açılarındaki KIVA ortamında gerçekleştirilmiştir. Püskürtme iki fazda, eşit kütsel oranlarda gerçekleştirilmiş ve ikinci püskürtme fazının püskürtme avansı 2° KMA'da sabitlenmiştir. 115° demet koni açılı enjektör için ön püskürtme fazı 30° KMA ile 47° KMA aralığındaki püskürtme avanslarında gerçekleştirilmiş, 35° KMA değerinden büyük püskürtme avanslarında piston oyuğu dışında ıslanma gözlemlenmiş, 30° KMA püskürtme avansında NO_x emisyonu 8 g/kg-yakıt olarak ölçülürken 35° KMA püskürtme avansında 4,5 g/kg-yakıt'tan daha düşük olmak üzere düzenli olarak azalmış ve sonrasında 4 g/kg-yakıt değerinin altına düşmüştür. PM emisyonları ise 30° KMA püskürtme avansında 0,6 g/kg-yakıt değerini aşarken benzer bir eğilimle 47° KMA püskürtme avansında 0,1 g/kg-yakıt değerinin altına düşmüştür. 80° enjektör demet koni açısında piston oyuğu dışı cidar ıslatma sınırı 50° KMA püskürtme avansına kadar artmış ve ilk püskürtme fazı 43° KMA ile 62° KMA püskürtme avansı aralığında değiştirilmiştir. NO_x ve PM emisyonları açısından püskürtme avansı değişimi ile bir önceki demet koni açısında gözlemlenen değerlerden, aynı eğilimde olmakla beraber, daha düşük değerler elde edilmiştir. Buna ilaveten 45° KMA püskürtme avansında %97 seviyesinde olan yanma verimi 62° KMA püskürtme avansında %90'ın altına düşmüştür. 60° KMA demet koni açılı enjektör kullanılması durumunda piston oyuğu dışında yakıtın cidara temas sorunu 65° KMA püskürtme avansı dolaylarında ortaya çıkmıştır.

Feng vd. [176] 2,7 litre hacimli, 6 silindirli, sıkıştırma oranı 17,3 olan, OHYBPS'li bir dizel motorunda, 1000 bar püskürtme basıncında, ana püskürtme zamanlamasını ÜÖN öncesi 6° KMA ile ÜÖN sonrası 6° KMA arasında değiştirmiş ve ön püskürtmeyi ana püskürtmeye göre 18° KMA daha önce gerçekleştirmiştir. Ön püskürtme fazında yakıtın %10'undan biraz azı silindir içerisine sokulmuştur. Çalışma 3 bar ve 5 bar olmak üzere iki farklı OEB şartında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada motorin ve hacimsel olarak %40'a kadar artan n-bütanol karışımları kullanılmıştır. Saf motorin için 5 bar OEB şartında yapılan deneyler sonucunda

ÜÖN öncesi yapılan ana püskürtme fazlarında pik ısı açığa çıkış hızı değeri ÜÖN'den bir miktar sonra ve yaklaşık aynı seviyede ortaya çıkmıştır. Fakat genişlemeye kayan ana püskürtme başlangıcında, enjeksiyonun başlangıç anı ÜÖN'den uzaklaştıkça belirtilen aralık için pik ısı açığa çıkış hızında artış ortaya çıkmıştır. Bütanol karışımlarında bu eğilim başlarda daha da belirgin %40 bütanol ilavesine gelindiğinde bu eğilim tersine dönmüş ve 6° KMA gecikmeli püskürtme şartında en düşük ısı açığa çıkış hızı değeri ortaya çıkmıştır. 3 bar OEB şartında en düşük özgül yakıt sarfiyatı 6° KMA ÜÖN öncesi ana püskürtme avansı şartında 310 g/kWh'nin bir miktar altında değer almıştır. 6° KMA ÜÖN sonrası püskürtme başlangıcı şartında ise bu değer 320g/kWh değerini aşmaktadır. Yakıt içerisindeki n-bütanol oranı arttıkça daha büyük özgül yakıt sarfiyatı farklılıkları ortaya çıkmıştır. 5 bar OEB şartında ise en düşük ve en yüksek özgül yakıt sarfiyatını veren enjeksiyon başlangıç zamanlamaları değişmemiştir. Konvansiyonel motorin için 6° KMA avanslı ana püskürtme şartında 250 g/kWh değerinin altında olan özgül yakıt sarfiyatı değeri, 6° KMA gecikmeli püskürtme şartında 270 g/kWh değerine çıkmıştır. Burada motor yükü arttıkça püskürtme avansı değişiminin yarattığı özgül yakıt sarfiyatındaki kötüleşmenin oransal olarak arttığı ve sistemin püskürtme zamanlamasına karşı daha hassas hale geldiği söylenebilir. Ancak n-bütanol karışımı kullanılması ve n-bütanol oranının artması ile 5 bar OEB şartında özgül yakıt sarfiyatı davranışı yine gecikmeli püskürtme şartında kötüleşse de konvansiyonel motorine göre bu durumdan daha az etkilenme söz konusudur. Saf motorin kullanımında ve 3 bar OEB şartında en yüksek özgül NO_x salımı ÜÖN öncesi 6° KMA püskürtme avansında 4 g/kWh değerinin biraz üzerinde seyrederken ÜÖN sonrası yapılan her üç püskürtme zamanlamasında da 2,5 g/kWh değerinin biraz üzerinde değerler görülmüş ve yanmanın daha fazla genişlemeye kayması ile özgül NO_x salımında belirgin düşüş ortaya çıkmamıştır. 5 bar OEB şartında ise benzer bir değişim eğilimi ve biraz daha düşük özgül NO_x emisyonları ortaya çıkmıştır.

Kakati vd. [177] CDC ve PCCI stratejilerini karşılaştığı çalışmada, CDC şartında enjeksiyon tek fazda ve 23° KMA püskürtme avansında gerçekleştirilmiştir. PCCI stratejisinde de püskürtme varyasyonları 35° KMA ön püskürtme avansı ve 5° KMA ana püskürtme avansı, 45° KMA ön püskürtme avansı ve 15° KMA ana püskürtme avansı, 55° KMA ön püskürtme avansı ve 23° KMA ana püskürtme avansı

şeklindedir. 55° KMA ön püskürtme avansı ve 23° KMA ana püskürtme avansında yapılan çalışmada, yani ana püskürtme faz zamanı aynı kalmak koşuluyla enjeksiyonun iki faza bölündüğü şartta %10 ve %20 ön püskürtme oranında ppm cinsinden ciddi NO_x düşüşleri ortaya çıkmış, ön püskürtme oranı %50 seviyesine geldiğinde ise NO_x emisyonları tek fazda püskürtmeye göre artış göstermiştir. 35° KMA ön püskürtme avansı ve 5° KMA ana püskürtme avansı senaryosunda ise %10 ve %20 ön püskürtme oranında CDC şartına göre ciddi düşüş ortaya çıkmış, ardından artan ön karışım oranlarında, yani %50 ön püskürtme oranında ise ciddi bir değişim ortaya çıkmamıştır. 45° KMA ön püskürtme avansı ve 15° KMA ana püskürtme avansında ise %10 ön karışım oranında NO_x düşüşü gözlemlenirken daha yüksek ön karışım oranlarında püskürtmenin ÜÖN'den uzaklaşmasıyla artış ortaya çıkmıştır. Ön karışım oranının %0'dan %10'a çekilmesiyle CDC'ye göre THC emisyonlarında düşüş gözlemlenmiş, ardından ön karışım oranı belli bir değerin üzerine çıktığında THC değerleri artış eğilimine girmiştir. Tahmin edileceği üzere püskürtmenin ÜÖN'den uzaklaşmasıyla birlikte THC'deki artış eğilimi daha yüksek seyretmiştir. PM emisyonlarındaki düşüş ise yüksek ön püskürtme oranlarında ortaya çıkmıştır. Belirtilen işletme şartında ekserji verimi CDC şartında %24 seviyesindeyken, %10 ön püskürtme oranı için ekserji verimi %21 ile %18 arası bir bandına düşmüş, ardından ön püskürtme oranının artmasıyla bir miktar artış sergilemiştir.

Lu vd. [178] tek fazda ve çift fazda yakıt püskürterek 1000 dev/dak, 1400 dev/dak ve 1800 dev/dak motor hızlarında deneysel ve matematiksel bazlı çalışma yürütmüştür. Tek fazda gerçekleştirilen enjeksiyonda yakıt 15° KMA, 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avansında silindir içerisine sevk edilmeye başlanmıştır. Bu şartta püskürtme avansının artışına bağlı olarak indike verimde %8'in üzerinde düşüş meydana gelmiştir. Kademeli püskürtme şartında ise ön püskürtme 30° KMA püskürtme avansında, ana püskürtme ise 20° KMA püskürtme avansında gerçekleştirilmiştir. Ön karışım oranı ise %10'luk adımlar halinde %20 ile %70 arasında değiştirilmiştir. Ön karışım oranının artışı ile beklenildiği üzere termik verimde düşüş ortaya çıkmıştır. Ancak verimdeki bu düşüş nispeten makul değerlerde seyretmiştir. Ön karışım oranının %20'den %60'a çıkarılması ile %4 bandında indike verim düşüşü ortaya çıkmış, ön karışım oranının %70'e çıkarılışında ise eğilim farklılaşması ortaya çıkmış ve indike verim artma eğilimine

girmiştir. 1000 dev/dak motor hızındaki sonuçlar incelendiğinde özgül NO_x emisyonları %60 ön karışım oranına kadar düşüş göstermiş, %70 ön karışım oranında ise indike verimde iki ön karışım oranı arasında artış ortaya çıkmış olsa da özgül NO_x değeri artmıştır. PM emisyonlarında ise ön karışım oranı artışına bağlı olarak düzenli düşüş görülmüştür. 1400 dev/dak motor hızında ön karışım oranının artmasıyla birlikte sürekli değişen özgül NO_x ve özgül PM değişim eğilimleri ortaya çıkmış, tutarlı bir çıktı elde edilememiştir. 1800 dev/dak motor hızında ön karışım oranı arttıkça özgül PM emisyonu düzenli düşüş gösterse de özgül NO_x değişim eğilimi yine 1400 dev/dak eğilimlerine benzer sonuçlar vermiştir.

Jain vd. [79] yaptıkları çalışmada tek silindirli, sıkıştırma oranı 17,5 olan bir motor kullanmış ve pilot püskürtme avansının 30° KMA ile 40° KMA arasında, ana püskürtme avansının da 12° KMA ile 24° KMA arasında değiştiği şartlarda deneysel çalışma yapmıştır. Çalışmada püskürtme basıncı 700 bar, motor hızı 1500 dev/dak, EGR oranı %0 ile %30 arasında değiştirilmiş ve yakıt olarak motorin kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre 35° KMA ön püskürtme avansında, ana püskürtme avansı 12° KMA'dan 24° KMA'ya doğru gittikçe TG süreci uzamıştır. 24° KMA ana püskürtme avansında ve %0 EGR oranında 14° KMA civarında TG elde edilmiş, 12° KMA ana püskürtme avansında ise TG süreci 9° KMA dolaylarında değer almış ve %30'a kadar artan EGR oranının kayda değer etkisi gözlemlenmemiş olup bu oranların güvenli sınırlar içerisinde olduğu belirtilmiştir. Yanma sürecine baktığımızda da 24° KMA ana püskürtme avansında 13° KMA ile 14° KMA dolaylarında yanma süreci saptanmış, 12° KMA ana püskürtme avansında ise 17° KMA ile 18° KMA dolaylarında yanma süreci gözlemlenmiştir. EGR oranındaki artışın yanma gürültüsü üzerinde olumlu etki yarattığı görülmüştür. 35° KMA pilot püskürtme avansı ve 24° KMA ana püskürtme avansında EGR oranı %0'dan %30'a çıkartıldığına yanma gürültüsü 95 dB civarından 92 dB civarına düşmüştür. Yine aynı şartlarda efektif termik verim değerleri incelendiğinde EGR uygulanmaksızın gerçekleşen yanmada püskürtme avansı değişimine bağlı olarak belirgin düşüşler gözlemlenirken %30 EGR oranına gelindiğinde bu düşüş oranı oldukça dar bir banda sıkışmıştır. Ana püskürtme avansı arttıkça, egzoz gaz sıcaklığında EGR uygulanmayan şartta 20 K civarında düşüş yaşanmıştır. EGR uygulanmasına bağlı olarak bu değerler birbirine oldukça yakın değerlere sıkışmıştır. Ancak yapılan

çalışmada özgül NO_x salımlarının püskürtme avansı artışına bağlı olarak artış sergilediği gözlemlenmiştir.

Shi vd. [179] dört silindirli, 2,147 litre silindir hacmine sahip, sıkıştırma oranı 14,8 olan bir motorda 160 MPa püskürtme basıncı ve %50 motor yükünde, yakıt olarak motorin kullanarak, çift fazlı püskürtme stratejisinde DSY üzerine deneysel çalışma yürütmüştür. Yapılan deneyler 1000 dev/dak ve 1500 dev/dak olarak iki farklı motor hızında, %45 EGR oranında gerçekleştirilmiştir. Çevrim başına 49 mg/strok yakıt silindir içerisine enjekte edilmiştir. Çalışmada yakıtın büyük kısmı ilk fazda silindir içerisine sokulmuş ve bu fazda yakıtın kütleli olarak %80 ile %100 arasında değişen kısmı yanma odasına sokulmuştur. İlgili fazın püskürtme avansı 40° KMA ile 95° KMA aralığında değiştirilmiştir. Tetikleyici püskürtme ise kütleli olarak toplam yakıtın %20'ye kadar çıkan oranında ve 20° KMA püskürtme avansında sabit tutulmuştur. Motor hızının 1000 dev/dak olduğu ve ilk püskürtme fazının 60° KMA püskürtme avansında yapıldığı şartta, ilk püskürtme fazında yakıtın %80 ve %85'lik kısmının silindir içerisine sokulması ile daha makul silindir içi anlık basınç - krank açısı verileri ortaya çıkmış, ancak kütleli olarak %90'lık ilk faz püskürtmesinde ÜÖN öncesi basınç artışı oldukça yüksek setretmiştir. Yakıtın tamamının tek fazda silindir içerisine sevki şartında basınç-krank açısı grafiği üzerindeki basınç verileri daha düşük değerler almıştır. Ancak motor hızının artmasıyla elde edilen, yani 1500 dev/dak motor hızında ortaya çıkan verilere bakıldığında ilk püskürtme fazında silindir içerisine sokulan yakıt miktarı arttıkça yanma odası basınç - krank açısı eğrisinin altındaki alan artış göstermiş ve önemli oranda ÜÖN sonrasında bu eğilim ortaya çıkmıştır. 1000 dev/dak motor hızında, kademeli püskürtmede ana püskürtmenin sonra ermesinden yanmanın başlangıcına kadar geçen süreç çok küçük farklılıklar barındırarak 10° KMA bandında değerler almıştır. Ancak 1500 dev/dak motor hızındaki verilere bakıldığında ilk püskürtme fazında silindir içerisine giren yakıt miktarı arttıkça yanma başlangıcı ÜÖN'ye yaklaşmış ve TG süreci uzamıştır. İlk fazda püskürtülen yakıtın kütleli olarak %80'den %90'a çıkması ile her iki motor hızında da CO ve THC artış göstermiş, NO_x emisyonları ise 1000 dev/dak motor hızında artış gösterirken, 1500 dev/dak motor hızında bir miktar düşüş sergilemiştir. İlk fazda püskürtülen yakıt oranını %85'te sabit tutulup, püskürtme başlangıcının 40° KMA ile 95° KMA püskürtme avansı arasında değiştirilmesi durumunda ön püskürtme avansının artması OİB

değerinin düşürmüştür. 1500 dev/dak motor hızında, 1000 dev/dak motor hızına göre daha küçük bir değişim gözlemlenmiş, motor arttıkça püskürtme avansına bağımlılık bir miktar azalmıştır.

Shenawy vd. [180] yaptıkları çalışmada dizel motorlarında ön karışım oranının performans ve emisyon değerleri üzerine etkisini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışma tek silindirli, 825 cm³ hacimli, sıkıştırma oranı 17 olan bir motorda ve farklı motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada püskürtme zamanlamaları sabit tutulmuş, silindir içerisine sokulacak yakıt ile %20, %25 ve %30 oranlarında ön karışım yaratılmıştır. %50 motor yükünde alınan verilere göre silindir içi pik basınç değeri, ön karışım oranının artmasıyla artış göstermiştir. Belirtilen ön karışım oranlarında silindir için pik basınç değeri sırasıyla 65,2 bar, 67,5 bar ve 74,5 bar değerini almıştır. Ön karışım oranı arttıkça pik basıncın yakalandığı konumun belli belirsiz olarak daha erken yakalandığı gözlemlenmiştir. Farklı motor yüklerinde ön karışım oranı arttıkça özgül yakıt sarfiyatında düzenli düşüş gözlemlenmiştir. Bu eğilim özellikle düşük motor yüklerinden orta seviyedeki motor yüklerine doğru gidildikçe daha da belirginleşmiştir. CO emisyonlarının düşük motor yüklerinde daha çok salındığı görülmektedir. Özellikle düşük motor yüklerinde belirgin olmak üzere, ön karışım oranı arttıkça NO_x emisyonlarında ciddi seviyede düşüşler göze çarpmıştır. %10 motor yükünde, tek fazda püskürtmeye göre %20 kütleli oranda ön karışım yaratılması durumunda %50 civarında, %30 oranında ön karışım yaratılması ile de yaklaşık olarak %75 oranında NO_x düşüşü gözlemlenmiştir. %50 motor yüküne gelindiğinde aynı eğilim devam etmekle beraber oransal olarak daha küçük bir değer ortaya çıkmıştır. Bu şartta tek fazda püskürtmeye göre kıyas yapıldığında, %20 ön karışım oranının takriben 1/3, %30 oranında ön karışım yaratmanın ise 2/3 oranında NO_x emisyonlarını düşürücü etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Ön karışım oranı arttıkça egzoz gaz sıcaklıklarında da düşüşler ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten daha yüksek motor yüklerine doğru gidildikçe egzoz gaz sıcaklıkları arasındaki farkın daha da büyüdüğü göze çarpmıştır.

Torregrosa vd. [181] yaptıkları çalışmada ön püskürtme zamanlaması ve ana püskürtme zamanlaması manipüle etmiştir. Çalışmada pilot püskürtme miktarı %20 ile %60 arasında değiştirilerek 1500 dev/dak motor hızı ve düşük yüklerde testler gerçekleştirmiştir. Püskürtme basıncı 800 bar olarak seçilmiş, EGR oranı ise %50'ye kadar çıkmıştır. Çalışmada enjektör enerjilendirme başlangıcı ön

püskürtme için ÜÖN öncesi 26° KMA ile 38° KMA arasında, ana püskürtme ise 6° KMA ile 26° KMA arasında değiştirilmiştir. Sıkıştırma oranı 18 olan aşırı doldurmalı motorda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlara göre ön püskürtme enjeksiyon miktarı %20'den %60'a doğru arttırıldıkça önceleri NO_x emisyonlarında bir miktar artış gözlemlenmiş, ardından düşüş eğilimi görülmüştür. Daha büyük püskürtme avanslarında ise ön püskürtme miktarı arttıkça düzenli olarak NO_x emisyonları düşüş göstermiştir. Benzer şekilde ön püskürtme oranının artışıyla PM emisyonları da dramatik düşüşler göstermiştir. OEB değerlerinde ön püskürtme miktarı arttıkça bir miktar düşüş gözlemlenmiş ve püskürtme avansı arttıkça da OEB değerlerinde düşüş görülmüştür. Özgül yakıt sarfiyatında ise ön püskürtme miktarın artışına bağlı olarak %20'lere varan artışlar görülmüştür. Ana püskürtme avansının arttırılması ile hem NO_x hem de PM emisyonlarında düşüş gözlemlenmiştir. Ana püskürtme fazında silindir içerisine giren yakıt miktarı arttıkça farklı püskürtme avansları arasındaki makas bir miktar kapansa da büyük püskürtme avanslarında daha yüksek özgül yakıt sarfiyatı değerleri görülmüştür.

Huang vd. [182] ana püskürtme avansını sabit tutarak, ön püskürtme avansını ve miktarı değişiminin, diğer bir deyişle ön karışım oranı artışının, performans ve emisyon değerleri üzerine etkisini deneysel ve simülasyon bazlı olarak incelemiştir. Yapılan çalışma 4 silindirli, 1,99 litre hacme sahip, sıkıştırma oranı 16,5 olan, OHYBPS'li bir motorda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada motor hızı 1600 dev/dak, motor yükü %35, EGR oranı %26,8, doldurma havası sıcaklığı 30° C, soğutma suyu sıcaklığı 85° C, doldurma havası basıncı 0,14 MPa, püskürtme basıncı 90 MPa olarak belirlenmiştir. Çalışmada konvansiyonel motorin ve hacmen %30 n-bütanol ve motorin karışımı için sonuçlar incelenmiştir. Çevrim başına konvansiyonel motorin kullanımı durumunda 21 mg, karışım yakıtta ise 22,5 mg yakıt püskürtülmüştür. Ana püskürtme avansı 7° KMA değerinde sabit tutulmuş, ön püskürtme oranı %5 ile %20 arasında (1,05 ile 4,2 mg arasında) ve ön püskürtme ise ana püskürtme avansından 15° KMA ile 45° KMA önce gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, konvansiyonel motorin kullanımında, ön püskürtme ile ana püskürtme arasındaki faz açısı 15° KMA'da sabit tutulduğunda tek fazda püskürtmeye göre, %5 ve %10 ön püskürtme oranlarında ÖÖN öncesi kayda değer basınç gradyan farklılıkları ve değerlendirmeye değer ısı açığa çıkış hızı değerleri

gözlemlenmemiştir. Aynı zamanda %15 ve %20 ön püskürtme oranlarında ÜÖN öncesi yüksek basınç gradyanı ve ısı açığa çıkış hızları gözlemlenmiştir. Ön püskürtme oranının %15 değerinde sabit tutulup, ön püskürtme başlangıcı ile ana püskürtme başlangıcı arasındaki faz açısının arttırılması durumunda ise ÜÖN öncesi basınç artış gradyanının daha düşük değerler aldığı ve ÜÖN öncesi ısı açığa çıkış hızı değerlerinin daha düşük seyrettiği tespit edilmiştir. Ön püskürtme oranının %15 değerinde sabit tutularak iki püskürtme arasındaki faz açısının değişimi incelendiğine 30° KMA püskürtme faz açısı farkına kadar kademeli püskürmede daha yüksek verim elde edilmiştir. İki püskürtme arasındaki faz farkının arttırılması ile verim düşüş gösterse de iki püskürtme arasında 45° KMA faz farkı için bu fark konvansiyonel motorin için %2, n-bütanol ve motorin karışımı için ise %2,5 seviyesindedir. Ön püskürtme ile ana püskürtme arasındaki faz farkının 15° KMA değerinde sabit tutulduğu şartta her iki yakıt için de ön püskürtme oranının %5'ten %10'a çıkması ile termik verimde küçük bir düşüş gözlemlenmiş, devamında ön püskürtme oranının %20'ye kadar arttırılması ile düzenli artış görülmüştür. %10 ön püskürtme oranında konvansiyonel motorin için %35 bandındaki efektif verim değeri, %20 ön püskürtme şartında %38'e oldukça yaklaşmıştır. Ön püskürtme oranının %15'te sabit tutulup, iki püskürtme başlangıcı arasındaki faz açısının belirtilen aralıkta arttırılması ile konvansiyonel motorin kullanımında PM salımları %75'ten daha büyük oranda düşüş göstermiştir. N-bütanol ve motorin karışımında ise bu oran daha yüksektir. Ön püskürtme oranı arttıkça özgül PM emisyonu açısından daha iyi sonuçlar göze çarpmıştır. Bu çalışma dahilinde ön püskürtme oranının arttırılması ile özgül NO_x emisyonlarında ciddi değişimler gözlemlenememiş olup, %10'u aşan ön püskürtme oranlarında belli belirsiz bir düşüş gözlemlenmiştir. Özgül CO emisyonları hem ön püskürtme oranı arttıkça hem de iki püskürtme arasındaki faz açısı arttıkça artış göstermiştir. Düşük ön püskürtme oranlarında bu fark pek belirgin olmasa da %20 ön püskürtme miktarında 3 katın üzerinde özgül CO emisyonu artışı saptanmıştır.

Park ve Bae [183] 498 cc³ deplasman hacimli, doğal emişli, sıkıştırma oranı 16 olan bir motorda 1200 dev/dak motor hızında, 75 MPa ve 120 MPa püskürtme basınçlarında farklı püskürtme avanslarının etkilerini incelemiştir. Yakıt enjeksiyonunun hem tek kademede hem de iki kademede gerçekleştirildiği çalışmada kademeli püskürtmede ön püskürtmedeki kütle oran %10 ile %50

arasında değiştirilmiştir. Çevrim başına yakıt enjeksiyonu ise 11,5 mm³/strok olarak belirlenmiştir. Tek kademede yapılan püskürtmede, püskürtme avansı 5° KMA ile 60° KMA arasında değiştirilmiştir. 30° KMA üzeri püskürtme avanslarında, püskürtme avansı artışına bağlı TG süreci artışı her iki püskürtme basıncı için de yaklaşık eşit miktarda değişim göstermiştir. Bu durumda 30° KMA değerini aşan püskürtme avanslarında yanmanın başlangıcı yaklaşık olarak aynı noktaya tekâmül etmektedir. Her iki püskürtme basıncı için de %15 üzeri EGR değerinde belirginleşmeye başlamakla %30 üzeri EGR oranlarında ısı açığa çıkış hızı ciddi seviyede yavaşlamaktadır. Kademeli yapılan püskürtmede ana püskürtme avansı 25° KMA'da sabit tutulmuş, ön püskürtme avansı ise 5° KMA adımlar halinde 30° KMA ile 60° KMA aralığında değiştirilmiştir. Bu şartta elde edilen OİB değerlerinde 35° KMA püskürtme avansına kadar bir miktar artış gözlemlenmiş, ardından 45° KMA püskürtme avansına kadar düşüş yaşanmış ve ardından bir artış ve düşüş eğilimi daha görülmüştür. Ön karışım oranı azaldıkça tahmin edileceği üzere püskürtme avansı değişimine bağlı değişimler nispeten dar bir banda yerleşmiştir. %40'a kadar ön karışım oranlarında birbirine yakın seyirler ortaya çıkarken %50 ön karışım oranında özellikle 40° KMA ile 50° KMA püskürtme avans aralığında ciddi OİB düşüşü ortaya çıkmıştır. Ön karışım oranı arttıkça NO_x salımlarında ciddi düşüşler ortaya çıkmıştır. NO_x salımlarında, genel olarak 30° KMA ön püskürtme avansından 35° KMA püskürtme avansına geçildiğinde bir miktar artış görülmüş, ardından 45° KMA püskürtme avansına kadar düşüş, sonrasında tekrardan bir dalgalanma göze çarpmıştır. PM salımlarında genel olarak ön karışım oranının artışına bağlı olarak başlarda bir düşüş ortaya çıkarken %40 ve %50'lik ön karışım oranlarında FSN ölçeğine göre tekrardan artış göze çarpmıştır. CO ve THC emisyonlarında ise püskürtme avans artışına bağlı genel eğilim olarak artış görülmüştür. Ancak THC emisyonlarında %10 ön karışım oranında 40° KMA püskürtme avansına kadar artış görülmüş, bunun ardından artan püskürtme avanslarında düşüş göze çarpmıştır.

Qian vd. [184] dört silindirli, direkt püskürtmeli, 1,325 litre hacme sahip, sıkıştırma oranı 18 olan bir dizel motorunda PCCI uygulamasına dönük olarak farklı püskürtme stratejilerinin etkisini incelemiştir. Yapılan testler 1500 dev/dak motor hızında, 120 MPa püskürtme basıncında, 40 mg/çevrim yakıt enjeksiyonunda ve %50 EGR oranında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada n-dodekan, n-

heksadekan, n-oktadekan, heptametildekan, dekalin ve metilnaftalenin farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilen sentetik dizel yakıtı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan karışımların setan sayısı 51, 40 ve 30 değerindedir. Çalışmada iki farklı püskürtme stratejisinin bu ikame yakıtların kullanımındaki davranışları incelenmiştir. Tüm püskürtme stratejilerinde ana püskürtme 7° KMA püskürtme avansında sabit tutulmuştur. Strateji farklılığı ise ön püskürtmeyi 50° KMA püskürtme avansında ve %20 ile %40 arasında değişen oranlarda püskürtmek ya da %30 ön püskürtme miktarını 30° KMA ile 60° KMA ön püskürtme avansı arasında değiştirmekle gerçekleştirilmiştir. Ön püskürtme avansının 50° KMA değerinde sabit tutulup ön püskürtme kütlelerinin artışı durumunda ÜÖN öncesi basınç artışı belirginleşmiş, pik basınç değeri artış göstermiştir. Aynı zamanda, belirtilen şartlarda setan sayısı düştükçe ısı açığa çıkış hızı anlık değerlerinin genişlemeye stroğuna kayan miktarı artmıştır. Yüksek setan sayılı yakıt örneklemelerinin kullanımı tüm ön püskürtme oranlarında daha uzun yanma süreci ile sonuçlanmıştır. Ön püskürtme kütle oranının %20'den %40'a çıkarılması ile %50'lik ısı açığa çıkış konumuna kadar geçen yanma safhası uzamış, yanmanın tamamlanmasına kadar geçen süre bu durumdan pek etkilenmemiştir. Setan sayısı arttıkça, ön püskürtme kütlesi artışında %50'lik ısı açığa çıkışı süresinin uzadığı görülmüştür. Maksimum basınç artış değeri, ön püskürtme kütlesi arttıkça erken püskürtme stratejisinin yanmaya hâkim gelmeye başlamasına bağlı olarak düşüş göstermiştir. Setan sayısı değişimine göre ortaya çıkan eğilimlere bakıldığında ise düşük setan sayısındaki yani setan sayısı 30 olan yakıt için pek fark gözlemlenemese de 40 ve 51 setan sayılı yakıtlar için elde edilen sonuçlarda ön püskürtme kütlelerinin %20'den %40'a çıkarılması sonucunda basınç artış gradyanı 5 bar/°KMA'dan daha küçük değerler almıştır. Daha düşük setan sayılarında CO, THC ve NO_x emisyonları artış göstermiştir. Ön püskürtme kütlesi arttıkça CO ve THC emisyonları artış göstermiş ve bu çalışma için THC'nin bu durumdan daha fazla etkilendiği görülmüştür. Ön karışım oranının %40'a kadar arttırılması ile NO_x emisyonlarında az da olsa düşüş elde edilmiştir. Daha düşük setan sayılı yakıt kullanımının %1 ile %2 arasında sayısal verim düşüşüne yol açtığı görülmektedir. Ön püskürtme oranı arttıkça aradaki verim kaybı %2'ye yaklaşmıştır. Ön püskürtme kütle oranının %30'da sabit tutulup püskürtme avansının 30° KMA ile 60° KMA arasında değiştirilmesi durumunda püskürtme avansı arttıkça ön reaksiyonların basınç arttırıcı etkisi büyük oranda ortadan kalkmıştır. Düşük püskürtme avansı için düşük

setan sayılarında daha yüksek CO ve THC elde edilmiştir. Ancak yüksek püskürtme avansında farklı setan sayısındaki yakıt örneklerinin arasındaki fark azalmıştır. NO_x emisyonları ise püskürtme avansı arttıkça düşmüş, yüksek oktan sayısına sahip numuneler püskürtme avansının artışıyla daha fazla iyileşme sergilemiştir. Ön püskürtme avansının 30° KMA değerinden 50° KMA değerine getirilmesi ile CN51 numunesinde indike termik verim %46'yı aşan bir seviyeden %44'ün altına düşmüştür. Düşük setan sayılı yakıt olan CN30 numunesinde püskürtme avansının değişimi sonucu verim düşüşü daha yüksek değerler almıştır.

Cheng vd. [185] düşük motor yüklerinde, sıkıştırma oranı 16,4 olan bir dizel motorunda 1270 dev/dak motor hızı, 10 MPa püskürtme basıncı, 60,5 mg/çevrim yakıt püskürtme miktarı ve %36 EGR oranında, ana püskürtme avansını 5° KMA değerinde sabit tutulduğu şartlarda farklı enjeksiyon stratejileri üzerine çalışma yürütmüştür. Çalışmanın bir kısmında %20 ön püskürtme oranındaki ön püskürtme 15° KMA, 35° KMA ve 55° KMA püskürtme avansında gerçekleştirilmiş, çalışmanın bir diğer kısmında ise ön püskürtme avansı 55° KMA değerinde sabit tutularak %20, %30, %40 ve %50'lik ön püskürtme oranları ile çalışılmıştır. Ön püskürtme miktarının %20'de sabit tutularak ön püskürtme avansının 15° KMA ile 55° KMA arasında değiştirildiği şartta ÜÖN öncesi basınç artışının 35° KMA püskürtme avansında bir miktar daha yüksek seyrettiği görülmüştür. ÜÖN sonrası basınç verilerinde ise püskürtme avansı arttıkça bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Fakat bu düşüş ciddi bir fark yaratacak nitelikte değildir. Ortalama silindir içi sıcaklık verilerine bakıldığında ise basınç verileri ile benzer bir değişim gözlemlenmiştir. 35° KMA püskürtme avansında en yüksek yanma verimi gözlemlenirken 55° KMA ön püskürtme avansında elde edilen yanma verimi 15° KMA ön püskürtme avans verisinden daha yüksek seyretmiştir. Özgül yakıt sarfiyatı verilerine bakıldığında ön püskürtme avansının 15° KMA'dan 35° KMA değerine çıkmasıyla özgül yakıt sarfiyatı değerinde 13 ile 14 g/kWh arasında bir artış görülürken, 55° KMA ön püskürtme avansına gidildiğinde 35° KMA ön püskürtme avans değerine göre bir miktar düşük özgül yakıt sarfiyatı verisi ortaya çıkmıştır. Ön püskürtme avansı artışına bağlı olarak CO ve THC emisyonlarında mertebe olarak, CO emisyonu daha fazla etkilenmek üzere, düzenli artış gözlemlenmiştir. NO_x ve PM emisyonlarında ise 15° KMA ön püskürtme avansından 35° KMA ön püskürtme avansına geçişte ciddi bir düşüş

gözlemlenirken ardından daha küçük bir değişim ile azalma görülmüştür. Ön püskürtme avansının 55° KMA değerinde sabit tutularak ön püskürtme oranının %20 ile %50 arasında değiştirildiği şartlarda %30 ön karışım oranında en yüksek yanma verimi elde edilmiştir. Ardından 50° KMA ön püskürtme avansı değerine gelene kadar yanma verimi %4 - %5 arasında düşüş sergilemiştir. Özgül yakıt sarfiyatında ise ön karışım oranı artışına bağlı olarak, özellikle %30 üzeri ön karışım oranlarında, düzenli artış görülmüştür. Ön karışım oranı arttıkça THC emisyonları düzenli olarak artmış, PM ve CO emisyonları düzenli olarak düşüş göstermiş, NO_x emisyonları ise başlarda oldukça küçük değişimler göstermekle beraber %40 üzeri ön karışım oranında artan hızla artış sergilemiştir.

Zehni vd. [186] KIVA ortamında CFD bazlı çalışma yürütmüştür. Çalışma 477 cm³ deplasman hacimli, sıkıştırma oranı 16,7 olan bir motorda farklı püskürtme avanslarının etkisini incelemeye yöneliktir. Çalışma 2000 dev/dak sabit motor hızı ve kısmi motor yükünde gerçekleşmiş, püskürtülen yakıt miktarı sabit tutulmuş ve çevrim başına 14,31 mg/çevrim değerini almıştır. Tek kademeli püskürtmede püskürtme avansı 25° KMA ile 40° KMA arasında, iki kademeli püskürtmede ise ilk faz 25° KMA ile 40° KMA püskürtme avansı arasında değiştirilmiş, ikinci faz ise 14,5° KMA püskürtme avansında sabit tutulmuştur. Tek fazlı püskürtme şartında elde edilen verilere göre 5° KMA'lık adımlar halinde arttırılan püskürtme avansına TG cevabı 25° KMA ile 40° KMA püskürtme avans aralığında 8° KMA TG, 12° KMA TG, 16° KMA TG ve 21° KMA TG olarak gözlenmiştir. Bu durumda TG süreci artış sergilemiş ve yanmanın başlangıcı birbirine yakın noktalarda ortaya çıkmıştır. Pik basınç değerleri 25° KMA püskürtme avansında yaklaşık 115 bar iken 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avansında yaklaşık 113 bar ile 113,5 bar arasında, 40° KMA püskürtme avansında ise 115,5 bar olarak gözlemlenmiştir. Pik basınçlar ÜÖN sonrası elde edilmiş olup püskürtme avans artışına bağlı olarak pik basıncın elde edildiği nokta çok az da olsa daha fazla genişlemeye kaymıştır. OİB değeri 25° KMA püskürtme avansında 5,49 bar iken 40° KMA püskürtme avansında 5,64 bar değerine çıkmıştır. İndike özgül yakıt sarfiyatı değeri ise 25° KMA püskürtme avansında 192 g/kWh civarında, 40° KMA püskürtme avansında ise 186g/kWh civarında gözlemlenmiştir. 20° KMA ve 35° KMA püskürtme avansında bu iki değer arasında değerler ortaya çıkmıştır. Çalışmanın bir başka sonucu ise teğetsel döngü (swirl) oranı arttıkça PCCI stratejisinde CO ve THC emisyonlarının

düşüş sergilemesidir. Buna ilaveten artan püskürtme avansı ile CO ve THC'nin artışı büyük oranda sınırlanmakta ve püskürtme avansına hassasiyet azalmaktadır. Çalışmada iki kademeli püskürtme şartında ilk püskürtme avansı 25° KMA ile 40° KMA arasında değiştirilmiş, ikinci püskürtme fazı 14,5° KMA püskürtme avansındadır. Püskürtme fazlarının her ikisinde de enjektör açık kalma süreleri eşittir. Kademeli püskürtmede belirtilen aralıkta ön püskürtme avansının artırılması ile başlarda az da olsa ÜÖN öncesi ısı açığa çıkış hızı değerleri artış gösterse de 40° KMA ön püskürtme avansına gelindiğinde 35° KMA ön püskürtme avansına göre düşüş görülmüştür. 35° KMA ön püskürtme avansı değerine kadar püskürtme avansı arttıkça THC düşüş göstermiş, ardından tekrardan artış eğilimi görülmüştür. CO emisyonlarında belirtilen aralıkta artış görülme de 40° KMA ön püskürtme avansına doğru gidildikçe CO düşüşü önemsiz seviyeye gerilemiştir. NO_x emisyonları ise 30° KMA ön püskürtme avansında pik değere ulaşırken ardında düzenli düşüş sergilemiştir. 25° KMA ön püskürtme avansında 5,52 bar OİB ve 190,3 g/kWh indike özgül yakıt sarfiyatı değeri gözlemlenmiştir. 40° KMA ön püskürtme avansına kadar düzenli iyileşme gösteren bu değerler, 40° KMA ön püskürtme avansında 5,60 bar OİB ve 187,7 g/kWh indike özgül yakıt sarfiyatı ortaya koymuştur.

1.2 Tezin Amacı

Tez kapsamında dizel motorlarından kaynaklanan NO_x ve PM emisyonlarını azaltmak amacıyla uygulanan DSY stratejisi üzerinde çalışılmıştır. Dizel motorlarında çift yakıtlı DSY stratejileri konstrüktif güçlükler barındırmaktadır. Dahası taşıt motorlarında yakıt deposu ve enjeksiyon hattının yeniden tasarlanmasını gerektirmektedir. Bu sebeple tek yakıt sistemi hattı ile uygulanabilen dizel DSY uygulamaları daha uygulanabilir ve pratik bir durum ortaya koymaktadır. DSY'nin motorun belli çalışma bölgesinde uygulanabilir oluşu ve tüm işletme şartlarında uygulanmaya elverişli olmayışı tek yakıtlı DSY stratejisini daha çekici kılmaktadır. Bu çalışmada, DSY stratejisi olarak yanma başlangıcının daha tahmin edilebilir olduğu PCCI stratejisi gerek termik verimde dramatik düşüş yaşanmaması açısından gerekse de daha geniş bir motor yükü ve hızı elastikliği sağlaması açısından tercih edilmiştir. PCCI stratejisinin uygulanabilirliği ve çıktıları çalışma kapsamında incelenmiştir. Yakıt püskürtme stratejisi tek fazlı ve

çift fazlı olarak gerçekleştirilmiştir. Püskürtmenin tek fazda gerçekleştirildiği durumda üç farklı motor hızı, üç farklı yakıt enjeksiyon kütlesi için 8 farklı püskürtme avansı ve 4 farklı püskürtme basıncında veriler toplanmıştır. Bu aşamada literatürdeki çalışmalar detaylı olarak incelenmiş ve işletme parametreleri detaylı olarak toplanarak sonrasında çalışmanın araştırma uzayı belirlenmiştir. Tek fazda yakıt püskürtme şartında yapılan çalışmada 288 nokta bulunmaktadır. Deneysel çalışma noktasının fazlalığı sebebiyle deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve 60 noktadan deneysel veri alınmıştır. AVL-Boost ortamında termodinamik model kurulmuş ve bu deneysel veriler doğrulanmıştır. Elde edilen model parametrik değerlerinden deneysel verisine sahip olunmayan noktaların parametrik katsayılarını elde etmek adına yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Yapay sinir ağı modelinde elde edilen veriler ile tüm araştırma uzayının sonuçları, tekrar termodinamik modele geri dönülerek termodinamik model üzerinden elde edilmiş ve geniş bir araştırma uzayından elde edilen veriler ile stratejiyi detaylı olarak irdelemek amaçlanmıştır. Çalışmanın diğer bir kısmında ise toplam yakıt kütlesi sabit kalmak koşuluyla iki faz halinde yanma odasına püskürtülmüştür. Bu şartta da farklı ön püskürtme avansı ve püskürtme yüzdelilerinin emisyon ve performans çıktılarına etkileri incelenmiştir. Böylelikle geniş bir deney uzayı ve işletme parametresinin eş zamanlı olarak tekil ve birleşik etkilerinin belirlenmesi ve ortaya konabilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Dizel motorlarında DSY üzerine birçok çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmalar, özellikle 2010'lu yılların ikinci yarısından itibaren yoğunlaşmaktadır. Dizel DSY çalışmalarının önemli bir kısmı RCCI ve HCCI stratejisine odaklıdır. Fakat yine de PCCI stratejisinde de azımsanmayacak sayıda çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmaların çok önemli bir kısmı yüksek oranlarda EGR uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Fakat EGR'nin yanma hızını yavaşlatan etkileri nedeniyle diğer işletme parametrelerin yanma ve emisyon etkileri büyük oranda perdelenmekte veya bu parametreler etkilerini yitirmektedir. PCCI stratejinde EGR uygulanmayan çalışma ise sayıca azdır. Bu sebeple EGR uygulanmayan şartta PCCI stratejisinin performans ve emisyon çıktılarının elde edilmesi ve bu alanda literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Dahası farklı motor hızı, farklı motor

yükü, farklı püskürtme basıncı, farklı püskürtme avansı ve çift fazda püskürtme esnasında da ilaveten farklı ön karışım oranları şartında tüm performans ve emisyon çıktılarının beraber incelendiği ve çıkarım yapmayı sağlayacak bir yayına da rastlanamamıştır. Bu amaçla OİB, termik verim gibi faktörlerin yanı sıra yanma süreci uzunluğu, %50'lik ısı açığa çıkış oranlarının ayrı ayrı incelenmesiyle yanma sürecinin ne hızla başlayıp devam ettiğini, oluşan NO_x salımlarının kompozisyonunun ne olduğunu ve PCCI stratejisi baskınlaştıkça bu değişimin durumdan nasıl etkilendiği ortaya konduğu bu denli bütünsel bir çalışma bulmak oldukça güçtür. Bu detaylı parametrik çıktı değerlerinin bir arada değerlendirilmesi ve birbiri ile ilişkilendirilmesi çalışmanın özgün kısmını yaratmaktadır.



2 TEORİK ÇERÇEVE

2.1 Dizel Motorlarında Yanma

Dizel motorlarında yakıt olarak kullanılan motorinin viskozite ve kaynama noktası değerlerinin, yaygın kullanımda olan yakıtlara nazaran, nispeten yüksek oluşu yakıt ve havanın birbiriyle karışım yaratabilme kabiliyeti açısından bir kısıt oluşturur. Yakıt ve hava karışımının niteliği yakıtın reaktivitesinin ölçütü olan setan sayısına, yakıt yoğunluğuna, viskozite ve uçuculuk gibi parametrelere bağlıdır [187]. Bu sebeple yakıt, sıkıştırma stroğunun sonlarına doğru daha büyük sıcaklık değerlerinin ve silindir içi daha yüksek türbülans seviyesinin olduğu bir anda silindir içerisine püskürtülmektedir.

Dizel motorlarında yakıt ve havanın makro karışım karakteristiğini iyileştirmek adına silindir içerisinde radyal, teğetsel ve piston oyuğu içerisine doğru yönelen üç temel hava hareketi mevcuttur. Piston oyuğu bölgesine doğru yönelen girdap hareketi (squish olarak adlandırılmaktadır) ÜÖN öncesi 10° KMA dolaylarında en üst seviyeye ulaşmaktadır [188]. Dolayısıyla yakıtın yanmaya hazırlanma süreci açısından bir mahzur olmadığı müddetçe bu sürede yakıt ve havanın birbiriyle karışıyor oluşu avantaj sağlayacaktır.

Dizel yanması temel olarak dört farklı safhada incelenmektedir. Bu dört faza göre yanmanın incelenmesi Ricardo'ya göre yanma olarak bilinmektedir. Bunlar tutuşma gecikmesi fazı, kontrolsüz yanma fazı veya ön karışimli yanma fazı, kontrollü yanma fazı veya difüzyon alev fazı ve art yanma fazlarıdır. Bu dört faz da yanma odası termodinamik şartlarından, özellikle de sıcaklık ve lokal hava fazlalık katsayısından etkilenmektedir. Dizel motorlarında yakıt ve havanın karışım oluşturmada yaşanan güçlükler dizel motorlarını fakir makro karışım ile çalışmaya mecbur bırakmıştır. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda makro düzeydeki yakıt ve havanın kütleli karışım olarak 1/18 ile 1/70 aralığında değişmektedir [188]. Fakir karışım yaratılması yoluyla teorik olarak tam yanmaya göre ihtiyaç

fazlası olarak silindir içerisinde bulunan hava, yakıtın oksijen ile buluşma kabiliyetinin artmasına imkan tanımaktadır.

Tutuşma gecikmesi fazı etkin enjeksiyonun başlangıcı ile ilk yanma çekirdeğinin yanma odası içerisinde oluşmasına kadar geçen süreç olarak tanımlanır. Güncel OHYBPS'lerde işletme şartına bağlı olarak istenilen püskürtme avansını gerçeklemek adına elektronik kontrol ünitesinde enjeksiyon sinyalinin gönderilmesine karar verilir. Elektronik kontrol ünitesinde karar verildikten sonra sinyalin enjektörlere gönderilmesi ve enjeksiyon gecikmesi sonrası enjektör iğnesinin açılma yönünde deplasmanı ile yakıt püskürtülmesinin başlamasına kadar genelde 0,3 – 0,4 ms dolaylarında süren bir gecikme yaşanır [189]. Bu süreçte enjeksiyon gecikmesi adı verilir. Yanma odasına yakıt enjeksiyonu ise enjeksiyon gecikmesi sonra erdikten sonra başlamaktadır. Etkin püskürtme başladıktan sonra ise tutuşma gecikmesi fazının başladığı söylenebilir. Tutuşma gecikmesi kendi içerisinde fiziksel tutuşma gecikmesi ve kimyasal tutuşma gecikmesi olarak iki alt süreçte incelenebilir. Fiziksel tutuşma gecikmesi yakıt ile havanın karışım oluşturmalarını temsil ederken kimyasal tutuşma gecikmesi ise reaksiyonların başlayacağı anla ilişkilidir [190].

Yakıt zerreciği enjektörü terk ettikten sonra sahip olduğu basınç ve hızının bir fonksiyonu olarak yanma odası içerisinde yayılım gösterir. Bu esnada yanma odası içerisinde var olan hava hareketleri yardımıyla, yakıt zerreciklerinin doğrultusu sapar ve yakıt zerrecikleri yanma odası içerisinde sürüklenmeye zorlanır. Hava ve yakıt zerreciğinin birbirine göre bağıl hız farkı sebebiyle yakıt zerreciği üzerinde yüzey gerilimleri değişmeye başlar ve damlacık kararlılığı bozulur. Bu etkiler ilerleyen süreçte yakıt damlacığının kararlılığını koruyamamasına yol açar ve yanma odası içerisinde belli bir nüfuziyet derinliğine ilerleyen yakıt yüzey gerilme kuvvetleri ile atalet kuvveti dengesinin korunamadığı bölgelerden parçalanmaya başlar. Devamında her yeni yakıt zerreciği için bu süreç tekrardan başlar ve ikincil parçalanma gerçekleşir. Söz konusu parçalanma rejimi yüzey gerilme kuvvetleri ile atalet kuvvetlerinin oranını veren Weber sayısının kritik bir değerine kadar devam eder. Sonrasında ise damlacık parçalanması durur. İlk parçalanma demet kırılma uzunluğu (break-up length) olarak adlandırılır. Parçalanma devam ettikçe püskürtülen toplam yakıt kütlesinin yüzey/hacim oranı artış sergiler ve dolayısıyla taşınım ısı transferi miktarı da sürekli olarak artmaktadır. Bu esnada daha küçük

parçacıklara ayrılan yakıtın kinetik enerjisi dolayısıyla da momentumu azalır ve birim zamanda kat edilen penetrasyon derinliği zaman geçtikçe düşüş gösterir. Hava ile yakıt arasında oluşan bağıl hız ne kadar yüksek ise zorlanmış taşınım katsayısı o kadar yüksek olacaktır. Aynı zamanda belirtildiği üzere yüzey/hacim oranı arttıkça damlacığın maruz kaldığı ısı akısı da o kadar artacaktır. Sürtünme ve bağıl sıcaklık farkı nedeniyle damlacık sıcaklığı bu durumda artış gösterir. İkincil parçalanma bölgelerinde belli bir süre sürüklenen yakıt nihayetinde kaynama noktasına erişir ve fiziksel hal değişimine uğrar. Böylelikle yakıt damlacığının merkezinde sıvı fazda yakıt çekirdeği dış kısımda ise yakıt buharı oluşur. Gaz fazına geçen yakıt zerreciği momentumunu önemli ölçüde kaybeder ve büyük oranda durağanlaşır (stagnasyona uğrar), sonrasında ise bu yakıt molekülleri silindir içi türbülansın anlık vektörlerine bağlı olarak sürüklenme eğilimine girer. Çekirdeğin merkez bölgesinde bulunan sıvı fazdaki yakıt ise bir miktar daha yüksek penetrasyon derinliğine doğru hareket eder ve zaman geçtikçe çekirdekte kaynama gözlemlenmeye devam eder.

Yakıtın kaynama noktasına ulaşarak faz değiştirmesi büyük oranda akış rejimini değiştirecektir. Çünkü yakıt moleküllerinin atalet kuvvetleri değişiklik gösterir. Yakıt buharının olduğu bölgeye hava hareketleri marifetiyle ulaşan sıkıştırma havası, yakıt ile karışmaya başlar. Bu karışma işlemi çok fazla noktadan ve farklı konsantrasyonlarda yakıt ile farklı bağıl hız ve türbülans seviyelerinde ortaya çıktığı için farklı hava fazlalık katsayılarında mikro karışımlar ortaya çıkar. Yakıt molekülleri de bir yandan ısı transferine maruz kalarak sıcaklığını artırır. Nihayetinde yakıt bir süre sonra kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşır. Yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşması yanmanın başlangıcı için bir gerek şart olup yeter şart niteliği taşımaz. Çünkü yakıt ve havanın belli oranlarda karışarak yanmayı başlatabilecek bölgeler oluşturması gerekmektedir.

Dizel motorlarının fakir karışımli motorlar oldukları bilinmektedir. Öyle ki tam yük şartında dahi dizel motorlarında hava fazlalık katsayısı 1'in üzerindedir. Ancak dizel motorları heterojen dolgulu motorlardır ve yanma odasında hava fazlalık katsayısı lokal olarak oldukça geniş bir aralıkta değişim göstermektedir. Yanmanın başladığı merkezlerde ise lokal hava fazlalık katsayısı stokiyometri yakınlarındandır. Esas olarak alev çekirdekleri 0,8 ile 1,8 eşdeğerlik katsayıları arasında oluşabilmektedir [188]. Bu değerler hava fazlalık katsayısı açısından 0,56

ile 1,25 arasına denk gelmektedir. Fakat oluşan alev çekirdekleri çok büyük oranda 1 ile 1,5 arasındaki eşdeğerlik katsayılarında yakıt demeti çevresinde bulunan karışım bölgelerinde oluşmaktadır [188]. Bu değerler ise hava fazlalık katsayısı açısından 0,67 ile 1 aralığına denk gelmektedir. Yakıt enjeksiyonunun başlayıp yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığına çıkarak bahsi geçen hava fazlalık katsayılarındaki karışım oranlarının sağlanmasına kadar geçen süre fiziksel tutuşma gecikmesi olarak adlandırılmaktadır. Devamındaki süreç ise yakıt ve havanın içerisinde bulunan oksijenin uygun çarpışma geometrisinde çarpışarak kimyasal tepkimeyi başlattığı kimyasal tutuşma gecikmesi sürecidir. Kimyasal tutuşma gecikmesi süre olarak son derece küçük bir zaman alır hatta çoğunlukla belirsizdir. Bu sebeple de tutuşma gecikmesi sürecinin pratik bir yaklaşımla fiziksel tutuşma gecikmesine eşit sayılması gözle görülür bir hataya yol açmaz.

Dizel motorlarında yanma esas olarak ön karışımli yanma ve difüzyon yanma olarak karakterize edilir [8]. Ön karışımli yanma fazı kontrolsüz yanma fazı olarak da adlandırılabilir. Bu fazın kontrolsüz yanma olarak adlandırılması bu süreçte yaşanan yanma olaylarının süreç içerisindeki püskürtme şartlarından bağımsız oluşundan kaynaklanmaktadır. Ön karışımli yanma fazındaki yanma bütünüyle tutuşma gecikmesi süresince yanma odası içerisinde oluşan şartlar tarafından tayin edilir. İlk alev cephesinin yanma odasında oluşmasına müteakiben o ana kadar yani TG süresince yanma odasına püskürtülmüş olan yakıt çok kısa sürede ani olarak yanmaya katılır. Kontrolsüz yanma fazında hızlı bir yanma ortaya çıkar. Hızlı yanma esas olarak içten yanmalı motorlarda termik verimi arttıran bir durumdur [191]. Bu esnada büyük basınç artışı gözlemlenir. Krank mili açısı başına ortaya çıkan basınç artışı ($dP/d\alpha$) belli bir değer üzerindeyse dizel vuruntusu oluşmaktadır. $dP/d\alpha$ değerinin özellikle 10 bar/°KMA seviyelerine ulaşması ciddi risk barındırmaktadır. Bu süreçte yanmanın ortaya çıktığı lokal karışım bölgelerinde yer yer 2700 K değerine kadar yerel sıcaklık değerleri ölçülebilir [192]. Yanmanın başlamasıyla beraber bir yandan basınç dalgaları ortaya çıkmakta bir diğer yandan da hava hareketlerinin artması sonucunda alev çekirdeği veya çekirdeklerinin iç ve dış kısmı arasında ısı ve kütle transferi artmaktadır. Bu bölgedeki yakıt da kısa sürede yanmaya hazır hale gelerek yanmaya iştirak eder. Bu esnada ısı girişi için reaksiyonlar açısından iki farklı süreç tanımlanabilir. Bunlardan ilki yakıt enerjisinin %7 ile %10'luk kısmının silindir içerisine girdiği

düşük sıcaklık reaksiyonları olarak tanımlanırken, kalan kısım ise yüksek sıcaklık reaksiyonları olarak adlandırılır [8]. Bu süreçte yakıtın kendi kendine tutuşma noktasına erişerek yanmanın başlaması sonrasında hali hazırda tutuşmaya son derece yatkın diğer bölgelerde de yakıt ve hava yanma için gerekli hazırlık sürecini tamamlar ve çok bölgeli bir yanma ortaya çıkar.

Ön karışımli yanma fazında, az önce belirtildiği gibi kısa sürede oluşan yanma gereğince ani bir basınç artışı olur. Buradaki ısı girişi ideal Otto çevrimine daha yakınsak bir karakterdeyken ideal Diesel çevrimine alabildiğine ıraksaktır. Fakat püskürtme avansı bakımından konvansiyonel aralıklarda çalışıldığı taktirde ve çok düşük yük bölgesinde çalışılmıyorsa püskürtme henüz sonlanmamıştır. Konvansiyonel dizel yanmasında enjeksiyonun sonra ermesiyle yanmanın başlaması arasında bulunan faz açısı (ignition dwell angle) negatiftir [193]. Konvansiyonel dizel yanmasında ön karışımli yanma sona erdiğinde, piston genellikle ÜÖN'ye oldukça yakın konumlanmaktadır. Sonrasında bir yandan enjeksiyon devam etmekte, bir yandan da yanma odasına püskürtülen yakıt hızlıca yanmaya katılmaktadır. Ticari motorinin setan sayısı göz önünde bulundurulduğunda bu yüksek sıcaklıktaki ortamda yakıtın yeterince hava ile karışmasına imkan bulamadan yanmaya katılacağı açıktır [194]. Bu fazda yanma hızı karışım oluşum hızından oldukça yüksek bir hızda meydana gelmektedir [195]. Bu sebeple de bu faza difüzif alev fazı adı verilmektedir. Bu esnada eğer ÜÖN yeni geçildiyse genişleme etkisi sebebiyle ortaya çıkacak basınç düşüşü ile yanma neticesinde oluşacak ısı açığa çıkışı sonucundaki basınç artış eğilimi belli bir seviyeye kadar birbirini karşılar ve bu süreçte yanma dar bir basınç değişim bandında gerçekleşir. Basıncın nispeten kontrol altında tutulabilmesi ve sürecin yakıt enjeksiyonu ile tayin edilmesi, difüzif yanma fazına aynı zamanda kontrollü yanma fazı da denmesine yol açmıştır. Konvansiyonel dizel yanmasına yanmanın çok önemli bir kısmı difüzif alev fazında gerçekleşmektedir [196]. Bu süreçte yakıt ile hava bir yandan karışırken bir yandan da yanma gerçekleşmekte, böylelikle yanma odası içinde yakıtça zengin ve yüksek sıcaklıklı bölgeler oluşmaktadır [197]. Bu yüksek sıcaklık bölgelerinde alev merkezlerinin çekirdek kısmı ile dış cepheler arasında kütle transferi yeterince sağlanamazsa, lokal oksijen yetersizlikleri nedeniyle PM emisyonları oluşmaya başlayacaktır. Ön karışımli yanma ve difüzif yanma fazının birbirine göre oranları PM formasyonunda önemli role sahip olup

PM emisyonlarından büyük oranda difüzif alev fazı sorumludur [198]. Özellikle difüzif alev fazında ortaya çıkan isli yanma bu fazda alevin çok büyük oranda optik geçirgen olmamasına ve görünebilir alevin ortaya çıkmasına sebebiyet verir. Difüzif alev fazında ön karışimli yanma fazına göre ısı kayıplar daha yüksektir. Difüzif alev fazında ısı kayıpların daha yüksek oluşunun iki temel sebebi vardır. Bunlardan ilki tahmin edileceği üzere ön karışimli yanma fazında sıcaklığın difüzyonlu yanma fazına göre daha düşük olmasıdır. İkinci önemli faktör ise difüzif alev fazında ortaya çıkan is PM'lerin radyasyon ısı transferine yol açmasıdır [199].

Enjeksiyonun sona ermesiyle difüzif alev fazı da pratik bir yaklaşımla sona ermektedir. Ancak bu esnada lokal zengin karışım bölgelerinde eksik oksidasyon ürünleri veya fakir bölgelerde THC bulunmaktadır. Devam eden süreçte oksidasyonlar bir süre daha devam etmektedir. Böylelikle yanmaya henüz katılmamış olan moleküllerin de büyük oranda yanmaya katılması sağlanır. Aynı zamanda bu süreçte, büyük oranda difüzif alev fazında oluşan PM tanecikleri de okside olur. Bu süreçte gelişen zayıf yanmanın motor performansı üzerindeki etkisi son derece sınırlı olup pratikte ihmalî büyük yüzdesel hatalara yol açmamaktadır. Burada oksidasyonunun seviyesinin düşüklüğünün yanında ortaya çıkan oksidasyonun fazlaca genişlemeye kaymış olmasının da bu süreçte silindir içerisine giren ısıнын yararlı iş yapabilme kabiliyetini olumsuz etkilediği söylenebilir.

OHYBPS ile püskürtmenin fazlandırılması ve daha yüksek basınçlarda yakıt enjeksiyonu gerçekleştirmek mümkün hale gelmiştir. Dizel motorlarında püskürtmenin fazlandırılması genel olarak ön püskürtme, ana püskürtme ve post püskürtme olarak üç kısma ayrılır. Konvansiyonel şartlarda ön püskürtme yakıtın oldukça küçük bir yüzdesinin silindir içerisine biraz daha erken bir zamanda sokularak ön reaksiyonların başlamasını ve devamında TG'nin daha kısa olması hedeflemektedir. Tek fazlı konvansiyonel püskürtme stratejisinde yakıtça zengin bölgelere oldukça sık rastlanır ve bu bölgeler PM oluşumunun temel kaynağıdır. Püskürtme kademeli yapıldığında ise yakıtça zengin karışım bölgeleri bir miktar azalmakta ve karışım daha fakir ve kademeli dolgu karakteristiğine yaklaşmakta ve is emisyonları düşüş göstermektedir [198]. Ön püskürtmenin bir diğer adı da pilot püskürtmedir. Pilot püskürtme, genel olarak, işletme şartına ve enjeksiyon sisteminin kabiliyetlerine bağlı olarak ÜÖN öncesinde 5° KMA ile 25° KMA arasında avans ile uygulanmaktadır [200]. Pilot enjeksiyon TG süresini kısaltır ve

daha stabil bir yanma gerçekleşmesini sağlar [201]. Özellikle yük arttıkça, silindire giren yakıt miktarının artışına paralel olarak yakıt hava karışımının homojenlik seviyesini kontrol altında tutmak güçleşmektedir. Bu zorluğu aşmak adına hem ön püskürtme yapmak hem de püskürtmeyi kademelendirmek dolgu heterojenite seviyelerini daha makul sınırlara çekmektedir [20].

2.2 Dizel Motorlarında Ortaya Çıkan Başlıca Emisyonlar

Dizel motorlarından yayılan emisyonlar, yanmanın kimyasal kompozisyonunun karmaşıklığı ve yakıtın içeriğine bağlı olarak oldukça farklılık gösterebilmektedir. Bunlar arasında ilk akla gelen aldehit, keton, polisiklik aromatik hidrokarbonlar, kükürtlü bileşiklerdir. İkincil kirletici sınıfı da dahil edildiğinde yayılan kirletici yelpazesi de genişlemektedir. CO, THC, PM ve NO_x temel emisyon olarak kabul edilen ve üzerinde en sık çalışılan 4 emisyondur. Güncel emisyon regülasyonu olan EURO 6 regülasyonunda hala daha dizel motorlarına yönelik THC salımları açısından bir kısıt bulunmamaktadır. Çünkü konvansiyonel dizel yanmasında oldukça düşük miktarda THC salımı ortaya çıkmaktadır. Fakat çalışmanın konusu olan PCCI stratejisinde THC emisyonlarının artış göstermesi nedeniyle incelemeye dahil edilmiştir.

2.2.1 CO Emisyonları

CO havanın ortalama özkütlesine yakın bir özkütleyle sahip, renksiz, kokusuz ve zehirli bir gazdır [202]. Renksiz ve kokusuz oluşu ise ortamda canlılar tarafından doğal melekeler ile tespit edilmesini imkansız kılmaktadır. CO'nun oksijene göre hemoglobine bağlanma eğilimi 240 kat daha yüksek olup hemoglobini uzun bir süre bloke edebilir. CO'nun kandan atılma süresi 2 ile 6 saat arasına kadar uzayabilmektedir. CO konsantrasyon ve etki süresine bağlı olarak vücutta farklı etkiler göstermektedir. Konsantrasyon ve etki süresine bağlı olarak ortaya çıkan ilk belirti baş ağrısıdır, devamında bunu baş dönmesi izler, sonrasında bulantı, kusma, şok hali, bilinç kaybı gibi sorunlar ortaya çıkar. 1000 ppm üzerindeki konsantrasyonda ise ölümcül etkilere yol açabilmektedir. CO çok düşük konsantrasyonlardaki maruziyet durumunda dahi migren ataklarına sebebiyet verebilmektedir [202]. Bu sebeple yoğun bir şekilde CO'ya maruz kalındığında ortaya çıkabilecek yıkıcı etkilerin yanı sıra düşük konsantrasyonlarda dahi konfor ve trafik güvenliğini olumsuz etkileyebilir. CO'nun trafik güvenliği üzerindeki en

olumsuz etkisi havalandırma sisteminin yetersiz olduğu tünellerde ortaya çıkmaktadır. Atmosfere salınan CO'nun bozunarak CO₂'ye dönüşü de oldukça yavaştır. CO'nun atmosferik koşullarda CO₂'ye dönüşümü için 2 ile 5 ay arasında süreye ihtiyaç vardır [203].

CO emisyonları esas itibariyle stokiyometri yakınlarında çalışan homojen dolgulu motorlar için bir sorundur. Dizel motorlarında ise son derece düşük miktarda CO emisyonu ortaya çıkmaktadır. CO, esas itibariyle karbon atomlarının CO₂'ye dönüşmesi esnasında oluşan bir ara reaksiyon ürünüdür. CO'nun OH ile reaksiyonunda CO molekülü CO₂'ye dönüşür [204]. Bu sebeple de CO formasyonu hava fazlalık katsayısına sıkı sıkıya bağlıdır. Dizel motorlarında makro karışım düzeyinde hava fazlalık katsayısı göz önünde bulundurulacak olursa, yanma odasında her zaman için oksidasyonu tamamlamaya yetecek oksijen olduğu söylenebilir. Fakat egzoz gazları içerisinde yine de CO gözlemlenir. Çünkü kimyasal denge tepkimeleri ve disosiyasyon gereğince de CO emisyonu ortaya çıkmaktadır. Özellikle ön karışimli yanma fazında alev cephesi civarında kısa bir süreliğine CO konsantrasyonu oldukça yüksek bir seviyeye ulaşır. Burada CO konsantrasyonun yüksek değerlere çıkışındaki sebep CO oluşumundaki reaksiyon hızının CO'nun CO₂'ye oksidasyonundaki reaksiyon hızından daha yüksek oluşudur. Bu esnada CO'nun CO₂'ye göre oluşum hızının yüksek olması sebebiyle bir ara reaksiyon sonucu oluşan CO konsantrasyonu artış gösterir. Tepkime hızlarında var olan farklılık nedeniyle de CO'nun CO₂'ye dönüşümü için yeterli süre bulunmamaktadır. Böylelikle CO₂ oluşumu CO'nun oluşumunu bu süreçte takip edememektedir. Yanmanın devam eden süreçlerinde CO'nun CO₂'ye dönüşümü devam etmektedir. Fakat alev sıcaklıkları düşükse soğuk bölgeler ile karışım neticesinde tepkime daha erken donacak ve CO'nun oksidasyonu duracaktır. Yanma sıcaklıkları özellikle 1500° C altındayken yanmanın zayıflaması sonucu CO emisyonları artış göstermektedir [205]. Fakir karışimli ve heterojen dolgulu motorlarda CO emisyonu hava fazlalık katsayısına, homojen dolgulu motorlarda olduğu gibi sıkı sıkıya bağlı değildir. Heterojen dolgulu motorlarda esas olarak reaksiyon bölgesindeki anlık sıcaklıklar ve belli sıcaklık dilimlerinde ne kadar kaldığı CO emisyonları açısından temel belirleyici faktördür. Böylelikle, reaksiyon bölgesinde CO₂'ye dönüşüm için ihtiyaç duyulandan fazla oksijen bulunsa dahi CO emisyonu ortaya çıkmaktadır.

Özellikle yüksek yük bölgesinde dizel motorlarından salınan CO miktarı yukarıda belirtilen gerekçelerle düşükken, dolgu heterojenliğinin azaltıldığı ve buna bağlı olarak daha seyreltik bir karışımla yanmanın daha yavaş ilerlediği DSY uygulamalarında CO emisyonu artış sergilemektedir.

2.2.2 THC Emisyonları

THC'ler genelde kötü kokulu ve irritasyon ile tahrişe sebep olan bileşiklerdir. Parafinik ve olefinik yapılar solunum sisteminde mukozayı tahriş edici etkiye sahipken aromatiklerin doğrudan kanserojen etkiye sahip oldukları bilinmektedir. THC'lerin insan sağlığı üzerindeki etkisi esas itibarıyla doymamış hidrokarbonlardan kaynaklanmaktadır. Özellikle olefinler bazı metabolik süreçlere katılarak genotoksit yapılara dönüşebilmektedir [202].

THC'ler tekil bir kimyasal kompozisyona sahip değildir. Yakıt içerisindeki hidrokarbonların hiç okside olmadan ya da kısmi oksidasyona uğramış karbon ve hidrojenli bileşiklerini temsil ederler.

Dizel motorlarında oluşan THC miktarı oldukça düşüktür. Öyle ki, güncel emisyon regülasyonu olan EURO 6 regülasyonunda dizel motor ile tahrik edilen binek taşıtlarında herhangi bir sınırlamaya tabi tutulmamışlardır. Hidrokarbon emisyonları hem zengin karışımlarda hem de aşırı fakir karışımlarda oluşabilmektedir [164]. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda karışım fazlaca fakir ise THC emisyonu homojen dolgulu kıvılcım ateşlemeli motorların 1/5'i seviyesine kadar çıkabilir [188]. Fakat dizel motorlarında THC emisyonunun birincil sorumlusu olarak makro düzeydeki hava fazlalık katsayısını görmek yanıltıcı olacaktır.

Dizel yakıt demetinin iç yapısından Bölüm 2.1'de bahsedilmişti. Yakıt damlacığı bir yandan penetre olurken diğer yandan farklı oranlarda hava ile karışarak geniş bir hava fazlalık katsayısı aralığına sahip olan bölgeler oluşturmaktadır. Bu esnada ortaya çıkan fakir karışimli alev dışı bölgeler, farklı bölgelerde gelişen yanmanın o bölgedeki sıcaklığı arttırmasıyla kimyasal tepkime eğiliminin artması sonucu yanmaya katılabilir. Fakat hava fazlalık katsayısı çok büyük ise artan ortam sıcaklığının reaktivite arttırıcı etkisi yetersiz kalabilir ve yanma gerçekleşemez. Bölgeye taze yakıt sevki gerçekleşmediği sürece moleküler bazlı olarak yanma gerçekleşse de alev yayılımında yüzey alanı çok yüksek olduğu için bir sonraki moleküle aktivasyon enerjisini aktaramaz ve kararlı çekirdek oluşmadan tepkime

sonlanır. Bu bölge sadece çok yavaş ön reaksiyonlar geçirebilir ve eksik yanma ürünlerine dönüşen yakıt tam olarak okside olamadan THC emisyonuna dönüşür veya hiç tepkimeye giremez ve gaz faza geçtiği haliyle yanma odasında kalır. Yanmanın ilerleyen sürecinde veya art yanma fazında da oksidasyon için uygun şartlar yeterince ortaya çıkmadığında ortama THC emisyonu salınır. Dizel motorları için makro karışımdan ziyade mikro karışımın hava fazlalık katsayısı önem arz eder. DSY uygulamalarında ise fazlaca fakirleşen bölgeler arttığı için literatür özetinde bahsedildiği ve sonraki bölümde bahsedileceği üzere THC emisyonları artar.

İçten yanmalı motorlarda THC emisyonlarının temel kaynağı alev sönme bölgeleridir. Üfleme (blow-by) gaz kaçakları, yakıtın sıkıştırma prosesinde yağlama yağı bünyesine dahil olup genişleme prosesinde basıncın düşümüyle tekrardan yanma odası içerisine serbest kalması, yanma odası içerisinde başta piston yan duvarları ile silindir cidarları arasında kalan bölge olmak üzere yüzey alanının hacme oranının son derece yüksek olduğu alev sönme bölgeleri ve cidar yakınlarında alevin nüfuz edemediği sınır tabakalar içten yanmalı motorlarda başlıca THC oluşumunu tetikleyen bölgelerdir. Yağlama yağının yanma odasına karışmasına sebep olan buharlaşma, segman dinamiği kaynaklı yağın yanma odasına pompalanması tersine üfleme gibi mekanizmalar da bir başka THC emisyonu oluşum mekanizmalarıdır. Esas olarak yanma odasına karışan yağlama yağı büyük oranda, yanmasının zor oluşu sebebiyle, PM emisyonlarına yol açmaktadır. Ancak son derece sınırlı kalsa da THC salımını arttırıcı etki oluşturmaktadır. Fakat yukarıda belirtilen mekanizmalar dizel motorlarının özellikle konvansiyonel yanma şartlarında büyük oranda bertaraf edilmiş durumdadır. Bunun sebebi güncel dizel motorlarının konvansiyonel şartlarda klasik dizel motorlarında göre daha küçük püskürtme avansları ile çalışılmasıdır. Ayrıca, günümüz dizel motorlarında genellikle ω tipi oyuk barındıran pistonlar kullanılmakta olup enjeksiyon sıkıştırma sonunda bu piston oyuğu bölgesine doğru gerçekleşmektedir. Dolayısıyla yanma odasının önemli bir kısmında yakıt bulunmaması nedeni ile THC oluşum mekanizmalarının önemli bir kısmı bertaraf edilmiş olur. Bu süreçte sadece momentumu çok düşük yakıt zerrecikleri ve eser miktarda türbülans etkisiyle yanma odası dışına taşarak silindir içerisinde sürüklenen yakıt bu mekanizmaya dahil olabilir. DSY uygulamalarında ise

püskürtmenin daha büyük bir avansla gerçekleştirilmesi beraberinde piston oyuğu dışına taşan yakıt miktarının artması ile ve soğuk bölgelerde de TG sürecinin artmasıyla aşırı fakir karışım karakteristiğinde bölgelerin artışı bir miktar THC emisyonunu arttırıcı etki göstermektedir.

2.2.3 NO_x Emisyonları

Azot gazı (N₂) yanma odası içerisinde en bol bulunan moleküldür. İçten yanmalı motorların atmosferik hava ile çalışması ve atmosferin de %78 - %79 oranında N₂'den oluşması yanma odasına giren diğer moleküller ile N₂ arasında merteye bazında farklılık barındırdığını gözler önüne sermektedir. N₂'nin yanma odası içerisinde okside olması sonucunda oluşan birçok bileşik bulunmaktadır. Azot ve oksijenin oluşturduğu bileşikler NO, NO₂, N₂O, N₂O₂, N₂O₃, N₂O₄ ve N₂O₅'tir. Bu bileşiklerin çok büyük bir kısmı NO ve NO₂'den oluşmaktadır. Bu iki bileşik pratik olarak NO_x olarak adlandırılır. Diğer moleküller ise eser miktarda oluşmakta ve bazen bunun da altında konsantrasyonlarda oluşmaktadır. NO_x dışı azot ve oksijen bileşiklerinin en yüksek seviyede çıkanı N₂O'dir. Dizel motorlarında rakiplerine göre nispeten yüksek konsantrasyonlarda N₂O salınmaktadır. N₂O konsantrasyonu motor çıkışında hemen hemen 1 ppm dolaylarında olup yanma sonrası emisyon indirgeme üniteleri sonrasında ise 4 ppm dolaylarına kadar çıkabilmektedir [206].

Troposferik NO₂'nin antropojenik olarak birincil kaynağı fosil yakıtların kuvvet makineleri içerisinde yakılmasıdır [207]. NO₂ atmosfer içerisinde farklı gazlarla etkileşime girerek atmosferik ozon ve asit yağmurlarına yol açabilmektedir [208].

NO kendi başına toksit değildir. Hemoglobin ile teması ve amfizemi tetiklemesi sınırlı olarak ortaya çıkabilmektedir. Fakat hemoglobine bağlanma yeteneği CO'dan dahi yüksek olup kan akışı üzerinde de yavaşlatıcı etki göstermektedir. NO₂ 300 ppm üzerinde kısa sürede ölümcül sonuçlara, 150 ppm üzerindeki konsantrasyonlarda bronşiyal fibrozise, 50 ppm dolaylarındaki konsantrasyonda ise kısa sürede sıradan bronşite, 10 ppm NO₂ ye kısa süreli maruz kalmada koku duyusu geçici olarak ortadan kalkmasına yol açmaktadır [209].

Dizel motorlarında oluşan NO_x'un iki temel kaynağı vardır. Bunlar atmosferik azot ve yakıt içerisinde bulunan azottur. Konvansiyonel kullarımdaki yakıtlar içerisinde son derece düşük miktarda azot bulunmaktadır. Bu sebeple içten yanmalı motorlarda ortaya çıkan NO_x'un pratik bir yaklaşımla atmosferik hava kaynaklı

olduğu söylenebilir. Oluşan NO_x çok büyük oranda NO 'dan oluşmaktadır. Özellikle benzinli motorlarda NO_2 oldukça düşük miktarda ortaya çıkmaktadır. Benzinli motorda egzoz gazları içerisinde %2 ile %5 arasında NO_2 bulunmaktadır. Dizel motorlarında ise işletme şartına bağlı olarak NO_2 'nin toplam NO_x içerisindeki oranı %20'ye kadar çıkabilmektedir [210]. NO_2 emisyonu, NO 'nun HO_2 ve O_2 tepkimesi neticesinde [188] nispeten daha düşük sıcaklıklarda ortaya çıkmaktadır. Düşük motor yükü ve yüksek hızlarda oluşan NO_2 oranı artmaktadır [211]. NO_2 , NO 'ya göre daha toksiktir ve güneş ışığı altında büyük oranda NO 'ya dönüşmektedir. Bu esnada yüksek reaktiviteye atomik oksijen yayılır ve atmosferik ozon oluşumuna yol açmaktadır [203].

Atmosferik azot düşük sıcaklıklarda çift atomlu yapıya sahiptir. N_2 düşük sıcaklıklarda stabil ve reaktif olmayan davranış gösterir. 1800 K bandındaki sıcaklıklara gelindiğinde ise di-atomik yapı yerini mono-atomik yapıya bırakmaya başlar ve aktif davranış sergiler [208]. Bu sebeple sıcaklık, NO_x emisyonlarının oluşumunda kuvvetli bir faktördür. Bir diğer faktör ise hava fazlalık katsayısıdır. Homojen dolgulu bir motorda karışımın az miktarda fakir olduğu şartta NO_x emisyonları en büyük değerine ulaşır ve ardından düşmeye başlar. NO_x oluşum tepkimeleri her şartta yanma tepkimelerinden daha düşük bir reaksiyon hızında ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla NO_x oluşumuna imkan tanımak için ortamda tam yanma için ihtiyaç olan oksijenden daha fazlası varsa NO_x tepkimeleri için uygun şartlar oluşacaktır. Fakat karışım daha da fakirleştikçe yanma hızı ve dolayısıyla da ortam sıcaklıklarının düşüşüne bağlı olarak NO_x emisyonları düşüş sergiler. Buradan sıcaklığın hava fazlalık katsayısına göre daha baskın bir değişken olarak kendini var ettiği rahatlıkla söylenebilir. Fakir karışımda NO_x emisyonlarının düşüş sergilemesi ilk anda dizel motorlarının fakir karışımli karakterde olmasına bağlı olarak daha düşük seyredeceği ön görüşünü ortaya çıkarabilir. Fakat bu derin bir yanılgıdan ibarettir. Çünkü dizel motorlarında homojen dolgu karakteristiği gözlemlenmemekte ve silindir içi yığın sıcaklıklar ile lokal sıcaklıklar birbirinden farklılık sergilemektedir. Lokal olarak sıcaklıkların oldukça yüksek seyrettiği bölgelerde yüksek miktarda NO_x oluşmakta ve dizel motorlarında daha fazla NO_x salımı ortaya çıkmaktadır.

NO_x oluşumu büyük oranda yanmış gaz bölgesinde oluşmaktadır. Görünür alev bölgesine oldukça yakın bölgelerde oluşacak yüksek sıcaklık sebebiyle NO_x

oluşumu tetiklenir [212]. NO_x emisyonu büyük oranda alev cephesi içerisinde kabaca 0,1 mm kalınlığındaki reaksiyon bölgesinin hemen ardında oluşmaktadır. Bu bölge yüksek sıcaklığa sahiptir ve N₂'nin di-atomik yapı kararlılığı bozulmuştur. Eğer bu bölgede reaksiyona girmemiş oksijen bulunursa özellikle NO olmak üzere NO_x oluşumu için son derece elverişli şartlar ortaya çıkmaktadır. Devamında alev cephesinin arkasında kalan yüksek sıcaklık bölgesinde de NO_x oluşumu devam etmektedir. NO oluşumunu en iyi açıklayan mekanizma Zeldovich mekanizmasıdır. Mekanizma denklem (2.1), (2.2) ve (2.3) ile açıklanmaktadır. Bu reaksiyonlar arasında denklem (2.1) ve (2.2) reaksiyonları daha baskın reaksiyonlardır. (2.3) denklemindeki tepkime ise sadece zengin şartlarda ortaya çıkan bir reaksiyondur.



Yukarıdaki tepkime denklemlerinde de görüldüğü üzere tepkimeler çift yönlü olarak gerçekleşmektedir. Oluşan NO_x emisyonu denge reaksiyonları gereğince oluşum hızından daha düşük bir hızda geri tepkimeye uğrar ve tekrardan ayrışma eğilimine girer. Bu nedenle egzozdan dış ortam atılan NO_x emisyonu, yanma odası içerisinde oluşan NO_x emisyonundan daha düşük seviyededir. Geri tepkime belli bir sıcaklık altında donar ve net NO_x emisyonu ortaya çıkar.

Dizel motorlarında heterojen doldu karakteristiği ve yanma odası içerisinde soğuk bölgelerin varlığı dizel motorlarında hem NO_x oluşumunu tetiklemekte hem de geri yönlü tepkimenin daha çabuk donmasına yol açtığı için NO_x emisyonu artış gösterir. NO_x oluşumu pratik yaklaşımla 1600 K dolaylarında başlamakta ve 1800 K seviyesinde belirginleşmektedir. 2200 K dolaylarında özellikle de fakir karışımlarda dramatik artışlar ortaya çıkmaktadır [213]. Dizel motorlarında konvansiyonel yanma şartlarında difüzyif alev fazında, yanma hızı karışım oluşum hızından daha yüksek olduğu için bu bölgelerde yeteri kadar serbest oksijen bulmak güçtür. Bu sebeple difüzyif yanma fazında ciddi seviyede NO_x açığa çıkışı görülmez. Ancak Bölüm 2.1'de de bahsedildiği üzere, ön karışımli yanma fazında oluşan alev çekirdekleri stokiyometriye yakın karışım oranına sahip bölgelerde oluşmaktadır. Bu bölgelerde di-atomik yapısı bozulan azot kendisini okside edecek oksijen ile buluşabilmektedir. Karışım kontrollü yanmada oluşan NO_x yüksek sıcaklık

bölgelerinde ve stokiyometriye yakın karışım oranına sahip bölgelerde oluşur [214]. NO_x oluşumu için son derece elverişli olan bu bölge yanmanın başlamasıyla gelişen türbülanslı ortamda taze yakıt ve hava ile beslenemez ve civarda kademeler halinde tutuşabilir dolgu oluşup yavaş bir soğuma hızı yaratılamazsa içerisinde yakıt bulunmayan sıkıştırma havası ile karşı karşıya kalır. Böylelikle ilgili bölgede ani bir soğuma ortaya çıkar. Sıcaklığın düşüşüyle başlarda bir miktar NO_x geri bozunması ortaya çıksa da sıcaklık düşüşü devam ettikçe tepkime hızları son derece düşer ve geri yönlü tepkime hızlıca sona erer.

Dizel motorları her ne kadar fakir karışımlı motorlar olsa da yüksek NO_x salımının sebebi yukarıda açıklandığı üzere heterojen dolgudur. DSY uygulamaları soğuk bölgelerin varlığını azaltarak geri yönlü tepkimenin daha uzun süre devam etmesine imkan sağlar. Aynı zamanda yanma hızının da daha düşük oluşu sebebiyle hem NO_x oluşumunu hem de daha yüksek oranda geri tepkime ile oluşan net NO_x emisyonları düşüş sergiler.

2.2.4 PM Emisyonları

Partikül madde emisyonları en genel hatlarıyla lokal oksijen açlığı içeren bölgelerde hidrokarbonun oksijen ile buluşamaması sebebiyle ve yüksek sıcaklık etkisiyle okside olamadan faz değiştirerek katı faza geçmesi olarak adlandırılmaktadır. Motorlarda partikül madde emisyonlarının karbon bazlı olanlarına is, duman, kuru partikül ve elementer karbon gibi isimler verilmektedir [215].

PM emisyonları yanma esnasında karbon parçacıklarının üzerine organik bileşikler katmasıyla meydana gelmektedir. PM emisyonları temel olarak hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonudur. İkinci etkin faktör ise sıcaklıktır. Bölüm 2.1 içerisinde yakıt zerreciklerinin yanma odası içerisindeki serüveni anlatılmıştı. İlgili kısımda da belirtildiği üzere her bir yakıt zerreciğinin dış kısımlarında fakir karışım bulunmakta, buradan merkeze doğru ilerledikçe stokiyometrik karışıma yakın bölgeler, zengin karışım bölgeleri ve merkez bölgesinde yeterince hava ile karışmamış yakıt buharı ve hatta bazen de sıvı fazda yakıt bulunmaktadır. Yanmanın stokiyometrik bölgelere yakın yerlerde başlamasıyla beraber yakıt demetinin merkez bölgesi de alev çekirdeklerinden yayılan basınç dalgasının etkisiyle sıcaklık artışına maruz kalmaktadır. Sıcaklık arttıkça yakıt demetinin merkez bölgesindeki yakıt moleküllerinin stabilitesi bozulmaya başlar ve reaktivite

artış sergiler. Eğer bu süreçte demet dış bölgelerinden kütle transferi ile bölgeye hava taşınmazsa veya basınç şok dalgaları etkisiyle demet merkezinde yer alan bu yakıt okside olmamış hava bölgesine sürüklenemezse lokal oksijen yetersizliği ortaya çıkmakta ve demet merkezlerine yakın bölgelerdeki hidrokarbon başkalaşıma uğrayarak katı faza geçer. Karmaşık yanma proseslerinde şüphesiz ki bu bölgeye bir miktar oksijen sirayet edebilir. Fakat bu denli kimyasal tepkime eğilimi yükselmiş hidrokarbon karışımı içerisinde ilk olarak hidrojen atomları yanmaya katılır. Çünkü hidrojenin tepkimeye girme kabiliyeti karbona göre daha yüksektir ve total bağ kuvveti daha zayıf bir şekilde kendini var etmektedir. Nihayetinde büyük oranda karbondan oluşan ve okside olamamış hidrokarbonlar ya da hidrokarbon komponentleri sıcaklığın daha da artmasıyla faz değişimine uğrar ve katı faza geçer. Yüksek sıcaklıktaki ortama gönderilen yakıt içerisindeki hafif hidrokarbon molekülleri hızlıca radikallere dönüşmektedir. Karbon oranı yüksek bileşikler ise PM öncülü olarak değerlendirilir ve nükleotid mod partikül emisyonunun oluşumundan sorumludurlar [216]. Dizel motorlarında eksik yanma ürünleri polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) oluşumuna yol açabilmekte ve PAH'da PM emisyonlarının bir öncülü olarak görev yapmaktadır [217]. PM oluşumunu tetikleyen bu nükleotid merkezler birkaç nanometrelik çap ölçüleri ile ortaya çıkmaktadır. Bunlar her ne kadar az önce bahsedildiği üzere sıvı fazda oluşabileceği gibi çok büyük oranda gaz faza geçmiş hidrokarbonlardan veya komponentlerinden de oluşabilir ve nükleotid adı verilen çekirdeklenme sağlanmış olur. Dizel motorlarında PM oluşumu hipotezine göre çekirdek görevi gören 10 nm çapından küçük partiküller çeşitli uçucuları bünyesine katarak büyürler [218]. Bu aşamaya ise aglomerasyon adı verilir. Nükleotid parçacıklar 50 nm den daha küçük parçacıklar olarak tanımlanabilir. Bu parçacıklar küçük miktarda katı parçacık barındırır ve uçucu organikler ile sülfattan oluşurlar. Nükleotid parçacıkların organik ve inorganik parçaları absorpsiyonu ile aglomere parçacık oluşur [160]. Aglomerasyon bir yandan nükleotidin bünyesine hidrokarbonları katarak kendini büyütmesi şeklinde olacağı gibi bir diğer yandan da farklı çekirdeklerin birbiri ile çarpışıp yekpare hale gelerek birbirini büyütmesi şeklinde de ortaya çıkabilir. Dolayısıyla aglomerasyon sıvı ya da gaz fazdaki bazı moleküllerin de nükleotide katılarak katı faza geçmesini de içeren bir prosestir. Küçük boyuttaki parçacıkların yüzey alanı ile hacimleri arasındaki oran daha büyük olduğu için toksiklik daha

yüksektir [160]. PM çapı küçüldükçe canlı bünyesine sirayet etme riski artmaktadır. Oldukça küçük partiküller dolaşım sistemine dahi katılabilir [132].

Dizel motorlarında 1500 K altında bir yanma gerçekleşirse yanma pratik olarak ıssız bir şekilde gerçekleşir. Çünkü bu sıcaklıklarda gerçekleşen yanma bahsi geçen faz başkalaşımı için yeterli değildir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise hava fazlalık katsayısına bağlı olarak PM oluşumu gözlemlenir. Özellikle 2000 K yanma sıcaklığı PM emisyonunun en fazla oluştuğu sıcaklık olarak değerlendirilmektedir [219]. PM formasyonu 1600 K üzeri ve 2'den büyük eşdeğerlik katsayılarında oluşmaktadır [220]. Bir başka deyişle lokal hava fazlalık katsayısının 0,5'ten küçük olduğu bir bölgede PM oluşabilmektedir. Sıcaklığın 1800 K üzerine çıktığı şartlarda ise belirtilen aralıktaki zengin mikro karışım bölgelerinde PM dramatik artışlar sergilemeye başlar [213].

Dizel motorlarında ön karışımli yanma fazı süresince alev cephelerinin yaklaşık stokiyometrik merkezlerde doğmakta ve oradan yayılmakta olduğu belirtilmiştir. Demet merkezindeki sınırlı bir alan haricinde bu sebeple ön karışımli yanma fazı prosesinde lokal oksijen açıklıklarına pek rastlanmaz ve son derece sınırlı miktarda PM ortaya çıkar. Difüzyon alev fazında ise yakıt ve havanın karışması için yeterli zaman bulunmamaktadır. Bu esnada hem sıcaklıklar yükselmiştir hem de lokal olarak hava fazlalık katsayısı 0,5'in altına düşebilmektedir. Difüzyon yanma fazında özellikle yakıt demetinin merkez bölgelerinde PM oluşumu için uygun şartlar fazlasıyla mevcuttur PM emisyonu ortaya çıkar.

PM emisyonunun oluşumu son derece anlık ve çok bölgesel olarak gerçekleşmektedir. Bir diğer yandan enjeksiyonun geleneksel stratejilerle yapıldığı şartlarda kaçınılmaz olarak PM açığa çıkmaktadır. Güncel sistemlerde püskürtmenin fazlara ayrılması, enjeksiyonun yüksek basınçta gerçekleştirilmesi, yanma odası içerisinde oluşan hava hareketlerini destekleyici önlemler gibi birçok başlıkta PM oluşumunun önüne geçilmek istenmektedir. Fakat bu sistemlerin başarısı istenilen seviyeye erişememektedir. Esas olarak PM indirgenmesi veya oksidasyonunun en başarılı hali yine yanma odası içerisinde, yanmanın PM oluşumunun sonrasındaki safhalarında meydana gelmektedir. PM indirgenmesi PM oluşumu meydana geldikten sonra yanma odası içerisinde ve PM taneciklerinin sahip oldukları yüksek sıcaklık ile oksijenle buluşma esnasında gerçekleşir. Bu durum hem PM oluşum bölgelerine oksijen gelmesiyle hem de PM'nin diğer

bölgelere transferiyle gerçekleşir. Yanma odasında oluşan PM'nin %90'ı yanma odası içerisinde tüketir, geri kalan kısma ise egzozda rastlanmaktadır [188].

PM emisyonunu ortadan kaldırmanın en etkin yolu az önce de belirtildiği üzere difüzyon alev fazının baskılanarak ön karışımli yanma karakteristiğinin baskın hale gelmesidir. Bu sebeple DSY stratejilerinde PM emisyonları düşüş sergilemektedir. Kademeli püskürtme stratejisinde de önceki duruma göre demet merkezindeki oksijen ile buluşamamış oran düşüş sergileyeceği için PM emisyonları iyileşme sergilemektedir [164].

2.3 Dizel Motorlarında PCCI Stratejisi

Günümüzde her geçen gün daha da istekleri ağırlaşan emisyon regölasyonları özellikle dizel motorlarını oldukça zorlar hale gelmiştir. Mevcut EURO 6 regölasyonunu sonrası yürürlüğe girmesi beklenen EURO 7 regölasyonunda mevcut yanma sonrası emisyon indirgeme üniteleri kendi başına yetersiz kalacaktır [11]. Konvansiyonel dizel yanmasında, eş zamanlı olarak NO_x ve PM emisyonlarının her ikisini birden kontrol altına almaya yönelik yanma esnasında alınacak efektif bir yöntem yoktur [221]. Bu sebeple konvansiyonel yanma stratejisinin dışına çıkarak yeni araştırma ve uygulama alanlarına ihtiyaç vardır. Günümüzde DSY stratejileri bu boşluğu doldurmaya en büyük adaydır.

DSY yanma odası içerisinde mümkün mertebe homojen karışım yaratmayı ve yanma sıcaklığının NO_x'un dramatik artış sergilediği bölgelerin dışında kaldığı bir aralıkta çalışmayı hedeflemektedir. DSY stratejileri fakir karışımlar ile gerçekleştirilir [48]. Dizel motorlarında tek yakıtla en geniş aralıkta uygulanabilen DSY stratejisi PCCI stratejisidir. Stratejide püskürtme avansı konvansiyonel dizel yanmasına göre daha büyük ön püskürtme avansı ile gerçekleştirilir. Böylelikle ilk etapta püskürtme yapılan ortamın basınç ve sıcaklığı daha düşük olacaktır. Aynı zamanda silindir içi hava hareketleri de sıkıştırma prosesinin etkisini henüz yeterince yaşamadığı için püskürtme yapılan ortam daha düşük türbülans seviyelerinde kalacaktır. Bu termodinamik şartlarda ve akış rejiminde, silindir içerisine sevk edilen yakıt zerreciklerinin üzerindeki hızı düşürücü etki gösteren yanma odası ortam basıncı daha düşüktür. Benzer şekilde yakıt zerreciği ile yanma odası içerisinde türbülanslı akış arasındaki ortalama bağıl hız farkı da daha düşüktür. Aynı zamanda pistonun henüz, yeterince ÜÖN'ye yaklaşmaması

sebebiyle silindir içi basınç ve sıcaklıklar da daha düşük seyreder. Sonuç olarak damlacığın daha derine nüfuziyetini engelleyecek basıncın düşük olması sebebiyle yakıt damlacığının penetrasyon kabiliyeti artacaktır. Bu esnada silindir içi türbülans seviyesinin düşük oluşu sıvı jet üzerindeki bozucu etkileri daha düşük seviyeye çekerek demet ve zerrecik parçalanmasını da olumsuz etkiler. Türbülans seviyesinin düşük olması beraberinde zorlanmış taşınım ile ısı transferini düşürür ve birim zamanda yakıtta ortaya çıkacak sıcaklık artışı azalır. Bir diğer yandan da termodinamik koşullar gereğince silindir içi sıcaklıklar düşük seviyededir. Bu üç temel faktöre bağlı olarak yakıt, yanma odasında konvansiyonel şartlara göre daha iyi bir yayılım gösterir. Nihayetinde yakıt daha fazla hava ile karışım oluşturmuştur.

Yakıt demetinin yanma odası içerisinde daha geniş bir hacme yayılması makro karışımı iyileştirici bir etki gösterir. Böylelikle makro karışım ile mikro karışım arasındaki farklılıklar daha makul bir banda indirgenmiştir. Uzayan TG sayesinde makro karışım iyileşmiştir. PCCI stratejisinde lokal yakıt eşdeğerlik katsayısı çok büyük oranda 2'den küçüktür, bu da ıssız yanma için uygun koşulları oluşturmaktadır [112]. Yakıt eşdeğerlik katsayısının 2'den küçük oluşu hava fazlalık katsayısının 0,5'ten büyük olması anlamına gelmektedir. Bu da Bölüm 2.2.4'te değinildiği gibi PM'nin dramatik artış gösterdiği bölgenin dışında kalınması anlamına gelmektedir.

DYS tepkimeleri ısı girişi açısından iki süreçte incelenebilir. Bunlardan biri düşük reaksiyon sıcaklıklarının gözlemlendiği soğuk alev süreci olup devamında ise sıcak alev süreci ortaya çıkar [222]. Soğuk alev süreci genelde ön reaksiyonların ortaya çıktığı süreci kapsar ve sonrasında sıcaklık hızlıca artış gösterir. Sıcak alev süresince ulaşılabilecek sıcaklıklar ise NO_x emisyonlarının seviyesi ile ilgili olarak kritik öneme sahiptir. Çünkü NO_x oluşumunda iki temel faktör mevcuttur. Bölüm 2.2.3'te de değinildiği gibi en önemli parametre sıcaklıktır. İkinci faktör ise lokal hava fazlalık katsayısıdır. NO_x oluşum tepkime hızlarının diğer yanma reaksiyonlarına göre daha düşük bir hızda gerçekleştiği bilinmektedir. Hızlı bir yanmada ilgili bölgede yeterince oksijen yoksa düşük miktarda NO_x oluşacaktır. Fakat bu bölgedeki mikro karışım fakir nitelikteyse ve yanma sıcaklığı yüksekse NO_x oluşumu için ideal şartların var olduğu söylenebilir. DSY uygulamalarında kısmi yüklerde çalışıldığı için lokal karışım bölgeleri de genelde fakir niteliktedir. Fakir karışımlı yanmada birim yakıttan açığa çıkan ısı daha fazla birim havaya

transfer olacağı için yanma sıcaklıkları yüksek seviyeye erişemez. Lokal hava fazlalık katsayısı yüksekliği ve dolayısıyla da lokal oksijen bolluğu şartı açısından dezavantaj doğsa da sıcaklığın yanmanın fiziksel özellikleri gereğince düşük kalması NO_x emisyonlarını düşürücü etki yaratır. Bu stratejide yanma sıcaklığı 2000 K altında tutulur. Böylece NO_x oluşumu büyük oranda engellenmiş olur. Dizel motorlarında yanma odası içerisinde tümü düşünüldüğünde birçok işletme şartında ortalama sıcaklığın 1600 K altında kaldığı söylenebilir, fakat heterojen dolgu karakteristiği gereğince birçok lokal karışım bölgesinde bu sıcaklığın üzerine çıkılır [223]. Silindir içi maksimum sıcaklık düzeyleri göz önünde bulundurulduğunda silindir içi ortalama yığın sıcaklık (bulk temperature) değerleri ile farkın ne denli yüksek olduğu anlaşılabilmektedir. Kuşkusuz konvansiyonel dizel yanmasındaki soğuk cephelerin varlığı bu farklılığı ortaya çıkartmaktadır. DSY uygulamalarının tümünde silindir içi yığın ortalama sıcaklık dağılımı daha yakın değerler almakta [53] ve dengesizlik seviyeleri daha kabul edilebilir düzeydedir. Bu durumda bir diğer yandan oksidasyon daha büyük bir hacme yayılmakta ve soğuk cephelerin azalması neticesinde soğuma hızını düşmektedir. Böylelikle NO_x oluşumu sınırlandırıldığı gibi aynı zamanda NO_x geri yönlü tepkimesi de daha uzun bir süreçte ve daha efektif olarak gerçekleşir.

DSY uygulamalarında motor yükü arttıkça silindir içi homojenlik azalmakta ve yanma konvansiyonel yanmaya yakınsamaktadır. Hatta sıkıştırmanın etkisiyle basınç ve sıcaklık artışları daha da artmaktadır. Yanma başlangıcı ÜÖN'den önce nispeten büyük bir avans değerinde başlarsa reaksiyon daha hızlı gerçekleşecek, böylelikle basınç artış gradyanı artacaktır [105]. PCCI stratejisi uygulanmak istendiğinde, yüksek yüklerde yanma gürültüsü ve PM kabul edilebilir sınırların dışına çıkmaktadır [37]. Çok düşük yüklerde ise yanmada stabilizasyon sorunları ortaya çıkabilmektedir [224].

PCCI stratejisinde yanma başlangıcı HCCI'ya göre daha tahmin edilebilir düzeydedir. Çünkü püskürtme avansı konvansiyonel aralıkta olmasa da HCCI kadar da yüksek değildir. PCCI stratejisi HCCI'nın püskürtmeye müdahale edilerek yanma başlangıcının daha kontrol edilebildiği ve HCCI'dan evrimleşmiş bir uygulamadır [213]. HCCI moduna göre PCCI stratejisi daha heterojen dolguya sahip olup [193] yanma başladığı esnada yanma odası sadece fakir değil, zengin karışım da barındırır [32]. Dolgu içerisindeki bu zengin karışım bölgeleri yanmanın

başlangıcını kontrol etmeye aday bölgelerdir. Bu bölgelerde yakıtın, hava ile belli oranlarda karışma neticesinde konvansiyonel dizel yanmasındaki gibi karışım kontrollü olarak yanma başlamaktadır. HCCI stratejisinde ise yanma başlangıcı kinetik kontrollüdür. Bu sebeple PCCI'da yanmanın başlangıcını kontrol etmek daha kolaydır. Böylece strateji yük ve hız açısından daha geniş bir bölgede strateji uygulanabilir. PCCI'de yanmanın başlangıcı HCCI'nın aksine püskürtme avansına sıkı sıkıya bağlıdır [8].

PCCI'de enjeksiyon ve yanmanın birbirinden ayrılması hedeflenmektedir [225]. Enjeksiyonun sonlanması ile yanmanın başlangıcı arasında belli bir zaman geçmesi stratejiye büyük avantaj sağlar ve karışımın homojenliği artış gösterir. Bu stratejide püskürtme bitişi ile yanma başlangıcı arasında pozitif faz açısı bulunur [226, 227].

PCCI stratejisinin en büyük avantajı NO_x - PM açmazının ("diesel dilemma" olarak bilinmektedir) elemine edilebilmesidir. PM emisyonları özellikle yanma sıcaklıklarının 1800 K ile 2400 K arasında, hava fazlalık katsayısının da 0,5'in altında olduğu şartlarda artış sergilemekte, NO_x ise lokal sıcaklığın özellikle 2200 K üzerinde olduğu fakir karışımlarda ciddi artış göstermektedir [228]. Bu karışım bölgelerinin ikisinden de eş zamanlı olarak konvansiyonel yanma proseslerinde kaçınmak neredeyse imkansızdır. Fakat PCCI stratejisinde hem yaratılan seyreltik karışım ve yanma hızının düşüşü sebebiyle sıcaklık değerlerinin makul düzeyde kalması, hem de lokal zengin karışım bölgelerinden büyük oranda kaçınılması sayesinde her iki emisyonu da aynı anda kontrol altında tutmak mümkün hale gelir.

PCCI stratejisinde yanma hızının düşmesi yanma sürecini uzatacaktır. Isı açığa çıkış hızı ise düşüş gösterecektir. Böylece yanma daha geç tamamlanacak ve her ne kadar azalmış düzeyde olsa da soğuk bölgelere bir miktar daha sirayet edecektir. Bu bölgelerde zayıf alev görüleceği gibi eksik oksidasyon veya okside olamama gibi sorunlar da ortaya çıkabilmektedir. PCCI yanma stratejisinde yanma verimi düşüş gösterir [229].

Yakıtın uçuculuğu ve setan sayısı PCCI stratejisinin uygulanabilirliğini kontrol altında tutmaktadır [184]. Bilindiği üzere setan sayısı yakıtın kendi kendine tutuşma kabiliyetini gösteren bir değerdir. Setan sayısının izin verdiği ölçüde yanmanın geç başlaması ön karışım miktarını arttıracaktır. Ön karışım oranı arttıkça da lokal oksijen açıklıkları ve soğuk bölge hacmi azalma gösterecektir. Böylelikle

konvansiyonel dizel yanmasında daha baskın yanma fazı olan difüzif alev fazı, PCCI stratejisinde yerini büyük oranda ön karışımli yanmaya bırakır ve difüzyonlu alev fazı pek belirgin değildir. Difüzif alev fazının yerini ön karışımli yanmaya bırakması NO_x ve PM'den kaçınmanın etkin yollarından biri olarak değerlendirilebilir [197]. Difüzif alev fazının büyük oranda baskılanması ile yanma odası içerisine gönderilirken çok ani bir şekilde yanan ve yeterince hava ile karışmamış yakıtın toplam yakıt içerisindeki oranının düşmesi, stokiyometriye yakın gelişen ve zengin şartta gerçekleşen yanmanın büyük oranda önüne geçecektir. Bu yolla, lokal yanma sıcaklıkları çok yukarılara çıkamayacaktır. Oksijenle buluşamayan yakıt miktarındaki azalma da PM emisyonlarını büyük oranda ortadan kaldıracaktır.

Ön karışım oranı arttıkça ve ön karışım yaratılmasına tanınan süre arttıkça yanma odasında fakir karışım karakteristiğinin baskınlaşması, pik sıcaklıkları düşürmenin yanında art yanma esnasında yanma odası sıcaklığındaki düşüşün de daha yavaş seyretmesine olanak tanır. Özellikle karışımın dış cephelerinde art yanmayla benzerlik gösteren yavaş reaksiyon hızına sahip bölgelerdeki geri tepkimeler daha uzun sürer. Genişleme süresince devam eden yanma adeta bir art püskürtme etkisi yaparak NO_x geri bozunumunun önünü açar. Bu durum, aynı zamanda yanma esnasında oluşmuş olan PM emisyonlarının da bir kısmını indirgemeye yardımcı olur. Fakat bu bölgelerdeki düşük yanma sıcaklıkları CO emisyonlarının artış sergilemesi için son derece ideal şartları barındırır ve CO emisyonları PCCI karakteristiği baskınlaştıkça artış sergiler. Yakıt ile hava karışımının en dış bölgelerindeki reaksiyona giremeyen aşırı fakir bölge ise daha merkez bölgelerden gelecek, okside olmuş veya olmakta olan zengin karışım bölgelerini pek içermediği için THC emisyonlarının artmasına yol açar. THC emisyon seviyeleri fazlaca arttırılmış püskürtme avansı değerlerinde merteye bazında artışlar sergileyebilmektedir. Bu sebeple belli bir sınırın üzerinde püskürtme avansı arttırımı yanma verimini ve dolayısıyla da termik verimi son derece olumsuz şekilde etkiler. Fazlaca arttırılmış püskürtme avanslarında bir başka THC oluşum mekanizması daha devreye girmektedir. Enjektör çıkışındaki akış geometrisi ve piston oyuk bölgesinin geometrik yapısı dikkate alındığında, püskürtme avansının kritik bir değerin üzerine çıkışı neticesinde yakıt jeti piston oyuğu dışına taşar ve burada son derece fakir bir karışım oluşturur. Bu sınır PCCI çalışmalarında sadece

emisyon ve OİB veya OEB verilerine bakılarak rahatlıkla anlaşılabilir. Çünkü OİB ve OEB’de dramatik düşüşler ortaya çıkar ve fakir karışım tutuşabilirlik sınırları dışında kalan bölgelerin okside olamaması sebebiyle de THC değerinde ani ve keskin artışlar ortaya çıkar. Bu bölgedeki yanma verimleri kabul edilebilir sınırların dışına çıkmaktadır. Aynı zamanda yakıtın cidarlara yapışması sonucu PM emisyonları tekrardan artış eğilimine girebilmektedir [175]. Söz konusu durum PM artışına sebep olmaz ise de yüzeyde karbon tortu birikimine yol açacak ve kontrolsüz yüzey ateşlemeye sebebiyet verecektir. Bu bölgelerde gelişecek kontrolsüz yüzey ateşleme oktan sayısı son derece düşük olan motorini termodinamik olarak son derece elverişsiz bir zamanda yanmaya dahil edebilir. İlgili sorunu aşmaya yönelik olarak ne yazık ki sadece konstrüktif önlemler alınabilmektedir ya da püskürtme basınç değeri değiştirilebilir. Alınacak konstrüktif önlemler enjektör demet koni açısının düşürülmesi ve böylelikle silindir merkezi eksenine odaklanma seviyesi daha yüksek enjektörlerin kullanımındır. Fakat bu durumda konvansiyonel dizel yanmasına geçilmek istendiğinde de yakıtın piston merkezi eksenindeki tepeciğe çarpmasına yol açmaktadır. Bu açmaz sadece farklı demet koni açılarına sahip çift enjektör kullanarak aşılabılır. Bu da hem konstrüktif güçlükler getirmekte hem de yakıt demetinin merkezi eksene odaklanmasını bozmaktadır. Merkezi eksene olan odağın bozulması da karışımın bir yöne doğru yöneleceği ve gaz dinamiği dengesizlikleri yaratması sonucunu doğurmaktadır. Bu da silindir içi kuvvet dağılımı dengesizliklerine yol açacaktır. Bu durumdan da kaçınmak adına püskürtme basıncının değiştirilmesi elimizde kalan tek hareket serbesiyetisidir.

Konstrüktif bir farklılığa gitmeksizin belli bir çalışma noktasında yakıt atomizasyon rejimini değiştirmek püskürtme basıncının değiştirilmesiyle mümkündür. Püskürtme basıncı değişimine bağlı olarak enjektör çıkış bölgesinde yakıt moleküllerinin üzerindeki kuvvet dolayısıyla da momentum farklılık göstermekte, parçalanma rejimi değişmekte ve stagnasyona uğradığı uzaklık değişmektedir. Püskürtme basıncı arttıkça yakıt damlacığı üzerindeki itki kuvveti artacaktır. Bu da sıvı fazdaki penetrasyon derinliğini arttırıcı etki gösterir. Bir diğer yandan da damlacığın daha büyük bir kararsızlıkla yanma odasına girmesi neticesinde parçalanma tetiklenecektir. Bu iki etki pülverizasyonu olumlu yönde etkiler. Püskürtme basıncı daha düşük olduğunda ise yakıt damlacığı üzerindeki

itici kuvvet düşüş gösterir. Ancak bu sefer de damlacığın kütlesi artış gösterir ve damlacığı parçalanmaya zorlayan faktörlerin etkisi düşer. Püskürtme başladıktan sonra yüksek püskürtme basıncında enjekte edilen yakıtın birim zamanda ilk başlarda daha büyük penetrasyon derinliklerine ulaştığı bilinmektedir. Ancak belli bir süre geçtikten sonra düşük ve yüksek püskürme basınçları arasındaki penetrasyon derinliği farklı düşüş sergilemekte ve belirginliğini yitirmektedir. Dolayısıyla aradaki fark konvansiyonel yanma aralıklarındaki seviyede değildir. Ancak yüksek püskürtme basınçlarında parçalanma ve atomizasyonun daha erken başlaması daha geniş bir hacimde karışım oluşumu ortaya çıkmasının önünü açmaktadır. Böylelikle karışım dengesizlikleri daha makul bir seviyeye düşer, lokal sıcaklık dengesizlikleri ve aşırı zengin karışım bölgeleri elemine edilmiş olur.

Püskürtmenin fazlara ayrılması yakıt ile havanın birbiri ile daha iyi karışmasına imkan tanımaktadır. PCCI stratejisinde ön püskürtme yapılarak ön karışımli yanma fazı daha baskın hale getirilebilir. Enjeksiyon fazlara ayrıldığında yakıt ve hava karışım oluşturmak için daha uzun süreye sahip olur. İlk fazda silindir içerisine giren yakıt fazlaca fakir karışım oluşturmaktadır. Ön reaksiyonların veya yanmanın başlamasını beklemeden ikinci faz silindir içerisine sevk edilirse ikinci fazın da sağlıklı karışım oluşturması için nispeten yeterli süreye sahip olunmuş olur. Ön karışımli yanma fazının daha homojen şartta gerçekleşmesi dizel vuruntusu riskini de düşürmektedir. Kademeli püskürtme vuruntu derecesini düşürdüğü için PCCI stratejisinin daha yüksek yüklerde uygulanmasına olanak tanır [186]. Bir diğer yandan da belli oranlarda ön karışımı kademeli püskürtme ile elde etmek de soğuk bölgeleri azaltacaktır. Bu sebeple PCCI'da çok fazlı püskürtme yapılırsa ana püskürtme avansı ÜÖN'ye nispeten daha yakın yapılabilir ve yanma daha kontrol altına alınabilir [196]. Bu durum aynı zamanda termik verimdeki aşağı yönlü trendin de daha makul bir bantta kalmasına katkı sağlar.

2.4 Deney Tasarımı Metodolojisi

Deney tasarımı, incelenen araştırma uzayı geniş bir aralığı kapsıyorsa, çok sayıda nokta ve faktör varsa arada bazı matematiksel ilişkiler kurarak inceleme yapılması gereken nokta sayısını azaltmaya yarayan bir metottur. Deney tasarımı, girdiler arasında belli fonksiyon veya algoritmalar vasıtasıyla girdi parametrelerinin değişimlerinin tekil veya gruplar halinde çıktıyı ne derece etkileyeceği hakkında

öngörü oluşturulmasına imkan tanımaktadır. Böylelikle araştırma uzayının incelenmesinde deney yükünü azaltarak iş gücü ve sarf malzemesi açısından kazanç sağlanır. Benzer şekilde zamandan da kazanç sağlayacaktır.

Ortaya konacak deney tasarımlarında tavsiye edilecek noktaların kullanışlılığı ve uygulanabilirliği, seçilmesi gereken deney tasarım metodunun kararlaştırılmasında önem taşır. Farklı istatistiki ve matematiksel alt yapıya bağlı olarak birçok deney tasarım metodu ortaya konmuştur. Bu metotların başlıcaları yüzey merkezli kompozit tasarım, rotasyonel merkezi kompozit tasarım, VIF optimal merkezi kompozit tasarım, G-optimal merkezi kompozit tasarım, maksimum mesafe bazlı optimal alan doldurma, merkezi bazlı optimal alan doldurma, Box-Benken, uzay grid, Latin hiperküp, Halton dizisi, Lattice, D-optimal, V-optimal ve A-optimal tasarım yöntemleridir. Bu paragrafta belirtilen metotların genel değerlendirmesine aşağıdaki paragraflarda yer verilmiştir.

Merkezi kompozit tasarım metodu çalışma aralığında eşit sayıda kademelendirme yapar ve manipüle edilen parametreler birbirini farklı yerlerde tekrarlayan değerler alır. Bu da sağlıklı bir kontrol grubu yaratılmasına olanak tanır. Böylelikle sonuçlar arası mukayese daha mümkün ve sağlıklı bir hal almış olur. Fakat metot her bir aralığı 3 farklı seviyeye bölerek deney matrisi yaratmaktadır. Manipüle edilecek parametrelerin istenilen seviyeye bölünmesine imkan tanımamaktadır. Bu sebeple her bir değişkenin bir baz değere göre artış ve azalış yönünde tek bir değer almasıyla 3 seviyeye bölünmüş araştırma uzaylarında son derece kullanışlı bir metotken, manipüle edilecek parametre seviyesi daha büyük bir sayısal değerde ise bazı girdi değerleri için hiçbir öneri verilmeyecektir. Bu noktalarda da çıktı tahmini yapmak doğrusal olmayan çıktı cevapları için sağlıklı değildir.

Optimal alan doldurma metodu içerisinde maksimum mesafe bazlı tasarımda her bir parametrenin kaç seviyede olacağı veya başka bir deyişle ardışık iki değer arasındaki artım miktarı seçilememektedir. Elde edilen verilerin bir kısmı tekrarlayan parametre içermemektedir. Optimal alan doldurma stratejisinde deney önerilerinin bir kısmı verilen girdileri alt sınır, üst sınır ve orta nokta olarak 3'e ayırır. Diğer deney öneri noktaları tek bir değer değişip diğer parametrelerin sabit tutulduğu noktaları içermektedir. Dolayısıyla deney grubu ve kontrol grubu net olarak birbirinden ayrılmaktadır. Ancak ara değer olarak seçilen seviyeler kendini tekrarlıyor olsa da istenilen seviye ve değerde seçilememektedir. Merkezi optimal

alan doldurma tasarımıda ise böyle bir imkan da bulunmamakta ve belli adımlar ile sabit artım aralıklarındaki davranışın ne yönlü olacağını belirlemek imkansızdır.

Box-Behnken metodu kullanılarak elde edilen deney matrisi noktaları seviye seçimi itibariyle merkezi kompozit tasarım ile büyük benzerlik taşımaktadır. Test edilebilir ve uygulanabilir noktalar elde edilse de bu metotta da girdilerin 3 seviye ile sınırlanmış oluşu girdilerin değişim eğilimi lineer değilse sonuçların ilişkilendirilmesinde güçlükler çıkmaktadır.

Uzay grid metodunda bir parametrik değer büyük oranda sabit tutularak diğer parametreler değiştirilir. Ardından ilgili parametre oldukça sınırlı sayıda deneyde manipüle edilir. Metodun önerdiği deney sayısı diğer metotlara göre daha azdır. Veri alınacak noktanın sınırlı olması ve belli seviyelerdeki veri eksikliğinin çalışma alanını yeterince temsil etmeyecek olması sebebiyle doğrusal olmayan değişim sergileyen veya sabit bir değişim eğilimi yakalanamayan sonuçların elde edileceği metotlarda uygulanması sakınca yaratmaktadır.

Latin hiperküp yöntemi esas olarak deney tasarımı çalışmalarında oldukça sık başvurulmuş bir metottur. Ancak belli bir parametreyi sürekli olarak kendi içerisinde farklı değerlere atamasından kaynaklı olarak parametreyi seviyelendirme sayısı çok artmaktadır. Çalışma nihayetinde anlamlı sayılamayacak noktalardan veri alınmasına yol açmasından dolayı bu metot sabit seviye sayısında ve seviyeler arasında istenen artım adımları ile çalışılacağı zaman elverişsizdir.

Halton serisinde döngünün kademelendirme metodu gereğince birbirini tekrarlamayan çalışma noktaları önermektedir. Bu da değişkenin deney sonuçlarına bakarak çıktıyı tek başına veya bileşik olarak nasıl etkileyeceğine dair bilgi vermemektedir. Benzer şekilde, Lattice metodunda da bir parametre sürekli farklı değerlere gitmekte ve tekrarlayan değeri bulunmadığı için sonuçların değerlendirilmesi esnasında mukayese olanağı sunmamaktadır.

Optimal deney tasarımı, manipüle edilecek her bir parametrenin kaç seviyeye ayrılacağını seçme olanağı tanımaktadır. Eşit adımlar ile veya eşit aralıklı olmayan bir şekilde artım verilen bu metot birçok çalışmaya en uygun metot olarak değerlendirilir. Optimal metot alt yöntemlerinden A - Optimal metot daha ziyade uç değerlere yoğunlaşmışken D - Optimal ve V - Optimal metot daha homojen dağılmış bir uzay temsil etmektedir.

Optimal tasarım, standart ortogonal tasarımların aksine etki değeri korelasyonu baz alan bir tasarımdır [230]. Geleneksel deney tasarım metotları birçok durumda ihtiyaca cevap üretebilmektedir. Geleneksel metotlar belli ve sabit bir matematiğe göre ortaya çıkmaktadır [231]. Optimal tasarımlar deney uzayı içerisinde eleme ve seçim işlemine yönelik olarak sisteme özgü bir formülasyon optimizasyonu yaparak cevap üreten bilgisayarlı hesaplama dayalı bir metottur [232]. Bu yönüyle diğer deney tasarımı metotlarından farklılık gösterirler. Girdi parametre sayısı ve seviye değeri fazla ise optimal tasarımları tercih etmek mantıklı hale gelmektedir. Optimal tasarımların en büyük avantajı ise çıktı sayısı belli bir miktarda tasarımcı tarafından değiştirilebilmektedir. Farklı seviyelerdeki faktörler ile çalışılırken seviye sayısı, deneyi tasarlayan tarafından optimizasyona dikte edilebilir [233]. Optimizasyon aşamasında ilk olarak tüm olası varyasyonları tam faktöriyel olarak işleme almaktadır. Ardından matematiksel optimizasyon ifadesinin kaçınıcı dereceden olduğu ile bağlantılı olarak belli sayıda çıktı üretilir. Tasarımcı tarafından, programın önerdiği deney sayısı yetersiz bulunursa yazılıma ilave nokta talebinde bulunulur ve deney öneri sayısı artırılabilir. İlave edilen bu noktalar rastsal değildir ve deney uzayındaki olası girdiler (tam faktöriyel şart) içerisinde yine ilk seçimdeki matematiğin esaslarına dayanmaktadır. İnceleme uzayı içerisindeki, çıktı algoritma içerisinde geçici olarak ortaya konan bir modelin varyans değişimine göre optimize edilerek modelin nihai haline ulaştırılması esasına dayanır. Nihai modelde elde edilen varyans değerlerine bağlı olarak da deney tasarımı çıktıları elde edilmiş olur [234].

D-optimal tasarımda ilk olarak belli derecede polinom model olarak oluşturulur. Bu geçici çözüme tepki fonksiyonu adı verilir ve (2.4) denklemi [234] ile gösterilebilir.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2.4)$$

(2.4) denkleminde de görüldüğü üzere Y , girdilerin bir fonksiyonudur. ε ise belirsizliklerin bir ölçütü olarak hata değerini temsil etmektedir. ε 'un hata değerlerinin ortalaması 0, varyansının ise normal dağılım sergilediği kabulü ile (2.4) eşitliği (2.5) denklemi [234] halini alır.

$$F(Y) = \eta = F[f(x_1, x_2, \dots, x_n)] + F(\varepsilon) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.5)$$

Denklem (2.5) haline dönüşmüş olan tepki fonksiyonu ikinci derecen bir yaklaşım yapılarak denklem (2.6) elde edilir. β değerleri regresyon katsayıları olmak üzere;

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.6)$$

Denklem (2.7) Taylor serisine açılır, sonrasında matrisel formda ifade yazılır ve denklem (2.8) yazılabilir.

$$\eta(x) = x_s' \beta \quad (2.8)$$

Denklem (2.8) üzerinde x_s terimi $n \times 1$ 'lik bir vektör matrisidir. Taylor serisi açılımında ise (2.9) denklemi elde edilir.

$$x_s = [1, x_1, \dots, x_n, x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2, x_1 x_2, \dots, x_1 x_n, x_2 x_3, x_2 x_4, \dots, x_{k-1} x_k] \quad (2.9)$$

Şu ana kadar ortaya konan matematiksel ifadeler ışığında $(n+1)(n+2)/2$ boyutunda regresyon katsayılarını veren sütun matrisi elde edilir.

Tepki fonksiyonu veya gözlem vektöründen yola çıkarak X dizayn matrisini ve model katsayılarını hesaba katarak elde edilmiş olan denklem (2.5)'in matrisel gösterimi (2.10) denklemdir.

$$Y = XB + e \quad (2.10)$$

B matrisi en küçük kareler metodu ile denklem (2.11) halini alır, B çıktı değerlerine dair önem taşımaktadır.

$$B = (X'X)^{-1}X'Y \quad (2.11)$$

σ^2 varyans değerini temsil etmek üzere, denklem (2.12) üzerinden görüleceği üzere $V(B)$ modelin başarısının istatistiki ölçütüdür. Denklem (2.12) üzerinde $(X'X)^{-1}$ terimi minimum olmalıdır. Bu da $X'X$ determinantının maksimize edilmesi ile mümkündür [230].

$$V(B) = \sigma^2 (X'X)^{-1} \quad (2.12)$$

V - Optimal tasarım da benzer bir metodu kullanmaktadır. V - Optimal tasarımda tahmin değeri varyans değerine bağlı kalarak tasarıma gidilir. Çıktı olarak talep edilen nokta sayısına göre ortalama varyans değerini minimize eden tasarım V - Optimal tasarım olarak adlandırılmaktadır [234].

2.5 Yanma ve Emisyon Modellemesi

İçten yanmalı motor araştırmalarında termodinamik modele dayalı çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Motor deneyleri genelde yüksek maliyetli ve zaman alan testlerdir. Aynı zamanda test odasının da belirli bir işlem için gereğinden fazla

meşgul edilmesi akılcı ve iktisadi değildir. Bu sebeple bazı veri setlerinden yola çıkılarak matematiksel veya termodinamik bazlı simülasyon çalışmalarına sıklıkla başvurulmaktadır. Böylelikle belli şarttaki çalışma koşullarında elde edilecek sonuçlara yönelik olarak öngörü geliştirilebilir ve kalibrasyon çalışması aşamasında yapılması gereken deney sayısı azaltılmış olur. Buna ilaveten doğrudan deney sonuç çıktısı olarak görülemeyen, fakat bilimsel bilgi kullanılarak tam veya yaklaşık hesabı yapılabilir parametreler hakkında da simülasyon çalışmaları sayesinde bilgi sahibi olunabilir. Bu yolla araştırmacı ve mühendislerin deney sonrası iş yükünü de azaltması yönünden simülasyon çalışmaları avantaj sağlar. Deneysel verilere bakıldığında veri toplama sistemi tarafından elde edilen veriler doğrudan proses edilmeksizin test anında tutuşma gecikmesi, yakıt ısı enerjisinin belli bir kısmının (%5, %10, %50, %95 gibi önem atfeden değerler) açığa çıkış anları ve yanma odası sıcaklığı gibi parametreler elde edilemez. Bunların anlık eldesi ancak veri toplama sistemine proses kabiliyeti kazandırılmasına veya mühendisin oluşturacağı matematiksel modüller ile mümkündür. Simülasyon çalışmalarında bu gibi değerlere de hızlıca erişilmesi büyük avantaj sağlamaktadır.

Yanma ve emisyon modellemesinin kullandığı matematik bazen termodinamik kanunları gibi mutlak sonuç vermekte, bazen de ampirik yollarla elde edilen ve yaklaşık sonuçlar veren Vibe ifadesi gibi denklemler içermektedir. Dolayısıyla modelin ürettiği toplam yanıt mutlak olmayıp bir yaklaşım niteliği taşır. Bu yüzden de deneysel veriye belli oranlarda yaklaşılarak doğrulama yapmak sistemin güvenilirliği açısından üst sınırdır. Ancak sistem iyi bir şekilde tanımlandıysa ve doğrulama işlemi yanma esnasındaki faktörleri yeterince göz önünde bulundurarak yapıldıysa elde edilen sonuçların yine makul bir hata payı içerisinde sonuçlar ortaya koyduğunu söyleyebiliriz. Matematiksel ve termodinamik bazlı olarak içten yanmalı motor simülasyonu gerçekleştiren yazılımlar piyasada mevcuttur. Bunlar bilimsel kabul görmüş bazı modeller üzerine inşa edilmiş ve hatta bilimsel kabul görmüş birçok model arasından seçim yapma olanağı da tanıyan paket yazılımlar niteliğindedirler. Bu çalışmada AVL-Boost yazılımı termodinamik modelleme esnasında kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında bir boyutlu modelleme gerçekleştirilmiştir. Bir boyutlu modelleme esnasında kullanılan kanun niteliğinde olan ve ampirik ifadelere dayalı yaklaşık çözüm veren denklemler aşağıda bilgilerinize sunulmuştur. İlgili

kısımdaki formülasyonlar kullanılan yazılım programı tarafından sunulan ve teorik hattı çizen “AVL-Boost Theory” [235] dokümanından alınmıştır.

Bir gazın termodinamik sistem özellikleri sıcaklık, basınç ve gaz kompozisyonuna göre değişim gösterir. Bu sebeple ortalama bir değer ataması yapmak tüm dolgu karakteristikleri ve dış ortam şartları için belirsizlikler yaratacaktır. Buna ilaveten yanma esnasında oluşan ekstrem koşullar da hata payını arttıracaktır. Bu sebeple simülasyon esnasında bu değerler zamana daha doğrusu konuma bağlı olarak anlık olarak hesaplanmaktadır.

2.5.1 Korunum Denklemleri ve Kütlesel Akış Denklemleri

Taze dolgu açısından kütleli süreklilik denklemi denklem (2.13) üzerinde görülmektedir. Burada w_{air} havanın kütleli oranını, w_{FV} yakıt buharının kütleli oranını, w_{CP} de okside olmuş yani yanmış kısmın kütleli oranını temsil etmektedir.

$$w_{air} = 1 - w_{FV} - w_{CP} \quad (2.13)$$

Yanma ürünleri için oluşacak yakıt hava oranı ise AF_{CP} ile gösterilmektedir ve denklem (2.14) ile bulunur. Bu terim anlaşılacağı üzere anlık değişkenlik gösteren bir terimdir. Denklemdaki w_{FB} terimi yanmaya katılan yakıtın kütleli oranını temsil etmektedir.

$$AF_{CP} = \frac{w_{CP} - w_{FP}}{w_{FB}} \quad (2.14)$$

Hava yakıt oranı değeri hem egzoz gaz kompozisyonu hem de yanma esnasındaki gaz kompozisyonunu etkileyen en başat faktörlerden biridir. Yanma odası içerisindeki gaz kompozisyonu, disosiyasyon gibi parametreleri sıkı sıkıya etkilemesi sebebiyle bu faktör sıklıkla hesaplamalarda yer alacaktır. Gaz termodinamik hal özellikleri belirlenirken yakıt, oksijen, azot, karbondioksit, su, karbonmonoksit ve hidrojen gazlarının özelliklerinin göz önünde bulundurulması zorunludur. Bunun yanında kullanıcı tarafından ek gaz özelliklerinin de göz önünde bulundurulması sağlanabilir.

Silindir içi termodinamik şartlar ve enerji dengesi bilineceği üzere termodinamiğin birinci yasası göz önünde bulundurularak belirtilir. Enerji dengesi, denklem (2.15)'te görülmektedir. Burada m_c silindir içi karışım kütleli, u özgül iç enerjiyi, α krank açısını, p basınç değerini, V hacmi, Q_F yakıt kimyasal enerjisini, Q_w cidarlara olan ısı kaybını, h_{BB} üfleme gazı (blow-by) entalpisini, m_{BB} üfleme gazı

kaçak kütlesini, m_i emme havası kütlesini, h_i emme havası entalpisini, m_e egzoz gaz kütlesini, h entalpiyi, q_{ev} yakıt buharlaşma gizli ısısını, f silindir içerisindeki dolgunun buharlaşma kesrini, m_{ev} ise buharlaşan yakıt kütlesini vermektedir. Denklemin sol tarafı silindiri iç enerji değişimini temsil ederken, sol tarafın ilk terimi piston işini vermektedir.

$$\frac{d(m_c \cdot u)}{d\alpha} = -p \frac{dV}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_w}{d\alpha} - h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha} \sum \frac{dm_i}{d\alpha} \cdot h_i - q_{ev} \cdot f \cdot \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (2.15)$$

Silindir içi toplam iş gazı kütlesinin değişim değeri ise denklem (2.16) üzerinde görüleceği üzere sisteme giren ve çıkan miktara göre tayin edilir.

$$\frac{dm_c}{d\alpha} = \sum \frac{dm_i}{d\alpha} - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} - \frac{dm_{BB}}{d\alpha} + \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (2.16)$$

Denklem (2.15) gaz kompozisyonundaki değişimlere bağlı olarak karışım oluşumunun silindir içerisinde ve silindir dışında oluşturulmasıyla farklılıklar barındırır. Karışımın silindir içerisinde oluşturulduğu şartlarda bazı kabuller ile denklem çözüme alınabilir. Bu kabuller yanma odasındaki yakıtın ani olarak yanmaya katılması, yanma ürünlerinin sonsuz küçük zaman aralığında yanma odasındaki dolgu ile karışması, hava fazlalık katsayısının yanma başlangıcından sonuna doğru sürekli değişim göstererek azalmasıdır. Bununla birlikte silindir içi basıncın buradan tayiniyle Runge-Kutta prensibi gereğince ideal gaz denkleminde faydalanılarak silindir içi sıcaklık değeri tayin edilir.

Emme ve egzoz supaplarındaki akış kütleli debileri, kararlı akış şartında akış kayıplarını da dikkate alarak izantropik akış denklemi yardımıyla çözülmüştür. Denklem (2.17)'de dm/dt değeri kütleli debiyi, A_{eff} supap efektif kesit alanını, p_{01} yukarı yönlü akış durma (stagnasyon) basıncını, R ilgili şarttaki ideal gaz sabitini, T_{01} yukarı yönlü akış stagnasyon sıcaklığını, ψ ise kesit kayıp katsayısını göstermektedir.

$$\frac{dm}{dt} = A_{eff} \cdot p_{01} \cdot \sqrt{\frac{2}{R_0 T_{01}}} \psi \quad (2.17)$$

Ses altı hızlarda kesit kayıp katsayısı denklem (2.18) ile bulunur. Denklemdaki p_2 alt akım statik basıncını, k ise adyabatik üs değerini temsil etmektedir.

$$\psi = \sqrt{\frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_{01}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_{01}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2.18)$$

Ses üstü hızlarda ise kesit kayıp katsayısı denklem (2.19) ile elde edilir.

$$\psi = \psi_{\max} = \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{1}{K-1}} \cdot \sqrt{\frac{K}{K+1}} \quad (2.19)$$

Gerçek efektif kesit alanı ise port akış katsayısı olan $\mu\sigma$ ve d_{vi} supap oturma yüzeyi iç çapını referans alarak denklem (2.20) formunda elde edilir. $\mu\sigma$ terimi supap eksenel doğrultusundaki deplasman ile değişmektedir. Gerçek akışla izantropik akış arasında belli şartlar altında oluşan akış oranlarını temsil etmektedir.

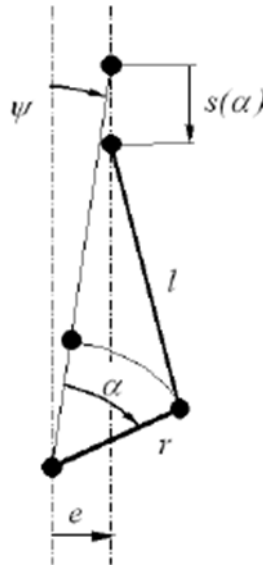
$$A_{\text{eff}} = \mu\sigma \cdot \frac{d_{vi}^2 \cdot \pi}{4} \quad (2.20)$$

Yapılacak tüm işlemlerde özellikle yanma esnasında ulaşılacak basınç ve sıcaklık değeri gaz sabitinin sabit alınmasını belli bir hataya sebep olacaktır. Bu sebeple gaz sabiti krank konumuna bağlı olarak denklem (2.21)'deki gibi elde edilir.

$$\frac{dR}{d\alpha} = \frac{1}{m_c} \cdot (1 - R) \cdot \frac{dm_i}{d\alpha} \quad (2.21)$$

2.5.2 Piston ile Krank Konumu Arasındaki Geometrik Bağlılıklar

Krank-biyel mekanizmasında aradaki geometrik bağıntıları belirtmeden önce sembollerin karşılık geldiği kısımları şekil üzerinde göstermek fayda sağlayacaktır. Şekil 2.1 krank-biyel mekanizmasının temsili gösterimini içermektedir.



Şekil 2.1 Krank-biyel mekanizması elemanları ve ortaya çıkan açılar

Denklem (2.22) piston yolunu veren ifadedir. Piston yolunun tayini ile yanma odası anlık hacminin deplasman doğrultusuna göre değişimi belirlenir ve 1-boyutlu

simülasyon çalışması yapmak mümkün hale gelir. Denklemden s piston perno merkezinin üst ölü noktadaki konumuna göre uzaklığını göstermekte, r krank mili merkezi ekseni ile krank muylu merkezi arasındaki mesafeyi göstermekte, l biyel küçük başı ve büyük başı merkezleri arasındaki mesafeyi temsil etmekte, e krank mili ile piston perno merkezi ekseni arasındaki ofset mesafesini temsil etmekte, α krank mili merkezi ekseni ile piston perno eksenini merkezinin oluşturduğu doğrusal hat ile krank muylu konumu arasında kalan açığı temsil etmekte, ψ ise perno merkezi ekseni ile krank mili merkezi arasındaki açığı göstermekte olup denklem (2.23) ile bulunur.

$$s = (r + 1) \cdot \cos\psi - r \cdot \cos(\psi + \alpha) - l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \cdot \sin(\psi + \alpha) - \frac{e}{l}\right)^2} \quad (2.22)$$

$$\psi = \arcsin\left(\frac{e}{r+1}\right) \quad (2.23)$$

2.5.3 Isı Transferinin Modellenmesi

Yanma odası cidarları ile iş gazı arasındaki ısı transferi denklem (2.24) ile hesaplanır. Burada Q_{wi} cidarların ısı transferini, A_i yanma odası yüzey alanını, α_w ısı transfer katsayısını, T_c iş gazı sıcaklığını, T_{wi} ise cidar sıcaklığını göstermektedir.

$$Q_{wi} = A_i \cdot \alpha_w \cdot (T_c - T_{wi}) \quad (2.24)$$

Cidar sıcaklığı pistonun üst ölü noktaya olan uzaklığının bir fonksiyonu olarak anlık değişen bir dağılım göstermektedir ve denklem (2.25) ile hesaplanmaktadır. Denklemden T_L anlık cidar sıcaklığını, $T_{L,TDC}$ üst ölü noktadaki cidar sıcaklığını, $T_{L,BDC}$ alt ölü noktadaki cidar sıcaklığını, x ise relatif stroğu yani stroğun oransal olarak hangi diliminde bulunduğunu göstermektedir.

$$T_L = T_{L,TDC} \cdot \frac{1 - e^{-cx}}{x \cdot c} \quad (2.25)$$

Buradaki c boyutsuz katsayısı ise denklem (2.26)'da görüldüğü gibi hesaplanır.

$$c = \ln\left(\frac{T_{L,TDC}}{T_{L,BDC}}\right) \quad (2.26)$$

Isı transfer katsayısının belirlenmesinde Woschni ısı transfer modeli tercih edilmiştir. Modelin 1990 yılında modifiye edilen versiyonu denklem (2.27) şeklindedir. Denklemden D silindir çapını, T_c emme sonu sıcaklığını, p_c emme sonu basıncını, c_1 merkezci hız ile ortalama piston hızına bağlı olarak ortaya çıkan bir boyutsuz sayıyı, c_m ortalama piston hızını, $VTDC$ üst ölü hacmi temsil etmektedir.

$$\alpha_w = 13 \cdot V^{-0,06} \cdot p_c^{0,8} \cdot t_c^{-0,4} \cdot (c_m + 1,4)^{0,8} \quad (2.27)$$

Isı transferinin genel modellenmesi yapılırken içten yanmalı motorlarda emme ve egzoz supaplarındaki ısı transferinin de hesaba katılması gerekmektedir. Egzoz gazlarının niteliği yer yer yapılan çalışma için büyük önem arz etmeyebilir. Fakat emme ve egzoz efektif kesit alanı civarında oluşan yüksek akış hızları sebebiyle zorlanmış taşınım ısı transfer miktarı göz ardı edilemeyecek seviyelere ulaşmaktadır. Bu da hem elemanların sıcaklık seviyelerini etkilemekte, hem de doğrulama esnasında egzoz gaz sıcaklığı verisinin sağlıklı çıktı vermesini sağlamak için hesaba katılmalıdır. Port bölgesindeki ısı transferinin bulunması için öncelikle port ısı transfer katsayısı denklem (2.28)'den elde edilebilir. Burada T_d alt akım sıcaklığını, T_u üst akım sıcaklığını, T_w port cidar sıcaklığını, A_w port yüzey alanını, c_p sabit basınçta özgül ısı değerini, T_w ise port cidar sıcaklığını temsil etmektedir.

$$T_d = (T_u - T_w) \cdot e^{\left(-A_w \frac{\alpha_p}{\dot{m} \cdot c_p}\right)} + T_w \quad (2.28)$$

Denklem (2.28)'deki α_p terimi akışın silindir içine ya da dışına doğru yönlendiği şartlarda farklılıklar gösterir. Akış silindir içerine yönelmiş ise ilgili terim denklem (2.29) ile silindir dışına yani kafa bölgesine yönelmiş ise denklem (2.30) ile tayin edilir. Bu iki denklemdeki h_v supap deplasmanını tayin eder, c indisleri ise boyutsuz katsayılarıdır. Egzoz tarafı için c_4 1,2809 değerini, c_5 $7,0451 \times 10^{-4}$ değerini, c_6 ise $4,8035 \times 10^{-7}$ değerini almaktadır. Emme tarafında da c_7 1,5132, c_8 $7,1625 \times 10^{-4}$ ve c_9 da $5,3719 \times 10^{-7}$ değerini almaktadır.

$$\alpha_p = [C_4 + C_5 \cdot T_u - C_6 \cdot T_u^2] \cdot T_u^{0,44} \cdot \dot{m}^{0,5} \cdot d_{vi}^{-1,5} \cdot \left[1 - 0,797 \cdot \frac{h_v}{d_{vi}}\right] \quad (2.29)$$

$$\alpha_p = [C_7 + C_8 \cdot T_u - C_9 \cdot T_u^2] \cdot T_u^{0,33} \cdot \dot{m}^{0,68} \cdot d_{vi}^{-1,68} \cdot \left[1 - 0,765 \cdot \frac{h_v}{d_{vi}}\right] \quad (2.30)$$

2.5.4 Üfleme Gaz (Blow-by) Kaçaklarının Modellenmesi

Üfleme gaz kaçakları etkin segman radyal açıklığı yani üfleme açıklığı (blow-by gap) ve ortalama karter basıncı göz önünde bulundurularak anlık değişim değeri olarak yanma odası basıncıyla birlikte hesaplar. Esas olarak kullanılan denklem (2.17) numaralı denklemdir. Üfleme gazları için bu denklem uygulanırken efektif kesit alanı denklem (2.31)'daki üfleme açıklığına göre tayin edilir. δ terimi üfleme açıklığını temsil etmektedir.

$$A_{eff} = D \cdot \pi \cdot \delta \quad (2.31)$$

Hesaplama esnasında yanma odası basıncı karter basıncının üzerine çıktığında yanma odası basınç ve sıcaklığı yukarı akım durma (stagnasyon) basınç ve sıcaklığı olarak işlev görür. Tersine üfleme (reverse blow-by) şartında ise tam tersi durum söz konusudur. Ancak burada stagnasyon sıcaklığı piston cidar sıcaklığı olarak kabul edilir ve gaz silindirden en son çıkan gaz kompozisyonuna eşit sayılır. Bu yaklaşım, sözü geçen havanın piston ile silindir cidarı arasında sıkışmış halde bulunan iş gazına benzeşim yapması sebebiyle makul bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

2.5.5 Karışım Kontrollü Yanma (Mixture Controlled Combustion-MCC) Teorisi

Karışım kontrollü yanma modeli yanma esnasında yanmış, yanmamış ve karışım prosesinin devam ettiği bölgeleri farklı bölgelere ayırabilmektedir. Buna ilaveten yanma fazlarına müdahaleyi de mümkün kılmaktadır. Bu avantajları sebebiyle çalışmada karışım kontrollü yanma modeli tercih edilmiştir. Bu model direkt püskürtmeli dizel motorlarında yanmanın modellenmesine uygun bir modeldir. Model ısı girişini denklem (2.32)'de de görüldüğü üzere ön karışımli yanma ve difüzyon alev fazlarındaki ısı girişi olarak iki başlıkta ele almaktadır. Denklemdaki Q_{MCC} karışım kontrollü yanmada açığa çıkan ısı miktarını, Q_{PMC} de difüzyon yanma fazında açığa çıkan ısı miktarını temsil etmektedir.

$$\frac{dQ_{total}}{d\alpha} = \frac{dQ_{MCC}}{d\alpha} + \frac{dQ_{PMC}}{d\alpha} \quad (2.32)$$

Karışım kontrollü yanma fazında ısı açığa çıkış oranı o andaki erişilebilir (o ana kadar enjekte edilen) yakıt miktarı olan f_1 ile türbülans kinetik enerji yoğunluğunu temsil eden f_2 'ye bağlı olarak denklem (2.33)'deki gibi bulunur. Burada C_{comb} yanma sabitini, m_f buharlaşmış yakıt miktarını, k türbülans kinetik yoğunluğunu temsil etmektedir.

$$\frac{dQ_{MCC}}{d\alpha} = C_{comb} \cdot f_1(m_f, Q_{MCC}) \cdot f_2(k, V) \quad (2.33)$$

f_1 katsayısı denklem (2.34), f_2 katsayısı ise (2.35) numaralı denklemler yardımıyla bulunur. Burada LHV yakıtın alt ısı değerini temsil etmektedir, $w_{oxygen,a}$ püskürtme başlangıcında iş gazındaki oksijenin kütle oranı, c_{EGR} ise EGR etki sabitini, c_{rate} ise karışım oranını temsil etmektedir.

$$f_1(m_f, Q) = \left(m_f - \frac{Q_{MCC}}{LHV} \right) \cdot (w_{oxygen,available})^{c_{EGR}} \quad (2.34)$$

$$f_2(k, V) = C_{rate} \cdot \frac{\sqrt{k}}{\sqrt[3]{V}} \quad (2.35)$$

Silindir içerisinde yaratılmış olan hava hareketlerinin (swirl ve squish) bağıl olarak kinetik enerji üzerindeki payının küçük kalması sebebiyle yakıt jetinin davranışı belirlenirken sadece yakıt jetinin kinetik enerjisi hesaba katılabilir. Silindir içi hava hareketlerinin saptırıcı etkisinin yakıt demeti kinetik enerjisi üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Türbülans kinetik enerjisinin değişimi denklem (2.36) ile, türbülans yoğunluk parametresi olan k değeri de denklem (2.37) ile bulunur. Bu denklemlerde E_{kin} yakıt jeti kinetik enerjisini, C_{turb} türbülanslı enerji üretim sabitini, v_F yakıt püskürtülme hızını, C_{diss} dağılım sabitini, λ_{Diff} difüzyonlu yanma fazında ortaya çıkan hava fazlalık katsayısını, m_{stoich} ise taze dolgunun stokiyometrik kütesini temsil etmektedir.

$$\frac{dE_{kin}}{dt} = 0,5 \cdot C_{turb} \cdot \dot{m}_F \cdot v_F^2 - C_{diss} \cdot E_{kin}^{1,5} \quad (2.36)$$

$$k = \frac{E_{kin}}{m_{F,1}(1 + \lambda_{Diff} m_{stoich})} \quad (2.37)$$

TG'nin belirlenmesinde ise denklem (2.38) kullanılır. I_{id} terimi TG integralini, T_{UB} yanmamış bölge sıcaklığını, T_{ref} motorin 505 K değerinde olan referans sıcaklık değerini (kendi kendine tutuşma sıcaklığı), Q_{ref} referans aktivasyon enerjisini, temsil etmektedir.

$$\frac{dI_{id}}{d\alpha} = \frac{T_{UB} - T_{ref}}{Q_{ref}} \quad (2.38)$$

Buradaki I_{id} integralini 1'e eşitleyen krank açısı aralığı TG süreci olarak adlandırılır.

Ön karışımli yanma esnasında enerji açığa çıkışı esas olarak Vibe fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Ön karışımli yanma denklemi denklem (2.39)'da görülmektedir. (2.39) denklemindeki y değeri ise (2.40) denklemi ile bulunmaktadır. Burada α Vibe parametresini (6,9 olarak alınabilir), $\Delta\alpha_c$ ön karışımli yanma parametresini, m şekil parametresini, α_{id} ise TG'yi temsil etmektedir.

$$\frac{dQ_{PMC}}{d\alpha} = \frac{a}{\Delta\alpha_c} \cdot (m + 1) \cdot y^m \cdot e^{-a \cdot y^{(m+1)}} \quad (2.39)$$

$$y = \frac{\alpha - \alpha_{id}}{\Delta\alpha_c} \quad (2.40)$$

Damlacık buharlaşması damlacık çapı belirlenirken ilk olarak denklem (2.41) denklemini iteratif metot ile çözümlenir. Burada λ_c silindir cidarı termal kondüksiyon katsayısını, T_d izotermal damlacık kaynama denge sıcaklığını, p_c de silindir içi anlık basınç değerini göstermektedir.

$$\lambda_c(T_c - T_d) = \frac{30,93 \cdot 10^4 \cdot \frac{T_d}{p_c}}{e^{\left(\frac{4150,0}{T_d}\right)} (20,0 + 0,26(T_d - 273,15) + 0,3(T_c - 273,15))} \quad (2.41)$$

Denge sıcaklığından yararlanarak buharlaşma hızı denklem (2.42) yardımıyla bulunur.

$$v_e = 0,70353 \frac{T_d}{p_c \cdot e^{\left(\frac{4159,0}{T_d}\right)}} \quad (2.42)$$

Buradan da damlacık çapının zamana bağlı değişimi denklem (2.43) yardımıyla tayin edilir. Burada d_d anlık damlacık çapını temsil ederken $d_{d,0}$ da başlangıç damlacık çap değerini temsil etmektedir.

$$d_d = \sqrt{d_{d,0}^2 - v_e \cdot t} \quad (2.43)$$

2.5.6 Emisyon Modellemesi

Geniştirilmiş Zeldovich mekanizmasını baz alan 6 reaksiyon NO_x salımlarının hesaplanmasında esas alınmıştır. Bu denklemler Tablo 2.1 üzerinde görülmektedir.

Tablo 2.1 NO_x oluşum denklemleri

	Stokiometri	Oran	$k_0[\text{cm}^3, \text{mol}, \text{s}]$	$a[-]$	$T_A[\text{K}]$
R1	$\text{N}_2 + \text{O} = \text{NO} + \text{N}$	$r_1 = k_1 \cdot c_{\text{N}_2} \cdot c_{\text{O}}$	$4,93 \times 10^{13}$	0,0472	38048,01
R2	$\text{O}_2 + \text{N} = \text{NO} + \text{O}$	$r_2 = k_2 \cdot c_{\text{O}_2} \cdot c_{\text{N}}$	$1,48 \times 10^8$	1,5	2859,01
R3	$\text{N} + \text{OH} = \text{NO} + \text{H}$	$r_3 = k_3 \cdot c_{\text{OH}} \cdot c_{\text{N}}$	$4,22 \times 10^{13}$	0,0	0,0
R4	$\text{N}_2\text{O} + \text{O} = \text{NO} + \text{NO}$	$r_4 = k_4 \cdot c_{\text{N}_2\text{O}} \cdot c_{\text{O}}$	$4,58 \times 10^{13}$	0,0	12130,6
R5	$\text{O}_2 + \text{N}_2 = \text{N}_2\text{O} + \text{O}$	$r_5 = k_5 \cdot c_{\text{O}_2} \cdot c_{\text{N}_2}$	$2,25 \times 10^{10}$	0,825	50569,7
R6	$\text{OH} + \text{N}_2 = \text{N}_2\text{O} + \text{H}$	$r_6 = k_6 \cdot c_{\text{OH}} \cdot c_{\text{N}_2}$	$9,14 \times 10^7$	1,148	36190,66

r tayin edilirken k'nin de ilgili indiste bulunması istenmektedir. Fakat k değeri sadece k₀ olarak verilmiştir. İlgili indisteki k_i değeri denklem (2.44) ile bulunur.

$$k_i = k_{0,i} \cdot T^a \cdot e^{\left(\frac{-TA_i}{T}\right)} \quad (2.44)$$

Reaksiyon oranlarını temsil eden R [mol/cm³s] birimindedir. Çıktı, denge konumu konsantrasyonlarıdır ve [mol/cm³] birimindedir. Oluşan NO_x değeri denklem (2.45) ile gösterilmiştir. Denklemdaki c katsayıları kinetik çarpan ve post-proses çarpanı olmak üzere boyutsuz doğrultma katsayılarıdır. α denklem (2.46) ile, AK₂ denklem (2.47) ile, AK₄ denklem (2.48) ile bulunur.

$$r_{NO} = C_{PostProcMult} \cdot C_{KineticMult} \cdot 2(1 - \alpha^2) \cdot \frac{r_1}{1 + \alpha \cdot AK_2} \cdot \frac{r_4}{1 + AK_4} \quad (2.45)$$

$$\alpha = \frac{c_{NO,act}}{c_{NO,eq}} \cdot \frac{1}{C_{PostProcMult}} \quad (2.46)$$

$$AK_2 = \frac{r_1}{r_2 + r_3} \quad (2.47)$$

$$AK_4 = \frac{r_4}{r_5 + r_6} \quad (2.48)$$

Karbon monoksit salımları modellenirken Onorati tarafından geliştirilmiş iki reaksiyon için farklı katsayılar ile hareket eden bir matematiksel yaklaşım kullanılmaktadır. Bu denklemler Tablo 2.2 üzerinde sunulmuştur.

Tablo 2.2 CO oluşum reaksiyonları

	Stokiyometri	Oran
R1	CO+OH=CO ₂ +H	$r_1 = 6,76 \cdot 10^{10} \cdot e^{\left(\frac{T}{1102.0}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{OH}$
R2	CO+O ₂ =CO ₂ +O	$r_2 = 2,51 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(\frac{-24055}{T}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{O_2}$

Denklem (2.49) yardımıyla r_{co} katsayısı elde edilir. Bu denklemdaki α ise denklem (2.50) ile bulunur. Buradaki C_{const} değeri keyfi sabit niteliğindedir. Denklem (2.51)'e göre r değeri elde edildikten sonra her iki tepkimede de eşitliğe sokularak değerleri elde edilir. Denklem (2.50) etkin c değeri ile denge halindeki c değerinin oranını vermektedir.

$$r_{CO} = C_{const} \cdot (r_1 + r_2) \cdot (1 - \alpha) \quad (2.49)$$

$$\alpha = \frac{c_{CO,act}}{c_{CO,equ}} \quad (2.50)$$

İs emisyonlarının modellenmesi ise denklem (2.51), (2.52) ve (2.53)'e göre gerçekleşir. Bu denklemlerdeki dm_{is} is emisyonunun değişim miktarını, $dm_{is,oluşum}$ is üretimindeki değişimi, $dm_{is,oksidasyon}$ is oksidasyonundaki değişimi, A_B is oluşum sabitini, $T_{A,oluşum}$ is oluşumu baz sıcaklık değerini, $T_{A,oksidasyon}$ is bozunumu baz sıcaklık değerini, $1/\tau_{char}$ karakteristik karışma katsayısını, A_0 ise is oksidasyon sabitini temsil etmektedir. Buna ilaveten n_1 ve n_2 model sabiti 1 olarak, n_3 model sabiti de 1,3 olarak alınabilir.

$$\frac{dm_{is}}{d\phi} = \frac{dm_{is,oluşum}}{d\phi} - \frac{dm_{is,oksidasyon}}{d\phi} \quad (2.51)$$

$$\frac{dm_{is,oluşum}}{d\phi} = A_B \cdot \left| \frac{dm_{yakıt}}{d\phi} \right|_{diff} \cdot \left(\frac{p_{cyl}}{p_{ref}} \right)^{n1} \cdot e^{\frac{T_{A,oluşum}}{T_{ort}}} \quad (2.52)$$

$$\frac{dm_{is,oksidasyon}}{d\phi} = A_0 \cdot \frac{1}{\tau_{char}} \cdot (m_{is})^{n2} \cdot \left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2ref}} \right)^{n3} \cdot e^{\frac{T_{A,oksidasyon}}{T_{ort}}} \quad (2.53)$$

2.6 Yapay Sinir Ağları ve Geri Dönüşümlü Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA) bilgisayar öğrenmesi tabanlı bir çalışmadır. YSA prensip olarak canlıların sinir sisteminin çalışma prensibinin elektronik ortama aktarılmasını amaçlayan bir programlama yaklaşımıdır [204]. Günümüzde matematiksel ifadesi net olarak tanımlanamayan problem veya sistem durumlarının tahmine dayalı olarak bilgisayar ortamında çözümüne gitmek mümkündür. YSA'ların en temel özelliği bilgiye dayalı karar verme yetisidir. YSA'lar kendilerine sunulan bilgilerden yola çıkarak bir öğrenme süreci geçirerek sonuç veya çıktı üretirler. YSA birçok alan ve probleme uygulanabilir olmakla beraber matematiksel formülasyonu tam olarak bilinmeyen problemler için, eğer mümkünse deneysel çalışma sonuçları sonrasında, en güvenilir metottur. Hatta çoğu durumda tek tahmin yürütme mekanizmasıdır. Bu süreç esnasında girdiler ile çıktılar arasında bir ilişki kurulur. Bu esnada birden çok girdi değişkeni ve bunlara ait çıktılar elde edilir. Her bir giriş değişkeni değerine bağlı olarak bir bilgi üretilir ve bir sonraki adımda o değişkenin diğer değerinden elde edilen ilgi bağı da öğrenilmiş olur. Tüm girdiler için öğrenilen bilgi veya iletim matematiğinin elde edilmesine makine öğrenmesi adı verilir. Öğrenme süreci belli örneklemelerin bilgisayar tabanlı olarak yapay zekâya tanıtılması ile mümkündür. Bu

örneklemelerden sürekli olarak çıkarım yapılır ve elde edilen çıkarımlar her aşamada geliştirilir. Bu çıkarımlar da yapay zekânın hafızasında saklanır. Söz konusu bilgi işleme prosesi defalarca kere tekrarlanarak bir çıkarım ve genelleme yapılır.

Öğrenme sürecinde sisteme yeteri kadar numune sunulmalıdır. Böylelikle sistem davranışı iyileşecek ve girdi ile çıktı arasındaki ilişkileri temsil eden daha iyi bir bağ oluşacaktır. Farklı örneklemeler arasında farklı ilişkiler kurularak farklı açılardan ilişki kurmak sistem elastikiyeti açısından faydalı olacaktır. Böylelikle yeteri sayıda örneklem sisteme tanıtıldığında daha sağlıklı bir algoritma geliştirilmiş olur. Bu esnada girdi parametresi ile çıktı parametresi sayısının eşit olması gerekmez. Böylelikle birden fazla girdiden etkilenen tek bir çıktıya yönelik tahminler yürütmek mümkün hale gelir. Öğrenme prosesi çevrimiçi ve çevrimdışı olmak üzere iki başlıkta incelenir. Çevrimiçi öğrenmede (on-line learning) eğitilen YSA yeni örneklemeler ile karşılaştıkça kendini eğitmeye ve algoritmasını geliştirmeye devam eder. Çevrimdışı öğrenmede (off-line learning) ise sistemin eğitilmesi esnasında sunulan örneklemeler ile bir algoritma oluşturulur. Sonrasında sisteme yeni girdi verildiğinde önceki bilgilere göre çıktı tahmini yapılır. Bu girdi ve çıktı daha önceden öğrenilen algoritmayı genişletmemekte, sadece anlık olarak alınan girdi ve çıktı operatörleri niteliği taşımaktadır. Yapay sinir ağı modellenirken eldeki örneklemelerin tamamı sisteme ilk etapta tanıtılmamalıdır. İlk olarak yeteri sayıda örneklem ile YSA eğitilmeli, ardından da sisteme henüz tanıtılmamış örneklemeler ile YSA test edilmeli ve güvenilirliği tayin edilmelidir.

YSA'lar birbirine paralel olarak çalışabilen birçok proses elemanından oluşur. Bu proses elemanları ilk etapta girdileri kabul eder. Devamında çıktıya doğru ilerlerken hiyerarşik olarak bir üst seviyede bulunan proses elemanlarının tamamına bağlanır. Sonrasında ilgili faktörün burası ile ilişkisi belli bir sayısal değer ile (0 ile 1 arasında) ilişkilendirilir. Proses elemanlarının paralel bağlı olarak birbiriyle belli ağırlıklar ile ilişkilendirilmiş olması eksik girdi ile çalışmayı da mümkün kılar. Klasik programlama sistemleri eksik girdi ile çalışamaz fakat YSA'lar eksik bilgi ile de çalışıp bir sonuç üretebilmektedir [236]. Eksik veri ile çalışıldığında, mutlak olarak belirsiz ve güvenilirmez sonuç elde edildiği kanaatine varılmamalıdır. Sonucun belirsizliği veya güvenilirlik kaybı ilgili girdi parametresinin YSA içerisinde öğrenme prosesi esnasındaki ağırlıklandırma değerinin bir ölçütüdür. Eğer eksik girdinin ağırlığı düşükse çıktı parametresi büyük oranında güvenilirdir.

YSA'lar birçok avantaj sağlasa da bazı olumsuzlukları da bünyelerinde barındırır. Sistemin kati kurallar ile tanımlanmış bir metodolojisinin olmayışı ve tasarımda esneklikler bulunması bazı belirsizliklere yol açmaktadır. Bir başka dezavantaj ağ yapısının konstrüktif yapısı ile ilgilidir. Elde edilecek en iyi sonuç ağ yapısının tasarımına bağlı olup genelde deneme yanılma metodu ile tayin edilebilir [236]. Bir diğer sorun ise ağın öğrenme sürecinin ne zaman sonlandırılacağına belirsiz olmasıdır. Bu süreç her ne kadar çıktı değerinin belirli bir yüzdesel hataya kadar düşürülmesi ile tayin edilebilse de relatif bir karar sürecini kapsamaktadır. Ancak en önemli belirsizlik ağın yaratıldıktan sonraki karar verme sürecinin nelere bağlı olduğunun tam olarak bilinmemesidir.

Yapay sinir ağı hücreleri proses elemanı olarak adlandırılır. Proses elemanı kendi içinde 5 farklı kısımdan oluşmaktadır. Bunlar girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve hücre çıktısıdır [236]. Girdiler, kullanıcı tarafından sisteme tanıtılan ya da farklı sinir ağı hücreleri tarafından proseslenerek ilgili hücreye ilettiği girdi bilgileridir. Ağırlıklar ise YSA hücresine girdi vasıtasıyla iletilen bilginin o hücre üzerindeki etkisini dolayısıyla da o hücre için ilgili girdinin önemini belirten numerik bir değerdir. Bu ağırlıklar sabit bir sayı olabileceği gibi değişken de olabilir [237]. Ağırlıklar pozitif veya negatif olabileceği gibi yer yer 0 da olabilmektedir. Ağırlığın 0 olması, ilgili girdinin çıktı üzerinde etkisi olmadığı anlamını taşımaktadır. Ancak ilgili parametrenin diğer hücrelerde bir anlam taşıma ihtimali sebebiyle çıktıda herhangi bir etkisinin görülmeyeceği anlamına gelmez. Hatta diğer hücrelerle toplam etkinin belirlenmesi için önem taşımaktadır. Toplama fonksiyonu farklı girdiler tarafından hücreye iletilen girdi yükünü temsil eder. Toplama fonksiyonu sadece gelen girdi sayısına bağlı olarak hesaplanmaz. Girdileri ağırlıkları ile birlikte hesaplayarak hücrenin yükünü bulur. Burada yapılan işlem ise denklem (2.54) üzerinde görüldüğü gibi NET (net girdi değeri) ile gösterilir. n elemanlı bir girdi için G girdileri, A ise ağırlıkları temsil eder.

$$NET = \sum_i^n G_i A_i \quad (2.54)$$

Fakat bazen farklı toplama fonksiyonu formülleri ile de sinir ağının NET değeri tayin edilebilir. Bu zaman zaman dizi yerine seri metoduyla veya maksimum, minimum veya ortalama değer üzerinden farklı metotlar ile de hesaplanabilmektedir. Esas olarak doğru metoda YSA kendisi karar vermektedir.

Aktivasyon fonksiyonu hücrenin kendisine iletilen girdiyi nasıl işlediğini ve neye dönüştürdüğünü yani ne çıktı ürettiğini belirtir. Burada da farklı metotlar ile veriyi işlemek mümkündür. Kimi metotlarda aktivasyon fonksiyonunun sürekli ve türevlenebilir olması gerekir (geri dönüşümlü yapay sinir ağları ve çok katmanlı algılayıcılarda bu bir zorunluluktur). Bu proseste kesin bir fonksiyon tanımı yoktur ve ağın proses elemanlarının tamamına aynı aktivasyon fonksiyonunun dikte edilmesi gibi bir zorunluluk yoktur. Birçok durumda aktivasyon fonksiyonu bir sigmoid fonksiyonu olarak değerlendirilir. Sigmoid fonksiyonunda net girdi ölçütü olan toplama fonksiyonuna bağlı kalınarak işlem yapılır. Bu işlem denklem (2.55) ile gösterilir. Buna çıktı da denmektedir ve y ile temsil edilmiştir.

$$y = f(\text{NET}) = \frac{1}{1+e^{-\text{NET}}} \quad (2.55)$$

Aktivasyon fonksiyonu öğrenilmeye çalışılan bilginin girdi ve çıktıları arasındaki ilişkilere göre doğrusal fonksiyon, adım fonksiyonu, sinüs fonksiyonu veya hiperbolik fonksiyon niteliğinde de olabilir. Hücre çıktısı ise aktivasyon fonksiyonu sonucunda elde edilen sayısal değerdir. Üretilen çıktı doğrudan sistem çıktısı olabildiği gibi farklı bir sinir hücresinin girdisi niteliği de taşıyabilir. Hatta bazen çıktı tekrar aynı hücrenin girdisi dahi olabilmektedir [236]. Sinir ağı hücrelerinde girdi sayısı açısından bir sınırlama bulunmamaktadır. Fakat hücre çıktısı mutlak olarak tektir. Ancak sonraki aşamada paralel bağlı yapı uyarınca devam eden istasyonda bu tek çıktı birden fazla hücrenin girdisi olabilir.

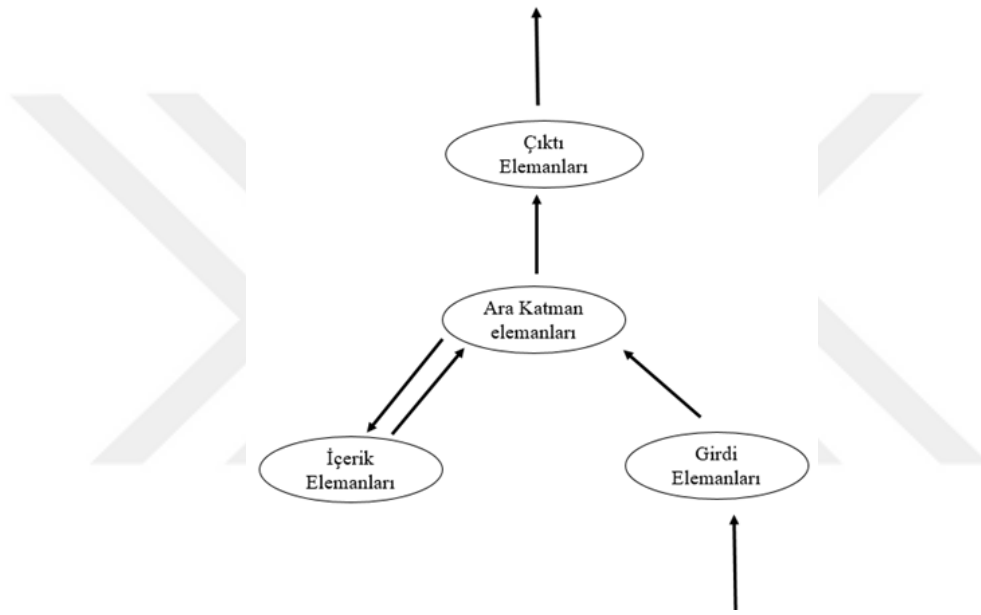
Yapay sinir ağı hücreleri işlevlerine göre konumlanmış alır ve katmanlar halinde pozisyonlanırlar. Girdi bilgileri ile çıktı bilgileri arasında 3 temel katman bulunur. YSA'yı oluşturan hücreler bu hiyerarşik yapı içerisinde girdi katmanı, ara katman/katmanlar ve çıktı katmanı kısımlarından birinde bulunur. Girdi katmanı sisteme girdi olarak verilen bilginin ilk uğradığı hücrelerdir. Bu katmanlarda bazen filtreleme ve bazı dönüştürmeler yapılacağı gibi bazen de hiçbir işlem yapılmaksızın bu bilgi ara katmanlara transfer edilir. Ara katman veya ara katmanlar YSA içerisindeki fonksiyonel kısımdır. Girdiler, ara katman veya katmanlar içerisinde işlenir. Ara katman veya katmanlar, kendi içerisinde birden fazla alt katmana ayrılabilirler. Çıktı katmanı ise ara katman ya da ara katmanların son katmanından gelen bilgiyi çıktı olarak dışarıya sunan kısımdır. YSA'da bir çıktı elde edilirken bunun hangi matematiksel tabana göre elde edildiğine dair proses

formalizasyonu sistem çıktısı olarak sunulmaz. Bu duruma kara kutu yaklaşımı (black-box approaching) adı verilir. Bu durum esasen, daha önce de belirtildiği üzere çıktıların güvenilirliğine dönük bir şüphe yaratmaktadır.

Öğrenme süreci boyunca ağırlık değerlerinin belirlenmesi prosesi ağı eğitilmesi olarak tanımlanmaktadır. İlk etapta ağırlıklar rastsal atanmış değerlerdir. YSA'ya sunulan örneklem arttıkça ve örneklem YSA'ya tanıtılıp proseslendikçe YSA ağırlık değerlerini günceller. Yeter sayıda örneklem girdisi ve girdi proseslemenin tekrarlanması neticesinde doğru ağırlık değerlerine yakınsanır. Nihayetinde ağırlık hakkında bir genelleme yapmak mümkün olur. Bu genelleme yapılabilen noktaya erişilmesine YSA'nın öğrenmesi denilebilir. Ağırlıkların değişimi ise öğrenme metodolojisi içerisinde belli kurallara bağlı kalınarak gerçekleşmektedir. Ağı öğrenmesi sonrasında ise ağ içine henüz alınmayıp hesaplamalara dahil edilmeyen girdiler, sisteme ağırlıklar değiştirilmeksizin sokularak çıktı değerlerinin YSA tarafından tahmin edilen değeri ile gerçek çıktı değeri arasındaki hataya bakılır. Bu aşamada ağırlıklar kesinlikle değiştirilmez. Bu çıktı değerleri ile ağı öğrenme kabiliyeti sınanmış olur. Bu aşamaya ağı test edilmesi denmektedir. Sonrasında ise sisteme öğretilmeyip ve henüz çıktısı bilinmeyen girdiler sisteme sokularak ve YSA'nın genelleme yapabilme kabiliyetinden faydalanarak çıktı değerleri elde edilebilir hale gelir. Ağ öğrenimi esnasında sisteme tanımlanmayan bilgilere yönelik sistem çıktısı üretme prosesine de adaptif öğrenme adı verilmektedir.

YSA modelleri arasında geri dönüşümlü yapay sinir ağları (recurrent neural network - RNN -) mühendislik sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Birçok YSA modeli sadece ileri beslemeli olarak çalışmakta ve sürekli olarak proses elemanının ürettiği çıktı progresif olarak bir sonraki elemana aktarılır. Geri dönüşümlü yapay sinir ağları (GDYSA), proses elemanı çıktısının tekrardan geri besleme ile proses elemanına girdi olarak veri girişi yapmasına imkan tanır. GDYSA'lar tam geri dönüşümlü ve kısmi geri dönüşümlü ağlar olarak iki kısımda incelenmektedir. Tam geri dönüşümlü ağlarda rastgele kurgulanmış ileri yönlü ve geri yönlü ağ bağlantıları bulunmakta olup ağların tamamı eğitilebilir durumdadır [236]. Kısmi geri dönüşümlü ağlar ise diğer YSA'lara göre ek bir elemana sahiptir. Bu elemana içerik elemanı adı verilir. Kısmi geri dönüşümlü ağlar esas itibarıyla ileri beslemeli ağlar olup geri besleme işlemi ise içerik elemanı tarafından gerçekleştirilir. Geri dönüşüm elemanı ise eğitilebilir niteliğe sahip değildir. İçerik elemanı geri besleme

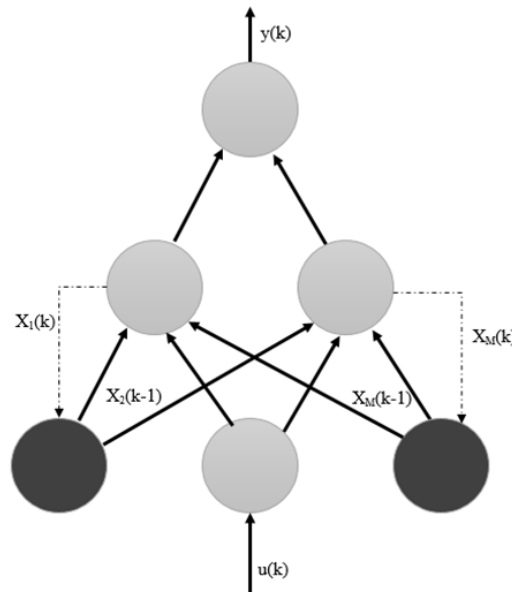
yaptığı eleman veya katmanın önceki durumunu anımsatma işlevi görür. Dolayısıyla YSA'nın üreteceği çıktı hem geçmiş hem de mevcut proses ve sistem haline bağlı olarak ortaya çıkar. Geçmiş durumların da aynı anda hatırlanabiliyor oluşu ağa sürekli güncellenebilir bir hafızaya sahip olma yetisi katmaktadır. GDYSA metodu birçok avantaj sağlasa da geri besleme mekanizması sebebiyle cevap üretme süresi nispeten daha uzundur [238]. GDYSA modeli içerisinde elman ağı sıklıkla kullanılan ağ tipidir [236]. Elman ağı yapısal olarak girdi elemanları, ara katman elemanları, çıktı elemanı ve içerik elemanlarından (context elements) oluşur. Elman ağının sembolik gösterimi Şekil 2.2 üzerinde görülmektedir.



Şekil 2.2 Elman ağı sembolik gösterimi

Ağa bilgi girişi diğer ağlarda da olduğu gibi girdi elemanı üzerinden gerçekleşmekte ve girdi işlenmeksizin ara katmanlara transfer edilir. Ara katman elemanları lineer veya lineer olmayan aktivasyon fonksiyonu ile işlevlendirilmiştir. İçerik elemanları ara katman elemanlarının geçmiş proseslerdeki değerini sisteme tanıtmak üzere görev alır. Dolayısıyla işlemin n. iterasyonunda n-1 adet bilgiyi ara katman elemanına hatırlatırlar. İleri yönlü besleme akışında ağırlıklar her iterasyonda güncellenmektedir. Geri besleme ağırlıkları ise sabit kalır. Geri dönüşüm ağı ağırlıklarının sabit değerlerden oluşuyor oluşu elman ağına kısmi geri dönüşümlü ağ niteliği kazandırır. Ağa girdiler tanıtıldıktan sonra ağ bir yandan ileri beslemeli çok katmanlı YSA olarak çıktı değerleri üretir. Bir yandan da bu aşamada ara katman aktivasyon değerleri geri besleme ile içerik elemanına girdi olarak

gönderilir ve bir sonraki iterasyonda bu bilgi kullanılmak üzere içerik elemanında saklanır. Prosesin ilk aşamasında ara katmanlara ait aktivasyon değerleri bilinmemektedir. Bu anda içerik elemanına bir başlangıç değeri atanmalıdır. Bu değer ara katman değerinin alabileceği maksimum değer yarısı olarak atanır (sigmoid fonksiyon için 0,5 değeri başlangıç değeri olarak atanır). Elman ağına hücresel etkileşim şeması Şekil 2.3’de görülmektedir. Şekil üzerindeki indislerde M ara katman sayısını, u(k) sisteme bilgi girdisini, y(k) YSA tarafından üretilen çıktıyı, x(k) k. iterasyondaki ara katman çıktıları, x(k-1) ise bir önceki iterasyona ait ara katman eleman çıktısını temsil etmektedir.



Şekil 2.3 Elman ağı hiyerarşik yapısı

Girdi elmanı ile ara katmanlar arasındaki ağırlıklar A ile temsil edilmiştir. İçerik elemanı ile ara katmanlar arasındaki ileri yönlü ağırlıklar A^i , geri yönlü ağırlıklar ise A^g olmak üzere delta öğrenme kuralı prensibine göre ağ öğrenmesi şu şekilde gerçekleşmektedir [236]. Öncelikle ara katman elemanlarının net girdi değeri hesaplanır. Bu hesap girdi katmanındaki elemanın girdi değeri olan u ile girdi elemanının ağırlığı olan A^g 'nin çarpımı ile bulunur. Sonrasında bu değere içerik elemanlarından gelen ağırlık ile bir önceki iterasyonun aktivite değeri çarpılarak bu değere eklenir. Bulunan aktivasyon değeri bir fonksiyonda işlenir ve eleman çıktısı elde edilir. Ara katmanlarda kullanılan aktivasyon fonksiyonu sigmoid bir fonksiyonsa ara katman eleman çıktısı denklem (2.56) ile bulunur.

$$x_i(k) = \frac{1}{1 + e^{-NET(k)}} \quad (2.56)$$

Denklem (2.56)'daki net girdi ise az önce belirtildiği üzere geri beslemeler de hesaplamaya dahil edilerek, N girdi eleman sayısı ve M ara katman eleman sayısı olmak üzere, denklem (2.57)'deki gibi bulunur.

$$NET_i(k) = \sum_{j=1}^N A_{ji}^g u(k) + \sum_{i=1}^M A_{ij}^i x(k-1) \quad (2.57)$$

Devamında genelleştirilmiş delta prensibine göre proses elemanları çıktıları hesaplanır ve ağırlık değişim miktarları tayin edilir. Ağ çıktısı da çıktı katmanına gelen net değer lineer fonksiyona tabi tutulması ile denklem (2.58) formunda elde edilir.

$$y_j(k) = \sum_{i=1}^M A_i^a(k) X_i(k) \quad (2.58)$$

y_j değerinin eldesiyle ileri yönlü proses tamamlanır. Gerçek çıktı değeri veya beklenen çıktı değeri daha önceden bilindiğine göre j. çıktı elemanın hata değeri E_j olmak üzere denklem (2.59) ile bulunabilir.

$$E_j = B_j(k) - y_j(k) \quad (2.59)$$

E_j hata değeri ilk olarak çıktı fonksiyonu türevi ile çarpılır ve ağırlıklara dağıtılacak olan hata oranları tayin edilir. Çıktı fonksiyonu sigmoid bir fonksiyon olarak modellendiğinde δ hata oranını temsil etmek üzere denklem (2.60) elde edilmiş olur.

$$\delta(k) = y(k) - (1 - y(k))E(k) \quad (2.60)$$

Yukarıda belirtilen işlemler hata oranı belli bir aşamaya gelene kadar iterasyonlar halinde devam eder. Belli bir hata oranı altına inildiğinde ise nihai çıktı elde edilmiş olur.

TEK FAZDA ELDE EDİLEN DENEYSEL SONUÇLAR, MODEL DOĞRULAMASI VE YSA MODELLEMESİ

3.1 Deneysel Kurulum ve Test Ekipmanlarının Tanıtılması

Çalışmada TŪMOSAN marka, 4 silindirli S8000 tipi, aşırı doldurmalı bir motor kullanılmıştır. Emme havası basıncını sabit tutmak için kompresör çıkışı ile emme havası eşanjörü bağlantısı sökülmüştür. Aşırı doldurma ünitesi böylelikle devre dışı bırakılmış ve doğal emişli formda çalışmıştır. Buna ilaveten iş gazında derişiklik ve kompozisyon değişimlerinin önüne geçmek adına EGR devre dışı bırakılmıştır. Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Deney motoru ve teknik özellikleri

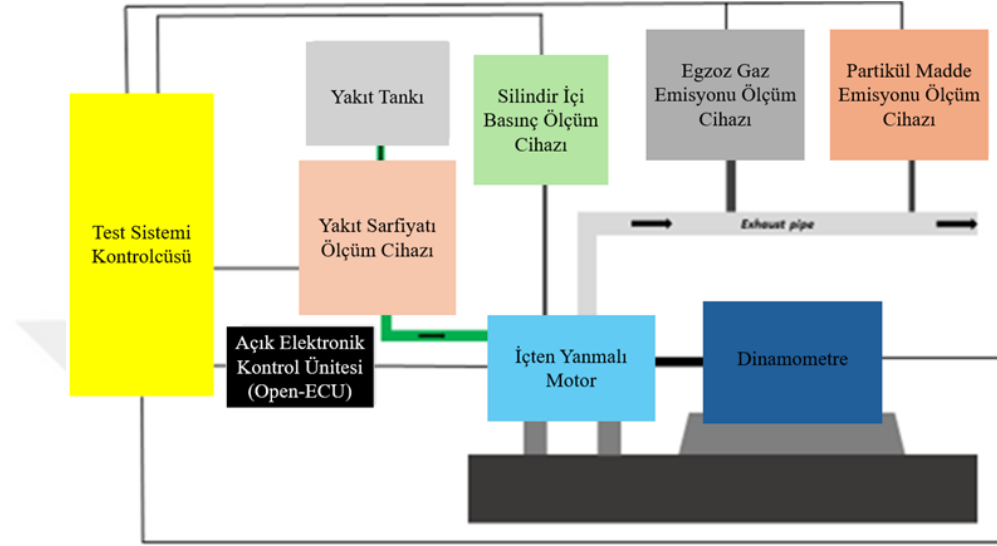
Özellik	Açıklama / Değer
Anma gücü	84,5 kW (2300 dev/dak)
Maksimum moment	405 Nm (1500 dev/dak)
Silindir sayısı	4
Motor deplasman hacmi	3,9 litre
Püskürtme sistemi	Common-rail
Maksimum motor hızı	2550 dev/dak
Minimum özgül yakıt sarfiyatı	217 g/kWh
Sıkıştırma Oranı	17
Emme prosesi	Turboşarjlı aşırı doldurma

Deneyisel alışmalar TÜBİTAK - Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü bünyesinde bulunan motor test odasında gerçekleştirilmiştir. Deneyisel çalışmalarda test motoru AVL INDY s44-2/0934 tipi bir dinamometre ile frenlenmiştir. Püskürtülen yakıt kütlesi Coriolis prensibine göre alışan AVL 735 CME ile llmştir. Açık elektronik kontrol nitesi (Open-ECU) tarafından verilen püskürtme avansı kontrolü için Fluke 80i-110s tetik gerilimi ölçer (current clamp) kullanılmıştır. Etketif tork ölçümü için HBM T12HP tipi tork ölçüm hücresi (torque-cell) kullanılmıştır. Silindir içi basınç verisine Kistler marka 6045B piezoelektrik tip sensör ile erişilmiştir. CO₂, CO, THC ve NO_x emisyonları AVL AMA i60 ile, PM emisyonları ise AVL SPC478 ile llmştir. Emme havası basıncı BYC marka MAP (mass air pressure) sensörü, emme havası sıcaklığı K-tipi ısıl çift elemanı (thermocouple) yardımıyla okunmuştur. Soğutma suyu sıcaklığı AVL Consyscoll 200 ile şartlandırılmıştır. Emme havası debisi AVL FSA 100 tipi gaz akış ölçer ile llmştir. Test odası tam otomatize niteliktedir. AVL PUMA yardımı ve Open-ECU prensibiyle püskürtme avansı, püskürtme basıncı, püskürtülen yakıt kütlesi, motor devri tayin edilebilmektedir. Silindir içi basınç verisinin krank konumuna göre gerçek zamanlı (real-time) olarak analizi ve tetik gerilimi lerden (current clamp) gelen veri doğrultusunda enjeksiyonun gerçekte nerede başladığı bilgisine AVL Indicom ile erişilmiştir. Test odasının görüntüsü şekil 3.1’de görülmektedir.



şekil 3.1 Test odası görseli

Şekil 3.1 test odasını bir fotoğraf olarak göstermektedir. Fakat dinamometre odasındaki birçok sistem ve ölçüm ekipmanı bu fotoğraf üzerinden ayırt edilememektedir. Bu sebeple test odasının şematik gösteriminin sunulması faydalı olacaktır. Şekil 3.2 motor test düzeneğinin şematik yapısını alt sistemleri ve üniteleriyle birlikte göstermektedir.



Şekil 3.2 Motor test sistemi şematik yapısı

Testlerde kullanılan ölçüm ekipmanlarının ölçüm hassasiyetleri Tablo 3.2’de sunulmuştur. Görüleceği üzere ölçüm hassasiyet seviyeleri güncel ekipmanlar arasında kabul edilebilir ve memnuniyet uyandıracak seviyededir.

Tablo 3.2 Ölçüm ekipmanlarının hassasiyetleri

Ölçülen Değer	Ekipman	Hassasiyet
Silindir iç basınç	Kistler 6045B	$\pm 0,2\%$
Yakıt enjeksiyon kütlesi	AVL 735 CME fuel meter	$\pm 0,12\%$
Motor torku	HBM T12HP torque cell	$\pm 0,01\%$
Emme hava debisi	AVL FSA 100 type flow meter	$\pm 0,8\%$
Soğutma suyu şartlandırıcısı	AVL Consycool 200	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Egzoz gaz emisyonu	AVL AMA i60	$\pm 0,01\%$

3.2 Deney Noktalarının Belirlenmesi ve Deney Tasarımı Sonuçları

Araştırma uzayı belirlenirken detaylı literatür taraması yapılmıştır. Bölüm 1.1’de yer alan birçok çalışmadan elde edilen veriler yardımıyla araştırma uzayı tayin edilmiştir. Literatür araştırmasında deneysel çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda stratejinin uygulandığı aralıklar incelenmiştir. Deneysel ve matematiksel modele dayalı araştırma uzayı belirlenirken literatür verileri ışığında çalışmanın sağlıklı uygulanabileceği olası aralık belirlenmiş ve buna ilaveten stratejinin uygulanabilir sınırların dışarısına çıkmaya başlayacağı bölgelerden de bir miktar veri alınarak, stratejinin uygulanabilir bölgelerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Tek fazda püskürtme şartında manipüle edilecek işletme parametreleri motor yükü, motor devri, püskürtme basıncı ve püskürtme avansıdır. Bu dört parametrenin çıktılar üzerindeki etkilerini sağlıklı bir şekilde irdelemek adına diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur.

Tek fazda yakıt püskürtme şartında çalışma aralığı Tablo 3.3 üzerinde görülmektedir. Çevrim başına püskürtülen yakıt kütlesi 15 mg/strok, 20 mg/strok ve 25 mg/strok değerindedir. Çalışmada motor devri 1000 dev/dak, 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak değerindedir. Püskürtme basıncı 600 bar ile 1200 bar arasında 200 barlık adımlar ile değiştirilmiştir. Püskürtme avansı ise ÜÖN öncesi 5° KMA ile 40° KMA aralığında 5° KMA’lık adımlarla değiştirilmiştir.

Tablo 3.3 Tek fazda püskürtme şartında belirlenen araştırma uzayı

Parametre	Alt Değer	Artım	Üst Değer	Seviye
Enjeksiyon kütlesi (mg/strok)	15	5	25	3
Motor hızı (dev/dak)	1000	500	2000	3
Püskürtme basıncı (bar)	600	200	1200	4
Püskürtme avansı (° KMA)	5	5	40	8

Tablo 3.3’te belirtilen araştırma uzayında olası tüm noktalardan veri alındığında yani tam faktöriyel çalışıldığı durumda 288 noktadan deneysel veri almak gerekecektir. Deneysel çalışmadaki çalışma noktasını azaltmak adına Bölüm 2.4’te

bahsedilen deney tasarımı metotlarından yola çıkılarak optimal tasarım metodolojisi seçilmiştir. Deney tasarımı çıktıları MATLAB programında Model Based Design ara yüzü ile elde edilmiştir. Optimal tasarım esnasında üçüncü dereceden polinoma göre modelleme yapılmıştır. Buna ilaveten araştırma uzayının daha iyi temsil edilebilmesi adına hem D - Optimal hem de V - Optimal tasarım sonuçları yaratılmış ve deneysel inceleme yapılacak nokta sayısı bu iki metodun birleşim kümesi alınarak genişletilmiştir. Nihayetinde de deneysel verilerin araştırma uzayını daha iyi temsil etmesi sağlanmıştır. Buna ilaveten dar bir aralıkta tam faktöriyel çalışılmış ve bu noktalar da deney listesine eklenmiştir. Deney tasarımı sonucunda elde edilen ve buna ilave edilen tek faz deneysel çalışma noktaları Tablo 3.4'te görülmektedir.

Tablo 3.4 Deneysel veri alınacak noktalar ve işletme parametreleri

Motor Hızı (dev/dak)	Enjeksiyon Kütlesi (mg/strok)	Püskürtme Basıncı (bar)	Püskürtme Avansı (°KMA)	Deney noktaları	DoE Çıktısı
1000	15	600	5	T1	D3
1000	15	600	20	T3	D1/V1
1000	15	800	5	T2	D5/V5
1000	15	1000	30	T4	V15
1000	20	800	40	T6	D7/V7
1000	20	1200	35	T5	D18/V18
1000	25	600	5	T7	D4/V4
1000	25	600	30	T9	D9/V9
1000	25	1200	15	T8	D17/V17
1500	15	600	35	T10	D8/V8
1500	20	600	5	T11	E7

Tablo 3.4 Deneysel veri alınacak noktalar ve işletme parametreleri (devamı)

1500	20	600	10	T16	E1
1500	20	600	15	T21	D13/V13
1500	20	600	20	T26	E2
1500	20	600	25	T31	E3
1500	20	600	30	T36	E4
1500	20	600	35	T41	E5
1500	20	600	40	T46	E6
1500	20	800	5	T12	E15
1500	20	800	10	T17	E8
1500	20	800	15	T22	E9
1500	20	800	20	T27	E10
1500	20	800	25	T32	E11
1500	20	800	30	T37	E12
1500	20	800	35	T42	E13
1500	20	800	40	T47	E14
1500	20	1000	5	T13	D21/V21
1500	20	1000	10	T18	D20/V20
1500	20	1000	15	T23	E16
1500	20	1000	20	T28	E17
1500	20	1000	25	T33	E18
1500	20	1000	30	T38	E19

Tablo 3.4 Deneysel veri alınacak noktalar ve işletme parametreleri (devamı)

1500	20	1000	35	T43	E20
1500	20	1000	40	T48	E21
1500	20	1200	5	T14	E22
1500	20	1200	10	T19	E23
1500	20	1200	15	T24	E24
1500	20	1200	20	T29	E25
1500	20	1200	25	T34	E26
1500	20	1200	30	T39	E27
1500	20	1200	35	T44	E28
1500	20	1200	40	T49	E29
1500	20	1400	5	T15	E30
1500	20	1400	10	T20	E31
1500	20	1400	15	T25	E32
1500	20	1400	20	T30	E33
1500	20	1400	25	T35	E34
1500	20	1400	30	T40	E35
1500	20	1400	35	T45	E36
1500	20	1400	40	T50	E37
1500	25	800	20	T51	D10/V10
1500	25	1200	25	T52	D19/V10
1500	25	1200	40	T53	D6/V6

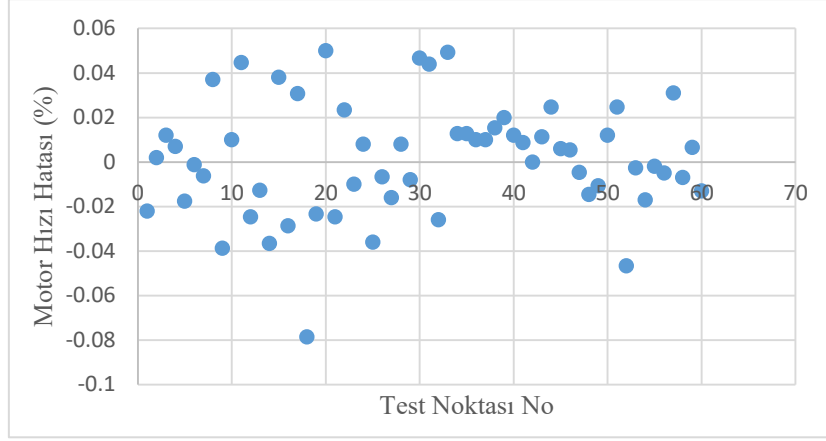
Tablo 3.4 Deneysel veri alınacak noktalar ve işletme parametreleri (devamı)

2000	15	600	5	T54	V3
000	15	800	25	T56	D14/V14
2000	15	1000	30	T57	D15
2000	15	1200	15	T55	D23/V23
2000	20	1200	30	T58	D2/V2
2000	25	600	40	T60	D12/V12
2000	25	1000	35	T59	D11/V12

3.3 Tek Fazda Yürütülen Deneysel Çalışmalarda Hata Analizi

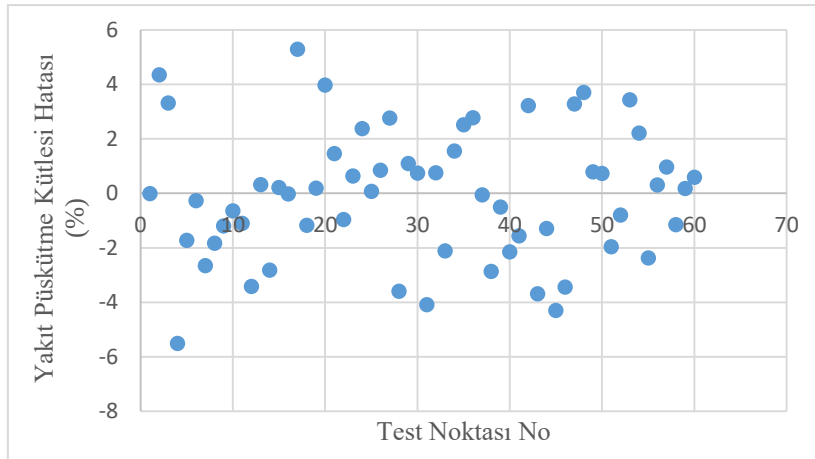
Bu bölümde deneysel çalışma esnasında hedeflenen değerler ile test odasında gerçekleşen değerler arasında ilişki kurulmuş ve hedeflere ne denli yaklaşıldığı yüzdesel hata oranları ve regresyon çıktısı olarak sunulmuştur.

Şekil 3.3 hedeflenen motor hızı ile gerçekte var olan motor hızı arasındaki farktan yola çıkarak hata oranlarını vermektedir. Şekil 3.3 üzerinde de görüldüğü üzere 60 nokta arasında sadece 1 noktada hata %0,05 ile %0,1 arasında olup diğer tüm noktalarda %0,05 değerinin altında hata değerleri almıştır. Bu sayısal verilere göre motor devrinin pratik bir yaklaşımla hedeflenen değerde olduğunu ve pratik yakınsamanın gerçekleştiği rahatlıkla söylenebilir. Bu kısımda yapıla regresyon analizi sonucunda da R^2 değerinin 0,9999 olduğu görülmüştür.



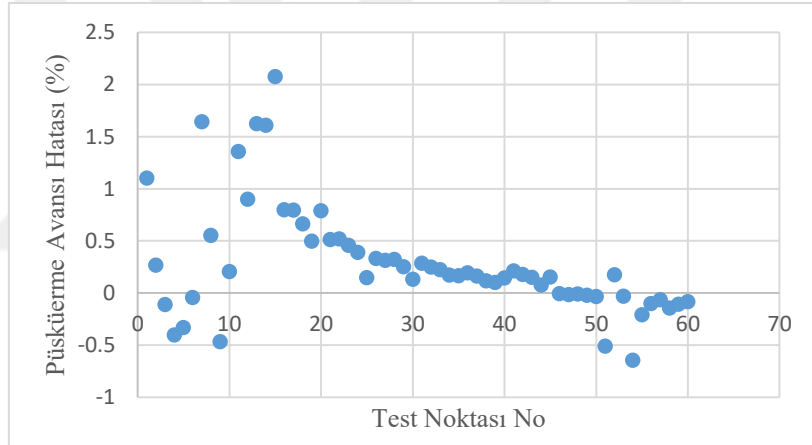
Şekil 3.3 Tek fazda deneysel çalışmada ortaya çıkan motor hızı hata değeri

Yanma odası içerisine püskürtülen yakıt miktarı ile hedeflenen değer arasındaki hata oranları Şekil 3.4 ile sunulmuştur. 60 nokta arasında 7 nokta için hata payı %4 değerinin üzerine çıkmıştır. Test noktalarında büyük oranda %2 hata değerinin altında bir sapmayla hedeflenen değere yaklaşmıştır. Bu test noktalarında kısmi yüklerde çalışılması ve püskürtülen yakıt kütlesinin hedef değerlerinin 15 mg/strok ve 25 mg/strok arasında değiştiği göz önünde bulundurulduğunda 0,1 mg/strok ile 0,2 mg/strok arasındaki sapmaların dahi bu hata değerlerine sebep olabileceği göz önünde bulundurulduğunda püskürtülen yakıt miktarı açısından hataların büyük oranda kabul edilebilir durumda olduğu söylenebilir. %4 üzeri elde edilen hatalarda da büyük oranda 15 mg/strok hedef değerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Yapılan regresyon analizi neticesinde çevrim başına püskürtülen yakıt miktarı açısından R^2 değerinin 0,9686 olduğu görülmüştür.



Şekil 3.4 Tek fazda deneysel çalışmada ortaya çıkan yakıt enjeksiyonu hata değeri

Çalışma içinde daha önceden de belirtildiği üzere tek fazda yapılan deneysel çalışmalarda püskürtme avansı 5° KMA ile 40° KMA arasında değişmektedir. Şekil 3.5 püskürtme avansının gerçek değeri ile hedeflenen değerler arasındaki hata oranlarını göstermektedir. Hedeflenen püskürtme avansı, büyük oranda %0,5 hatadan daha küçük bir hata ile gerçekleşmiştir. 60 nokta arasında 11 noktada %0,5 hata payı aşılmış, bunlar arasında da 6 nokta %1 üzeri hata ortaya çıkmış ve 1 noktada %2 yakınlarında hata gözlemlenmiştir. Hata oranının nispeten yüksek çıktığı noktalar çoğunlukla püskürtme avansının araştırma uzayında küçük değerler aldığı aralıkta gözlemlenmiştir. %1 üzeri püskürtme avansı hatası veren noktalar çok büyük oranda 5° KMA püskürtme avansının hedeflendiği noktalarda karşımıza çıkmış durumdadır. Püskürtme avansının regresyon analizine bakıldığında ise R^2 değerinin 0,9998 olduğu görülmektedir. Bu da oldukça iyi bir değer olarak değerlendirilebilir.



Şekil 3.5 Tek fazda deneysel çalışmada ortaya çıkan püskürtme avansı hata değeri

3.4 Tek Fazda Elde Edilen Deneysel Verilerin Yorumlanması

Tek fazda püskürtme şartında veri alınan 60 nokta içerisinde üç farklı motor yükü, üç farklı motor devri, 5 farklı püskürtme basıncı ve 8 farklı püskürtme basıncının yarattığı sınırlar içerisinde deneysel tasarım metodu ile belirlenmiştir. DoE çalışması sonucu önerilen test noktaları Bölüm 3.2 içerisinde belirtilmiş durumdadır. Bu verilerde tam faktöriyel çalışma şartına göre ardışık test noktalarında veri bulunmaması sebebiyle 1500 dev/dak motor hızı ve 20mg/strok yakıt püskürtme kütlesi şartında tam faktöriyel çalışılmış ve deneysel sonuçların incelenmesi kısmında bu deney noktalarının sonuçlarına değinilmiştir. Bu aralıkta değişkenler ise püskürtme avansı ve püskürtme basıncıdır.

Bölüm 3.1 içerisinde deney şartlarına dair birçok bilgi verilmiştir. Buna ilaveten bazı sistem hal değerleri şu şekildedir. Emme havası basıncı 989 mbar seviyesinde sabit seyretmektedir. Emme havası sıcaklığı ise 20° C değerinde sabit tutulmuştur. Bu değer motor girişi yakınlarında 22° - 23° C değerlerine çıkmaktadır. Bağlı nem değeri %72 olarak kaydedilmiştir. Yağlama yağı basıncı motor devrine göre bir miktar farklılık göstermek üzere 2,29 bar ile 2,67 bar gösterge basıncı arasında değişmektedir. Benzer şekilde yağlama yağı sıcaklığı ise 78° C ile 90° C arasında değerler almıştır. Soğutma suyu giriş sıcaklığı ise 80° C değerinde sabit tutulmuştur. Yakıt olarak EN590 standardına uygun motorin kullanılmıştır ve ölçülen değerlere göre 825 kg/m³ yoğunluğa sahiptir.

3.4.1 Motor Efektif Güç Değerlerinin İncelenmesi

Püskürtme basıncının değişimi bir yandan yakıt pompasının yapması gereken iş miktarını değiştirmekte bir diğer yandan da TG ve atomizasyon rejimini etkilemektedir. Bu sebeple artan püskürtme avanslarında, düşük püskürtme basınçlarıyla çalışmanın ortaya çıkartacağı sonuçlar PCCI stratejisinde merak konusudur.

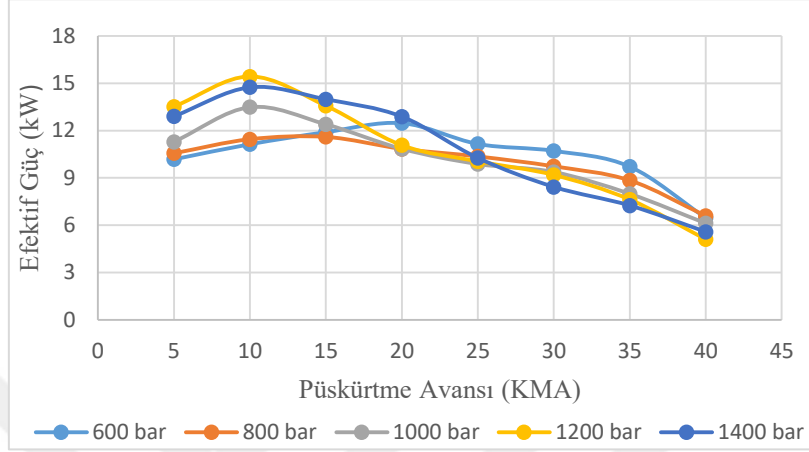
Şekil 3.6'da farklı püskürtme basınçlarının, püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya koydukları efektif güç değerleri görülmektedir. 5° KMA püskürtme avans değerinde TG süreci 5° KMA üzerinde değerler almakta ve yanma başlangıcı genişlemeye kaymaktadır. Bu sebeple genişlemeye kayan yanmadan dolayı efektif güç değerleri düşük değerler almıştır. Püskürtme avansı belli bir değere kadar arttıkça güç değerleri artış göstermiş ve farklı püskürtme basınçlarında 10° KMA ile 20° KMA püskürtme avansı aralığında en yüksek efektif güç değerleri elde edilmiştir. Bu pik efektif güç değerinden sonra, püskürtme avansı arttırıldıkça yanmanın büyük oranda ÜÖN öncesi gerçekleşmesi ve yanma sürecinin uzamasına bağlı olarak efektif güçte düşüşler ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan bu durum beklenen bir durumdur. PCCI stratejisi için önemli olan bu güç düşüşünün makul seviyelerde kalabilmesidir. Püskürtme avansının belli bir değerin üzerine çıkışı her ne kadar birim zamandaki atomizasyon kabiliyetini düşürse de TG sürecini arttırmakta ve yanmaya hazırlık sürecini uzatmaktadır. Püskürtme basıncının düşüşü de yakıtın atomizasyon prosesini olumsuz etkilemekte ve TG sürecini uzatmaktadır. Düşük püskürtme avanslarında, konvansiyonel yanma ile paralel olarak yüksek püskürtme basınçları

ile çalışmak daha avantajlıdır. Daha büyük püskürtme avanslarında ve PCCI çalışma bölgesinde ise daha düşük püskürtme basınçları ile çalışmanın efektif güç açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum yüksek püskürtme basınçlarında TG sürecinin kısılması ve daha düşük ortam basıncında yakıt jetinin daha zor durağanlaşması (stagne oluşu) neticesinde cidar ıslatma eğiliminin ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlar da bu durumu doğrular niteliktedir. Çalışma bölgesi içerisinde, 1400 bar püskürtme basıncında ve 10° KMA püskürtme avansında en yüksek efektif güç ortaya çıkmış, ardından püskürtme avansının artmasıyla oldukça hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında da benzer eğilimler ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında ise aynı karakterin çok daha düşük gradyanlar ile gerçekleştiği görülmüştür. 15° KMA püskürtme avansında maksimum efektif gücü veren 800 bar püskürtme basıncı serisi ile 20° KMA püskürtme avansında maksimum efektif gücü veren 600 bar serisinde ise yüksek püskürtme avanslarında, diğer püskürtme basınçlarına göre daha yüksek efektif güç değerleri gözlemlenmiştir. Bir diğer yandan pik güç çıkışı elde edildikten sonra daha düşük püskürtme basınçlarında, püskürtme avansının artırılması ile efektif güçteki düşüş daha yavaş gerçekleşmiştir. Düşük püskürtme basınçlarında hem yakıt basınçlandırma işinin düşüşü hem de yakıt demetinin daha düşük momentuma sahip olması sebebiyle daha erken stagna oluşu ve cidar ıslatma riskinin azalmasından kaynaklı olarak bu aralıkta daha yüksek efektif güç değeri elde edildiği söylenebilir.

Aynı grafik alanında belirli püskürtme avansındayken püskürtme basıncının değişimine bakıldığında ise şu sonuçlar karşımıza çıkmıştır. Çalışma alanı içerisindeki büyük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncındaki değişimlerin efektif güç çıkışına etkisinin nispeten sınırlı olduğu görülmektedir. 40° KMA püskürtme avansı için püskürtme basıncındaki değişimler sonucunda efektif güç farklılıklarının küçük değerler aldığı görülmüştür. Aynı zamanda diğer püskürtme avansı değerlerindeki verilere bakıldığında, güç çıkışının kayda değer oranda düşük çıktığı görülmektedir. Bu denli büyük püskürtme avansında, yanmanın fazlaca olumsuz etkilenmesi püskürtme basıncının yanma üzerindeki etkisini büyük oranda perdelemiştir. 35° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncı arttıkça efektif güç çıkışının düşüş gösterdiği görülmektedir. Benzer eğilim 30° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncının artırılışında da görülmektedir. Bu bölgelerde

püskürtme basıncının düşük oluşu, TG sürecini artmasına yol açmış ve düşük püskürtme basınçlarında daha iyi sonuçların ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Bu püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının arttırılması ile TG sürecinin kısalışı sonucu yanma başlangıcının beklenenden daha erken ortaya çıkması ve dolgunun atomizasyon kabiliyetinin nispeten düşük olduğu şartta damlacık momentumu ile yanma odası içerisindeki damlacık akışına karşı oluşan direnç seviyesinin düşüklüğü neticesinde cidar ıslanması ortaya çıktığı ve bunun da efektif güç değerini düşürdüğü çıkarımı yapılabilir. 25° KMA püskürtme avansının altındaki püskürtme avanslarında büyük püskürtme basınçlarındaki efektif güç çıkışının nispeten daha büyük oluşu bir yandan cidar ıslatma sorunun bu püskürtme avanslarında sınırlı bir etkiye sahip olduğunu bir yandan da yanma odası termodinamik ve akış şartlarının belli bir olgunluğa ulaştığını ve daha da artan püskürtme basıncının TG sürecini değiştirici etkisinin sınırlı kaldığı sonucunu ortaya çıkartmıştır. 20° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak 600 bar püskürtme basıncından 1000 bar püskürtme basıncına doğru gidildikçe efektif güç çıkışının düşüş gösterdiği, ardından tekrar artış gösterdiği görülmektedir. Burada yanma hızı, ön karışımli yanmanın ve difüzyon yanma fazının ne kadar yanmaya hakim olduğu, TG sürecinin değişimi gibi bir çok faktörün iç içe geçerek bu eğilimi ortaya çıkarttığı söylenebilir. Başlangıçtaki düşüşün, yanma odası içerisindeki birim yakıtın atomizasyon kabiliyetinin düştüğü, yanma başlangıcında dolgu heterojenliğinin daha fazla oluşu, yanmanın daha erken başlaması ve ÜÖN öncesi ısı girişinin artışına bağlı olarak ortaya çıktığı söylenebilir. Bu şartta ön karışımli yanma fazının kısalmış ve difüzyon alev fazının baskınlaşmış olduğu, böylelikle yanmanın daha kısa bir sürede tamamlandığı ön görüşüne sahip olunabilir. Daha düşük püskürtme avansı değerleri olan 10° KMA ve 15° KMA püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının artışına bağlı olarak başlarda bir miktar artış, ardından düşüş ve sonrasında güç değerinde tekrardan artış olduğu görülmektedir. Burada ortaya çıkan değişim eğilimi için de 20° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan durum geçerliliğini korumaktadır. 5° KMA püskürtme avansında, 600 bar püskürtme basıncından 800 bar püskürtme basıncına gidildiğinde bir miktar düşüş ardından artış ortaya çıktığı görülmektedir. 5° KMA püskürtme avansında öncelikle, yanmanın ÜÖN sonrasında başladığını belirterek irdelemeyi yapmak gerekmektedir. İlk başta ortaya çıkan düşüşün 10° KMA ve 20° KMA aralığındaki şarta benzer sebepler ile ortaya çıktığı söylenebilir. Bu aralıkta

düşük püskürtme basıncı sonucu tanecik çapındaki değişim ve buharlaşan yakıt zerreciklerinin yarattığı karışım bölgelerindeki oksijen konsantrasyonu ve yüksek basınçlı püskürtmede bu bölgelerde yer alacak oksijen konsantrasyonu ve yakıt transfer olan toplam ısı akısı gibi faktörlere bağlı olarak yanmanın başlangıcındaki değişimlere bağlı olarak bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır.



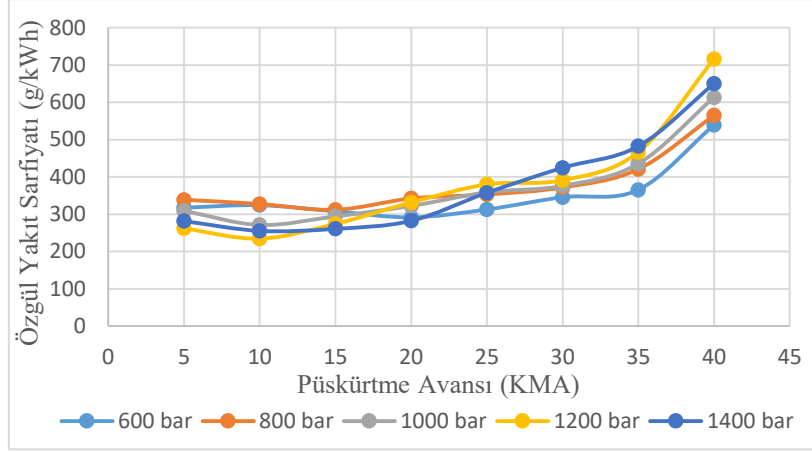
Şekil 3.6 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında efektif güç çıkışı değerleri

3.4.2 Özgül Yakıt Sarfiyatı Değerlerinin İncelenmesi

Yapılan testler sabit motor hızı ve eşit çevrim başına yakıt püskürtme kütlesine bağlı olarak yapıldığı için özgül yakıt sarfiyatı eğrileri ile efektif güç çıkışı eğrileri grafikleri karşıt eğilimde benzer sonuçlar gösterecektir. Bu sebeple Şekil 3.7 sadece özgül yakıt sarfiyatı değerlerinin açık bir şekilde gözükmesi adına sunulmuştur. Elde edilen sonuçlardaki özgül yakıt sarfiyatı değerlerinin bir dizel motora göre yüksek olduğu görülmektedir. Burada motorun düşük yük bölgesinde çalıştığı unutulmamalıdır. Yüksek püskürtme basınçları ile çalışırken 15° KMA - 20° KMA püskürtme avans değerlerinden sonra özgül yakıt sarfiyatında kabul edilebilir sınırların dışında özgül yakıt sarfiyatı artışları ortaya çıkmıştır. Daha düşük püskürtme basınçlarında ise daha geniş bir püskürtme avansı aralığında çalışmanın mümkün olduğu görülmüştür. Yanmanın detorasyon derecesine bağlı olarak yüksek püskürtme basınçlarında 30° KMA püskürtme avansı sonrasında, düşük püskürtme basınçlarında ise 35° KMA sonrasında ortaya çıkan özgül yakıt sarfiyatı değerleri kabul edilebilir olmanın ötesine geçmiştir. 25° KMA püskürtme avansında en düşük püskürtme basıncında çalışmak en yüksek püskürtme basıncına çalışmaya göre %17, 30° KMA'da %19 ve 35° KMA'da %24 özgül yakıt sarfiyatı avantajı

sağlamıştır. Yüksek püskürtme basınçlarında ise püskürtme avansı arttıkça, en yüksek güç çıkışının elde edildiği şarta kıyasla yer yer 3 kata varan oranlarda artış görülmüştür. Fakat burada tek faktörün artan püskürtme basıncıyla azalan TG sonucu yanmanın erken başlaması olduğunu düşünmek büyük bir yanılgıdır. Burada yüksek püskürtme basıncı sebebiyle atomizasyon kabiliyetinin düşük olduğu bir zamanda püskürtme yapılması sonucu piston oyuğu dışına taşan yakıt miktarının artışı da belirleyici rol oynamaktadır.

Her bir püskürtme avansında püskürtme basıncı değişimine bağlı olarak inceleme yapıldığında ise şu bulgular gözlemlenmiştir. 40° KMA püskürtme avansı ve farklı püskürtme basınçlarında elde edilen verilere bakıldığında özgül yakıt sarfıyatı değerlerinin kabul edilebilir sınırların dışına çıktığı görülmektedir. Bu püskürtme avansında 700 g/kWh değerini aşan özgül yakıt sarfıyatı değerleri görülmüştür. Her ne kadar kısmi yüklerde çalışılıyor olursa da bu değerler bir dizel motoru için kabul edilebilir olmanın ötesindedir. 35° KMA püskürtme avansında elde edilen verilere bakıldığında, 600 bar püskürtme basıncından 800 bar püskürtme basıncına gelindiğinde özgül yakıt sarfıyatında belirgin bir miktar artış olduğu, devamında 1200 bar püskürtme basıncına kadar özgül yakıt sarfıyatı değerlerinin daha küçük değişimler gösterdiği görülmüştür. 30° KMA püskürtme avansında elde edilen veriler incelendiğinde 600 bar püskürtme basıncından 800 bar püskürtme basıncına ulaşana kadar özgül yakıt sarfıyatı değerlerinde benzer bir artış gözlemlenmiş, devamında püskürtme basıncının artışı ile 35° KMA püskürtme avansına göre daha küçük değişimler ortaya çıkmıştır. Bahsi geçen püskürtme basıncı verilerine bakıldığında, PCCI bölgesinde 800 bar püskürtme basıncından büyük püskürtme basınçlarında çalışmak yarar sağlamamıştır. 20° KMA püskürtme avansında elde edilen verilere bakıldığında, 1000 bar püskürtme basıncına kadar özgül yakıt sarfıyatının arttığı, devamında da püskürtme basıncının daha da artmasıyla beraber özgül yakıt sarfıyatı değerinin düşüş sergilediği görülmüştür. 15° KMA püskürtme avansında elde edilen veriler incelendiğinde, 10° KMA püskürtme avansına göre püskürtme basıncına hassasiyet daha düşük seviyede kalmış ve artan püskürtme basıncıyla beraber özgül yakıt sarfıyatı değişim gradyanı daha küçük değerler almıştır.



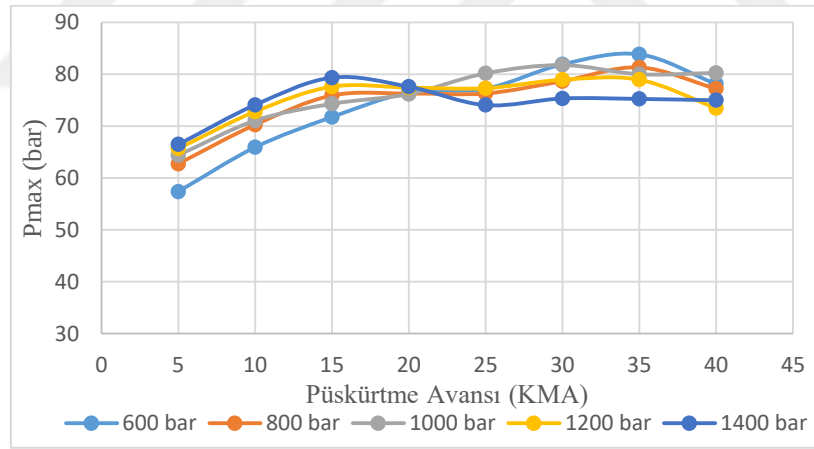
Şekil 3.7 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında özgül yakıt sarfıyatı değerleri

3.4.3 Silindir İçi Maksimum Basınç Değerlerinin İncelenmesi

Silindir içi maksimum basınç verileri Şekil 3.8’te sunulmuştur. Silindir içi maksimum basınç değerleri, düşük püskürtme avanslarında, daha yüksek püskürtme basıncı ile çalışılması halinde daha büyük çıkmıştır. 1400 bar püskürtme basıncında pik silindir içi basınç değeri 15° KMA bandında en yüksek değere ulaşmış, ardından 25° KMA püskürtme avansına kadar düşüş sergileyip, sonrasında yaklaşık sabit değerde seyretmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise 15° KMA ile 35° KMA püskürtme avansı aralığında oldukça küçük dalgalanmalar ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansına kadar, 800 bar ve 600 bar püskürtme basıncında ise 35° KMA püskürtme basıncına kadar maksimum silindir içi basınç değeri artış sergilemiştir. 20° KMA püskürtme avansına kadar yüksek püskürtme basınçları daha büyük pik silindir içi basıncı ortaya çıkarken daha büyük püskürtme avanslarında karakter değişimi gözlemlenmiş ve düşük püskürtme basınçlarında daha büyük pik silindir içi basınç ortaya çıkmıştır. Bu durumun, ilgili püskürtme basınçlarında püskürtme tamamlanmasından yanmanın başlamasına kadar geçen sürenin uzunluğu, makro karışımın daha cepheli bir yapıya sahip oluşu gibi faktörlere bağlı olarak ortaya çıktığı söylenebilir. Sonuçların belli bir kısmında, değişen püskürtme avansına rağmen yaklaşık değerde pik basınçların elde edilmesi de artan püskürtme avansı neticesinde TG sürecinin uzaması, yanmanın yaklaşık benzer yerlerde başlaması ve benzer atomizasyon karakterlerinin ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Doğrudan bu sonuç çıkarılamayacak olsa da bahsi geçen noktalarda efektif güç değerlerinin de ciddi farklılıklar barındırmaması bu savı destekler niteliktedir.

Şekil 3.8’de görülen verileri sabit püskürtme avansında püskürtme basıncının değişimine bağlı yorumladığımızda, düşük püskürtme basınçlarında genel eğilim olarak püskürtme avansının artması, silindir içi elde edilen pik basınç değerinin daha yüksek olmasına yol açmıştır. Püskürtme avansından bağımsız olarak, 1000 bar ve üzerindeki püskürtme basınçlarında elde edilen verilerde yer yer eğilim değişiklikleri ortaya çıkmış ve daha girift bir ilişki var olmuştur. Düşük püskürtme basınçlarında püskürtme avansının artışına bağlı olarak silindir içi maksimum basınç değerinin artış göstermesi, büyük oranda düşük püskürtme avanslarında yanmanın fazlaca genişlemeye kaymasından kaynaklanmaktadır. 40° KMA püskürtme avansında daha düşük silindir içi pik basınç değerlerinin elde edilişi ise yanmanın belli oranlarda detore olması ve cidar ıslatma eğiliminin artmasına bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Motor efektif gücü ve özgül yakıt sarfıyatı eğrilerinde 40° KMA püskürtme avansında elde edilen veriler, buradaki çıkarımı doğrular niteliktedir. 5° KMA püskürtme avansında elde edilen silindir içi pik basınç değerleri, diğer verilere göre kayda değer miktarda düşük seyretmiştir. Bu durum yanmanın ÜÖN sonrasında başlamasından kaynaklanmaktadır. Buna ilaveten püskürtme basıncı arttıkça silindir içi pik basınç değerinin bir miktar artmış olması, TG sürecinin kısaldığını ve yine yanmanın genişlemede başlamış olsa da ÜÖN’ye daha yakın bir yerde ortaya çıktığını göstermektedir. 10° KMA ve 15° KMA püskürtme avanslarında elde edilen verilerde püskürtme basıncının artışına bağlı olarak silindir içi pik basınç değerlerinde düzenli artışlar görülmeye başlamıştır. 20° KMA püskürtme avansında, püskürtme basıncına hassasiyet düşük seyretmiş ve püskürtme avansı değişimine bağlı olarak pik basınç artışı devam etse de oldukça küçük artış gradyanları ortaya çıkmıştır. Püskürtme basıncının artışının normal şartlarda TG sürecini kısalttığı bilinen bir gerçektir. Buna bağlı olarak yanma başlangıcının bir miktar daha püskürtme basıncı artışı ile öne kayması silindir içi pik basınç değerinde artış eğilimini ortaya koymuştur. Fakat burada artış eğiliminin küçük değişimler ile ortaya çıkması püskürtme basıncından ziyade, silindir içi sıcaklık değerlerinin başat faktör olduğunu göstermektedir. 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avansları altında elde edilen verilere bakıldığında 1000 bar püskürtme basıncına kadar silindir içi pik basınç değeri artış göstermiş, ardından da bir miktar düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. Bu iki püskürtme avans değeri 1000 bar püskürtme basıncına kadar artan değerlerde, silindir içi pik basınç açısından konvansiyonel şart ile benzerlik göstermektedir. Fakat bu değer üzerindeki düşüşler, bir yandan

yakıt nüfuziyet derinliğinin artmasıyla makro karışım ve mikro karışım dengesizliklerinin azalması sonucunda daha fakir karışım bölgelerinde yanmanın ilerlemesi ve ısı açığa çıkış hızının düşmesiyle, bir diğer yandan ise cidar ıslatma eğiliminin artmasıyla açıklanabilir. 35° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncı arttıkça düzenli olarak silindir içi pik basınç değerinin düşüş göstermesi tek başına yanma hızı ve ısı kayıpların artışı ile açıklanabilir olmaktan çıkmaktadır. Bu püskürtme avansında cidar ıslatma durumu ortaya çıkmış, aşırı fakir karışım bölgeleri artış göstermiş ve artan püskürtme basıncı ile bu eğilim kuvvetlenmiştir. Çalışmanın devamında THC emisyonları ve CO emisyonlarında görülen artışlar bu savı destekler niteliktedir. 40° KMA püskürtme avansında ise başlangıçta yavaş bir düşüş, ardından 1000 bar püskürtme basıncına kadar artış, sonrasında tekrar düşüş ve sonrasında küçük bir artış trendi ortaya çıkmıştır. Bu verilere göre 40° KMA püskürtme avansında tamamen düzensiz bir değişim ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum yanma hızı, ısı transferi, yanmanın başladığı an, ısı açığa çıkış hızı, yakıt hava karışımının homojenliği, yakıt spreyinin yanma odasına uyumu gibi birçok faktörün yarattığı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır.

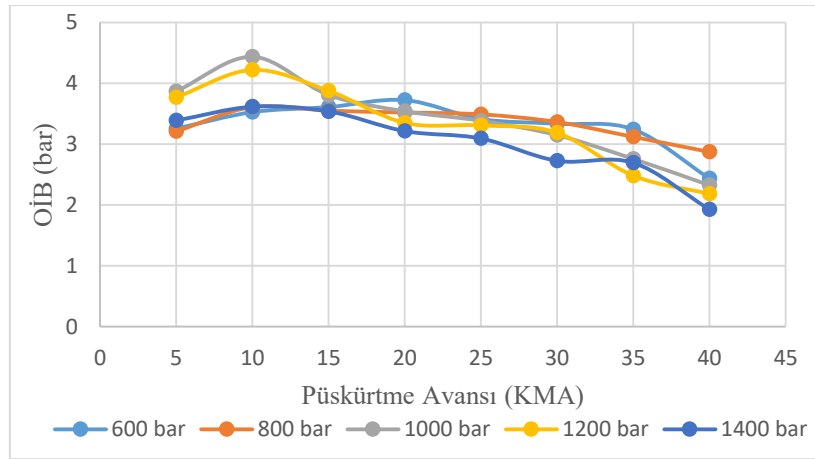


Şekil 3.8 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında silindir içi pik basınç değerleri

3.4.4 Ortalama İndike Basınç Değerlerinin İncelenmesi

OİB değerleri Şekil 3.9'da görülmektedir. Daha önce bazı performans parametrelerine yer verilmiş olsa da yanma termodinamiğinin değişimine bağlı olarak ortaya çıkacak değişimleri değerlendirmek adına OİB verilerine başvurmak faydalı olacaktır. Genel eğilim olarak püskürtme avansının belli bir değerinden sonraki artışlarında OİB değerinin düşüş sergilediği görülmektedir. Bu da esas

olarak beklenen bir durumdur. Bir yandan daha fakir bir mikro karışım ile yanmanın başlaması ve yanma hızının düşüşü bir yandan da yanma odası hacmi daha büyükken yanma gerçekleşmesi ısı kayıpları arttıracaktır. Böylece OİB düşüş sergileyecektir. 600 bar ve 1000 bar gibi düşük püskürtme basınçlarında daha geniş bir püskürtme avans aralığında ortaya çıkan OİB değişimleri daha makul seviyede seyretmiştir. Özellikle 600 bar püskürtme basıncında 10° KMA ile 30° KMA aralığındaki püskürtme avanslarında son derece kabul edilebilir değişimler ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncı için de benzer şey söylenebilir, hatta belirtilen püskürtme avans aralıklarında daha stabil bir karakter dahi ortaya çıkmıştır. Ancak 1000 bar ve üzerindeki püskürtme basınçlarında en büyük OİB değeri elde edildikten sonra hızlı bir düşüş ortaya çıkmıştır. Özellikle 1400 bar püskürtme basıncında bu durum daha da belirgindir. OİB değişim eğilimleri büyük oranda efektif güç çıkışı eğilimleri ile uyum içerisindedir. Çünkü çalışmanın bu kısmı sabit motor yükü ve dolayısıyla da sabit püskürtme kütlesi altında ve de sabit motor hızında gerçekleştirilmiştir. Genel olarak değişim eğilimlerine yönelik olarak aynı şeyler söylenebilse de mekanik kayıplardan arındırılmış inceleme odağı olan OİB verileri arasındaki değişim oranları bir miktar daha küçük farklılıklar barındırmaktadır.



Şekil 3.9 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında OİB değerleri

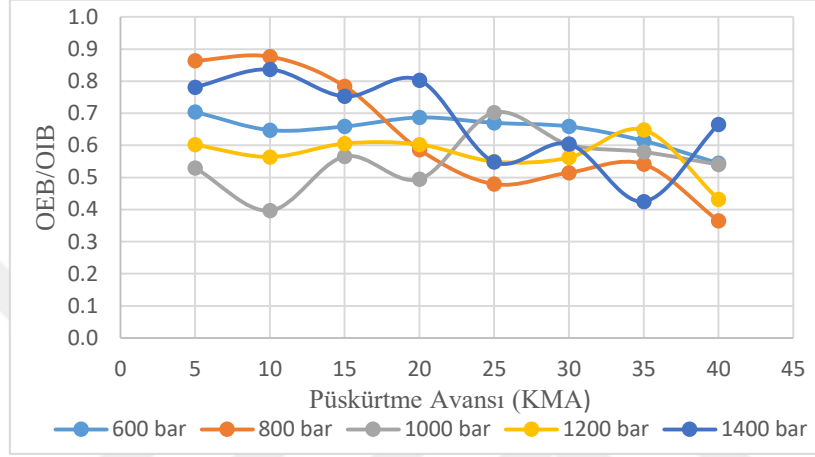
3.8.5 Mekanik Verim Açısından İrdeleme

Çalışmanın bu kısmında sabit motor hızında ve yakıt enjeksiyonuyla çalışılması sebebiyle OEB eğrileri, farklı bir skalada efektif güç değerleri ile aynı karakterde çıkacaktır. İki eğri arasında sadece ordinat eksen değerleri farklılık gösterecek olup tüm aralıkta değişim eğilimleri ve değişim oranları aynı olacaktır. Bu sebeple OEB

değerlerinin ayrıca incelenmesine gerek yoktur. Fakat Bölüm 3.4.4'te de belirtildiği gibi indike parametreler ile efektif parametreler arasındaki değişimleri incelemek yanmanın termodinamik koşulları haricinde maruz kaldığı kayıplara yönelik fikir sunması açısından önemlidir. Bu sebeple mekanik verim olarak da adlandırılan OEB/OİB oranları çalışmaya dahil edilmiştir. Şekil 3.10 üzerinde görülen sonuçlara göre düşük püskürtme avanslarında püskürtme basıncının artışına bağlı olarak sabit bir değişim trendi ortaya çıkmamıştır. Bu düzensiz etki artan püskürtme avanslarında da kendini var etmiştir. Genel bir eğilim olarak da püskürtme avansının artışı ve PCCI bölgesine geçiş ile mekanik verimde bir miktar düşüş olduğu görülmektedir.

Her bir püskürtme avans değeri için püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak OEB/OİB oranı, küçük püskürtme avanslarında daha iyi sonuçlar vermiş, mutlak bir eğilim olarak olmasa da çalışma aralığının tümünde nispeten düşük püskürtme avanslarının OEB/OİB açısından daha avantajlı sonuçlar doğurduğu görülmüştür. Yüksek püskürtme avansları, mekanik verim açısından avantaj yaratmamıştır. 5° KMA püskürtme avansı verileri incelendiğinde, özellikle 800 bar değerinden büyük püskürtme basınçlarında iyileşmeler görülmüştür. Bu durum yanmanın termodinamik olarak daha doğru bir noktada ısı girişini doğurmasından kaynaklanmaktadır. 10° KMA ve 15° KMA püskürtme avansında başlangıçta belli bir belirsizlik ortaya çıkmış fakat 1000 bar püskürtme basıncı sonrasında kayda değer iyileşmeler görülmüştür. 20° KMA püskürtme basıncında bu eğilim daha normale yakın davranış göstermek üzere devam etmiştir. 25° KMA püskürtme basıncında düzensiz bir eğilim ortaya çıkmış, 30° KMA püskürtme basıncı altında ise 800 bar püskürtme basıncına kadar bir miktar düşüş, ardından yavaş bir artış eğilimi ortaya çıkmıştır. 35° KMA püskürtme avansında ise 1200 bar püskürtme basıncına kadar ciddi değişiklikler ortaya çıkmazken, ardından hızlı bir kötüleşme görülmüştür. 40° KMA püskürtme avansında ise değişim eğiliminin ne olduğundan bağımsız olarak oldukça kötü sonuçlar elde edilmiş ve mekanik verim yer yer, %50'nin de altına düşmek üzere, %50'ler seviyesinde kalmıştır. Burada verilerin tek tek incelenmesinden ziyade, grafikteki veri havuzundan faydalanarak çıkarım yapmak faydalı olacaktır. PCCI stratejisinde, püskürtme avansının artışı ile artacak olan TG sürecinde püskürtme basıncını düşürmenin ciddi TG farklılıklarına yok açmayacağı ve yakıt basınçlandırma işinin düşüşüne bağlı olarak yer yer

iyileşmeler ortaya çıkarabileceği düşüncesi merak konusudur. Bu çalışmada 20° KMA ile 30° KMA aralığında izafi olarak çok kötü sonuçlar ortaya çıkmamıştır. Fakat, 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avanslarında, en iyi OEB/OİB değerleri düşük püskürtme basınçlarında elde edilmiştir. Burada ciddi iyileşmeler ortaya çıkmasa da yer yer mekanik verim iyileşmesi göze çarpmaktadır. Yüksek püskürtme basıncı bölgesinde ise konvansiyonel çalışma bölgesi içerisinde kalan püskürtme avanslarında kayda değer iyileşmeler göstermiştir.



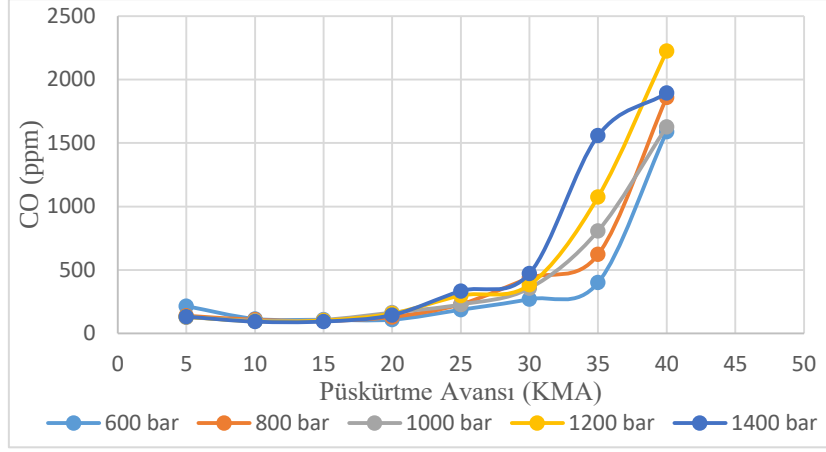
Şekil 3.10 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında mekanik verim değerleri

3.4.6 CO Emisyonlarının İncelenmesi

Şekil 3.11 ppm biriminde CO emisyonlarını göstermektedir. Püskürtme avansının 20° KMA değerine artışına kadar CO emisyonlarında belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Aynı zamanda 20° KMA püskürtme avansına kadar ortaya çıkan CO emisyon miktarı püskürtme basıncından da büyük oranda bağımsız seyretmiştir. 25° KMA püskürtme avansı ile beraber aradaki farklar belirginleşmeye başlamıştır. Bu püskürtme avansı ve sonrasında hem püskürtme avansı hem de püskürtme basıncına hassasiyet oldukça yüksek seyretmiştir. Özellikle 35° KMA püskürtme avansı ve sonrasında CO emisyonlarında ciddi artışlar göze çarpmaktadır. Bu püskürtme avanslarında yüksek püskürtme basıncı ile çalışmak daha yüksek CO emisyonlarını ortaya çıkarmıştır. 1400 bar püskürtme basıncındaki değerlere bakıldığında 20° KMA püskürtme avansına kıyasla, 30° KMA püskürtme avansında CO emisyonu yaklaşık olarak 3,3 katına, 40° KMA püskürtme avansında ise yaklaşık 13,1 katına çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ise bu değerler yaklaşık olarak sırası ile 2,1 ve 12,3 değerlerini almıştır. Dizel motorlarında CO oluşumu büyük oranda zayıf

aleve bağı olup PCCI stratejisinde CO emisyonlarının artışı beklenen bir durumdur. Artan püskürtme basınçları ile silindir içerisinde daha büyük bir hacimde karışım oluştuğu ve daha fakir karışımlı bölgelerin hacmen artış gösterdiği, bu bölgelerde de alev sıcaklıklarının düşük seyretmesi sonucunda CO emisyonlarının arttığı söylenebilir. Aynı zamanda püskürtme avansı artışıyla CO emisyonunun artması da bu duruma bağlıdır. 30° KMA püskürtme avansında iki sınır püskürtme basıncı değeri arasında %75 CO emisyonu farkı varken, 35° KMA püskürtme avansında bu fark %400 seviyesine çıkmıştır. Bu da CO artış hipotezini doğrular niteliktedir. Çünkü bu yüksek püskürtme avanslarında TG süreci daha da uzamış ve daha seyreltik ve fakir karışımlar ile yanma gerçekleşmesi sonucunda CO emisyonları artış sergilemiştir. 40° KMA püskürtme avansında aradaki farklar daha düşük seviyeye gerilemiştir. Bu püskürtme avansında en düşük ve en yüksek CO emisyonu %36 farklılık sergilemiştir. Ancak tüm püskürtme basınçlarında oldukça yüksek CO salımları ortaya çıkmıştır. Bu aralıkta silindir içi sıcaklıkların püskürtme yapıldığı esnada oldukça düşük olması atomizasyon rejimini olumsuz etkilemiştir. Dahası, püskürtme basıncının yaratacağı etkiyi perdelemeye başlamıştır. Bu püskürtme avansında püskürtme basıncı artışına bağlı olarak CO'nun düzenli artış eğilimi de bozulmuştur. Bu durum püskürtme basıncı artışıyla birim kütlenin momentumu artsa da damlacık çapının değişimine bağlı olarak atalet ve yüzey gerilme kuvvetleri arasında kurulan ilişkinin farklılaşması ile ilişkilendirilebilir.

Her bir seçili püskürtme avansında farklı püskürtme basınçlarında inceleme yapıldığında 20° KMA püskürtme avansına kadar tüm püskürtme basınçlarında gözle görülür bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Bu dört farklı püskürtme avansında da CO emisyonunun püskürtme avansı ve püskürtme basıncına duyarlılığı oldukça düşüktür. 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avanslarında püskürtme basıncı artışına bağlı olarak kabul edilebilir CO emisyonu artışı gözlemlenmiştir. 35° KMA püskürtme avansında, püskürtme basıncı arttıkça belirgin artış ortaya çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan CO değerleri tüm püskürtme basınçlarında değerlerinde kabul edilebilir değerlerin oldukça üzerinde sayısal verilere erişmiştir. Düşük püskürtme basınçlarında artan püskürtme avansına bağlı olarak meydana gelen CO artışı nispeten kabul edilebilir seviyedeyken, yüksek püskürtme basınçlarında oldukça büyük farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu durum yanma odası içerisinde zayıf alev bölgelerinin artış göstermesi ile gerekçelendirilebilir.



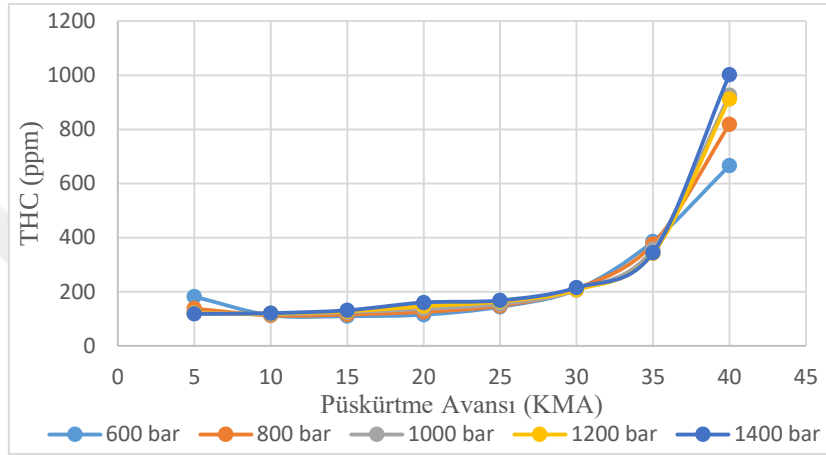
Şekil 3.11 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında CO emisyonu

3.4.7 THC Emisyonlarının İncelenmesi

THC emisyonları, Şekil 3.12'den de görüleceği üzere, literatür verilerine benzer şekilde CO emisyonları ile son derece benzer değişim eğilimine sahiptir. THC emisyonlarında, püskürtme avansının artışı neticesinde belirgin farkların ortaya çıkması 20° KMA püskürtme avansından daha sonra gerçekleşmiştir. Yani gözle görülür artış CO emisyonlarından daha geç ortaya çıkmıştır. 30° KMA püskürtme avansına kadar ise püskürtme basıncının THC emisyonları üzerinde ciddi bir etki göstermediği sonuçlar elde edilmiştir. Buradan THC emisyonları açısından basınç etkisinin, püskürtme avansı etkisinden daha geç kendini var ettiği sonucu ortaya çıkmaktadır. En yüksek püskürtme basıncı değerleri olan 1400 bar püskürtme basıncında ve 20° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan THC değerine kıyasla 30° KMA püskürtme avansında 1,34 kat, 35° KMA püskürtme avansında 2,15 kat, 40° KMA püskürtme avansında 6,26 kat daha yüksek THC salımı gözlemlenmiştir. En düşük püskürtme basıncı olan 600 bar püskürtme basıncında, bu değerler sırası ile 1,68, 2,86 ve 5,32 değerini almıştır. 40° KMA püskürtme avansında ve 1400 bar püskürtme basıncında, 600 bar püskürtme basıncına kıyasla %51 daha fazla THC emisyonu ortaya çıkmıştır. Bu durum püskürtme yapılan ortam basıncının düşüklüğü sonucunda yakıtın hava içerisinde karışırken aksel doğrultuda durağanlaşmaması sonucunda piston üst yüzeyi ve özellikle de silindir cidarlarına yakıtın çarpması sonucunda yanmaya katılamama neticesinde ortaya çıkmaktadır.

Benzer şekilde sabit püskürtme basıncında THC emisyonları incelenirken 5° KMA, 10° KMA, 15° KMA, 20° KMA püskürtme avanslarında, püskürtme basıncı ve püskürtme avansının değişimiyle THC emisyonlarında ciddi değişiklik

görülmemiştir. 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avanslarında daha yüksek THC değerleri gözlemlenmiş olsa da püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak kayda değer farklılıklar görülmemiştir. Fakat 40° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncı arttıkça THC emisyonları ciddi artış sergilemiştir. 40° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncının artması düzenli olarak THC emisyonlarını arttırmıştır. Bu durum hali hazırda elverişsiz şartta yapılan püskürtmenin artan püskürtme basıncı ile yakıtın yağlama yağına karışmasına, cidar ıslatmasına sebep olmasına ve alev sönme bölgesinde yakıt hava karışımının artmasına bağlanabilir.



Şekil 3.12 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında THC emisyonu

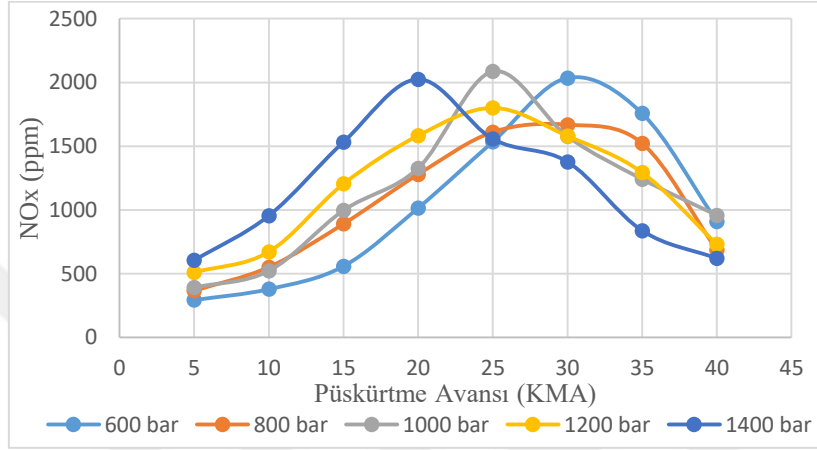
3.4.8 NO_x Emisyonlarının İncelenmesi

Şekil 3.13, NO_x emisyonlarını ortaya koymaktadır. Bilindiği üzere, dizel motorlarında NO_x emisyonları, püskürtme avansı ÜÖN'den belli bir değere kadar uzaklaştıkça artış göstermekte ve ardından kısmi yüklerde çalışılıyorsa, PCCI stratejisini makul kılan şekilde, düşüşe geçer. Küçük püskürtme avans verilerine bakıldığında, yüksek püskürtme basınçlarında daha yüksek NO_x değerleri ortaya çıkmıştır. Bu eğilim 20° KMA ile 25° KMA püskürtme avansı aralığında değişmeye başlamıştır. Ortaya çıkan bu artış eğilimi, TG sürecinin daha kısa olup difüzif alev fazının daha baskın olması, buna bağlı olarak daha yüksek alev sıcaklıklarının ortaya çıkması ve dolgu heterojenliğinin artarak soğuk cephelerin artışından kaynaklanmaktadır. Daha büyük püskürtme avanslarında ise karışım homojenliğinin artışı neticesinde daha fakir karışımlı bir yanma gerçekleşmiş ve alev sıcaklıkları da düşüş göstermiştir. Böylelikle soğuk cephelerin azalmasına bağlı olarak NO_x emisyonları düşüş eğilimine girmiştir. NO_x emisyonlarının en yüksek değeri 1400 bar püskürtme basıncında 20° KMA püskürtme avansında,

1200 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında 25° KMA püskürtme avansında, 800 bar ve 600 bar püskürtme basınçlarında ise 30° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. Burada göze çarpan önemli bir sonuç ise en yüksek NO_x salımının görüldüğü püskürtme avansından sonra püskürtme avansı arttırıldıkça, daha düşük püskürtme basınçlarında daha büyük bir gradyan ile NO_x salımları azalma eğilimine girmektedir. Fakat PCCI stratejisinin bu motor ve işletme şartlarında uygulanabilir olduğu kabaca 25° KMA ve üzeri püskürtme avanslarında düşük püskürtme basınçları daha yüksek NO_x salımlarına yol açmıştır. Bu durumun muhtemel sebebi yanmaya iştirak eden bölgelerde hava fazlalık katsayısı açısından heterojenliğin yüksek oluşu, TG uzun olsa da düşük püskürtme basıncı düşüklüğü sebebiyle damlacık parçalanması ve makro karışım oluşumunun yetersiz kalmasıdır. NO_x emisyonlarındaki düşüş yaşanan bölgede PCCI stratejisinin uygulanabilirliği ise ilgili işletme şartında motor gücü ile birlikte değerlendirilmeli ve özgül emisyon çıktıları ile karara bağlanmalıdır.

Püskürtme basıncı değişiminin göz önüne alındığı şartlarda düşük püskürtme basınçlarında, püskürtme avansının 30° KMA değerine artışına kadar, püskürtme avansı arttıkça NO_x emisyonlarında artış görülmüştür. Devamında 40° KMA püskürtme avans değerine doğru gidilirken NO_x emisyonları düşüş eğilimine girmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında 25° KMA püskürtme avansı değerine kadar artan püskürtme avanslarında NO_x emisyonlarında artış, sonrasında düşüş eğilimi başlamıştır. 1400 bar püskürtme basıncı şartında bu değer 20° KMA püskürtme avansına gerilemiştir. Verilerin geneline bakıldığında 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avansında düşük NO_x salımları elde edilmiştir. Püskürtme basıncından bağımsız olarak 15° KMA ve 20° KMA püskürtme avanslarına çıkıldığında daha küçük püskürtme avansı verilerine göre ciddi NO_x emisyonu artışları görülmüştür. Tabi ki bu durum püskürtme basıncı arttıkça daha da büyümüştür. 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avansında elde edilen NO_x salımlarına en yakın NO_x salım değerleri büyük oranda 40° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir. 15° KMA ve 20° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncı arttıkça NO_x salımlarında elde edilen düzenli artış; yanma veriminin artması, yanmanın konvansiyonel yanma karakteristiğinde olması ve ideal çevrime yakınsamasından kaynaklanmaktadır. Devamında 25° KMA püskürtme avansında, 1000 bar püskürtme basıncına kadar NO_x salımının artması ve sonrasında düşüş

eğiliminin başlaması bu çıkarımı destekler niteliktedir. Bu bölgede düşüş trendinin başlaması makro karışımın iyileşerek soğuk bölgelerin azalmasına bağlıdır. 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avanslarında, püskürtme basıncı arttıkça NO_x salımlarındaki düzenli düşüşler de aynı sebeple ortaya çıkmaktadır. 40° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncı arttıkça daha önceki verilerde olduğu gibi dalgalı bir form ortaya çıkmıştır. Bu düzensizliğin olası sebepleri daha önceki kısımlarda açıklanan faktörler ile benzerlik göstermektedir.

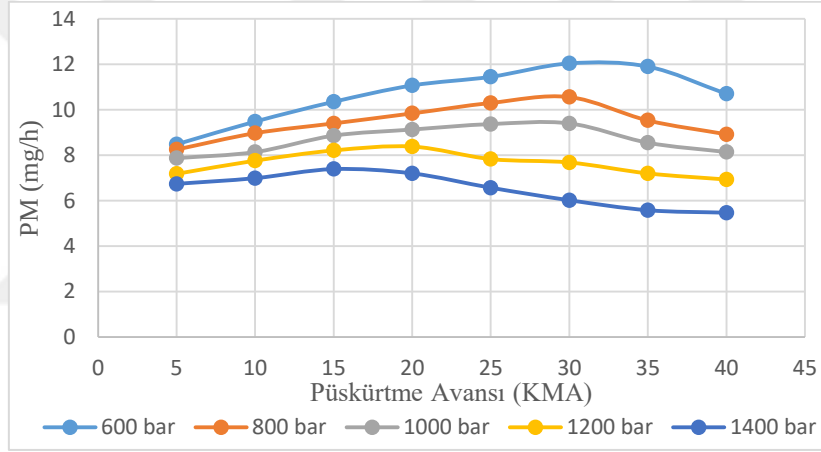


Şekil 3.13 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında NO_x emisyonu

3.4.9 PM Emisyonlarının İncelenmesi

PM emisyonları Şekil 3.14 ile sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre püskürtme avansı arttıkça tüm püskürtme basınç değerlerinde PM emisyonları başlangıçta artış eğilimine girmiş, ardından da düşüş eğilimi göze çarpmıştır. 5° KMA gibi küçük püskürtme avanslarında her ne kadar enjeksiyon yapılan ortam sıcaklığı oldukça yüksek olsa ve silindir içi gelişkin türbülans var olsa da yakıtın bu yüksek sıcaklık bölgesinde kısa süre kalması sebebiyle yanma başlangıcı genişleme stroğuna kaymıştır, böylelikle uzun TG süreci elde edilmiştir. Fakat, birincil parçalanma rejimi nispeten daha uygun şartlarda gerçekleşmiştir. Belli bir değere kadar artan püskürtme avanslarında püskürtme sonu ile yanma başlangıcı arasında negatif faz açısı (negative dwell) ortaya çıkmış ve ön karışimli yanma karakteristiği baskılanırken difüzif alev fazı daha belirgin hale gelmiştir. Aynı zamanda silindir içerisine enjekte edilen son yakıt zerreciklerinin karışım oluşturma için yeterli süreye sahip olmaması da bu eğilimi tetiklemiştir. Böylelikle püskürtme avansının artışıyla ilk etapta PM emisyonları artış göstermiştir. Sonrasında püskürtme avansının daha da arttırılması ile TG süresince yakıt zerreciklerinin buharlaşma ve

kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşması için geçen süre artmış, hem de yakıt zerrecikleri daha düşük ortam basıncında daha büyük penetrasyon derinliğine ulaşmıştır. Bu faktörlere bağlı olarak belli bir püskürtme avans değerinden sonra püskürtme avansının artışıyla PM emisyonları düşüş eğilimine girmiştir. 1400 bar püskürtme basıncında en yüksek PM değeri 15° KMA püskürtme avansında, 1200 bar püskürtme basıncında 20° KMA püskürtme avansında, daha düşük püskürtme basınçlarında ise 30° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten her bir püskürtme avansında daha yüksek püskürtme basıncı ile çalışmak daha iyi sonuçlar vermiştir. NO_x emisyonlarında ortaya çıkan yüksek gradyanlı değişimler PM emisyonlarında gözlemlenememiştir. PM emisyonlarında püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan değişim daha yumuşak geçişli bir formda ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.14 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında PM emisyonu

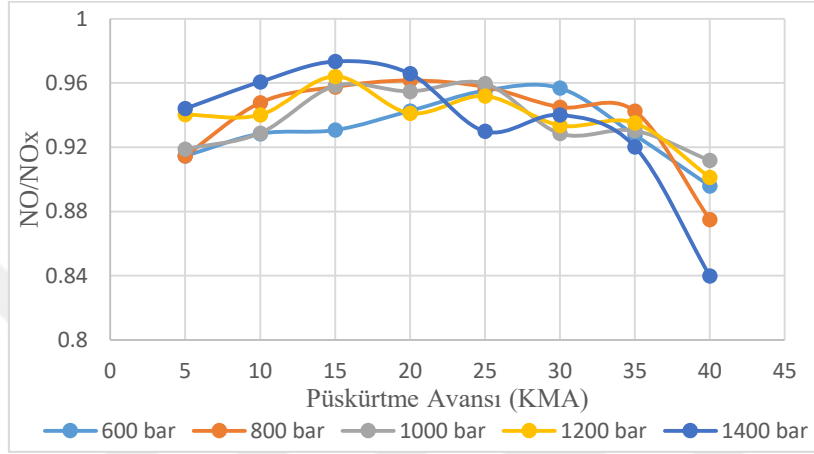
3.4.10 NO/NO_x Oranlarının İncelenmesi

Kirletici emisyon sınıflandırmalarında azot oksitler, bir çatı isim olarak NO_x olarak adlandırılır. Fakat bilindiği üzere her bir NO_x bileşeninin çevre üzerindeki etkisi farklılık göstermektedir. İçten yanmalı motorlarda oluşan NO_x'un büyük kısmı NO'dan oluşmaktadır. Bir diğer önemli NO_x ise NO₂ emisyonudur. Benzinli motorlarda işletme şartına göre farklılık gösterse de genelde oluşan NO_x'un %2 civarındaki kısmı NO₂'dir. Bazı durumlarda bu değer bir miktar daha yukarıya çıkabilir. Dizel motorlarında ise oluşan NO_x'un kabaca %5 ile %20'si NO₂'den oluşmaktadır. NO_x içerisindeki NO₂ oranı motor hızı arttıkça ve motor yükü azaldıkça artış göstermektedir. NO₂ esas olarak NO oluşumunda bir ara reaksiyondur. Reaksiyona ayrılan süre kısaldıkça tepkime hızı NO'ya dönüşümü

gerçekleştiremediği için NO_2/NO_x oranı artış gösterir. Motor yükü düştükçe de reaksiyon bölgesi sıcaklığı düştüğü için ara reaksiyonda tepkime donmakta ve NO_2/NO_x oranı artış göstermektedir. İçten yanmalı motorlara yönelik yapılan çalışmaların nispeten sayıca az kısmında NO_2 'ye dair bilgi bulunmaktadır. PCCI stratejisine yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde ise NO_2/NO_x oranlarına dair bilgi bulabilmek oldukça güçtür. PCCI stratejisinde ön karışım oranının artışı, yanma hızının düşüşü, yanma sıcaklığının düşüşü, buna mukabil soğuk cephelerin de azalması NO_2/NO_x oranının ne olacağına dair merak uyandırmaktadır. Şekil 3.15 üzerinde farklı püskürtme avansı ve püskürtme basınçlarında NO/NO_x oranları görülmektedir. Dizel motorlarında oluşan NO_x pratik olarak NO ve NO_2 'den oluşmaktadır. Fakat son derece eser miktarda N_2O , N_2O_5 gibi harici azot ve oksijen bileşikleri de görülmektedir. Bu eser miktardaki diğer NO_x komponentleri yüzdesel olarak anlamlı değerler yaratmasa da teorik hata ortaya koymamak adına çalışmada NO/NO_x oranları sunulmuştur. Elde edilen verilere göre düşük püskürtme basınçlarında püskürtme avansının artışına bağlı olarak öncesinde NO/NO_x oranlarında artış, sonrasında düşüş gözlemlenmektedir. Düşük püskürtme basınçlarında PCCI bölgesine gidildikçe NO/NO_x oranı düşüş göstermiştir. Buradan NO_2/NO_x oranının artış gösterdiği çıkarımı yapılabilir. Daha yüksek püskürtme basınçlarında süreklilik arz eden bir eğilim ortaya çıkmasa da genel eğilim olarak benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Konvansiyonel püskürtme avansı bölgesinde yüksek püskürtme basıncı daha yüksek NO/NO_x oranı, dolayısıyla da daha düşük NO_2/NO_x değerleri vermektedir. Bu çalışma için PCCI geçiş bölgesi olarak adlandırılabilir püskürtme avansları olan $20^\circ \text{KMA} - 25^\circ \text{KMA}$ püskürtme avanslarında ortaya çıkan oranlar birbirine nispeten yakın seyretmektedir. Sonrasında daha da artan püskürtme avanslarında NO/NO_x düşüş göstermiş, dolayısıyla NO_2/NO_x oranı artmıştır. PCCI bölgesinde alev hızı düşüşü ve yanma odası sıcaklıklarındaki gerilemeye bağlı olarak püskürtme avansı arttıkça NO/NO_x oranında düşüş, NO_2/NO_x oranı artış göstermektedir.

600 bar püskürtme basıncında 30°KMA püskürtme avansına kadar toplam NO_x salımı içerisindeki NO oranı artmış, NO_2 oranı ise düşüş sergilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının 20°KMA 'ya kadar artışında NO_2/NO_x oranı düşüş göstermiş, ardından artan püskürtme avanslarında NO_2 'nin toplam NO_x salımları içerisindeki oranı tekrar artış eğilimine girmiştir. Püskürtme basıncının

artışına bağlı olarak belirli çalışma noktalarının önemli bir kısmında NO_2/NO_x oranı düşüş gösterse de 25° KMA ve 35° KMA püskürtme avanslarında farklı bir eğilim ortaya çıkmıştır. Çalışma alanı içerisindeki bölge incelendiğinde düşük sıcaklıkta yanma stratejisine uygun termal koşullar barındıran 5° KMA, 30° KMA, 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında NO_2/NO_x oranı diğer püskürtme avansı değerlerine göre daha yüksek seyretmektedir. Bu durum yalnızca düşük püskürtme basıncı bölgesinde farklılıklar ortaya koymaktadır.

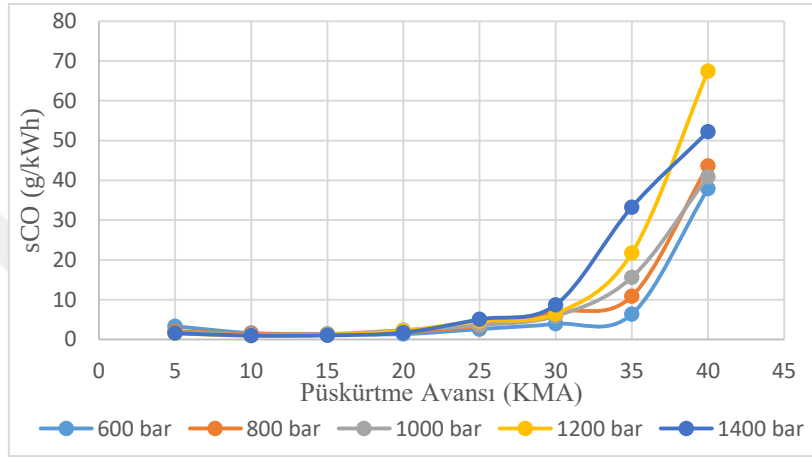


Şekil 3.15 Farklı püskürtme basıncı ve püskürtme avanslarında NO/NO_x oranları

3.4.11 Özgül CO Emisyonlarının İncelenmesi

Hacimsel konsantrasyona bağlı olarak verilen salım değerleri çevreye atılan net miktara yönelik olarak sağlıklı bilgi verse de belli bir gücü elde ederken salınan emisyon değerlerine dair bilgi vermediği için yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple Şekil 3.16 üzerinde özgül CO emisyon değerleri verilmiş ve belli bir güç arzı esnasında ortaya çıkacak emisyon değerleri hakkında bilgi sahibi olunarak daha anlamlı yorumlama yapmak hedeflenmiştir. Özgül CO emisyonları 20° KMA püskürtme avansına kadar ppm cinsinden emisyonlara benzer şekilde birbirine oldukça yakın seyretmektedir 25° KMA püskürtme avansında ise aradaki farklılıklar grafik görünür hale gelmiştir. 30° KMA püskürtme avansında en düşük ve en yüksek püskürtme basıncı farklılığına göre 2,1 kata kadar fark ortaya çıkmış, 40° KMA püskürtme avansına ise farklı püskürtme basınçlarına göre 1,8 katı bulan farklılıklar ortaya çıkmıştır. Salt konsantrasyonu baz alan çıktılarda yani ppm cinsinden CO emisyonlarına bakıldığında aradaki fark bu denli yüksek değildir. Burada, yüksek püskürtme avanslarında efektif motor gücünde düşüş yaşanması sebebiyle daha büyük farklar ortaya çıkmıştır. Düşük püskürtme basınçlarında özgül CO

emisyonlarındaki dramatik artışlar daha yüksek püskürtme avans değerlerinde ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı değerine kadar dramatik artışlar ortaya çıkmamıştır. 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında ise, yine 35° KMA püskürtme avansına kadar kabul edilebilir değişimler ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme basınçlarında maksimum gücün biraz daha büyük püskürtme avans değerlerinde ortaya çıkışı ve bu aralıkta maksimum güç elde edildikten sonra ortaya çıkan güç düşüşünün nispeten yavaş bir düşüş eğiliminde olması bunda etkili olmuştur.



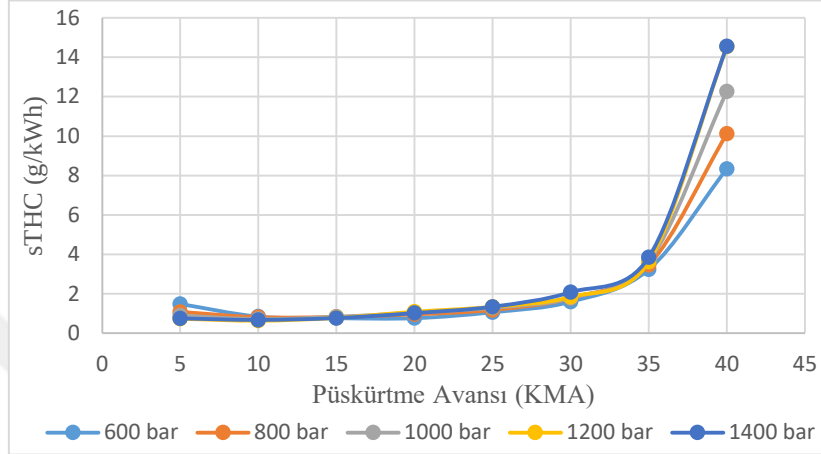
Şekil 3.16 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında özgül CO emisyonu

3.4.12 Özgül THC Emisyonlarının İncelenmesi

Şekil 3.17 üzerinde de görüldüğü üzere, özgül THC emisyonları için de özgül CO emisyonları için ortaya çıkan sonuç ve yorumlar benzerlik göstermektedir. Burada püskürtme avansı ve püskürtme basıncına karşı belirgin farklılıkların ortaya çıkması biraz daha yüksek püskürtme avans değerinde, 30° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Fakat 35° KMA püskürtme avansına kadar püskürtme basıncına bağlı olarak ciddi değişimler ortaya çıkmamış, 40° KMA püskürtme avansında ise dramatik farklılıklar baş göstermiştir.

Farklı püskürtme basınçları açısından inceleme yapıldığında, anlamlı farklılıkların ortaya çıkması 30° KMA püskürtme avansı değerinde ortaya çıkmıştır. Bu değere kadara olan altı farklı püskürtme avansı için tüm püskürtme basınç değerlerinde elde edilen özgül THC değerleri kayda değer farklılıklar barındırmamakta ve nispeten kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunmaktadır. 35° KMA püskürtme avansında elde edilen özgül THC değerleri 1200 bar püskürtme basıncına kadar yaklaşık sabit kalmış, devamında ise bir miktar artış ortaya çıkmıştır. 35° KMA

püskürtme avansında, püskürtme basıncı değişimine bağlı olarak ppm cinsinden emisyonlara göre biraz daha stabil verilerin elde edildiğinden söz etmek mümkündür. Fakat 1200 bar püskürtme basıncından, 1400 bar püskürtme basıncına gidildiğinde motor gücündeki düşüşe bağlı olarak bir miktar artış söz konusu olmuştur. 40° KMA püskürtme avansında ise tüm püskürtme basınçlarında görece olarak kabul edilemez nitelikte özgül THC emisyonları ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.17 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında özgül THC emisyonu

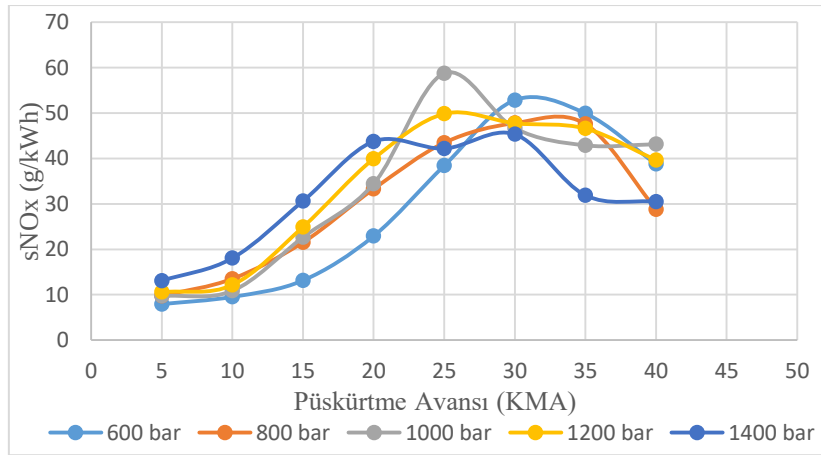
3.4.13 Özgül NO_x Emisyonlarının İncelenmesi

Çalışmaya konu prensibin genel çerçevesi açısından, belki de en önemli grafik özgül NO_x emisyonlarının görüldüğü Şekil 3.18'dir. Elde edilen sonuçlara göre 25° KMA püskürtme avansına kadar düşük püskürtme basınçları ile çalışmak daha düşük özgül NO_x değerleri ortaya koymaktadır. 10° KMA püskürtme avansında ve 1400 bar püskürtme basıncında elde edilen özgül NO_x değeri, aynı püskürtme avansında 600 bar püskürtme basıncında elde edilen değerden yaklaşık 1,8 kat daha yüksektir. 20° KMA püskürtme avansına kadar bu eğilim yaklaşık olarak korunmuş ve 2 kat daha fazla özgül NO_x emisyonu elde edilmiştir. 25° KMA ile 30° KMA püskürtme avansı dolaylarında aradaki ilişkiler giriftleşmeye başlamış ve eğilim değişimleri ortaya çıkmıştır. Bu değerden sonra, yüksek püskürtme basınçları daha düşük özgül NO_x değerleri ortaya koymuştur. Fakat 40° KMA püskürtme avansında yüksek püskürtme basınçlarının yol açtığı cidar ıslanması (impingement) sebebiyle ilave güç düşüşü ile değişim eğilimleri tekrardan farklılaşmaya başlamıştır. Fakat PCCI stratejisinin nispeten makul sonuçlar verdiği 25° KMA ile 35° KMA aralığında daha yüksek püskürtme basınçları ile çalışmak daha düşük özgül NO_x

sonuçları ortaya çıkarmıştır. Bunun bir diğer sebebi ise ppm cinsinden NO_x emisyonlarının yüksek püskürtme basınçlarında 20° KMA, düşük püskürtme basınçlarında ise 30° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra düşüşe geçmesidir. Püskürtme basıncından bağımsız olarak sadece püskürtme avansı baz alındığında ise en yüksek ppm cinsinden elde edilen NO_x değerine kadar özgül NO_x emisyonlarının da artış gösterdiği görülmektedir. Oysaki ppm cinsinden NO_x emisyonları Şekil 3.13 üzerinde görüldüğü üzere biraz daha erken düşüş seyrine girmiştir. Bu durum püskürtme avansına bağlı olarak ilgili püskürtme basıncı için maksimum güç değerinin biraz daha erken elde edilmesi ve söz konusu irdeleme aralığında gücün düşüş eğilimine girmesine bağlı olarak ortaya çıkmakta ve özgül NO_x emisyonları, ppm cinsinden NO_x emisyonlarına göre biraz daha gecikmeli olarak düşüş eğilimine girmektedir.

600 bar püskürtme basıncında ve farklı püskürtme avanslarında elde edilen verilerde 30° KMA püskürtme avansına kadar artan püskürtme avanslarında özgül NO_x salımı artış göstermiş, devamında düşüş eğilimi başlamıştır. Bu durum püskürtme basıncının sağlıklı bir karışım oluşturmak için aslında yetersiz olduğunu göstermektedir. Çünkü 30° KMA püskürtme avansına kadar özgül NO_x salımlarında artış yetersiz atomizasyonun yol açacağı bir sorun olarak değerlendirilebilir. Devamında ise makro karışım dengesizlikleri azalmış ve özgül NO_x salımları düşüş göstermiştir. 800 bar püskürtme basıncına gelindiğinde 25° KMA püskürtme avansında en yüksek özgül NO_x emisyonu elde edilmiş ve devamında düşüş görülmüştür. Bu aralıkta 25° KMA püskürtme avansı ve 35° KMA püskürtme avansında elde edilmiş olan değerler birbirine oldukça yakın seyretmiştir. Devamında artan püskürtme basınçlarıyla beraber özgül NO_x salımının en yüksek değeri yine 25° KMA püskürtme avansında elde edilmiş ve değişim eğilimi bozulmamıştır. 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avanslarında, artan püskürtme basınçlarının artışıyla daha düşük özgül NO_x emisyonları gözlemlenmiştir. 40° KMA püskürtme avansında motor gücündeki dalgalanmalar ve püskürtmenin fazlaca öne alınması sonucu yanmanın detorasyona uğramasının yarattığı belirsizliklerin ortaya çıkarttığı karmaşık durum gereğince püskürtme basıncının artışına bağlı olarak düzenli özgül NO_x emisyonu artışı gözlemlenmiştir. 5° KMA püskürtme avansında püskürtme basıncı arttıkça sınırlı miktarda özgül NO_x salımında artışlar gözlemlenmiştir. Uç iki püskürtme basıncı arasında oransal

değişim ppm cinsinden NO_x salım değerlerine göre daha düşük seyretmiştir. Çünkü bu aralıkta her ne kadar NO_x emisyonları artış gösterse de motor gücünün, TG sürecinin kısılp yanmanın genişleme fazına kayma eğiliminin azalmasına bağlı olarak, artış göstermiştir. Bu güç artışı özgül NO_x emisyonu artış hızını baskılamış durumdadır. 15° KMA püskürtme avansında ise püskürtme basıncının artışı özgül NO_x emisyonları üzerinde başlangıçta hızlı bir artış sergilerken devamında püskürtme basıncı arttıkça özgül NO_x emisyonları izafi olarak daha düşük bir hızla artmaya devam etmiştir. 20° KMA püskürtme avansında ise püskürtme basıncı arttıkça düzenli özgül NO_x salımı artışı gözlemlenmiştir. Oysaki g/h cinsinden NO_x emisyonları bu püskürtme avansında püskürtme basıncının artışı ile düzenli artış göstermiştir. Ancak püskürtme basıncının bu aralıktaki artışı yanmayı iyileştirdiği ve efektif gücü arttırdığı için özgül NO_x salımındaki artış frenlenmiştir. 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avanslarında püskürtme basıncının artışına bağlı olarak bir miktar özgül NO_x emisyonu düşüşü elde edilmiştir. PCCI stratejisi için çalışma dahilinde, uygulanabilir alan olarak tarif edilecek bu bölgede, püskürtme basıncı arttıkça özgül NO_x emisyonlarının düşüş göstermesi, yakıt basınçlandırma işini düşürerek daha düşük basınçta püskürtme yapılmasının bir avantaj yaratmayacağını göstermektedir.

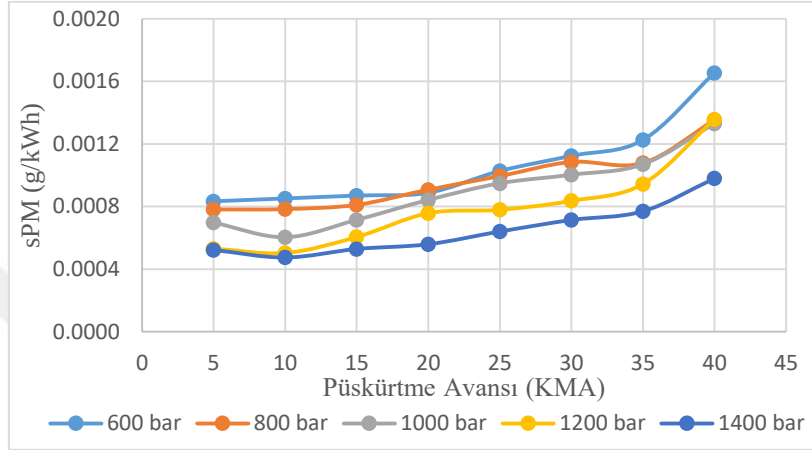


Şekil 3.18 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında özgül NO_x emisyonu

3.4.14 Özgül PM Emisyonlarının İncelenmesi

Şekil 3.19 özgül PM emisyonlarını ortaya koymaktadır. Her bir püskürtme basıncı serisinde püskürtme avansı arttıkça istisnai durumlar haricinde özgül PM emisyonları artış göstermiştir. Tüm veri setinde sadece 1000 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansından 10° KMA püskürtme avansına

geçildiğinde ve 800 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansından 35° KMA'ya geçildiğinde anlamlı sayılabilecek düşüşler ortaya çıkmıştır. Şekil 3.14 üzerinde görülen PM emisyonlarının değişim eğiliminin düşük oluşu, püskürtme avansı arttıkça özgül emisyonların artış göstereceğini güç düşüşüne bağlı olarak salık vermektedir. Çalışmanın bu veri setinde iki hedef olan özgül NO_x ve özgül PM düşüşü hedeflerinden, özgül PM emisyonu düşüşünün gerçekleştirilemediği görülmüştür.



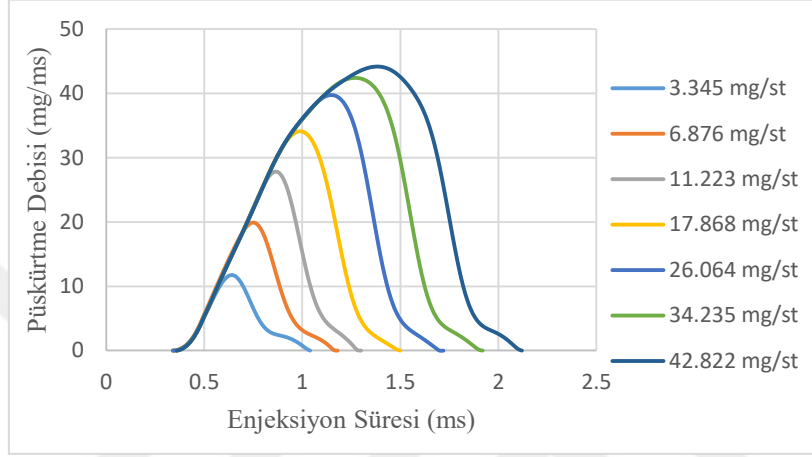
Şekil 3.19 Farklı püskürtme avansı ve püskürtme basıncında özgül PM emisyonu

3.5 Termodinamik Modelin Doğrulanması

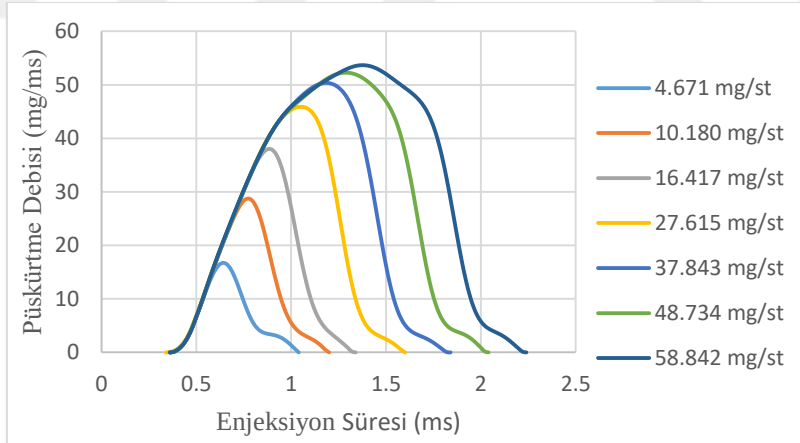
3.5.1 Enjeksiyon Profillerinin Çıkarılması

Gerçek enjeksiyon profillerinin geometrik yapısı yanma sürecinin tamamını, dolayısıyla da performans ve emisyon değerlerini doğrudan etkileyecektir. Deney motorunda kullanılan enjektörlerin belli basınçta ve belli milisaniye boyunca açık kaldığı sürede ne kadar yakıt püskürteceği enjektör üreticisi tarafından sunulmaktadır. Şekil 3.20 - 24 üzerinde de görüldüğü üzere, enjeksiyon profillerine bakıldığında enjektör kalkış eğrisi boğunca enjeksiyonun, plato bölgesine gelene kadar aynı hat üzerinden ilerlediği görülmektedir. Buna ilaveten enjektör kapanışındaki kuyruk dalgası sebebiyle kapanma eğrisindeki form kaybının da yaklaşık olarak sabit eğimli bir fonksiyon hattında başladığı görülmektedir. Enjeksiyon süresi daha da uzatıldığında tepe bölgesinde oluşmaya başlayan plato bölgesi belirginleşecektir. Ancak kısmi yükte çalışma bölgesinde gerçekleştirilen 15 mg/strok, 20 mg/strok ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyon değerlerinde bu plato bölgesine henüz ulaşamamaktadır. Bu sebeple de ilgili kısımlar grafiğe

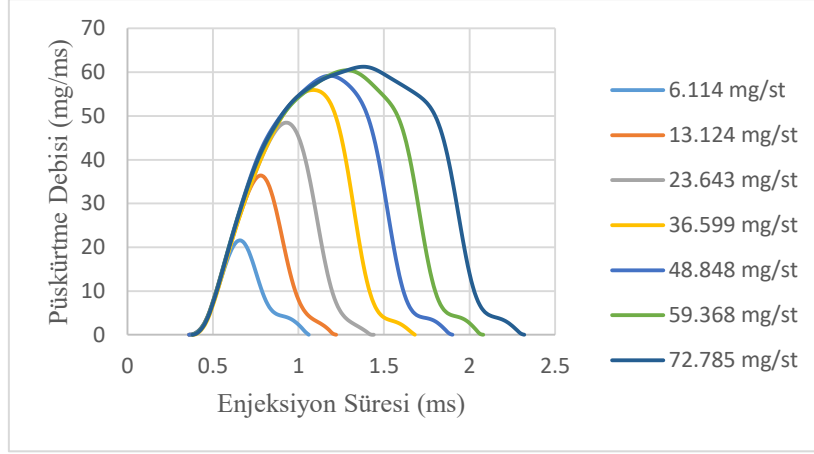
yansıtılmamıştır. Daha önce de belirtildiği üzere çalışmada en büyük püskürtme kütlesi 25 mg/strok değerindedir. Enterpolasyon yapılarak ihtiyaç bulunan forma uygun enjeksiyon profillerinin elde edilmesi için belli sayıda eğri hesaba eklenmiştir. Şekil 3.20’de 600 bar püskürtme basıncında, Şekil 3.21’de 800 bar püskürtme basıncında, Şekil 3.22’de 1000 bar püskürtme basıncı, Şekil 3.23’te 1200 bar püskürtme basıncı ve Şekil 3.24’te ise 1400 bar püskürtme basıncındaki gerçek enjeksiyon profilleri ortaya koyulmuştur.



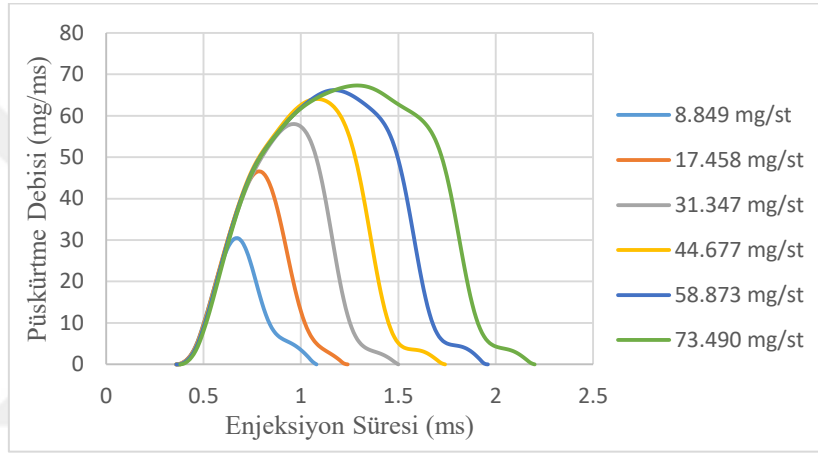
Şekil 3.20 600 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları



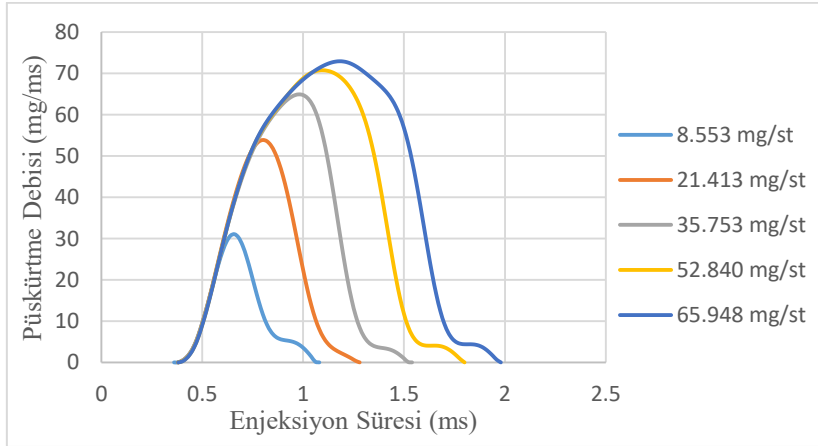
Şekil 3.21 800 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları



Şekil 3.22 1000 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları



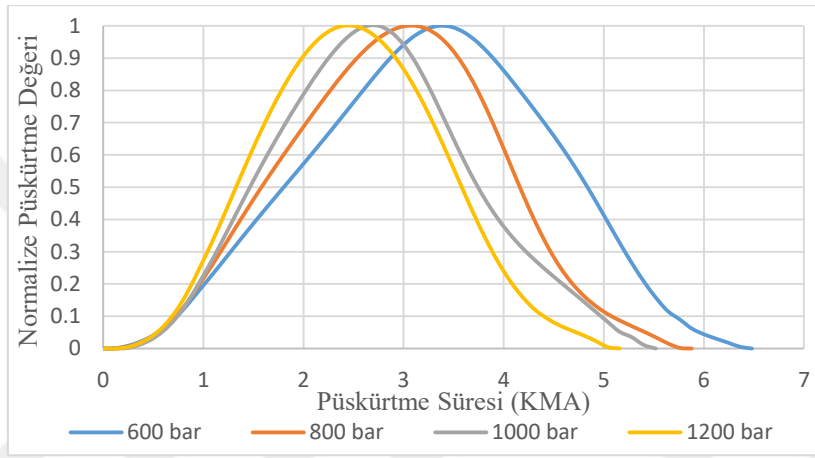
Şekil 3.23 1200 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları



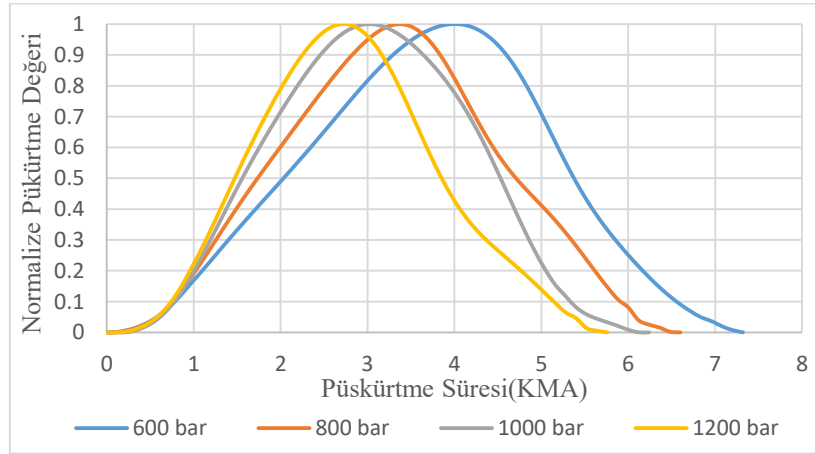
Şekil 3.24 1400 bar püskürtme basıncında enjeksiyon haritaları

Enjektör enerjilendirme süreleri için verilen değerlere bakıldığında bu çalışmadaki 15 mg/strok, 20 mg/strok, 25 mg/strok yakıt enjeksiyon kütleleri verilen eğrilerde tam olarak görülememektedir. Bu sebeple MATLAB ortamında bu eğrilerin arasında ilgili yakıt püskürtme kütle debi değerini verecek olan enjeksiyon profili

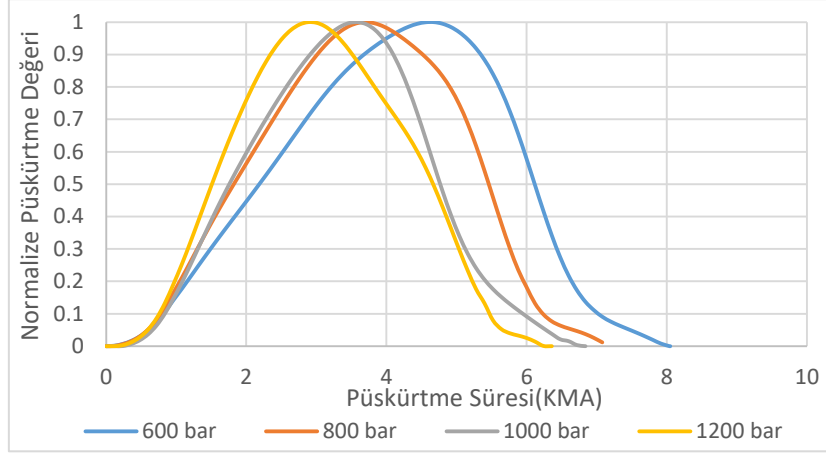
enterpolasyon ile elde edilmiştir. AVL-Boost programında enjeksiyon profilleri krank açısına bağlı olarak tanıtılmaktadır. Bu sebeple 4 farklı enjeksiyon basıncı, 3 farklı yakıt püskürtme kütle değeri ve 3 farklı motor devri için 36 farklı enjeksiyon profili elde edilmiştir. AVL-Boost programında enjeksiyon profili tanıtılması ise şu şekildedir. Krank açısına bağlı olarak enjeksiyon profili elde edildikten sonra birim zamanda en yüksek püskürtme değerine oranla enjeksiyon profili normalize edilerek programa tanıtılmaktadır. Püskürtülen yakıt kütlesi ise programa ayrıca girilmektedir. Programa girilen normalize enjeksiyon profilleri ise Şekil 3.25 - 33'te sunulmuştur.



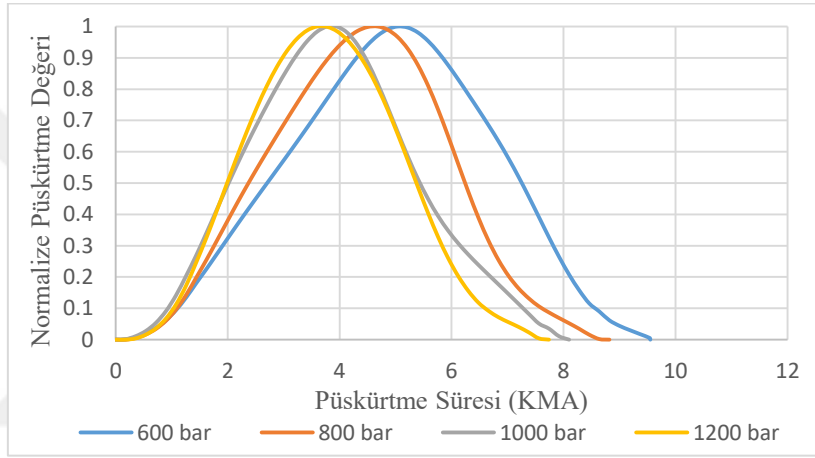
Şekil 3.25 1000 dev/dak ve 15 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri



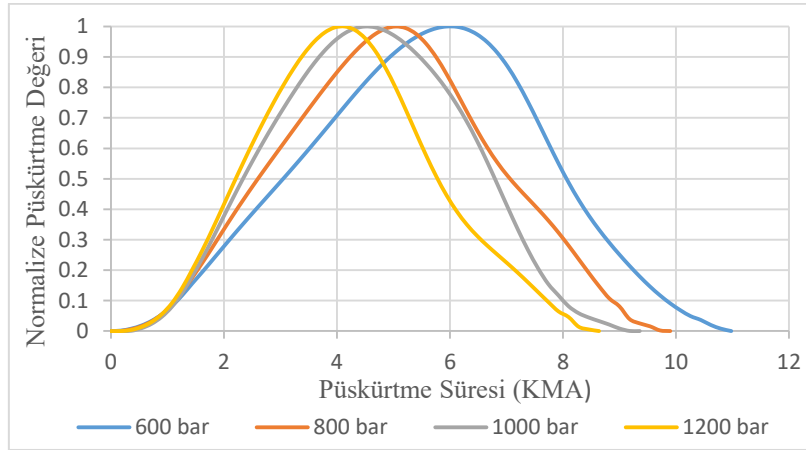
Şekil 3.26 1000 dev/dak ve 20 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri



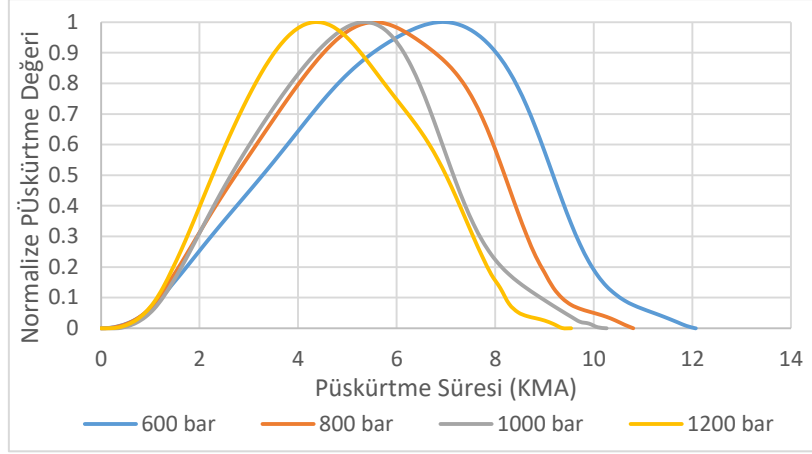
Şekil 3.27 1000 dev/dak ve 25 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri



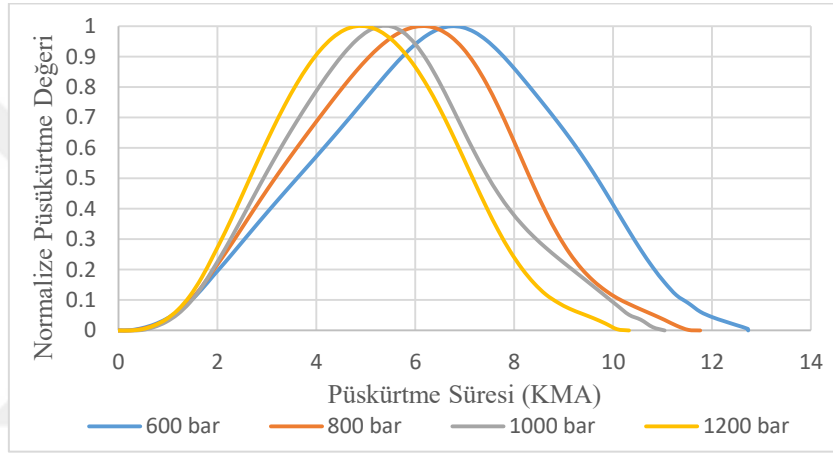
Şekil 3.28 1500 dev/dak ve 15 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri



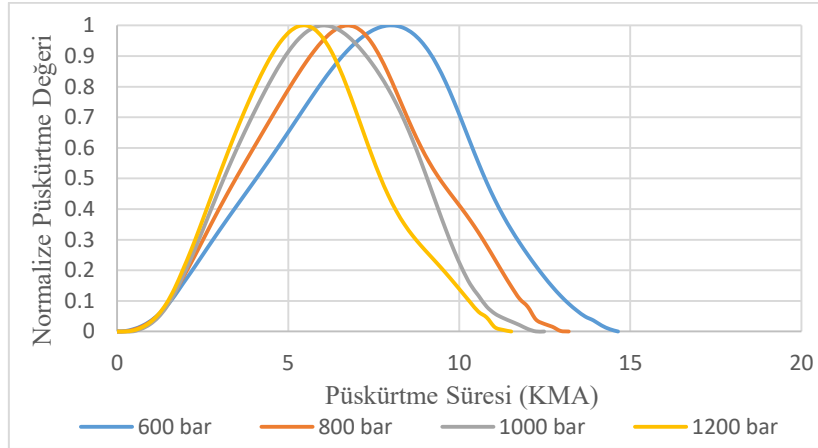
Şekil 3.29 1500 dev/dak ve 20 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri



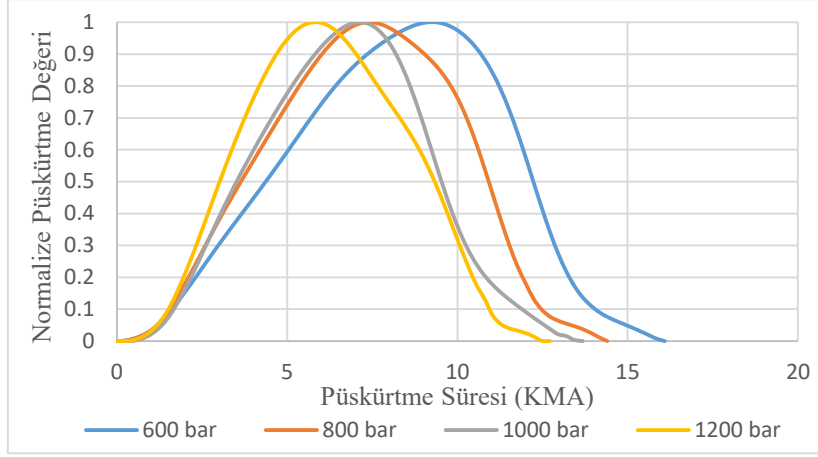
Şekil 3.30 1500 dev/dak ve 25 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri



Şekil 3.31 2000 dev/dak ve 15 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri



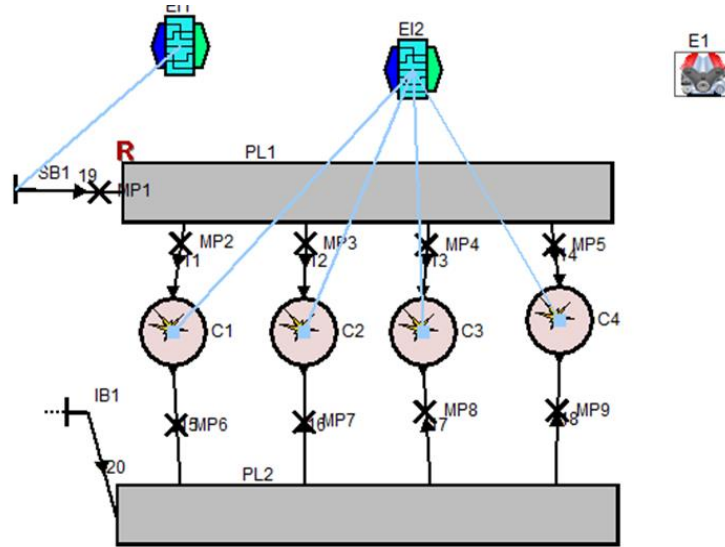
Şekil 3.32 2000 dev/dak ve 20 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri



Şekil 3.33 2000 dev/dak ve 25 mg/strok şartında normalize püskürtme verileri

3.5.2 Yanma Modelinin Kurulması

AVL-Boost program içerisinde birçok yanma modeli bulunmaktadır. Bu çalışmada karışım kontrollü yanma modeli (Mixture controlled combustion- MCC) tercih edilmiştir. Çünkü bu yanma modelinde TG süreci, kontrolsüz yanma sürecinin ne kadar süreceği, kontrolsüz yanma fazının sonunda ulaşılabilecek basınç değeri ve kontrolsüz yanma fazındaki basınç artış gradyanı değeri, yanmanın ne kadar süreceği, yakıtın ne kadarının difüzyif alev fazında yanacağı gibi birçok parametre girdi olarak programda manipüle edilebilmektedir. Böylelikle her bir değişkene atanan parametrik katsayı ile doğrulanma seviyesi daha yüksek bir yanma modellenilebilmektedir. 4 silindirli motor için oluşturulan motor modelinin şematik hali Şekil 3.34 üzerinde görülmektedir.



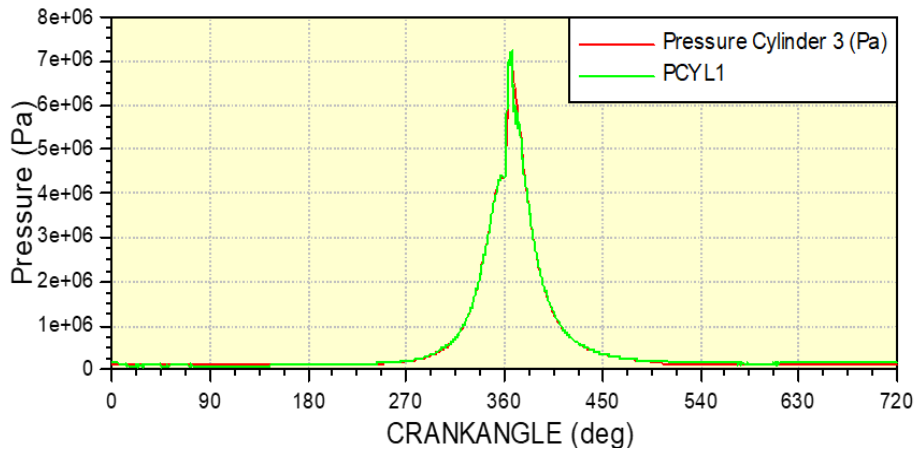
Şekil 3.34 AVL-Boost ortamında oluşturulan motor modeli

Model içerisine tanıtılması gereken birçok parametre bulunmaktadır. Model içerisinde değiştirilen parametrelerin başlıcaları şu şekildedir:

- Motor hızı (Engine speed)
- Üfleme gazı kaçak haritası (Blow-by map)
- Enjeksiyon kütlesi (Rate of injection)
- Emme havası kütlesi (Inlet mass)
- Emme supabı kapandığında silindir içi basınç değeri (Pressure at start of high pressure)
- Hava tutabilme verimi (Trapping efficiency air)
- Çevrim başına silindir içerisine püskürtülen yakıt kütlesi (Fuel mass / Cycle)
- Ray basıncı (Rail pressure)
- Tutuşma gecikmesi kalibrasyon faktörü (Ignition delay calibration factor)
- Yanma parametresi (Combustion parameter)
- Türbülans parametresi (Turbulence parameter)
- Ön karışımli yanma parametresi (Premixed combustion parameter)
- Referans değere göre püskürtme başlangıcı faz farkı açısı (Injection shift)
- Normalize yakıt enjeksiyon haritası (Normalized rate of injection)
- Ön karışımli yanma süreci faktörü (Premixed combustion duration factor)
- NO_x kinetik çarpanı (NO_x kinetic multiplier)
- NO_x post-proses çarpanı (NO_x post-processing multiplier)
- CO kinetik çarpanı (CO kinetic multiplier)
- İs üretim sabiti (Soot production constant)
- İs tüketim sabiti (Soot consumption constant)
- Piston kalibrasyon faktörü (Isı transferi) (Piston calibration factor)
- Silindir kafası kalibrasyon faktörü (Isı transferi) (Head calibration factor)
- Silindir cidarlar kalibrasyon faktörü (Isı transferi) (Liner calibration factor)

3.5.3 AVL-Boost Ortamında MCC Modelinin Doğrulaması

Tek fazda yakıt püskürtme koşulunda 60 farklı noktadan toplanan deneysel verilerin tamamı program içerisinde doğrulanmıştır. Doğrulama esnasında ilk olarak deneysel veriden elde edilen anlık silindir içi basınç verisi ve krank açısı ($P-\alpha$) grafiği ile simülasyon sırasında elde edilen $P-\alpha$ grafiği mümkün olduğunca örtüştürülmüştür. Bu işlem esnasında sıkıştırma prosesi süresince ortaya çıkan silindir içi basınç değeri, yanmanın başlangıç anı, kontrolsüz yanma süresince ortaya çıkan $dP/d\alpha$ değeri, pik basınç değerinin elde edildiği değer ve kontrollü yanma fazında geçirilen süre de örtüştürülmüştür. Doğrulama işleminin bu aşaması Ek-A üzerinde görülmektedir. Burada da iki verinin örtüşme eğilimi için bir örnek Şekil 3.35'te sunulmuştur. İki eğrinin birbiriyle yakınsamasının yanında maksimum silindir içi basınç değeri, OİB değeri ve egzoz gaz sıcaklıklarının doğrulanması hedeflenmiştir. Birçok noktada %2'nin altında hata değerleri ile simülasyon ve deneysel veriler doğrulanmıştır. Ancak gerçek deney şartlarında püskürtülen yakıt kütlesi yer yer %2 ile %3 bandına kadar hatalar barındırabilmektedir. Bu şartlarda ise hata kendini büyüterek %3,5 - %4 değerine kadar çok nadir de olsa çıkabilmiştir. 5° KMA püskürtme avansında yanmanın tamamı genişleme stroğunda meydana gelmektedir. Bu esnada yanmanın konvansiyonel eğilimden çok uzaklaşması nedeniyle doğrulama güçlükle başarılmış ve en büyük deneysel veri ve simülasyon verisi hataları veya sapmaları bu noktalarda ortaya çıkmıştır.

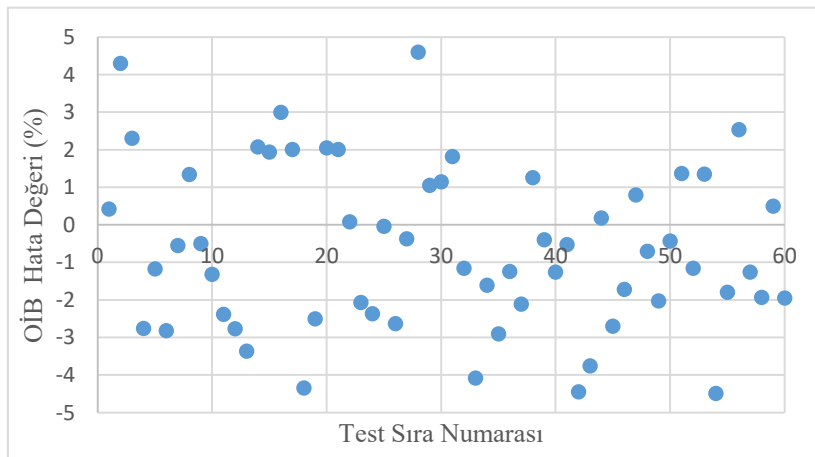


Şekil 3.35 T18 Noktasında deneysel ve matematiksel veriye bağlı $P-\alpha$ karşılaştırması

Deneysel veri ve simülasyon çalışmasında elde edilen sayısal veriler arasındaki hata analizleri aşağıda bilgilerinize sunulmuştur. Doğrulama işlemleri OİB, silindir içi

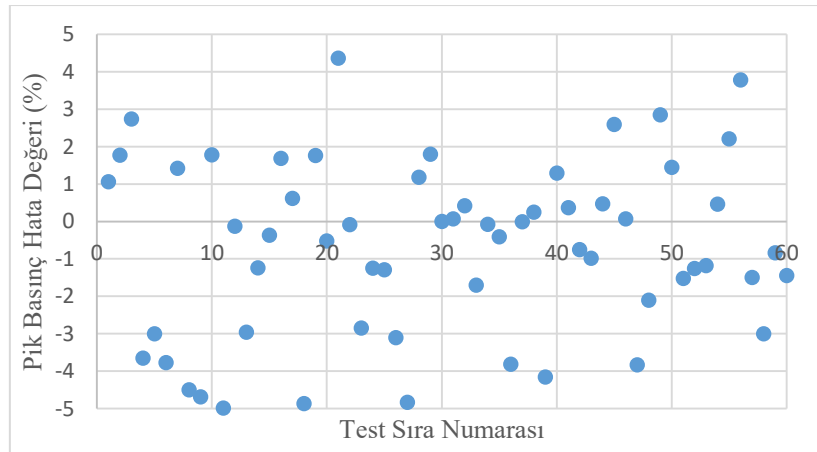
maksimum basınç değeri, egzoz gaz sıcaklığı, CO salımı, NO_x salımı ve PM salımı açısından gerçekleştirilmiştir.

OİB verilerinin doğrulanabilme seviyelerine bakıldığında şu sonuçlar karşımıza çıkmaktadır. 60 nokta arasında 6 noktanın %4 - %5 arasında yüzdesel hata barındırdığı, %3 - %4 hata aralığında 3 nokta bulunduğu, geriye kalan 51 noktanın ise %3'ün altında hata barındırdığı görülmektedir. Deneysel veri değerleri incelendiğinde de bu noktalarda, çevrim başına silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarını istenen değere göre bir miktar farklılık barındırdığı ve böylelikle hatanın kendini büyütürerek %4 - %5 bandına yerleştiği söylenebilir. Hatanın %4 ile %5 arasında seyrettiği noktaların çoğunda püskürtülen yakıt miktarı hatası sebebiyle ortaya çıkan belirsizlik filtrelendiğinde reel hatanın büyük oranda %3 altına yerleşeceği söylenebilir. Örneğin T3 noktasında deneysel olarak elde edilen OİB değeri daha yüksek değer almış ve hata oranı % 4,29 olarak gözlemlenmiştir. Ancak burada deney esnasında püskürtülen yakıt miktarı hedeflenen değere göre %3'ü aşan miktarda daha yüksektir. Bu durumda reel hatanın çok daha düşük düzeyde olduğu açıklıkla görülebilir. Benzer şekilde T46 noktasında -%4,35 oranında hata ortaya çıkmış ve bu noktada yakıtın %3,5 dolaylarında eksik püskürtüldüğü görülmüştür. Bu durum tüm doğrulama noktalarında geçerli olup reel hata hiçbir noktada %4 ve üzerine çıkmamaktadır. Doğrulaması yapılan tüm noktalar için her bir noktanın deneysel verisi ile simülasyon verisi arasındaki OİB hata değerleri Şekil 3.36'da görülmektedir.



Şekil 3.36 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki OİB yüzdesel hata oranları

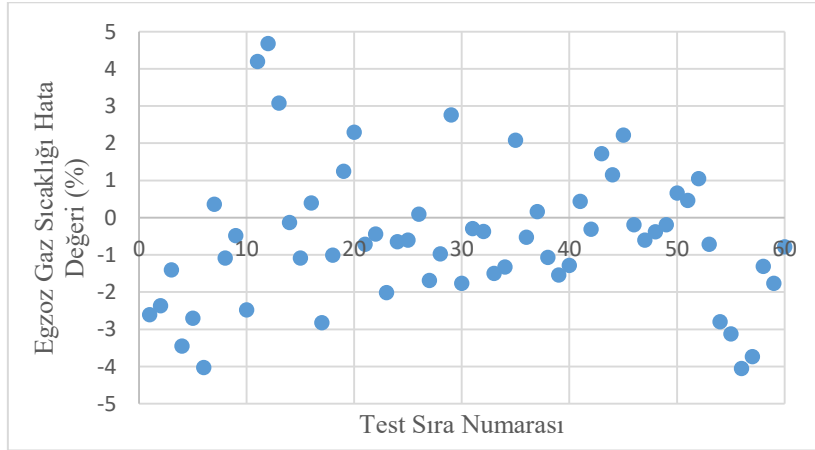
Silindir içi pik basınç değerlerinde ortaya çıkan yüzdesel hata değerleri de OİB değerlerine benzerlik göstermektedir. Fakat burada daha büyük hata oranları daha sık bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. Doğrulamalar neticesinde %4 - %5 bandında hataya sahip olan 7 nokta gözlemlenmiştir. 6 noktada ise %3 - %4 arasında yüzdesel hata gözlemlenmiştir. Maksimum silindir içi basınç değerlerinde, OİB'ye göre daha yüksek hata oranlarının görülmesi anlaşılabilir bir durumdur. Burada temel olarak iki faktörden söz edilebilir. Bunlardan ilk faktör tıpkı OİB hatasında olduğu gibi çevrim içerisinde silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarının ortaya çıkarttığı belirsizliktir. Silindir içerisine giren yakıt miktarı arasındaki farklılıklar yanmanın başladığı noktaya göre farklı ağırlıklar barındırmak üzere silindir içi pik basınç değerini OİB'ye göre daha çok etkileyebilmektedir. İkinci faktör ise anlık silindir için basınç verileri 100 farklı çevrimin üst bindirilerek anlık değerlerin ortalamasının alınmasıyla elde edildiği için yer yer sinyal gürültüsü P- α diyagramına yansımaktadır. Bu da ikinci bir belirsizlik faktörü olarak maksimum silindir içi basınç verisi hatalarını arttırmıştır. Hatta birçok noktada ortaya çıkan hatanın başat faktörü çevrimler arası varyasyondur. Şekil 3.37 termodinamik modelde doğrulaması yapılan tüm noktaların deneysel verilere göre tek tek yüzdesel hata oranlarını göstermektedir.



Şekil 3.37 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki silindir içi pik basınç değeri yüzdesel hata oranları

Egzoz gaz sıcaklığı doğrulaması yanma odasına giren yakıtın ısı enerjisi, ısı açığa çıkışı sebebiyle oluşan OİB ve dolayısıyla da çevrimden elde edilen net indike işle birlikte değerlendirilmelidir. Böylece yakıt ısı enerjisinden geriye ısı transferi kalmakta ve toplam ısı denge sağlanabilmektedir. Bu sebeple egzoz gaz sıcaklıkları da makul sayılacak bir bantta doğrulanmalıdır. Yanma odası içerisinde motor hızı

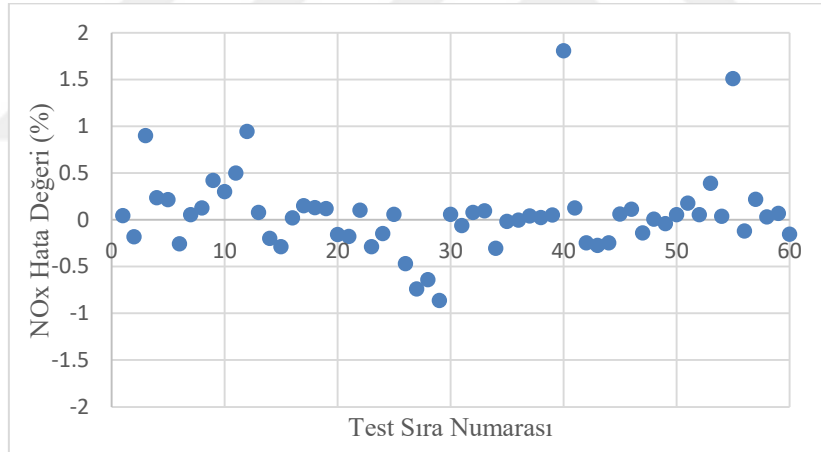
değişimi ve çevrim başına yanma odasına püskürtülen yakıt miktarı değerine bağlı olarak çok az bir egzoz gaz debisi farklılığı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla belli bir yakıt püskürtme kütlesi varyasyonu kendisinden kütlece çok fazla olan silindir içerisindeki havanın da sıcaklığını değiştireceği için egzoz gaz sıcaklığı hata değerlerinin, OİB'ye göre daha yüksek hata oranları barındırma riski bulunmaktadır. Hataları daha makul bir banda çekmek ise piston, silindir kafası ve silindir cidarlarından olan ısı transferi miktarının manipüle edilmesi ile mümkündür. Ancak hatayı minimize ederken artırılıp azaltacak olan ısı transfer katsayıları ile OİB değerinde de farklılık olacağı için önümüzde sınırsız bir hareket alanı bulunmamaktadır. Egzoz gaz sıcaklıkları 60 nokta arasında 3 nokta %4 - %5 arasında hata barındırmış, 4 nokta ise %3 - %4 arasında hata barındırmaktadır. Geriye kalan 53 noktada ise hata payı %3'ün altında seyretmiştir. Genel olarak yüzdesel hataların veri seti içerisinde çok büyük oranda %2 altında hatada yoğunlaştığı görülmüştür. Ortaya çıkan nispeten yüksek egzoz gaz sıcaklığı yüzdesel hatalarının silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarının hedeflenen değerden sapmasının yüksek olduğu değerlerde ve püskürtme avansının konvansiyonel çalışma modundan uzaklaştığı noktalarda gözlemlendiği söylenebilir. Egzoz gaz sıcaklıklarının hata değerleri Şekil 3.38 üzerinde görülmektedir.



Şekil 3.38 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki egzoz gaz sıcaklığı değeri yüzdesel hata oranları

AVL-Boost programında karışım kontrollü yanma (Mixture controlled combustion-MCC) yanma modeli içerisinde emisyonlar modellenirken NO_x emisyonları 2 farklı parametrik katsayı tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar “ NO_x Kinetik Çarpanı” (NO_x Kinetic Multiplier) ve “ NO_x Post-Proses Çarpanı”

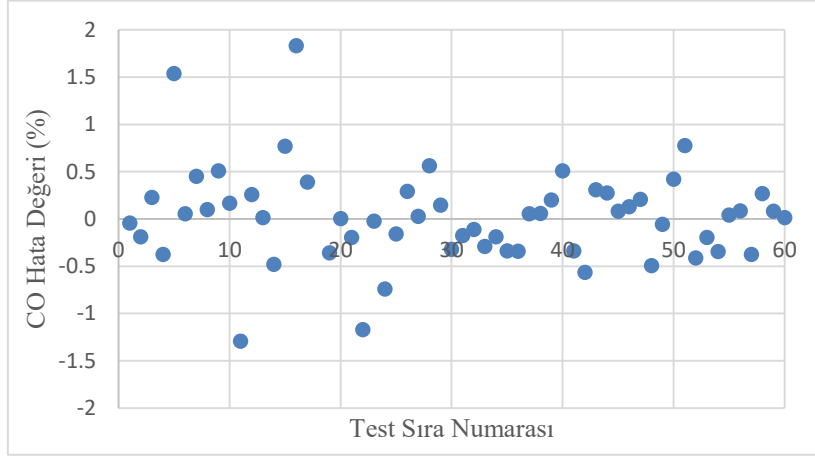
(NO_x Post-Processing Multiplier) parametrik katsayılarıdır. Her iki katsayıdaki artış da NO_x emisyonunu arttırıcı etki göstermektedir. Var olan 60 noktadan yola çıkıldığında her iki parametrenin de değiştirilmesi ile her nokta için sonsuz sayıda doğrulama ikilisi ortaya çıkacaktır. Fakat sonrasında yapay sinir ağı modellenmesinde ortaya çıkacak çıktılar tahmin edilebilme kabiliyeti çok kötüleşecek ve hatta modellenemez hale gelecektir. Bu sebeple ilgili parametrelerden biri sabit tutulmuş diğer parametre değiştirilmiştir. Çalışma içerisinde NO_x kinetik çarpanı değeri değiştirilmiş ve NO_x post-proses çarpanı ise 20’de sabit tutulmuştur. Katsayı rahatlıkla manipüle edilebildiği için bu başlık altındaki hata payları son derece düşük seviyelere indirilebilmiştir. Şekil 3.39 üzerinde de açıkça görüldüğü üzere, tüm deneysel verisi alınmış noktalar NO_x salımları açısından %2’nin altında bir hata payı ile doğrulanmıştır. Bunların ise 2 tanesi %1 ile %2 arasında hataya sahip olup geriye kalan 58 noktada ise %1’in altında hata değerlerine ulaşılmıştır. Dolayısıyla NO_x emisyonlarının son derece güvenilir bir hata payı ile doğrulandığı söylenebilir.



Şekil 3.39 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki NO_x emisyonu değeri yüzdesel hata oranları

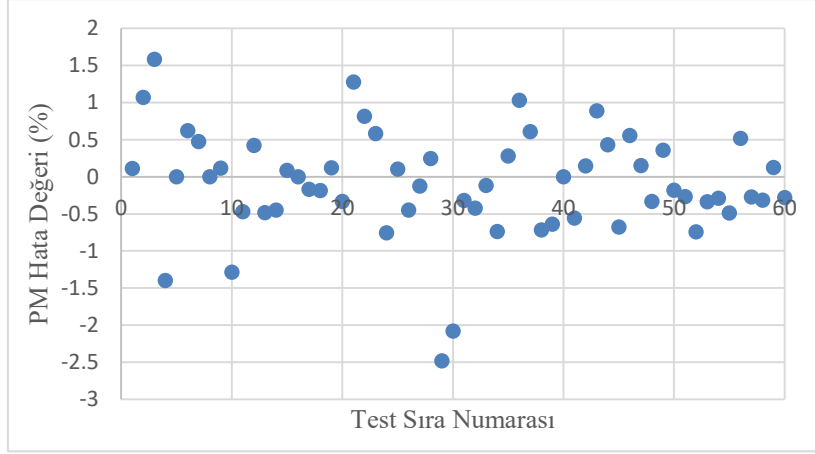
İlgili program ve yanma modelinde CO emisyonları modellenirken “CO Kinetik Çarpanı” (CO Kinetic Multiplier) parametrik katsayısı değiştirilmektedir. İlgili parametrik katsayı oldukça küçük değerler almaktadır. 0 ile 1 arasında değerler alan ilgili katsayı küçüldükçe CO emisyonu artış sergilemektedir. Genelde 0,2’nin altında olan bu katsayı için çoğu kere virgülden sonraki dördüncü hanede sonuca %2’nin altında yakınsamıştır. Genel olarak 60 nokta arasında 4 noktada %1 ile %2 arasında hata ortaya çıkmış, 56 noktada ise %1’in altında hata oranları ile CO

emisyonları doğrulanmıştır. CO emisyonları için doğrulama esnasında ortaya çıkan hata oranları Şekil 3.40 üzerinde görülmektedir.



Şekil 3.40 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki CO emisyonu değeri yüzdesel hata oranları

PM emisyonları da diğer emisyonlara benzer şekilde düşük hata oranları ile doğrulanabilmiştir. Şekil 3.41 PM emisyonlarının doğrulanması esnasında ortaya çıkan hata oranlarını göstermektedir. 60 nokta arasında sadece 2 noktada %2 ile %3 arasında yüzdesel hata elde edilmiştir. 6 noktada %1 ile %2 arasında yüzdesel hata ortaya çıkmış, geriye kalan 52 noktada ise %1 altında hata oranları ortaya çıkmıştır. PM emisyonları da tıpkı NO_x gibi iki farklı katsayı ile kontrol altına alınmaktadır. Fakat burada katsayılardan biri PM emisyonunu arttırıcı diğeri ise azaltıcı yönde etkilemektedir. Burada da tıpkı NO_x doğrulaması esnasında karşımıza çıktığı gibi, her bir çalışma noktası için ortaya çıkan emisyonu doğrulayacak sonsuz nokta bulunmaktadır. Fakat 60 nokta üzerinden emisyon katsayılarının iki farklı değişkene bağlı olarak yapay sinir ağı ile modellenmesi oldukça güçtür. Bu sebeple değişken sayısını azaltmak için “İs Tüketim Sabiti” (Soot Consumption Constant) değeri 300’de sabit tutulmuş ve “İs Üretim Sabiti” (Soot Production Constant) manipüle edilmiştir. Burada yer yer ufak değişimlerin çıktılara fazlaca etki etmesi ve yine yakıt püskürtme kütlesi belirsizliğine bağlı yanma odası şartlarını değiştirmesi, yanma esansındaki şartlardan çok fazlaca etkilenen PM emisyonları için ortaya çıkan hata paylarını bir miktar arttırmıştır. Ancak inceleme noktalarının %90’ından fazlasında %1’in altında hata elde edilmesi son derece makul seviyede doğrulama yapıldığı yorumunu mümkün kılmaktadır.



Şekil 3.41 Termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki PM emisyonu değeri yüzdesel hata oranları

Karışım kontrollü yanma prensibince yanma modelinin doğrulanması sürecinde modelin sağlıklı şekilde çalışarak sonuç verebilmesi için gerekli olan tüm parametreler elde edilmiştir. Tablo 3.5 işletme şartlarını ve kapalı çevrim başlangıcındaki basınç değeri (start of high pressure) ve hava tutma verimi (air trapping efficiency) değerlerini içermektedir. Bu iki parametre emme prosesi esnasında gerçek çevrim eğrisi ile simülasyon eğrilerinin üst üste bindirilebilmesi esnasında önem taşımaktadır. Kapalı çevrim başlangıcı anındaki basınç hassas bir girdi olarak programa tanıtılmadığında sağlıklı basınç profili elde edilememektedir.

Tablo 3.5 Tek fazda püskürtme şartında işletme parametreleri

Deney No	Motor Hızı	Yakıt Kütlesi	Ray Basıncı	Püskürtme Avansı	Kapalı Çevrim Başlangıç Basıncı	Hava Tutma Verimi
	dev/dak	mg/st	bar	° KMA	bar	[]
T1	1000	15	600	5	1,2	0,7
T3	1000	15	600	20	1,2	0,7
T2	1000	15	800	5	1,2	0,7
T4	1000	15	1000	30	1,2	0,7
T6	1000	20	800	40	1,2	0,7
T5	1000	20	1200	35	1,2	0,7

Tablo 3.5 Tek fazda püskürtme şartında işletme parametreleri (devamı)

T7	1000	25	600	5	1,2	0,7
T9	1000	25	600	30	1,2	0,7
T8	1000	25	1200	15	1,2	0,7
T10	1500	15	600	35	1,2	1
T11	1500	20	600	5	1,2	1
T16	1500	20	600	10	1,2	1
T21	1500	20	600	15	1,2	1
T26	1500	20	600	20	1,2	1
T31	1500	20	600	25	1,2	1
T36	1500	20	600	30	1,2	1
T41	1500	20	600	35	1,2	1
T46	1500	20	600	40	1,2	1
T12	1500	20	800	5	1,2	1
T17	1500	20	800	10	1,2	1
T22	1500	20	800	15	1,2	1
T27	1500	20	800	20	1,2	1
T32	1500	20	800	25	1,2	1
T37	1500	20	800	30	1,2	1
T42	1500	20	800	35	1,2	1
T47	1500	20	800	40	1,2	1
T13	1500	20	1000	5	1,2	1
T18	1500	20	1000	10	1,2	1

Tablo 3.5 Tek fazda püskürtme şartında işletme parametreleri (devamı)

T23	1500	20	1000	15	1,2	1
T28	1500	20	1000	20	1,2	1
T33	1500	20	1000	25	1,2	1
T38	1500	20	1000	30	1,2	1
T43	1500	20	1000	35	1,2	1
T48	1500	20	1000	40	1,2	1
T14	1500	20	1200	5	1,2	1
T19	1500	20	1200	10	1,2	1
T24	1500	20	1200	15	1,2	1
T29	1500	20	1200	20	1,2	1
T34	1500	20	1200	25	1,2	1
T39	1500	20	1200	30	1,2	1
T44	1500	20	1200	35	1,2	1
T49	1500	20	1200	40	1,2	1
T15	1500	20	1400	5	1,2	1
T20	1500	20	1400	10	1,2	1
T25	1500	20	1400	15	1,2	1
T30	1500	20	1400	20	1,2	1
T35	1500	20	1400	25	1,2	1
T40	1500	20	1400	30	1,2	1
T45	1500	20	1400	35	1,2	1
T50	1500	20	1400	40	1,2	1

Tablo 3.5 Tek fazda püskürtme şartında işletme parametreleri (devamı)

T51	1500	25	800	20	1,2	1
T52	1500	25	1200	25	1,2	1
T53	1500	25	1200	40	1,2	1
T54	2000	15	600	5	1,15	1,2
T56	2000	15	800	25	1,15	1,2
T57	2000	15	1000	30	1,15	1,2
T55	2000	15	1200	15	1,15	1,2
T58	2000	20	1200	30	1,15	1,2
T60	2000	25	600	40	1,15	1,2
T59	2000	25	1000	35	1,15	1,2

Deneysel veriler ile matematiksel modelin doğrulanması esansında performans çıktılarına yönelik parametreler yani yanma ve ısı transferi parametrik katsayıları Tablo 3.6 üzerinde sunulmuştur.

Tablo 3.6 Tek fazda püskürtme şartında performans doğrulama parametreleri

De. No	TG Kal. Fak.	Yanma Par.	Tür. Par.	Ön Kar. Y. Par.	Ön Kar. Y. Sür. Par.	Piston Kal. Fak.	Silindir Kaf. Kal. Fak.	Cıdar Kal. Fak.	Girdap Oranı
T1	2,6	2,45	1,2	0,62	0,18	1	1,02	1,1	2
T3	2,28	1,2	1,25	0,7	0,14	0,62	0,62	1	2
T2	2,65	2,35	1,25	0,7	0,3	0,95	0,95	0,97	2
T4	2,95	0,9	0,9	0,6	0,32	1,2	1,2	0,9	2
T6	3,4	0,8	0,6	0,51	0,2	2	2	0,9	2

Tablo 3.6 Tek fazda püskürtme şartında performans doğrulama parametreleri
(devamı)

T5	3,05	0,85	0,47	0,74	0,24	1,5	1,5	1	2
T7	2,36	0,95	1,25	0,35	0,28	0,7	0,7	0,8	2
T9	2,13	0,57	1,17	0,74	0,23	0,95	1	0,9	2
T8	2,47	1,1	1,3	0,4	0,26	0,65	0,65	0,85	2
T10	2,21	1,74	1,2	0,66	0,31	1,03	1	1,3	2
T11	2,4	3	1,25	0,7	0,4	1,05	1,05	1	2
T16	2,4	2,3	1,24	0,32	0,5	1,2	1,2	1,2	2
T21	2,3	2,6	1,2	0,35	0,55	1	1	1	2,3
T26	2,25	2	1,2	0,5	0,5	0,85	0,85	0,9	2
T31	2	2	1,2	0,2	0,33	0,98	0,98	0,98	2
T36	2,2	2	1,2	0,6	0,2	1	1	1	2
T41	2	1,9	1,5	0,8	0,21	0,7	0,7	1,2	2
T46	2,05	1,2	1,3	0,9	0,23	1,5	1,55	1,22	2
T12	2,65	1,7	1,1	0,6	0,35	1	1	1	2
T17	2,48	1,8	1,22	0,56	0,47	0,65	0,65	1	2
T22	2,45	1,75	1,2	0,35	0,27	0,6	0,58	1,1	1,7
T27	2,32	1,8	1,15	0,4	0,3	1	1	1	1,9
T32	2,2	2	1,16	0,25	0,3	1	1	1	1,95
T37	2,2	1,9	1,2	0,28	0,27	1,05	1,05	1,07	2,3
T42	2,05	1,8	1,3	0,7	0,35	1,15	1,15	1,1	2,1
T47	2,25	1,15	0,8	0,7	0,26	1,5	1,5	1,5	2

Tablo 3.6 Tek fazda püskürtme şartında performans doğrulama parametreleri
(devamı)

T13	2,85	2,7	1	0,8	0,25	1,1	1,1	0,7	2
T18	2,6	1,7	1,2	0,5	0,42	0,97	0,97	0,92	2
T23	2,52	1,6	1,16	0,4	0,28	1	1	0,93	2
T28	2,45	1,6	1,12	0,4	0,25	1,07	1,07	1,04	2
T33	2,38	1,9	1,1	0,5	0,3	0,95	0,95	1	1,9
T38	2,44	1,8	1,17	0,63	0,23	1	1	1	2
T43	2,4	1,57	1,1	0,68	0,3	1,35	1,35	0,95	2
T48	2,5	1,15	0,8	0,83	0,21	1,95	1,98	0,76	2
T14	2,98	3,3	1,02	0,6	0,4	1,15	1,15	0,8	1,8
T19	2,7	3	1,16	0,6	0,53	0,98	0,98	0,81	1,95
T24	2,57	2,7	1,13	0,37	0,46	1,1	1,15	0,76	1,7
T29	2,55	2,34	1,25	0,17	0,18	1	1	0,95	2
T34	2,58	2,1	1,11	0,45	0,23	1	1	1	2
T39	2,53	1,3	0,95	0,36	0,31	1,5	1,2	0,71	2
T44	2,66	1	0,8	0,68	0,28	2	1,8	0,7	2
T49	2,9	0,65	0,51	0,6	0,23	2,5	2,3	0,6	2
T15	3,05	3,2	1,1	0,61	0,41	1,5	1,3	0,7	2
T20	2,91	2,55	1,1	0,5	0,37	1,15	1,05	0,7	2
T25	2,68	2,6	1,1	0,3	0,4	1,1	1,03	0,78	2
T30	2,63	1,5	0,9	0,49	0,25	1,2	1,05	0,8	2
T35	2,7	1,25	0,7	0,46	0,27	1,2	1,15	1	2

Tablo 3.6 Tek fazda püskürtme şartında performans doğrulama parametreleri
(devamı)

T40	2,82	1,1	0,65	0,5	0,29	1,7	1,5	0,82	2
T45	3,03	0,7	0,52	0,5	0,31	2,6	2,5	0,7	2
T50	3,1	0,68	0,5	0,6	0,3	3,5	3	0,3	2
T51	2,32	1,62	1,25	0,23	0,28	0,7	0,8	1	2
T52	2,55	1,3	0,67	0,5	0,14	1,25	1,17	0,87	2
T53	2,98	0,6	0,51	0,51	0,16	2,7	2,5	0,62	2
T54	2,83	4	1,55	0,85	0,5	1,1	1,1	2,2	2
T56	2,24	3,4	1,5	0,6	0,33	1,5	1,5	2,1	2
T57	2,35	3	1,45	0,6	0,37	0,9	0,9	2,15	2
T55	2,74	3,9	1,55	0,58	0,4	1,24	1,3	2,2	2
T58	2,52	2,76	1,45	0,4	0,27	1,3	1,34	2,05	2
T60	1,85	2,27	1,28	0,46	0,19	1,3	1,3	2,2	2
T59	1,88	2,3	1,32	0,42	0,37	1,1	1,1	2	2

Doğrulama işlemi sırasında ortaya çıkan emisyon parametrik faktörleri de Tablo 3.7 üzerinde görülmektedir.

Tablo 3.7 Tek fazda püskürtme şartında emisyonlara ilişkin doğrulama parametreleri

Deney No	NO _x Kinetik Çarpanı	NO _x Post-proses Çarpanı	CO Kinetik Çarpanı	PM Üretim Sabiti	PM Tüketim Sabiti
T1	4750	20	0,169	9,6	300
T3	19200	20	0,0328	7,89	300
T2	1745	20	0,242	19,2	300

Tablo 3.7 Tek fazda püskürtme şartında emisyonlara ilişkin doğrulama parametreleri (devamı)

T4	158,5	20	0,00712	2,54	300
T6	19,8	20	0,008	1,1	300
T5	46,7	20	0,0191	2,73	300
T7	9,4	20	0,224	3,12	300
T9	17,1	20	0,107	2,5	300
T8	47	20	0,226	23,1	300
T10	127,5	20	0,0306	5,15	300
T11	16,3	20	0,168	13,8	300
T16	43,2	20	0,193	6,9	300
T21	47	20	0,169	15,9	300
T26	35,8	20	0,156	12,1	300
T31	103	20	0,0087	12,8	300
T36	126	20	0,061	22,3	300
T41	78,3	20	0,0438	29,6	300
T46	19,3	20	0,025	19,3	300
T12	27,1	20	0,1976	1,96	300
T17	26,35	20	0,188	6,4	300
T22	64,9	20	0,1832	4,83	300
T27	79,1	20	0,1287	8,1	300
T32	133,1	20	0,0681	16,3	300
T37	129,7	20	0,0358	18,94	300

Tablo 3.7 Tek fazda püskürtme şartında emisyonlara ilişkin doğrulama parametreleri (devamı)

T42	59,8	20	0,0329	23,9	300
T47	16,02	20	0,0182	2,94	300
T13	67	20	0,216	17	300
T18	35	20	0,198	5	300
T23	70,3	20	0,168	4,5	300
T28	87,5	20	0,1033	6,5	300
T33	143,4	20	0,0692	18,8	300
T38	100,8	20	0,0475	21,7	300
T43	47,3	20	0,0297	17,5	300
T48	27,9	20	0,0246	5,9	300
T14	125	20	0,206	16,4	300
T19	79	20	0,195	19	300
T24	195,2	20	0,159	20,1	300
T29	297,4	20	0,0955	20,9	300
T34	193,4	20	0,533	19,5	300
T39	73	20	0,0446	3,98	300
T44	32,35	20	0,0278	2,12	300
T49	11,8	20	0,01622	0,45	300
T15	163	20	0,2066	16	300
T20	171,5	20	0,2017	16,3	300
T25	331,3	20	0,169	18,5	300

Tablo 3.7 Tek fazda püskürtme şartında emisyonlara ilişkin doğrulama parametreleri (devamı)

T30	150,9	20	0,114	7	300
T35	65,7	20	0,0543	2,25	300
T40	42,6	20	0,0415	1,37	300
T45	12,1	20	0,02	0,4	300
T50	8,15	20	0,0208	0,44	300
T51	1,9	20	0,291	15,1	300
T52	16,62	20	0,192	2,9	300
T53	2,91	20	0,0203	0,39	300
T54	16	20	0,236	6,8	300
T56	138,2	20	0,0972	15	300
T57	177	20	0,0502	15,75	300
T55	160,9	20	0,1524	15,4	300
T58	47,43	20	0,0616	10,8	300
T60	3,35	20	0,01129	9,85	300
T59	5,25	20	0,2208	8,47	300

3.6 Yapay Sinir Ağı Modellemesi Sonuçları

Termodinamik modelin doğrulanması ile elde edilen termodinamik model parametrik katsayıları Bölüm 3.5’te belirtilmiştir. Araştırma uzayında 288 farklı nokta bulunmaktadır. Yapay sinir ağı modellemesi esnasında, doğrulaması yapılan 60 noktanın parametrik katsayılarından faydalanarak 288 noktanın her biri için ihtiyaç duyulan tüm parametrik katsayılar elde edilmiştir. Yapay sinir ağı modellemesi AVL-Cameo ortamında gerçekleştirilmiş olup çıktılar Matlab üzerinden alınmıştır.

Bölüm 2.6’da belirtildiği üzere çalışmada geri dönüşümlü yapay sinir ağı modeli tercih edilmiştir. Ağın eğitilmesi esnasında belli sayıda veri setinin sinir ağına tanıtılması gerekmekte ve bazı verilerin saklanarak modelleme yapıldıktan sonra çıktının ne denli tahmin edilebildiğini test etmek için kullanılmaktadır. Bu sebeple yapay sinir ağına 57 farklı nokta tanıtılmış ve sinir ağının eğitilmesi sağlanmıştır. Sonrasında ise bu 3 noktanın tahmin çıktıları incelenmiş ve yapay sinir ağının öğrenme seviyesinin yeterli olduğu görülmüştür. Sonrasında da 288 noktaya ait parametrik katsayılar program çıktısı olarak alınmıştır. Yapay sinir ağı 5 katmanlı ve 53 nöronlu bir ağ olarak modellenmiştir. Öğrenme süreci esnasında her bir parametrenin öğrenilme seviyesine dair istatistiki veriler Tablo 3.8 üzerinde regresyon sonuçlarıyla birlikte görülmektedir.

Tablo 3.8 YSA’nın öğrenme sürecinde ortaya çıkan regresyon değerleri

Parametre	R ²
Tutuşma gecikmesi kalibrasyon faktörü (IDCF)	0,9994
Yanma parametresi (CP)	0,9822
Türbülans parametresi (TP)	0,9911
Ön karışımlı yanma parametresi (PCP)	0,9195
Ön karışımlı yanma süreci faktörü (PCDF)	0,9562
Piston ısı transferi kalibrasyon faktörü (HTPCF)	0,9726
Silindir Kafası ısı transferi kalibrasyon faktörü (HTHCF)	0,9783
Silindir cidarı ısı transferi kalibrasyon faktörü (HTLCF)	0,9625
NO _x kinetik çarpanı (NO _x KM)	0,9555
CO kinetik çarpanı (CO KM)	0,9855
PM üretim sabiti (SCC)	0,9569

Yapay sinir ağı modellemesi ile elde edilen ve sürecini belirleyen parametrik faktörler Tablo 3.9’da sunulmuştur. Tablo 3.9 üzerinde emme havası kütlesi (Mem), kapalı çevrim başlangıcındaki silindir içi basınç (SOHP), hava tutabilme kapasitesi (ATE), tutuşma gecikmesi kalibrasyon katsayısı (IDCF), yanma parametresi (COP), türbülans parametresi (TUP), ön karışımli yanma parametresi (PCP), ön karışımli yanma süreci faktörü (PCDF), piston ısı transferi kalibrasyon katsayısı (HTPCF), silindir kafası ısı transferi kalibrasyon katsayısı (HTHCF), silindir cidarı ısı transferi kalibrasyon katsayısı (HTLCF) verileri örölmektedir.

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları

S, No	Mem	SOHP	ATE	IDCF	COP	TUP	PCP	PCDF	HTPCF	HTHCF	HTLCF
	kg/h	bar	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
ST1	106,43	1,2	0,7	2,794	2,399	1,240	0,415	0,296	0,978	0,940	1,009
ST2	106,43	1,2	0,7	2,812	2,339	1,259	0,428	0,222	1,006	0,858	0,977
ST3	106,43	1,2	0,7	2,558	2,250	1,237	0,559	0,184	0,993	0,829	0,928
ST4	106,43	1,2	0,7	2,684	2,136	1,195	0,580	0,180	0,916	0,800	1,048
ST5	106,43	1,2	0,7	3,008	2,001	1,201	0,575	0,200	0,988	0,819	1,125
ST6	106,43	1,2	0,7	3,149	1,849	1,226	0,648	0,300	1,027	1,119	1,232
ST7	106,43	1,2	0,7	3,234	1,686	1,299	0,614	0,300	1,039	1,233	1,202
ST8	106,43	1,2	0,7	3,508	1,517	1,207	0,573	0,244	1,391	1,446	1,097
ST9	106,43	1,2	0,7	2,787	2,301	1,192	0,466	0,304	0,932	0,987	0,867
ST10	106,43	1,2	0,7	2,752	2,228	1,242	0,461	0,302	0,950	1,035	0,932
ST11	106,43	1,2	0,7	2,668	2,097	1,172	0,580	0,293	0,983	1,061	1,028
ST12	106,43	1,2	0,7	2,588	1,953	1,131	0,693	0,245	1,002	0,933	1,047
ST13	106,43	1,2	0,7	2,573	1,824	1,143	0,686	0,263	1,053	0,912	1,020
ST14	106,43	1,2	0,7	2,656	1,685	1,162	0,659	0,308	1,060	1,011	0,999
ST15	106,43	1,2	0,7	2,772	1,537	1,154	0,625	0,306	1,080	1,164	0,955
ST16	106,43	1,2	0,7	3,025	1,385	0,885	0,584	0,260	1,316	1,374	0,845
ST17	106,43	1,2	0,7	2,944	3,002	1,188	0,530	0,307	0,928	1,067	0,796
ST18	106,43	1,2	0,7	2,805	2,058	1,190	0,424	0,303	0,960	1,089	0,821
ST19	106,43	1,2	0,7	2,732	1,638	1,186	0,555	0,291	0,997	1,099	0,923
ST20	106,43	1,2	0,7	2,720	1,414	1,295	0,506	0,270	0,998	1,070	0,999
ST21	106,43	1,2	0,7	2,771	1,213	1,124	0,506	0,308	0,977	1,015	0,930
ST22	106,43	1,2	0,7	2,902	1,028	1,008	0,579	0,309	1,042	1,092	0,823
ST23	106,43	1,2	0,7	3,038	0,859	0,883	0,645	0,308	1,271	1,358	0,787
ST24	106,43	1,2	0,7	3,294	0,709	0,654	0,604	0,282	1,533	1,496	0,623
ST25	106,43	1,2	0,7	3,103	2,080	1,245	0,413	0,300	0,972	1,101	0,739

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları
(devamı)

ST26	106,43	1,2	0,7	2,981	1,768	1,320	0,213	0,289	1,033	1,110	0,753
ST27	106,43	1,2	0,7	2,934	1,538	1,252	0,358	0,288	1,033	1,085	0,780
ST28	106,43	1,2	0,7	2,954	1,323	1,210	0,492	0,303	1,065	1,031	0,882
ST29	106,43	1,2	0,7	3,046	1,123	1,218	0,530	0,310	1,217	1,046	0,816
ST30	106,43	1,2	0,7	3,223	0,940	0,839	0,606	0,310	1,304	1,222	0,735
ST31	106,43	1,2	0,7	3,464	0,776	0,689	0,674	0,309	1,514	1,420	0,471
ST32	106,43	1,2	0,7	3,638	0,632	0,576	0,636	0,298	1,916	1,822	0,445
ST33	103,93	1,2	0,7	2,475	2,249	1,232	0,544	0,381	1,047	0,912	0,983
ST34	103,93	1,2	0,7	2,518	2,197	1,214	0,389	0,439	1,006	0,918	1,008
ST35	103,93	1,2	0,7	2,447	2,118	1,201	0,377	0,487	0,849	0,928	0,916
ST36	103,93	1,2	0,7	2,294	2,015	1,194	0,390	0,368	0,911	1,037	0,924
ST37	103,93	1,2	0,7	2,247	1,891	1,194	0,419	0,238	0,975	1,071	1,007
ST38	103,93	1,2	0,7	2,465	1,751	1,196	0,560	0,197	0,947	1,081	1,136
ST39	103,93	1,2	0,7	2,614	1,600	1,183	0,674	0,223	1,176	1,076	1,211
ST40	103,93	1,2	0,7	2,884	1,442	1,109	0,695	0,227	1,578	1,488	1,231
ST41	103,93	1,2	0,7	2,577	2,091	1,224	0,597	0,280	0,948	0,832	0,948
ST42	103,93	1,2	0,7	2,475	2,028	1,221	0,493	0,348	0,701	0,752	0,978
ST43	103,93	1,2	0,7	2,540	1,943	1,206	0,450	0,288	0,727	0,842	1,007
ST44	103,93	1,2	0,7	2,721	1,838	1,200	0,476	0,276	0,936	0,904	1,000
ST45	103,93	1,2	0,7	2,944	1,718	1,224	0,499	0,281	1,011	1,107	1,050
ST46	103,93	1,2	0,7	3,066	1,586	1,223	0,570	0,263	1,024	1,265	1,043
ST47	103,93	1,2	0,7	3,162	1,441	1,176	0,689	0,235	1,323	1,255	1,033
ST48	103,93	1,2	0,7	3,216	1,294	0,981	0,670	0,230	1,535	1,554	0,903
ST49	103,93	1,2	0,7	2,716	2,535	1,100	0,621	0,346	1,050	1,014	0,791
ST50	103,93	1,2	0,7	2,538	2,312	1,185	0,497	0,351	0,906	0,964	0,859
ST51	103,93	1,2	0,7	2,514	2,077	1,163	0,343	0,265	0,922	0,969	0,926
ST52	103,93	1,2	0,7	2,521	1,835	1,134	0,390	0,258	0,982	0,983	0,994
ST53	103,93	1,2	0,7	2,653	1,563	1,187	0,455	0,235	0,994	1,051	0,965
ST54	103,93	1,2	0,7	3,088	1,216	1,088	0,543	0,281	1,007	1,143	0,848
ST55	103,93	1,2	0,7	3,138	0,982	0,741	0,648	0,247	1,274	1,379	0,784
ST56	103,93	1,2	0,7	3,275	0,804	0,583	0,732	0,233	1,658	1,714	0,699
ST57	103,93	1,2	0,7	2,828	2,634	1,101	0,575	0,422	1,178	1,039	0,758
ST58	103,93	1,2	0,7	2,850	2,390	1,153	0,499	0,412	1,042	0,979	0,761
ST59	103,93	1,2	0,7	2,665	2,123	1,183	0,344	0,291	1,047	0,997	0,802
ST60	103,93	1,2	0,7	2,686	1,732	1,257	0,289	0,270	1,121	1,105	0,912
ST61	103,93	1,2	0,7	2,758	1,319	1,169	0,314	0,286	1,262	1,144	0,846
ST62	103,93	1,2	0,7	2,892	1,082	0,948	0,403	0,296	1,330	1,203	0,751

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları
(devamı)

ST63	103,93	1,2	0,7	3,113	0,890	0,673	0,576	0,264	1,694	1,680	0,672
ST64	103,93	1,2	0,7	3,464	0,722	0,521	0,676	0,237	2,089	1,977	0,508
ST65	103,43	1,2	0,7	2,394	2,009	1,271	0,499	0,365	0,980	0,726	0,938
ST66	103,43	1,2	0,7	2,481	1,966	1,246	0,447	0,392	0,795	0,866	0,995
ST67	103,43	1,2	0,7	2,425	1,899	1,227	0,328	0,444	0,718	0,886	0,923
ST68	103,43	1,2	0,7	2,292	1,810	1,213	0,260	0,333	0,721	0,892	0,907
ST69	103,43	1,2	0,7	2,108	1,702	1,206	0,286	0,262	0,858	0,898	0,924
ST70	103,43	1,2	0,7	2,161	1,579	1,204	0,320	0,254	0,886	0,904	0,975
ST71	103,43	1,2	0,7	2,283	1,446	1,208	0,360	0,250	0,895	0,908	1,130
ST72	103,43	1,2	0,7	2,475	1,306	1,233	0,435	0,245	1,420	1,292	1,205
ST73	103,43	1,2	0,7	2,464	1,752	1,290	0,547	0,278	0,838	0,691	0,923
ST74	103,43	1,2	0,7	2,379	1,698	1,265	0,501	0,329	0,706	0,690	0,933
ST75	103,43	1,2	0,7	2,520	1,627	1,247	0,447	0,270	0,698	0,842	0,986
ST76	103,43	1,2	0,7	2,393	1,540	1,234	0,353	0,258	0,750	0,887	0,943
ST77	103,43	1,2	0,7	2,338	1,441	1,227	0,345	0,253	0,917	0,892	0,966
ST78	103,43	1,2	0,7	2,342	1,332	1,225	0,350	0,248	0,966	0,900	1,035
ST79	103,43	1,2	0,7	2,382	1,216	1,227	0,371	0,242	1,146	1,071	1,060
ST80	103,43	1,2	0,7	2,632	1,097	0,979	0,424	0,234	1,545	1,538	1,234
ST81	103,43	1,2	0,7	2,655	1,712	1,314	0,601	0,342	0,932	0,997	0,796
ST82	103,43	1,2	0,7	2,488	1,541	1,289	0,531	0,378	0,697	0,948	0,900
ST83	103,43	1,2	0,7	2,487	1,366	1,270	0,452	0,241	0,661	0,815	0,926
ST84	103,43	1,2	0,7	2,491	1,193	1,253	0,344	0,204	0,705	0,905	0,971
ST85	103,43	1,2	0,7	2,513	1,026	1,238	0,358	0,188	0,903	1,204	0,980
ST86	103,43	1,2	0,7	2,579	0,868	1,212	0,400	0,176	1,000	1,278	0,915
ST87	103,43	1,2	0,7	2,720	0,724	0,985	0,451	0,168	1,240	1,401	0,789
ST88	103,43	1,2	0,7	3,039	0,598	0,568	0,519	0,167	1,671	1,829	0,719
ST89	103,43	1,2	0,7	3,609	1,814	1,283	0,597	0,380	1,086	1,058	0,774
ST90	103,43	1,2	0,7	3,496	1,625	1,123	0,520	0,308	1,040	0,910	0,776
ST91	103,43	1,2	0,7	2,804	1,433	1,104	0,440	0,280	1,026	0,819	0,844
ST92	103,43	1,2	0,7	2,587	1,245	0,912	0,366	0,161	1,112	1,010	0,909
ST93	103,43	1,2	0,7	2,672	1,064	0,870	0,425	0,148	1,201	1,266	0,878
ST94	103,43	1,2	0,7	2,820	0,897	0,854	0,454	0,149	1,434	1,374	0,805
ST95	103,43	1,2	0,7	3,075	0,753	0,728	0,476	0,152	1,766	1,790	0,840
ST96	103,43	1,2	0,7	3,635	0,696	0,630	0,503	0,171	2,361	2,290	0,919
ST97	157,57	1,2	1	2,498	2,561	1,266	0,428	0,332	1,008	0,980	1,047
ST98	157,57	1,2	1	2,291	2,494	1,292	0,450	0,284	1,026	0,926	1,102

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları
(devamı)

ST99	157,57	1,2	1	1,913	2,396	1,262	0,635	0,212	1,020	0,917	0,987
ST100	157,57	1,2	1	1,796	2,271	1,214	0,714	0,189	0,991	0,893	0,954
ST101	157,57	1,2	1	1,765	2,125	1,203	0,702	0,194	1,015	0,926	1,045
ST102	157,57	1,2	1	1,780	1,961	1,227	0,677	0,283	1,021	1,053	1,242
ST103	157,57	1,2	1	1,841	1,786	1,266	0,645	0,307	1,027	1,061	1,271
ST104	157,57	1,2	1	1,958	1,605	1,200	0,606	0,266	1,278	1,350	1,295
ST105	157,57	1,2	1	2,766	2,370	1,193	0,512	0,314	0,944	1,023	0,879
ST106	157,57	1,2	1	2,457	2,314	1,262	0,450	0,309	0,937	0,938	0,960
ST107	157,57	1,2	1	2,107	2,230	1,205	0,630	0,305	0,972	1,067	1,072
ST108	157,57	1,2	1	1,889	2,120	1,132	0,721	0,291	0,992	0,984	1,033
ST109	157,57	1,2	1	1,829	1,989	1,142	0,711	0,254	1,044	0,896	1,070
ST110	157,57	1,2	1	1,854	1,841	1,161	0,688	0,307	1,054	0,973	1,103
ST111	157,57	1,2	1	1,939	1,681	1,184	0,661	0,309	1,078	1,173	1,239
ST112	157,57	1,2	1	2,090	1,515	0,991	0,631	0,288	1,346	1,391	1,081
ST113	157,57	1,2	1	2,886	2,518	1,170	0,623	0,314	0,921	1,083	0,792
ST114	157,57	1,2	1	2,693	2,347	1,218	0,439	0,311	0,951	1,096	0,831
ST115	157,57	1,2	1	2,576	2,066	1,111	0,592	0,308	0,996	1,141	0,955
ST116	157,57	1,2	1	2,516	1,904	1,149	0,685	0,298	0,997	0,999	1,026
ST117	157,57	1,2	1	2,506	1,764	1,151	0,684	0,302	0,979	0,953	0,988
ST118	157,57	1,2	1	2,533	1,618	1,062	0,684	0,311	0,973	1,069	0,909
ST119	157,57	1,2	1	2,575	1,468	0,940	0,698	0,310	1,153	1,274	0,801
ST120	157,57	1,2	1	2,645	1,316	0,749	0,731	0,302	1,658	1,434	0,745
ST121	157,57	1,2	1	3,018	2,842	1,190	0,569	0,316	1,014	1,159	0,775
ST122	157,57	1,2	1	2,843	1,963	1,280	0,288	0,305	1,064	1,159	0,763
ST123	157,57	1,2	1	2,745	1,650	1,287	0,334	0,288	1,053	1,017	0,784
ST124	157,57	1,2	1	2,709	1,407	1,247	0,491	0,294	1,041	0,961	0,882
ST125	157,57	1,2	1	2,732	1,185	1,147	0,550	0,311	1,112	1,015	0,799
ST126	157,57	1,2	1	2,816	0,985	0,854	0,607	0,311	1,309	1,164	0,753
ST127	157,57	1,2	1	2,973	0,807	0,726	0,673	0,311	1,595	1,389	0,657
ST128	157,57	1,2	1	3,227	0,653	0,615	0,747	0,308	2,047	1,896	0,627
ST129	154,28	1,2	1	2,430	2,399	1,238	0,599	0,409	1,082	1,022	1,021
ST130	154,28	1,2	1	2,426	2,341	1,225	0,434	0,481	1,063	1,024	1,086
ST131	154,28	1,2	1	2,360	2,253	1,212	0,387	0,497	1,000	0,989	1,026
ST132	154,28	1,2	1	2,222	2,140	1,206	0,401	0,426	0,905	0,978	0,950
ST133	154,28	1,2	1	1,853	2,006	1,208	0,443	0,279	0,953	0,984	0,965
ST134	154,28	1,2	1	1,710	1,855	1,257	0,611	0,216	0,964	0,990	1,057
ST135	154,28	1,2	1	1,965	1,692	1,450	0,744	0,220	0,956	0,944	1,211

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları
(devamı)

ST136	154,28	1,2	1	2,223	1,524	1,309	0,833	0,232	1,445	1,457	1,255
ST137	154,28	1,2	1	2,693	2,177	1,137	0,649	0,340	0,963	0,992	0,979
ST138	154,28	1,2	1	2,531	2,130	1,219	0,508	0,379	0,701	0,733	1,015
ST139	154,28	1,2	1	2,468	2,057	1,197	0,392	0,312	0,697	0,744	1,058
ST140	154,28	1,2	1	2,292	1,959	1,181	0,375	0,283	0,936	0,882	1,017
ST141	154,28	1,2	1	2,130	1,842	1,180	0,366	0,285	1,006	1,040	0,999
ST142	154,28	1,2	1	2,008	1,708	1,161	0,542	0,285	1,019	1,065	1,059
ST143	154,28	1,2	1	2,160	1,563	1,144	0,614	0,251	1,205	1,194	1,190
ST144	154,28	1,2	1	2,354	1,411	0,897	0,714	0,235	1,505	1,501	1,459
ST145	154,28	1,2	1	2,885	2,263	1,092	0,679	0,303	1,074	1,071	0,788
ST146	154,28	1,2	1	2,650	2,153	1,195	0,535	0,410	0,964	0,992	0,872
ST147	154,28	1,2	1	2,476	2,027	1,174	0,422	0,327	0,968	1,004	0,945
ST148	154,28	1,2	1	2,397	1,888	1,153	0,455	0,282	0,999	1,019	0,993
ST149	154,28	1,2	1	2,375	1,738	1,169	0,501	0,266	0,994	1,011	0,967
ST150	154,28	1,2	1	2,393	1,566	1,202	0,561	0,264	1,031	1,069	0,986
ST151	154,28	1,2	1	2,515	1,370	1,102	0,646	0,269	1,362	1,380	0,864
ST152	154,28	1,2	1	2,794	1,214	0,978	0,731	0,239	1,781	1,807	0,751
ST153	154,28	1,2	1	2,963	3,019	1,094	0,602	0,382	1,211	1,147	0,782
ST154	154,28	1,2	1	2,587	2,724	1,174	0,521	0,423	1,059	1,045	0,781
ST155	154,28	1,2	1	2,493	2,419	1,201	0,396	0,378	1,063	1,043	0,816
ST156	154,28	1,2	1	2,511	2,086	1,232	0,306	0,255	1,063	1,050	0,904
ST157	154,28	1,2	1	2,525	1,570	1,113	0,336	0,269	1,211	1,058	0,824
ST158	154,28	1,2	1	2,587	1,151	0,958	0,443	0,296	1,429	1,223	0,768
ST159	154,28	1,2	1	2,711	0,927	0,759	0,581	0,285	1,838	1,766	0,711
ST160	154,28	1,2	1	2,914	0,747	0,554	0,672	0,245	2,183	2,102	0,618
ST161	151,71	1,2	1	2,480	2,141	1,283	0,551	0,387	1,110	0,811	0,979
ST162	151,71	1,2	1	2,403	2,093	1,259	0,496	0,419	0,982	0,851	1,058
ST163	151,71	1,2	1	2,351	2,019	1,240	0,409	0,483	0,734	0,859	1,032
ST164	151,71	1,2	1	2,229	1,921	1,228	0,307	0,389	0,740	0,865	0,947
ST165	151,71	1,2	1	2,055	1,804	1,221	0,297	0,267	0,855	0,871	0,953
ST166	151,71	1,2	1	1,927	1,671	1,219	0,327	0,255	0,965	0,876	0,975
ST167	151,71	1,2	1	1,860	1,528	1,224	0,369	0,248	0,864	0,844	1,086
ST168	151,71	1,2	1	1,813	1,378	1,240	0,477	0,242	1,175	1,259	1,220
ST169	151,71	1,2	1	2,570	1,906	1,300	0,600	0,317	0,847	0,836	0,949
ST170	151,71	1,2	1	2,433	1,868	1,275	0,548	0,374	0,712	0,669	0,972
ST171	151,71	1,2	1	2,461	1,807	1,257	0,468	0,295	0,713	0,825	1,028
ST172	151,71	1,2	1	2,319	1,725	1,245	0,277	0,264	0,742	0,852	1,006

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları
(devamı)

ST173	151,71	1,2	1	2,233	1,624	1,238	0,283	0,258	0,897	0,858	0,973
ST174	151,71	1,2	1	2,312	1,509	1,235	0,319	0,251	0,940	0,872	0,995
ST175	151,71	1,2	1	2,382	1,384	1,236	0,360	0,243	1,074	1,250	1,054
ST176	151,71	1,2	1	2,579	1,252	1,093	0,447	0,234	1,392	1,693	1,417
ST177	151,71	1,2	1	2,815	1,826	1,312	0,653	0,317	0,955	1,037	0,805
ST178	151,71	1,2	1	2,595	1,728	1,280	0,557	0,372	0,746	0,971	0,930
ST179	151,71	1,2	1	2,453	1,618	1,244	0,471	0,361	0,695	0,916	0,959
ST180	151,71	1,2	1	2,395	1,500	1,136	0,390	0,232	0,702	0,894	0,965
ST181	151,71	1,2	1	2,389	1,377	0,969	0,432	0,205	0,894	0,969	0,926
ST182	151,71	1,2	1	2,421	1,251	0,905	0,467	0,188	0,923	1,099	0,976
ST183	151,71	1,2	1	2,553	1,125	0,887	0,487	0,175	1,103	1,545	0,987
ST184	151,71	1,2	1	2,795	1,002	0,675	0,511	0,168	1,529	1,886	0,902
ST185	151,71	1,2	1	3,053	2,100	1,105	0,627	0,379	1,114	1,109	0,776
ST186	151,71	1,2	1	3,079	1,870	1,107	0,543	0,381	1,071	1,040	0,786
ST187	151,71	1,2	1	2,594	1,640	0,937	0,459	0,409	1,063	0,938	0,859
ST188	151,71	1,2	1	2,477	1,416	0,716	0,374	0,284	1,133	1,101	0,908
ST189	151,71	1,2	1	2,528	1,204	0,701	0,430	0,154	1,233	1,182	0,861
ST190	151,71	1,2	1	2,627	1,008	0,712	0,473	0,150	1,331	1,428	0,810
ST191	151,71	1,2	1	2,787	0,832	0,669	0,496	0,151	1,829	1,839	0,684
ST192	151,71	1,2	1	3,050	0,686	0,525	0,525	0,160	2,361	2,270	0,680
ST193	194,87	1,15	1,2	1,736	2,808	1,318	0,484	0,385	1,046	1,006	1,107
ST194	194,87	1,15	1,2	1,503	2,730	1,359	0,492	0,319	1,053	1,035	1,112
ST195	194,87	1,15	1,2	1,160	2,620	1,300	0,646	0,274	1,045	1,028	1,086
ST196	194,87	1,15	1,2	1,140	2,480	1,258	0,687	0,210	1,021	0,996	0,999
ST197	194,87	1,15	1,2	1,090	2,317	1,226	0,703	0,200	1,012	0,914	1,012
ST198	194,87	1,15	1,2	1,041	2,135	1,249	0,733	0,252	1,013	0,931	1,222
ST199	194,87	1,15	1,2	1,012	1,942	1,280	0,779	0,311	1,015	1,051	1,276
ST200	194,87	1,15	1,2	1,051	1,742	1,193	0,801	0,294	1,169	1,234	1,311
ST201	194,87	1,15	1,2	1,417	2,594	1,228	0,624	0,331	0,992	1,046	0,897
ST202	194,87	1,15	1,2	1,240	2,530	1,301	0,445	0,320	0,935	1,041	1,053
ST203	194,87	1,15	1,2	1,167	2,435	1,252	0,504	0,316	0,976	0,855	1,081
ST204	194,87	1,15	1,2	1,145	2,312	1,157	0,572	0,311	1,005	1,034	1,058
ST205	194,87	1,15	1,2	1,109	2,166	1,161	0,635	0,291	1,036	0,963	1,029
ST206	194,87	1,15	1,2	1,087	2,002	1,181	0,704	0,304	1,051	1,040	1,098
ST207	194,87	1,15	1,2	1,090	1,826	1,205	0,780	0,313	1,068	1,115	1,374
ST208	194,87	1,15	1,2	1,131	1,643	1,065	0,859	0,306	1,305	1,293	1,510
ST209	194,87	1,15	1,2	1,772	2,442	1,188	0,619	0,325	0,938	1,107	0,788

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları
(devamı)

ST210	194,87	1,15	1,2	1,486	2,389	1,257	0,404	0,323	0,961	1,108	0,851
ST211	194,87	1,15	1,2	1,267	2,305	1,129	0,441	0,319	1,015	1,101	0,955
ST212	194,87	1,15	1,2	1,207	2,194	1,112	0,511	0,315	1,012	0,899	0,900
ST213	194,87	1,15	1,2	1,139	2,061	1,150	0,581	0,310	0,993	0,944	0,846
ST214	194,87	1,15	1,2	1,121	1,911	1,129	0,655	0,313	0,977	1,098	0,968
ST215	194,87	1,15	1,2	1,145	1,748	1,012	0,732	0,313	1,065	1,183	1,040
ST216	194,87	1,15	1,2	1,187	1,578	0,864	0,813	0,311	1,675	1,377	0,948
ST217	194,87	1,15	1,2	1,761	3,082	1,190	0,607	0,329	1,081	1,187	0,789
ST218	194,87	1,15	1,2	1,520	2,457	1,326	0,408	0,325	1,100	1,182	0,791
ST219	194,87	1,15	1,2	1,261	2,044	1,408	0,371	0,314	1,082	0,918	0,805
ST220	194,87	1,15	1,2	1,204	1,849	1,288	0,456	0,292	1,061	0,906	0,842
ST221	194,87	1,15	1,2	1,208	1,674	1,099	0,527	0,312	1,051	1,082	0,787
ST222	194,87	1,15	1,2	1,181	1,503	0,899	0,601	0,315	1,189	1,129	0,747
ST223	194,87	1,15	1,2	1,215	1,339	0,778	0,678	0,314	1,651	1,378	0,717
ST224	194,87	1,15	1,2	1,287	1,181	0,667	0,759	0,313	2,189	2,077	0,604
ST225	190,89	1,15	1,2	1,591	2,628	1,259	0,663	0,451	1,118	1,106	1,085
ST226	190,89	1,15	1,2	1,290	2,560	1,319	0,517	0,497	1,096	1,138	1,091
ST227	190,89	1,15	1,2	1,220	2,461	1,245	0,408	0,499	1,032	1,007	1,070
ST228	190,89	1,15	1,2	1,139	2,334	1,224	0,422	0,465	0,957	0,980	1,017
ST229	190,89	1,15	1,2	1,079	2,185	1,215	0,480	0,304	0,975	0,985	0,997
ST230	190,89	1,15	1,2	1,056	2,018	1,224	0,642	0,254	0,979	0,994	1,052
ST231	190,89	1,15	1,2	1,024	1,838	1,375	0,750	0,223	0,957	1,027	1,206
ST232	190,89	1,15	1,2	0,994	1,653	1,272	0,838	0,239	1,288	1,365	1,273
ST233	190,89	1,15	1,2	1,634	2,382	1,166	0,711	0,380	0,990	1,033	1,014
ST234	190,89	1,15	1,2	1,362	2,327	1,266	0,632	0,385	0,779	0,940	1,063
ST235	190,89	1,15	1,2	1,239	2,244	1,229	0,414	0,364	0,749	0,693	1,058
ST236	190,89	1,15	1,2	1,184	2,135	1,205	0,414	0,285	0,930	0,842	1,036
ST237	190,89	1,15	1,2	1,136	2,004	1,186	0,441	0,282	0,992	0,919	1,014
ST238	190,89	1,15	1,2	1,120	1,856	1,239	0,581	0,293	1,022	0,990	1,035
ST239	190,89	1,15	1,2	1,107	1,696	1,287	0,697	0,280	1,111	1,141	1,181
ST240	190,89	1,15	1,2	1,027	1,529	0,891	0,787	0,243	1,356	1,408	1,550
ST241	190,89	1,15	1,2	1,713	2,199	1,116	0,750	0,302	1,102	1,100	0,787
ST242	190,89	1,15	1,2	1,427	2,155	1,220	0,576	0,377	0,988	1,072	0,886
ST243	190,89	1,15	1,2	1,316	2,084	1,194	0,423	0,410	0,996	0,975	0,936
ST244	190,89	1,15	1,2	1,231	1,988	1,171	0,391	0,301	1,019	0,978	0,887
ST245	190,89	1,15	1,2	1,185	1,871	1,169	0,418	0,291	1,009	0,970	0,837
ST246	190,89	1,15	1,2	1,169	1,738	1,236	0,531	0,279	1,055	1,050	0,886

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları
(devamı)

ST247	190,89	1,15	1,2	1,173	1,593	1,165	0,642	0,287	1,406	1,367	1,020
ST248	190,89	1,15	1,2	1,226	1,440	0,792	0,731	0,249	1,783	1,803	1,218
ST249	190,89	1,15	1,2	1,749	2,821	1,109	0,640	0,376	1,246	1,184	0,781
ST250	190,89	1,15	1,2	1,436	2,605	1,212	0,550	0,384	1,074	1,141	0,788
ST251	190,89	1,15	1,2	1,354	2,380	1,239	0,444	0,412	1,088	1,024	0,839
ST252	190,89	1,15	1,2	1,297	2,151	1,255	0,337	0,329	1,074	0,979	0,869
ST253	190,89	1,15	1,2	1,231	1,898	1,078	0,376	0,245	1,103	1,045	0,815
ST254	190,89	1,15	1,2	1,219	1,529	1,012	0,477	0,288	1,483	1,139	0,774
ST255	190,89	1,15	1,2	1,262	1,266	0,891	0,581	0,296	1,986	1,845	0,743
ST256	190,89	1,15	1,2	1,345	1,095	0,690	0,671	0,260	2,390	2,328	0,616
ST257	185,54	1,15	1,2	2,329	2,343	1,296	0,614	0,398	1,156	0,858	1,051
ST258	185,54	1,15	1,2	2,319	2,287	1,272	0,559	0,465	1,043	0,844	1,063
ST259	185,54	1,15	1,2	2,271	2,203	1,254	0,481	0,496	0,771	0,849	1,042
ST260	185,54	1,15	1,2	2,158	2,093	1,242	0,367	0,440	0,780	0,855	1,011
ST261	185,54	1,15	1,2	1,913	1,963	1,235	0,356	0,277	0,876	0,861	0,989
ST262	185,54	1,15	1,2	1,715	1,816	1,235	0,348	0,254	1,003	0,875	1,010
ST263	185,54	1,15	1,2	1,740	1,658	1,240	0,386	0,247	1,010	0,810	1,087
ST264	185,54	1,15	1,2	1,715	1,494	1,252	0,539	0,240	0,940	1,024	1,244
ST265	185,54	1,15	1,2	2,725	2,083	1,308	0,666	0,373	0,867	0,982	0,981
ST266	185,54	1,15	1,2	2,517	2,039	1,283	0,610	0,380	0,727	0,715	1,029
ST267	185,54	1,15	1,2	2,398	1,970	1,264	0,517	0,352	0,749	0,820	1,026
ST268	185,54	1,15	1,2	2,235	1,878	1,248	0,317	0,270	0,780	0,841	1,004
ST269	185,54	1,15	1,2	2,111	1,766	1,232	0,290	0,257	0,912	0,849	0,985
ST270	185,54	1,15	1,2	2,009	1,639	1,174	0,328	0,251	0,966	0,900	1,022
ST271	185,54	1,15	1,2	1,796	1,500	1,075	0,374	0,244	0,987	1,274	1,060
ST272	185,54	1,15	1,2	1,698	1,356	1,043	0,495	0,238	1,233	1,622	1,430
ST273	185,54	1,15	1,2	3,044	1,886	1,174	0,720	0,302	1,003	1,088	0,826
ST274	185,54	1,15	1,2	2,756	1,852	1,159	0,601	0,372	0,938	1,004	0,964
ST275	185,54	1,15	1,2	2,418	1,794	1,143	0,496	0,374	0,886	0,930	0,955
ST276	185,54	1,15	1,2	2,282	1,714	1,131	0,384	0,337	0,835	0,866	0,903
ST277	185,54	1,15	1,2	2,252	1,617	1,000	0,299	0,258	0,907	0,865	0,858
ST278	185,54	1,15	1,2	2,256	1,505	0,822	0,329	0,248	0,933	1,123	0,849
ST279	185,54	1,15	1,2	2,277	1,382	0,848	0,369	0,241	0,962	1,570	1,003
ST280	185,54	1,15	1,2	2,060	1,252	0,769	0,461	0,234	1,277	1,932	1,030
ST281	185,54	1,15	1,2	3,278	2,209	1,035	0,672	0,379	1,147	1,175	0,771
ST282	185,54	1,15	1,2	2,720	2,017	1,133	0,573	0,380	1,095	1,079	0,785
ST283	185,54	1,15	1,2	2,405	1,824	1,141	0,485	0,382	1,086	1,023	0,873

Tablo 3.9 YSA modeli tarafından yaratılan yanma parametrik katsayıları
(devamı)

ST284	185,54	1,15	1,2	2,350	1,632	1,032	0,394	0,403	1,148	1,041	0,900
ST285	185,54	1,15	1,2	2,371	1,447	0,788	0,421	0,286	1,274	1,066	0,855
ST286	185,54	1,15	1,2	2,432	1,271	0,723	0,489	0,225	1,306	1,421	0,811
ST287	185,54	1,15	1,2	2,533	1,106	0,740	0,512	0,209	1,576	1,874	0,787
ST288	185,54	1,15	1,2	2,486	0,954	0,582	0,539	0,196	2,163	2,238	0,799

Yapay sinir ağı modelinden çıktısı alınan emisyon parametrik katsayısı değerleri Tablo 3.10’da görülmektedir. Tablo 3.10 üzerinde NO_x kinetik çarpanı (NO_x KM), NO_x post-proses çarpanı (NO_x PPM), is üretim sabiti (SPC) ve is tüketim sabiti (SCC) verileri görülmektedir.

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları

S. No	NO _x KM	NO _x PPM	CO KM	SPC	SCC
	[]	[]	[]	[]	[]
ST1	1380,315	20,000	0,1717	10,457	300,000
ST2	1808,662	20,000	0,0428	8,708	300,000
ST3	3094,854	20,000	0,0249	9,707	300,000
ST4	2943,047	20,000	0,0293	9,131	300,000
ST5	1868,729	20,000	0,0284	4,344	300,000
ST6	738,894	20,000	0,0369	4,868	300,000
ST7	758,911	20,000	0,0280	6,070	300,000
ST8	305,130	20,000	0,0253	7,689	300,000
ST9	2838,720	20,000	0,1835	9,586	300,000
ST10	1930,864	20,000	0,0803	7,663	300,000
ST11	1664,365	20,000	0,0700	6,585	300,000
ST12	2263,092	20,000	0,0281	4,810	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST13	2168,270	20,000	0,0274	5,191	300,000
ST14	1487,851	20,000	0,0302	9,993	300,000
ST15	763,332	20,000	0,0263	6,024	300,000
ST16	264,115	20,000	0,0162	4,320	300,000
ST17	4043,287	20,000	0,2044	17,462	300,000
ST18	2561,356	20,000	0,1742	17,630	300,000
ST19	1817,248	20,000	0,0716	11,884	300,000
ST20	1866,912	20,000	0,0301	14,535	300,000
ST21	1420,943	20,000	0,0207	17,751	300,000
ST22	646,254	20,000	0,0274	17,174	300,000
ST23	180,614	20,000	0,0163	10,966	300,000
ST24	47,046	20,000	0,0119	1,913	300,000
ST25	4061,874	20,000	0,2076	18,121	300,000
ST26	3790,252	20,000	0,1448	21,267	300,000
ST27	3068,269	20,000	0,0561	25,615	300,000
ST28	2405,935	20,000	0,0530	24,832	300,000
ST29	1667,879	20,000	0,0439	16,747	300,000
ST30	354,637	20,000	0,0180	2,516	300,000
ST31	73,414	20,000	0,0120	0,710	300,000
ST32	25,134	20,000	0,0118	0,668	300,000
ST33	132,603	20,000	0,1912	10,857	300,000
ST34	186,489	20,000	0,1881	9,346	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST35	207,276	20,000	0,1816	11,191	300,000
ST36	316,535	20,000	0,0645	11,928	300,000
ST37	521,051	20,000	0,0435	14,775	300,000
ST38	487,855	20,000	0,0414	21,565	300,000
ST39	247,207	20,000	0,0358	12,622	300,000
ST40	96,317	20,000	0,0225	8,287	300,000
ST41	136,414	20,000	0,1996	2,611	300,000
ST42	210,253	20,000	0,1962	4,273	300,000
ST43	294,015	20,000	0,1812	5,987	300,000
ST44	381,878	20,000	0,0830	11,856	300,000
ST45	418,852	20,000	0,0568	16,034	300,000
ST46	301,371	20,000	0,0431	12,765	300,000
ST47	165,721	20,000	0,0298	7,800	300,000
ST48	90,615	20,000	0,0121	4,566	300,000
ST49	264,835	20,000	0,2086	14,750	300,000
ST50	349,231	20,000	0,2041	12,435	300,000
ST51	337,955	20,000	0,1561	14,750	300,000
ST52	392,612	20,000	0,0917	18,372	300,000
ST53	537,067	20,000	0,0538	19,345	300,000
ST54	225,000	20,000	0,0394	15,636	300,000
ST55	105,708	20,000	0,0181	3,722	300,000
ST56	39,245	20,000	0,0136	1,110	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST57	244,372	20,000	0,2165	11,590	300,000
ST58	417,353	20,000	0,2016	12,324	300,000
ST59	572,095	20,000	0,1544	12,376	300,000
ST60	722,845	20,000	0,0980	14,635	300,000
ST61	465,503	20,000	0,0472	12,292	300,000
ST62	226,975	20,000	0,0242	4,328	300,000
ST63	83,030	20,000	0,0182	0,986	300,000
ST64	38,429	20,000	0,0166	0,843	300,000
ST65	12,107	20,000	0,1968	5,324	300,000
ST66	17,793	20,000	0,1930	9,850	300,000
ST67	28,009	20,000	0,1890	14,272	300,000
ST68	40,179	20,000	0,1890	16,617	300,000
ST69	58,315	20,000	0,1665	17,511	300,000
ST70	39,317	20,000	0,1168	18,374	300,000
ST71	26,040	20,000	0,0810	16,762	300,000
ST72	20,089	20,000	0,0230	8,177	300,000
ST73	27,360	20,000	0,2050	2,232	300,000
ST74	27,835	20,000	0,2010	4,426	300,000
ST75	35,550	20,000	0,1999	9,012	300,000
ST76	43,892	20,000	0,2279	11,161	300,000
ST77	47,016	20,000	0,0962	13,376	300,000
ST78	39,512	20,000	0,0186	13,559	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST79	27,465	20,000	0,0271	7,995	300,000
ST80	18,754	20,000	0,0150	2,450	300,000
ST81	31,945	20,000	0,2139	7,569	300,000
ST82	34,185	20,000	0,2109	5,769	300,000
ST83	51,120	20,000	0,2286	5,547	300,000
ST84	57,504	20,000	0,2227	6,727	300,000
ST85	52,365	20,000	0,0892	8,503	300,000
ST86	32,422	20,000	0,0385	4,512	300,000
ST87	16,523	20,000	0,0179	0,946	300,000
ST88	9,850	20,000	0,0147	0,762	300,000
ST89	33,272	20,000	0,2238	10,552	300,000
ST90	50,043	20,000	0,2286	17,847	300,000
ST91	76,004	20,000	0,2382	15,806	300,000
ST92	87,942	20,000	0,2526	8,920	300,000
ST93	70,717	20,000	0,1976	4,457	300,000
ST94	31,822	20,000	0,0748	2,262	300,000
ST95	16,629	20,000	0,0270	0,807	300,000
ST96	9,325	20,000	0,0183	0,732	300,000
ST97	132,085	20,000	0,1807	10,064	300,000
ST98	141,073	20,000	0,0776	8,249	300,000
ST99	217,678	20,000	0,0459	9,889	300,000
ST100	222,595	20,000	0,0239	12,152	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST101	438,471	20,000	0,0339	6,591	300,000
ST102	225,498	20,000	0,0403	5,252	300,000
ST103	260,278	20,000	0,0308	6,203	300,000
ST104	213,723	20,000	0,0250	5,187	300,000
ST105	239,180	20,000	0,1101	3,204	300,000
ST106	261,633	20,000	0,0918	7,085	300,000
ST107	187,697	20,000	0,0574	6,095	300,000
ST108	235,687	20,000	0,0502	6,460	300,000
ST109	432,053	20,000	0,0314	6,706	300,000
ST110	362,638	20,000	0,0376	5,409	300,000
ST111	274,416	20,000	0,0283	6,548	300,000
ST112	117,618	20,000	0,0231	4,640	300,000
ST113	235,120	20,000	0,1975	15,744	300,000
ST114	316,580	20,000	0,1610	13,092	300,000
ST115	205,945	20,000	0,1473	27,675	300,000
ST116	194,195	20,000	0,0565	11,926	300,000
ST117	233,748	20,000	0,0467	8,981	300,000
ST118	275,294	20,000	0,0406	17,561	300,000
ST119	137,709	20,000	0,0306	13,987	300,000
ST120	34,527	20,000	0,0173	6,467	300,000
ST121	505,709	20,000	0,2058	16,657	300,000
ST122	529,649	20,000	0,1640	17,984	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST123	416,303	20,000	0,0891	19,624	300,000
ST124	314,313	20,000	0,0612	20,682	300,000
ST125	310,890	20,000	0,0477	17,036	300,000
ST126	240,331	20,000	0,0344	10,053	300,000
ST127	54,704	20,000	0,0174	4,166	300,000
ST128	12,912	20,000	0,0923	2,154	300,000
ST129	20,063	20,000	0,1869	7,942	300,000
ST130	36,728	20,000	0,1838	9,083	300,000
ST131	39,789	20,000	0,1745	11,976	300,000
ST132	48,647	20,000	0,1051	12,911	300,000
ST133	96,066	20,000	0,0430	15,420	300,000
ST134	150,574	20,000	0,0302	21,948	300,000
ST135	65,847	20,000	0,0284	22,935	300,000
ST136	23,712	20,000	0,0236	13,529	300,000
ST137	30,918	20,000	0,1953	2,502	300,000
ST138	28,803	20,000	0,1890	4,623	300,000
ST139	56,521	20,000	0,1733	6,234	300,000
ST140	82,244	20,000	0,1059	9,280	300,000
ST141	126,134	20,000	0,0652	16,766	300,000
ST142	124,148	20,000	0,0447	19,675	300,000
ST143	54,637	20,000	0,0325	13,350	300,000
ST144	19,883	20,000	0,0218	4,011	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST145	57,233	20,000	0,2030	4,067	300,000
ST146	43,205	20,000	0,1973	6,689	300,000
ST147	57,720	20,000	0,1584	8,856	300,000
ST148	99,652	20,000	0,1045	11,315	300,000
ST149	150,572	20,000	0,0666	17,236	300,000
ST150	97,394	20,000	0,0423	17,896	300,000
ST151	55,884	20,000	0,0266	12,690	300,000
ST152	27,122	20,000	0,0217	4,761	300,000
ST153	113,294	20,000	0,2081	16,277	300,000
ST154	100,487	20,000	0,2014	16,775	300,000
ST155	160,775	20,000	0,1623	25,315	300,000
ST156	251,492	20,000	0,1038	30,152	300,000
ST157	140,825	20,000	0,0604	23,523	300,000
ST158	71,338	20,000	0,0383	4,789	300,000
ST159	32,407	20,000	0,0220	1,555	300,000
ST160	14,612	20,000	0,0177	0,536	300,000
ST161	4,638	20,000	0,1915	5,710	300,000
ST162	8,340	20,000	0,1878	10,400	300,000
ST163	4,176	20,000	0,1829	13,444	300,000
ST164	3,185	20,000	0,2384	15,335	300,000
ST165	4,273	20,000	0,0476	16,812	300,000
ST166	6,865	20,000	0,0327	19,092	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST167	13,819	20,000	0,0229	21,269	300,000
ST168	12,591	20,000	0,0134	8,981	300,000
ST169	8,092	20,000	0,1998	2,296	300,000
ST170	6,021	20,000	0,1958	4,714	300,000
ST171	6,559	20,000	0,2438	10,730	300,000
ST172	7,079	20,000	0,2492	14,200	300,000
ST173	6,794	20,000	0,1275	15,186	300,000
ST174	10,656	20,000	0,0184	19,636	300,000
ST175	18,265	20,000	0,0201	12,633	300,000
ST176	9,532	20,000	0,0211	4,437	300,000
ST177	15,464	20,000	0,2089	9,219	300,000
ST178	11,328	20,000	0,2393	5,566	300,000
ST179	8,300	20,000	0,2559	6,987	300,000
ST180	6,290	20,000	0,2189	8,989	300,000
ST181	5,893	20,000	0,2018	10,896	300,000
ST182	11,963	20,000	0,0999	6,439	300,000
ST183	7,008	20,000	0,0204	1,879	300,000
ST184	3,764	20,000	0,0166	0,524	300,000
ST185	30,710	20,000	0,2352	9,665	300,000
ST186	23,165	20,000	0,2483	8,791	300,000
ST187	22,009	20,000	0,2355	10,380	300,000
ST188	22,016	20,000	0,1944	7,235	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST189	18,426	20,000	0,1478	3,638	300,000
ST190	10,837	20,000	0,0983	1,669	300,000
ST191	6,094	20,000	0,0613	0,580	300,000
ST192	3,246	20,000	0,1670	0,476	300,000
ST193	3,672	20,000	0,1848	3,441	300,000
ST194	1,930	20,000	0,3596	7,556	300,000
ST195	1,762	2,000	0,2574	13,055	300,000
ST196	4,885	2,000	0,1472	13,744	300,000
ST197	8,270	2,000	0,0896	12,936	300,000
ST198	229,316	20,000	0,0561	6,525	300,000
ST199	124,839	20,000	0,0384	7,319	300,000
ST200	63,662	20,000	0,0247	4,311	300,000
ST201	4,009	20,000	0,1930	2,735	300,000
ST202	10,920	20,000	0,1442	6,439	300,000
ST203	25,360	20,000	0,1139	7,079	300,000
ST204	77,676	20,000	0,1144	7,124	300,000
ST205	132,847	20,000	0,0849	6,413	300,000
ST206	179,015	20,000	0,0417	5,987	300,000
ST207	92,419	20,000	0,0295	7,224	300,000
ST208	45,494	20,000	0,0240	5,691	300,000
ST209	17,989	20,000	0,2003	3,462	300,000
ST210	31,353	20,000	0,1583	7,499	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST211	80,988	20,000	0,0780	12,547	300,000
ST212	106,202	20,000	0,0797	21,168	300,000
ST213	158,458	20,000	0,0572	24,838	300,000
ST214	123,057	20,000	0,0299	29,923	300,000
ST215	61,324	20,000	0,0297	20,463	300,000
ST216	28,619	20,000	0,0234	9,847	300,000
ST217	16,829	20,000	0,2080	15,974	300,000
ST218	36,786	20,000	0,1728	17,171	300,000
ST219	67,135	20,000	0,1071	18,429	300,000
ST220	116,684	20,000	0,0765	21,727	300,000
ST221	150,363	20,000	0,0623	14,256	300,000
ST222	75,868	20,000	0,0389	20,219	300,000
ST223	34,956	20,000	0,0250	12,175	300,000
ST224	16,843	20,000	0,0215	5,720	300,000
ST225	1,027	20,000	0,1845	4,817	300,000
ST226	8,721	20,000	0,1802	8,634	300,000
ST227	33,223	20,000	0,1723	13,111	300,000
ST228	45,260	20,000	0,1316	14,394	300,000
ST229	76,654	20,000	0,0862	15,837	300,000
ST230	107,782	20,000	0,0567	25,434	300,000
ST231	60,555	20,000	0,0393	26,710	300,000
ST232	23,440	20,000	0,0242	16,488	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST233	1,889	20,000	0,1945	2,572	300,000
ST234	14,367	20,000	0,1870	5,184	300,000
ST235	45,588	20,000	0,1777	7,026	300,000
ST236	69,898	20,000	0,1126	9,488	300,000
ST237	112,796	20,000	0,0643	14,979	300,000
ST238	90,086	20,000	0,0437	20,136	300,000
ST239	45,473	20,000	0,0337	19,346	300,000
ST240	26,202	20,000	0,0232	5,695	300,000
ST241	6,744	20,000	0,2026	5,243	300,000
ST242	28,915	20,000	0,1953	6,018	300,000
ST243	57,573	20,000	0,1665	5,705	300,000
ST244	113,170	20,000	0,1124	7,226	300,000
ST245	180,069	20,000	0,0806	15,470	300,000
ST246	103,693	20,000	0,0449	19,051	300,000
ST247	50,826	20,000	0,0296	18,405	300,000
ST248	30,878	20,000	0,0217	5,623	300,000
ST249	19,275	20,000	0,2104	12,757	300,000
ST250	76,766	20,000	0,2031	16,619	300,000
ST251	184,006	20,000	0,1670	19,780	300,000
ST252	256,823	20,000	0,1146	21,341	300,000
ST253	131,770	20,000	0,0794	16,944	300,000
ST254	64,548	20,000	0,0493	10,768	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

ST255	37,050	20,000	0,0266	3,228	300,000
ST256	24,691	20,000	0,0218	1,049	300,000
ST257	6,547	20,000	0,1872	6,381	300,000
ST258	6,473	20,000	0,1817	11,465	300,000
ST259	5,971	20,000	0,1736	14,073	300,000
ST260	6,075	20,000	0,2141	14,202	300,000
ST261	4,825	20,000	0,1477	15,256	300,000
ST262	4,092	20,000	0,0832	16,788	300,000
ST263	3,366	20,000	0,0464	18,912	300,000
ST264	2,331	20,000	0,0246	12,419	300,000
ST265	11,176	20,000	0,1957	2,419	300,000
ST266	8,559	20,000	0,1894	5,270	300,000
ST267	7,131	20,000	0,2309	10,265	300,000
ST268	6,869	20,000	0,2447	13,060	300,000
ST269	6,333	20,000	0,1747	14,241	300,000
ST270	6,181	20,000	0,0935	17,403	300,000
ST271	4,786	20,000	0,0503	23,418	300,000
ST272	3,503	20,000	0,0220	5,878	300,000
ST273	13,533	20,000	0,2061	4,177	300,000
ST274	10,862	20,000	0,2392	7,467	300,000
ST275	7,480	20,000	0,2582	9,530	300,000
ST276	7,381	20,000	0,2025	6,261	300,000

Tablo 3.10 YSA modelinde yaratılan emisyon parametrik katsayıları (devamı)

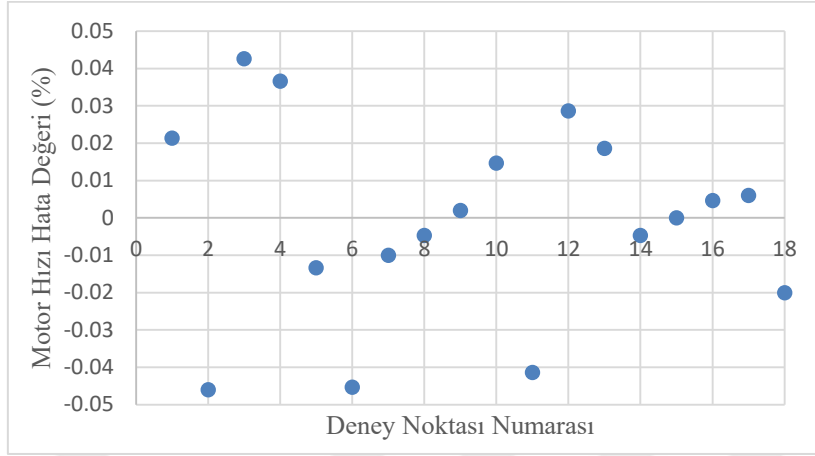
ST277	6,763	20,000	0,2040	13,428	300,000
ST278	6,190	20,000	0,1548	8,528	300,000
ST279	6,101	20,000	0,0262	4,534	300,000
ST280	5,778	20,000	0,0201	1,920	300,000
ST281	19,209	20,000	0,2411	6,875	300,000
ST282	10,942	20,000	0,2521	11,443	300,000
ST283	9,306	20,000	0,2306	10,712	300,000
ST284	7,958	20,000	0,2127	10,433	300,000
ST285	6,285	20,000	0,1956	6,527	300,000
ST286	6,361	20,000	0,1033	1,771	300,000
ST287	6,449	20,000	0,1119	0,614	300,000
ST288	6,127	20,000	0,0227	0,252	300,000

3.7 Çift Fazda Yürütülen Deneysel Çalışmaların Hata Analizi

Yakıtın çift fazda püskürtülmesi durumunda yapılan deneyler 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok çevrim başına yakıt püskürtme kütlesi ve 800 bar püskürtme basıncında yürütülmüştür. Ana püskürtme avansı 10° KMA ve 20° KMA olmak üzere iki farklı değer almaktadır. Ön püskürtme avansı ise 35° KMA, 45° KMA ve 55° KMA olarak üç farklı değer almaktadır. Ön püskürtme esansında ise silindir içerisine gönderilen toplam yakıtın %20, %30 ve %40'ı enjekte edilmiştir. Bu şartlar altında 18 farklı noktadan veri alınmıştır.

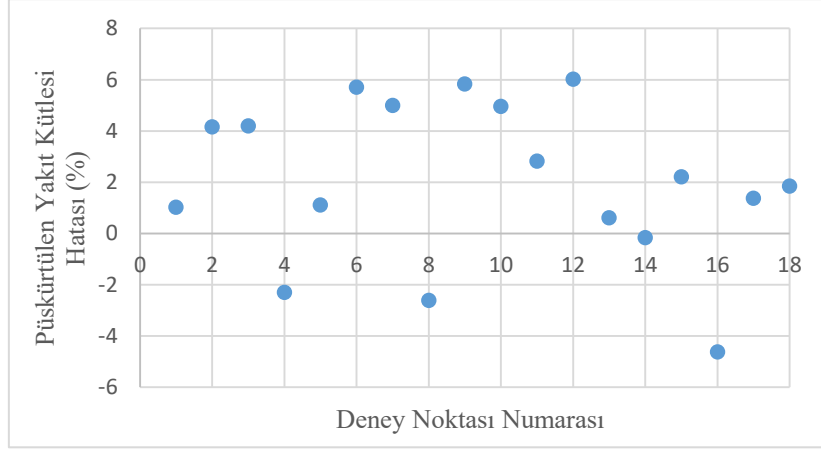
Şekil 3.42 çift fazda püskürtme fazı ile elde edilen 18 noktada dinamometreye bağlı olan motorun, istenilen şarttaki motor hızını ne kadarlık bir hata ile gerçekleştirdiğini göstermektedir. Şekil 3.42'den de görüleceği üzere 18 deney noktası içerisinde hiçbir noktada %0,05'in üzerinde hata oranı gözlemlenmemiştir. Bu verilere göre

pratik bir yaklaşımla hedeflenen motor hızına yaklaşık kusursuz bir şekilde erişildiği söylenebilir. Deney noktalarının tamamına bakıldığında %0,02 ve altında hata değerleri baskın gelmektedir.



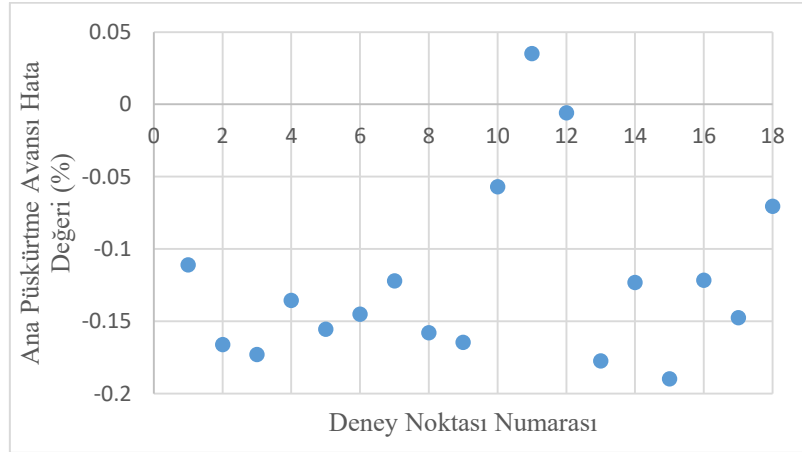
Şekil 3.42 Çift fazda püskürtme şartında elde edilen deneysel verilerdeki motor hızı yüzdesel hataları

Şekil 3.43 çift fazda elde edilen verilerde silindir içerisine gönderilen yakıt miktarının yüzdesel hata değerlerini vermektedir. Çalışmanın PCCI stratejisini incelemeye yönelik bir çalışma olması sebebiyle çalışılan motor yükleri kısmı motor yükleridir. Silindir içerisine çevrim başına 15 mg/strok yakıt enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Ön püskürtme oranının %20 ile %40 arasında gerçekleştiği düşünülürse, ön püskürtme fazında hedeflenen enjeksiyon kütlesi 3 mg/strok ile 6 mg/strok arasında değişmektedir. Dolayısıyla enjektör enerjilendirme süresindeki çok küçük farklılıklar bile gözle görülebilir yakıt enjeksiyon kütlesi yüzdesel hatalarını ortaya çıkartacaktır. Buna rağmen 18 deney noktası arasında 8 noktada %4 ile %6 arasında, toplam 4 noktada %2 ile %4 arasında, geri kalan 6 noktada ise %0 ile %2 arasında hata oranları görülmüştür. %4 ve üzeri hata değerlerinin görüldüğü noktalara bakıldığında çok büyük oranda bu değerlerin ön püskürtme fazında 3 mg/strok yakıt püskürtme isteri altında gerçekleştiği söylenebilir. Genel olarak ön püskürtme fazında püskürtülen yakıt kütlesinin düşük olması ve enjektör enerjilendirme süresindeki çok küçük değişikliklerin dahi büyük hata ve belirsizliklere yol açacağı göz önünde bulundurulduğunda elde edilen hata değerlerinin kabul edilebilir değerler olduğu ortadadır.



Şekil 3.43 Çift fazda püskürtme şartında elde edilen deneysel verilerde püskürtülen yakıt miktarı yüzdesel hataları

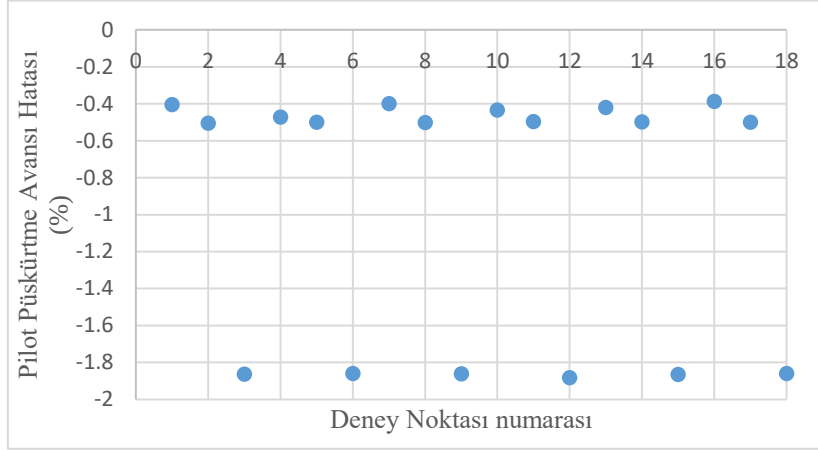
Şekil 3.44 çift fazda püskürtme yapılan deneysel çalışmalar için ana püskürtme avansı hatalarını göstermektedir. Sonuçlara bakıldığında %0,2 değerinin altında hatalar görüldüğü, 14 noktada %0,1 ile %0,2 aralığında, 4 noktada ise %0 ile %0,1 aralığında hata oranları ortaya çıkmıştır. Ana püskürtme avansının gerçek değerlerine bakıldığında ilgili değerlerin kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olduğu ve ana püskürtme avansının ister değerlere oldukça yakın değerler aldığı söylenebilir.



Şekil 3.44 Çift fazda püskürtme şartında elde edilen deneysel verilerdeki ana püskürtme avansı yüzdesel hataları

Şekil 3.45 çift fazda elde edilen verilerdeki ön püskürtme avansı hatalarını göstermektedir. 18 nokta içerisinde toplam 6 noktada %1,5 ile %2 aralığında hata değerleri ortaya çıkmış, geriye kalan 12 noktada ise %0,6'dan daha düşük hata oranları ortaya çıkmıştır. Genel olarak ön püskürtme avansının da büyük olması ile oldukça küçük hata değerleri ortaya çıkmıştır. Püskürtme yapılan zamanlama

gereğince TG sürecinin de uzun olduğu göz önünde bulundurulduğunda ön püskürtme fazı hatalarının gayet kabul edilebilir değerlerde olduğu söylenebilir.



Şekil 3.45 Çift faz püskürtme şartında elde edilen deneysel verilerdeki ön püskürtme avansı yüzdesel hataları

3.8 Çift Fazda Elde Edilen Deneysel Verilerin Yorumlanması

Yakıt enjeksiyonunun çift fazda yapıldığı deneylerde 18 farklı noktadan veri alınmıştır. Çift fazda yapılan çalışmada inceleme uzayı tek fazda yapılan çalışmaya göre daha az sayıda veriden oluşmaktadır. Çünkü tek fazda yakıt enjeksiyonunda olduğu gibi farklı hız, motor yükü ve enjeksiyon basınçlarında farklı ön püskürtme avansı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme oranının etkisini incelemek adına anlamlı bir araştırma uzayı yaratıldığında ve tam faktöriyel araştırma uzayında çalışıldığında oldukça fazla çalışma noktası ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple motor hızı sabit seçilmiştir. Bu değer motorun maksimum moment devri civarlarında olan 1500 dev/dak değeridir. Çevrim başına yakıt püskürtme kütlesi 15 mg/strok olarak belirlenmiştir. Yakıt püskürtme basıncı ise 800 bar olarak seçilmiştir. Konvansiyonel dizel yanmasında pilot püskürtme fazında yakıtın küçük bir kısmının silindir içerisine püskürtülerek esas olarak ön reaksiyonların başlaması ve belki de zayıf bir alevin oluşması hedeflenmektedir. PCCI yanma stratejisinde ise esas amaç ön reaksiyonları başlatmaktan ziyade TG sürecini uzatmak ve yanma başlayana kadar geçen sürede daha fazla yakıtı hava ile karıştırmak olduğu için ilk püskürtme fazında silindir içerisine daha büyük kütleli oranda yakıt püskürtülebilir. Bu sebeple, yani ilk fazda püskürtülen yakıt kütlelerinin az olmayışı sebebiyle, bu püskürtme fazına pilot püskürtme demekten kaçınılmış ve ön püskürtme olarak adlandırılmıştır. Ön püskürtme fazında yakıtın kütlece %20, %30

ve %40'ı silindir içersine sevk edilerek yüksek dereceli ön karışım oranlarının yaratılması hedeflenmiştir. Ön püskürtme avansı 35° KMA, 45° KMA ve 55° KMA olarak üç farklı değer almıştır. Ana püskürtme avansı ise 10° KMA ve 20° KMA değerindedir. Püskürtmeyi fazlara bölmenin karışım karakteri açısından sağlayacağı yarar açısından iki püskürtme fazı arasında belli bir faz açısı olması gerektiği göz önünde bulundurularak ana püskürtme avansı daha fazla artırılmamıştır.

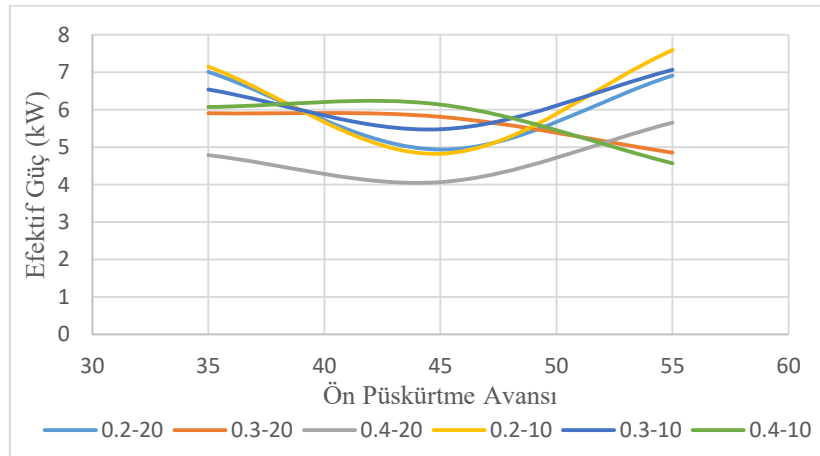
3.8.1 Motor Efektif Güç Değerlerinin İncelenmesi

Şekil 3.46 çift fazda yakıt püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak efektif motor gücü değerlerini göstermektedir. Şekil 3.46'daki verilere bakıldığında eşit miktarda yakıtın farklı zamanlarda ve farklı ön püskürtme oranlarında püskürtülmesi ile motor gücünde ciddi farklılıklar ortaya çıkmıştır. Belirlenen çalışma alanında söz konusu değişimler ile efektif motor gücü 7,59 kW ile 4,06 kW arasında değerler almıştır. Apsiste görülen ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak tüm deney noktalarında eş eğilim gözlemlenmemiştir. Ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak bazı noktalarda efektif güç değerinde düşüş gözlemlenirken bazı noktalarda da efektif motor gücünde artış ortaya çıkmıştır. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranı eğrisi incelendiğinde ön püskürtme avansının 35° KMA değerinden 45° KMA değerine artışıyla efektif güç değerinde düşüş ortaya çıkmıştır. Bu esnada bir miktar düşüş beklenen bir durum olup 7,01 kW olan efektif güç değeri 4,93 kW'ye gerilemiştir. Burada ortaya çıkan gerilemenin, yakıtın belli bir bölümünün daha erken yanma odasına sokulması ve bu yakıtın yanma odası içerisinde daha iyi bir yayılım gerçekleştirmesi neticesinde, yanma merkezleri civarında alev hızları ciddi değişkenlik göstermese de yanmanın devam eden sürecinde fakir karışım cephelerinin artış sergilemesinden kaynaklandığı düşünülebilir. Böylelikle yanmanın devam eden süreci daha düşük oksidasyon hızlarıyla tamamlanmış ve efektif güç düşüş sergilemiş olacaktır. Fakat sonrasında ön püskürtme avansının daha da artarak 55° KMA'ya gelişinde efektif güç değerinde bir miktar artış ortaya çıkmıştır. Çalışma sonuçları itibariyle bu açıdan Jung vd. [157] sonuçları ile benzerlik taşımaktadır. Burada ortaya çıkan artış ilk bakışta beklenen bir durum olmayıp termodinamik model çalışmasında elde edilecek olan TG, yanma süreci, yanma başlangıcındaki sıcaklık değeri, %50'lik

kütlesel yanma kesri ve ısı açığa çıkış hızı gibi verilerden faydalanarak bir açıklama yapmak mümkündür. Çünkü sadece efektif güç verilerinden yola çıkarak yapılacak tahminler atomizasyon ve karışım oluşumu prosesinin farklılık barındırmasına bağlı olarak ortaya konabilir. Bu yolla iki farklı hipotez kurmak mümkündür. Bunlardan birincisi yakıt zerreciklerinin düşük sıcaklık nedeniyle ilk etapta damlacık kararlılıklarını koruması ve karışım oluşumunun daha geç başlamasıdır. Fakat bu durumda 45° KMA ön püskürtme avansında ortaya çıkan termodinamik koşulların belli süre sonra 55° KMA ön püskürtme avansında da yaşanacak olması bu hipotezin güçlü bir sav olmadığı kanaatini doğurmaktadır. İkinci hipotez ise piston kafası ile yakıt zerreciklerinin etkileşimi üzerine kurulabilir. Ön püskürtme avansı arttıkça yakıt daha düşük basınç, sıcaklık ve daha düşük türbülans seviyeli ortama giriş yapmaktadır. Bu şartlarda yakıt zerreciklerinin stagnasyon derinliği artış sergilemektedir. 45° KMA ön püskürtme avansında stagnasyon derinliği ve pistonun geometrik konumlanması arasında kurulan etkileşimde yakıtın bir kısmının piston üst yüzeyine çarparak yanmaya katılamadığı ve güçte düşüş yaşanmasına yol açtığı düşünülebilir. Fakat 55° KMA ön püskürtme şartında her ne kadar püskürtme yapılan ortamdaki fiziksel koşullar basınç, sıcaklık ve Reynolds sayısı (türbülans seviyesi ölçütü olarak) bakımından daha düşük değerler olsa da enjektör ve piston kafası arasındaki mesafenin artışı sebebiyle yakıtın stagne olabildiği ve piston üst yüzey ıslatma eğiliminin daha makul seviyede kaldığı düşünülebilir. Bu hipotezin az önce bahsedilen ilk hipoteze göre daha makul bir çıkarım olduğunu söylemek mümkündür. Aynı ana püskürtme avansında ön karışım oranının %30'a çıktığında, yani 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranı şartında ön püskürtme avansı arttıkça başlangıçta belli belirsiz, ardından ise gözle görülebilir düşüş ortaya çıkmıştır. Bu şartta 35° KMA ön püskürtme avansında 5,90 kW olan efektif güç değeri 45° KMA ön püskürtme avansında 5,80 kW'ya 55° KMA ön püskürtme avansında ise 4,85 kW'ye gerilemiştir. Az önceki duruma kıyasla ortaya çıkan değişim eğilimlerinin farklılık gösterdiği görülmekte ve 55° KMA'da daha düşük efektif güç çıkışının ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Bu şartlarda 35° KMA püskürtme avansında ve %30 ön püskürtme şartında, ön püskürtme sırasında yanma odasına giren yakıtın %20 ön püskürtme şartına göre daha erken bir zamanda yanmayı başlatmış olması az önce belirtilen ikinci hipotezin geçerliliği açısından bir zorunluluktur. Bu da çalışmanın ilerleyen kısımlarında değinildiği üzere, TG süreçlerinin incelenmesiyle anlaşılabacaktır. Aynı ana püskürtme avansı olan 20°

KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karışım oranında ise 35° KMA ön püskürtme avansında 4,79 kW, 45° KMA ön püskürtme avansında 4,06 kW ve 55° KMA ön püskürtme avansında 5,65 kW efektif güç elde edilmiştir. Bu seri değişim eğilimleri itibariyle %20 ön karışım oranını takip etmektedir. Bu durum ön püskürtme kütlelerinin artışı neticesinde silindir içerisinde çekilecek ısıнын artış göstermesi ve TG'nin %30 ön karışım oranı şartına göre artmasıyla açıklanabilir. Bu yorumların geçerliliği TG sürelerinde artışı zorunlu kılmaktadır ve ilgili değerlendirme TG incelemesi altında verilmiştir.

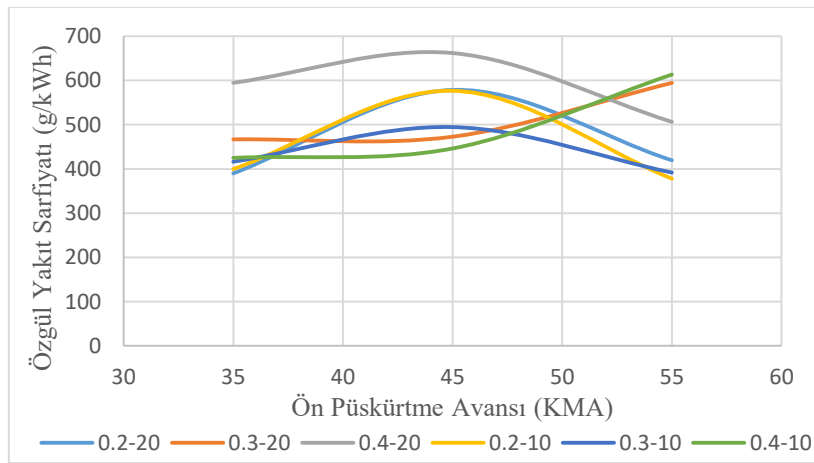
10° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında ortaya çıkan değişim eğilimleri 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında ortaya çıkan eğilimler ile uyum içerisinde. Bu şartlarda ve 35° KMA ön püskürtme avansında 7,15 kW, 45° KMA ön püskürtme avansında 4,82 kW ve 55° KMA ön püskürtme avansında da 7,59 kW efektif güç ortaya çıkmıştır. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında da ortaya çıkan sonuçlar benzer niteliktedir. 35° KMA ön püskürtme avansında 6,54 kW, 45° KMA ön püskürtme avansında 5,47 kW ve 55° KMA ön püskürtme avansında 7,06 kW efektif güç değeri ortaya çıkmıştır. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karışım oranında ise ön püskürtme avansı arttıkça yani ön püskürtme ve ana püskürtme arasındaki faz açısı arttıkça efektif güç değerinde sırasıyla 6,27 kW, 6,13 kW ve 4,56 kW efektif güç ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.46 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı efektif güç değeri değişimi

3.8.2 Özgöl Yakıt Sarfıyatı Değerlerinin İncelenmesi

Şekil 3.47 çift fazda püskürtme şartında elde edilen özgöl yakıt sarfıyatı değerlerini göstermektedir. Özgöl yakıt sarfıyatı eğrileri püskürtülen yakıt miktarının ve motor hızının sabit olması sebebiyle, efektif güç değerlerinin tam tersi davranış göstermektedir. Fakat birim güç başına ilgili işletme şartında ortaya çıkan yakıt tüketim değerlerinin bilinmesi, ilgili işletme şartının uygulanabilirliği hakkında bilgi verecek olması sebebiyle çalışmaya dahil edilmiştir. Ön püskürtme avansının değişimi ile güçte meydana gelen farklılıklar özgöl yakıt sarfıyatı eğrilerini de şekillendirmiştir. Çalışma bölgesinde elde edilen özgöl yakıt sarfıyatı değerleri 378 g/kWh ile 661 g/kWh arasında değişen değerler almıştır. Ön püskürtme avansının değişimi sonucu ortaya çıkan özgöl yakıt sarfıyatı değerleri, tek fazda yakıt püskürtme şartında elde edilen verilere göre daha büyük farklar ortaya koymuştur. Motorun doğal emişli olarak ve düşük yük şartlarında çalıştığı göz önünde bulundurulduğunda düşük ana püskürtme avansı olarak seçilen 10° KMA ana püskürtme avansında, %40 karışım oranında ve nispeten küçük ön püskürtme avanslarında kabul edilebilir sonuçlar ortaya çıktığı görülmektedir. Benzer şekilde %20 ön püskürtme oranında ve 20° KMA ana püskürtme avansında yer yer kabul edilebilir sonuçlar ortaya çıkmıştır. Fakat %40 ön püskürtme oranı ve 10° KMA ana püskürtme avansı ile %30 ön püskürtme ve 20° KMA ana püskürtme avansında, ön püskürtme avansı arttıkça elde edilen sonuçlar kabul edilebilir olmanın ötesine geçmiştir. %40 ön püskürtme ve 20° KMA ana püskürtme avansı için ise genel olarak oldukça yüksek özgöl yakıt sarfıyatı değerleri görülmüştür.



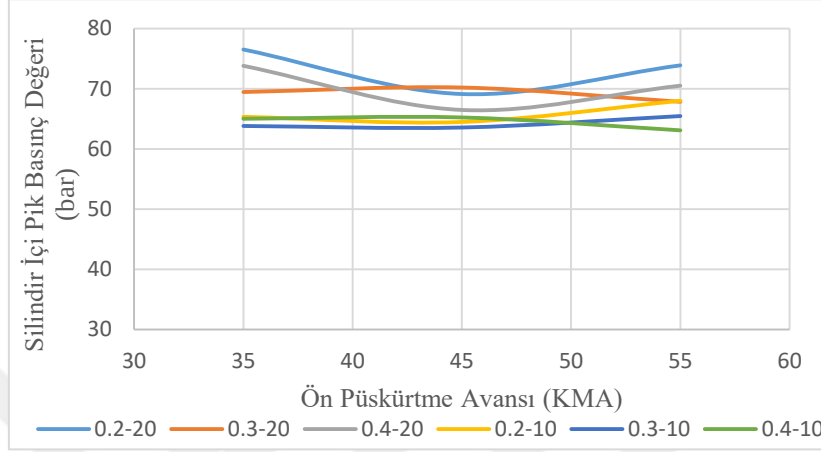
Şekil 3.47 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgöl yakıt sarfıyatı değerleri

3.8.3 Silindir İçi Maksimum Basınç Değerlerinin İncelenmesi

Şekil 3.48 belli bir ön püskürtme oranı ve ana püskürtme avansında ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak elde edilen silindir içi pik basınç değerlerini ortaya koymaktadır. Tek fazda püskürtme şartında elde edilen pik basınç değerlerine göre, çift fazda daha düşük silindir içi pik basınç değerleri ortaya çıkmıştır. Çift fazda püskürtme örneklemelerinde silindir içi pik basınç değeri 63,04 bar ile 76,52 bar aralığında değerler almıştır. Ana püskürtme avansının 10° KMA olduğu şartlarda silindir içi pik basınç değerlerinin 20° KMA ana püskürtme avansında elde edilen pik basınç değerlerine göre daha düşük çıktığı görülmektedir. 10° KMA ana püskürtme avansında elde edilen pik basınç değerlerinin değişim eğilimi, genel olarak aynı işletme parametrelerindeki efektif güç değişimlerine paralellik göstermektedir. Ana püskürtme avansının 20° KMA olduğu durumda %20 ön püskürtme oranı ile %40 ön püskürtme oranı, ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak aynı değişim eğilimlerini sergilemektedir. %20 ön püskürtme oranında ön püskürtme avansı değişimine bağlı olarak daha yüksek pik basınç değerleri elde edilmiştir. %30 ön püskürtme oranında ise değişim gradyanı küçük değerler almak üzere tam tersi eğilim ortaya çıkmıştır. Ana püskürtme avansının 10° KMA olduğu durumda %20 ve %30 ön püskürtme oranlarında, ön püskürtme avansı arttıkça silindir içi pik basınç değeri düzenli artış sergilemektedir. Ancak bu bölgelerdeki efektif güç eğrileri ile maksimum silindir içi basınç eğrileri arasında senkron bir ilişki saptanamamıştır. Bu durumun sebebi pik basınç değerinin sayısal karşılığından ziyade nerede elde edildiği ve bu basınç bölgesinin yaklaşık olarak ne kadar korunabildiğinin daha büyük öneme sahip olması ile açıklanabilir.

Araştırma alanı içerisinde ortaya çıkan pik basınç değerlerinin de sunulması yapılan kıyaslamalar açısından daha sağlıklı olacaktır. 20° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında 76,52 bar, 45° KMA ön püskürtme avansında 69,12 bar ve 55° KMA ön püskürtme avansında 73,89 bar silindir için pik basınç değeri elde edilmiştir. Ön püskürtme avansının artışıyla 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında sırasıyla 69,46 bar, 70,20 bar ve 67,92 bar silindir içi pik basınç gözlemlenmiştir. Bu değerler 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karışım oranında 73,81 bar, 66,47 bar ve 70,51 bar olarak elde edilmiştir. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında

elde edilen değerler ise sırasıyla 65,34 bar, 64,48 bar ve 68 bar değerindedir. Bu değer 10° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında 63,81 bar, 63,56 bar ve 65,46 bar olarak gözlemlenmiştir. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karışım oranında ise ilgili değerler 65,01 bar, 65,23 bar ve 63,09 bar olarak karşımıza çıkmıştır.



Şekil 3.48 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı silindir içi pik basınç değerleri

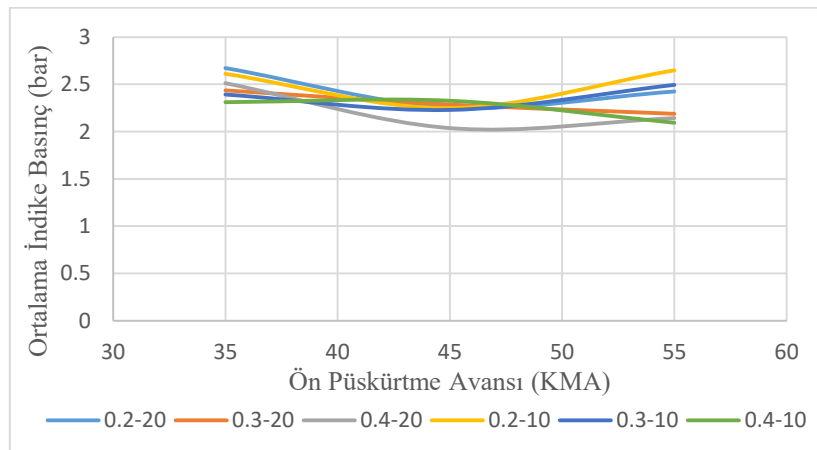
3.8.4 Ortalama İndike Basınç Değerlerinin İncelenmesi

Şekil 3.49 çift fazda deneysel çalışma bölgesinde OİB verilerini göstermektedir. OİB değerlerinin mekanik kayıplardan bağımsız oluşu ve salt silindir içi termodinamik şartlara göre ortaya çıkması sebebiyle şu ana kadar incelenen performans parametrelerinden farklı ilişkiler ortaya koymaktadır. OİB verileri incelendiğinde ilk göze çarpan çıktı, diğer performans çıktılarında oldukça ayrık duran ve diğer verilerden kopuk davranış gösteren 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranı şartında efektif performans parametresi çıktılarına göre o denli ayrık sonuçların ortaya çıkmamış olmasıdır. OİB değerlerinin ön püskürtme oranı ve ana püskürtme avansının sabit tutularak ön püskürtme avansının değişimi ile ortaya çıkan değişim eğilimlerin diğer performans parametreleri ile genel olarak aynı eğilimleri ortaya koyduğu görülmüştür. Fakat bunların değişim gradyanları farklılıklar barındırmaktadır.

Bu kısımda ortaya çıkan değişimleri tetikleyen mekanizma efektif güç değerlerinde ortaya çıkan değişimleri ortaya çıkaran mekanizma ile aynıdır. İki parametre arasında mekanik kayıpların etkisi kadar bir fark bulunmaktadır. Fakat bu farklılık

herhangi bir değişim eğilimi değişikliğe yol açmamıştır. Bu sebeple benzer yorumlar bu kısım için de geçerliliğini korumaktadır.

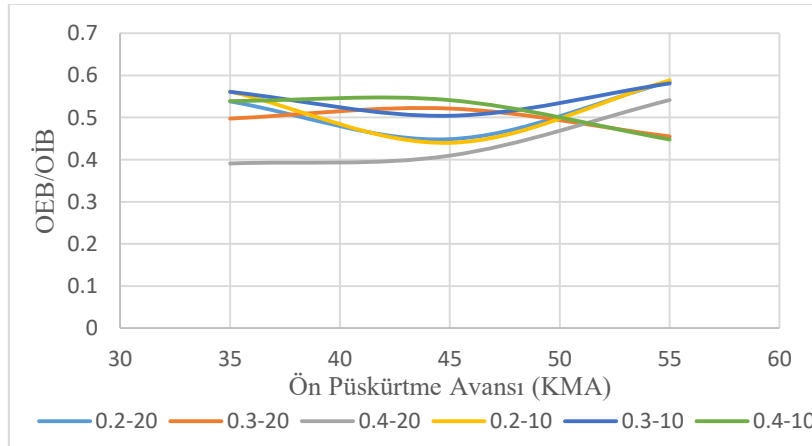
20° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında 2,67 bar OİB, 45° KMA ön püskürtme avansında 2,26 bar OİB ve 55° KMA ön püskürtme avansında da 2,42 bar OİB gözlemlenmiştir. 20° KMA ana püskürtme avansı, %30 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında 2,44 bar OİB, 45° KMA ön püskürtme avansında 2,29 bar OİB ve 55° KMA ön püskürtme avansında da 2,19 bar OİB ortaya çıkmıştır. 20° KMA ana püskürtme avansı, %40 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında 2,51 bar OİB, 45° KMA ön püskürtme avansında 2,04 bar OİB ve 55° KMA ön püskürtme avansında da 2,14 bar OİB elde edilmiştir. Bu değerlerden görüleceği üzere ön püskürtme oranının artışına bağlı olarak belirgin bir değişim eğilimi ortaya çıkmamıştır. 10° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında 2,61 bar OİB, 45° KMA ön püskürtme avansında 2,25 bar OİB ve 55° KMA ön püskürtme avansında da 2,65 bar OİB gözlemlenmiştir. 20° KMA ana püskürtme avansı, %30 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında 2,39 bar OİB, 45° KMA ön püskürtme avansında 2,23 bar OİB ve 55° KMA ön püskürtme avansında da 2,49 bar OİB ortaya çıkmıştır. 20° KMA ana püskürtme avansı, %40 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında 2,31 bar OİB, 45° KMA ön püskürtme avansında 2,33 bar OİB ve 55° KMA ön püskürtme avansında da 2,09 bar OİB elde edilmiştir.



Şekil 3.49 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimiyle ortalama indike basınç değişimi

3.4.5 Mekanik Verim Açısından İrdeleme

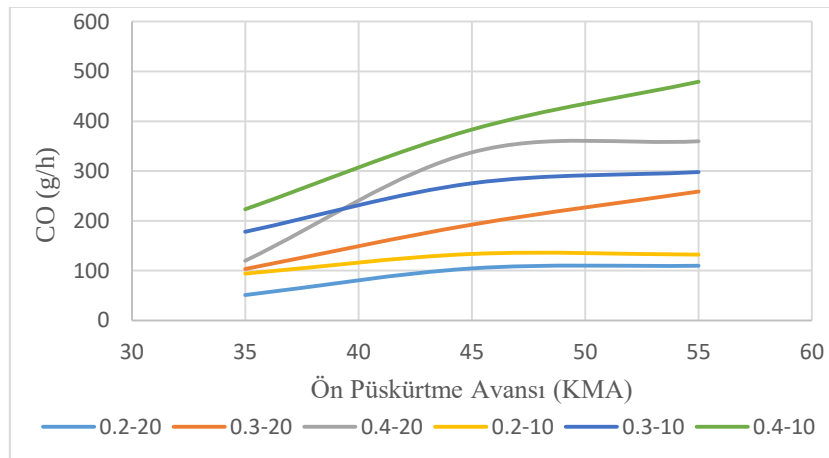
Çift fazda yapılan deneyler sonucunda elde edilen OEB/OİB değerleri Şekil 3.50 üzerinde görülmektedir. OEB'nin OİB'ye oranını mekanik verimi vermektedir. Yapılan deneylerde, püskürtülen yakıt kütlesi daha önceden de belirtildiği üzere 15 mg/strok olarak belirlenmiştir. Motorun genel çalışma aralığına bakıldığında, püskürtülen yakıt kütlesi oldukça düşük yük bölgesine denk gelmektedir. Bu yakıt enjeksiyon miktarında hava fazlalık katsayısının 4,5 civarlarındadır. Bu sebeple OEB/OİB oranının düşük çıkması beklenen bir durumdur. Ana püskürtme avansının 10° KMA, ön püskürtme oranının ise %20 ve %30 olduğu şartlarda 35° KMA ön püskürte avansından 45° KMA ön püskürtme avansına kadar azalış, 45° KMA sonrasında yeniden artış göze çarpmaktadır. %40 ön püskürtme oranında ise 45° KMA ön püskürtme avansına kadar yavaş da olsa mekanik verimde iyileşme ortaya çıkmış, ardından ise mekanik verim kötüleşmektedir. Ana püskürtme avansının 20° KMA değerinde sabit tutulduğu şartta, %20 ön püskürtme oranı ve ana püskürtmenin 10° KMA değerinde yapıldığı şarta yakın eğilimler ortaya çıkmıştır. %30 ön püskürtme oranında iki ön püskürtme avans değeri arasındaki mekanik verim farkı diğer verilere göre daha yüksektir. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranı şartlarında, efektif güç değerlerinin aksine, uç ön püskürtme avans değerlerinde dramatik kötüleşmeler ortaya çıkmamıştır. Fakat 35° KMA ön püskürtme avansında oldukça düşük mekanik verim değerleri ortaya çıkmış, ardından daha da artan ön püskürtme avanslarında mekanik verim tekrar artış eğilimine girmiştir.



Şekil 3.50 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı OEB/OİB değerleri

3.8.6 CO Emisyonlarının İncelenmesi

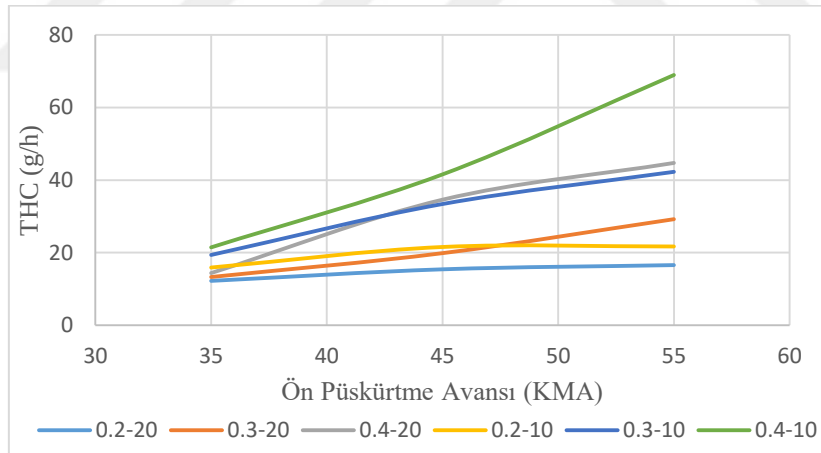
Şekil 3.51 çift fazda püskürtme yapılan deneysel veri alanında belirli bir ön püskürtme oranı ve ana püskürtme avansına bağlı olarak, farklı ön püskürtme avanslarının g/h cinsinden CO emisyonları üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 3.51 üzerinden de görüldüğü üzere her bir ön püskürtme oranı ve ana püskürtme avansı veri setleri için ön püskürtme avansı arttıkça CO emisyonları farklı seviyelerde artış göstermiştir. Tüm veriler arasında 45° KMA ön püskürtme avansı sonrasında 55° KMA ön püskürtme avansına gidildiğinde %20 ön püskürtme oranı örneklemelerinde CO emisyonu yaklaşık sabit seyretmiş, oldukça sınırlı artış göstermiştir. Geri kalan tüm verilerde ön püskürtme avansı arttıkça CO emisyonlarında gözle görülür artış gözlemlenmiştir. %40 ön püskürtme oranında ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak değişim oranı en yüksek seviyede çıkmış, %20 ön püskürtme oranında ise en düşük seviyededir. Ana püskürtme avansı açısından inceleme yapıldığında ise 20° KMA ana püskürtme avansında ve eş ön püskürtme yüzdelerinde elde edilen CO emisyonlarının, 10° KMA ana püskürtme avansına göre daha düşük CO emisyonu ortaya koyduğu görülmüştür. Bu durum 20° KMA ana püskürtme avansında yanmanın konvansiyonel şarta daha yakın karakterde olduğu, 10° KMA ana püskürtme avansında elde edilen değerlerin daha yüksek oluşunun ise hem yanmanın genişlemeye kaymasından hem de iki püskürtme prosesi arasındaki faz açısının artışıyla birlikte yanma odası içerisinde daha seyreltik ve fakir bir makro karışım oluşmasından ve buna bağlı olarak yanma sıcaklıklarında yaşanan düşüşten kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 3.51 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı CO emisyonu değerleri

3.8.7 THC Emisyonlarının İncelenmesi

Şekil 3.52 çift fazlı püskürtme stratejisinde belirlenen ön püskürtme oranı ve ana püskürtme avansları için ön püskürtme avanslarının değişimine bağlı olarak g/h cinsinden THC emisyonlarını göstermektedir. THC emisyonlarının artış eğilimleri CO emisyonları ile benzerlik göstermektedir, fakat THC emisyonundaki artışta iki uç ön püskürtme avans değeri arasındaki artım oranı daha yüksek seviyededir. %20 ön püskürtme oranında elde edilen verilerde püskürtme avansına hassasiyet, diğer deney noktalarına göre ön püskürtme oranının daha düşük olmasının da etkisiyle, ciddi farklılık göstermemiştir. %30 ön püskürtme oranında ise 10° KMA ana püskürtme avansında, ön püskürtme avansının arttırılması ile ortaya çıkan artış, 20° KMA ana püskürtme avansında ortaya çıkan THC salımına göre belirgin şekilde yüksektir. %40 ön püskürtme oranında ise ön püskürtme avansı artışı ile ortaya çıkan THC emisyonu artışı 10° KMA ana püskürtme avansında kabul edilebilir sınırların çok üzerindeyken, 20° KMA ana püskürtme avansında ciddi bir artış olsa da diğer örneklemelerde olduğu gibi 10° KMA ana püskürtme avansında elde edilen verilere göre daha kabul seviyededir.



Şekil 3.52 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı THC emisyonu değerleri

3.8.8 NO_x Emisyonlarının İncelenmesi

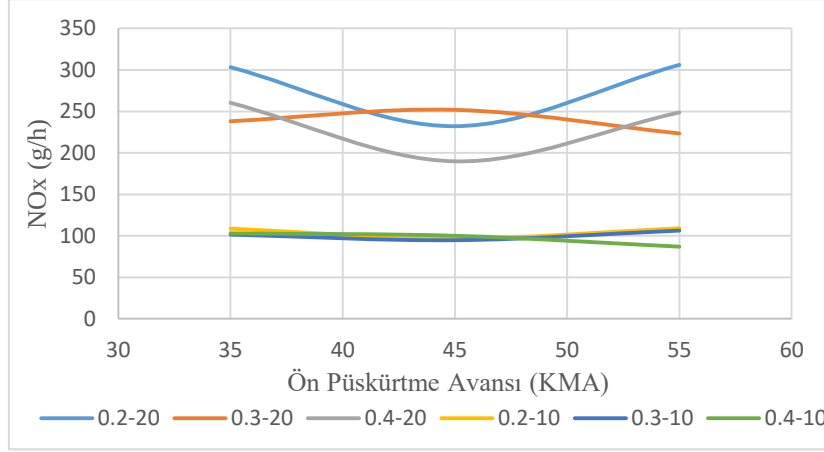
Şekil 3.53 çift fazda yakıt enjeksiyonu gerçekleştirildiği şartta belli bir ana püskürtme avansı ve ön püskürtme oranında, ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak NO_x emisyonlarını g/h biriminde gözler önüne sermektedir. Şekil 3.53 üzerinden de görüldüğü üzere CO ve THC emisyonlarından farklı olarak, ana püskürtme avansı tek başına NO_x emisyonları üzerinde oldukça belirgin farklılıklar

yaratmış ve iki farklı ana püskürtme avansı arasında hiçbir giriftliğe izin vermemiştir. Ana püskürtme avansının değişimi NO_x emisyonları kabaca iki kat ve üzerinde farklılık göstermiştir. 10° KMA ana püskürtme avansında, 20° KMA ana püskürtme avansına nazaran düşük NO_x emisyonları ortaya çıkmıştır. Şu ana kadar elde edilen verilerde 10° KMA ana püskürtme avansında görülen birçok performans ve emisyon parametresine bağlı olarak yanmanın genişlemeye kaydığı öngörüsü oluşmaktaydı, NO_x 'un da bu seviyelerde seyretmesi bu savı destekler niteliktedir.

Ana püskürtmenin 10° KMA püskürme avansında yapıldığı şartta ve %20 ön püskürtme oranında, ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak NO_x emisyonları yaklaşık olarak stabil kalmış, ön püskürtme avansı değişimine bağlı olarak oldukça sınırlı bir değişim ortaya çıkmıştır. Ön püskürtme avansının 45° KMA'dan 55° KMA'ya çıkışıyla oldukça sınırlı artış görülmüştür. Normal şartlarda ön püskürtme avansının artışıyla burada NO_x emisyonlarında düşüş yaşanması beklenmektedir. Fakat yanma esnasında ortaya çıkan şartlar nedeniyle burada küçük de olsa NO_x emisyonlarında artış görülmüştür. Bu durum efektif güç değerlerinde ön püskürtme avansının 45° KMA ile 55° KMA aralığında olduğunda elde edilen değerlerin değişim sebebine yönelik kurulan hipotezi destekler niteliktedir. İlgili seri içerisinde, 45° KMA ön püskürtme avansında az farkla da olsa en düşük NO_x emisyonlarının elde edilmesi yakıtın bir kısmının yanmaya katılamamasıyla açıklanabilir. %30 ön püskürtme oranında da %20 ön püskürtme oranına benzer bir eğilim ortaya çıkmıştır. Ön püskürtme oranının %40'a çıkmasıyla, ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak bir miktar NO_x emisyonunda düşüş ortaya çıkmıştır. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ön püskürtme avansının 35° KMA değerinden 55° KMA değerine gelişine kadar geçen aralıkta NO_x emisyonları %18 düşüş göstermiştir. Bu veri setinde ön püskürtme avansının artışı ile ön püskürtme oranına dahil olan yakıt, diğer ön püskürtme oranlarına göre kütle artışı neticesinde, daha büyük oranda buharlaşma ve ısınma ısını çekmesi sonucunda makro karışım iyileşmiş ve doldu heterojenite seviyesi düşüş sergilemiştir. Bu durum soğuk cephelerin azalmasına ortam hazırlamıştır. Aynı zamanda ana püskürtme fazında silindire sevk edilen yakıt miktarının da azalması sebebiyle yanma merkezleri civarındaki yüksek sıcaklık bölgesi azalmıştır. Buradan hareketle %20 ve %30 ön püskürtme şartlarında ve aynı ana püskürtme avansında, ön karışım oranının silindir

içerisinden çektiği ısıнын nispeten sınırlı kalması sebebiyle farklı ön püskürtme avans aralıklarında belirgin farklılıklar ortaya çıkmamıştır. Buna ilaveten ana püskürtmenin nispeten geç bir zamanda yapılması yanma odası sıcaklıklarının fazlaca artmasını engellemiş ve NO_x oluşumu büyük oranda baskılanmıştır. Bu savın doğruluğu ileriki kısımlarda sunulacak olan yanma odası pik sıcaklık değerleri ile karşılaştırıldıktan sonra güvenilirlik kazanacaktır. Gerçekten de bu şartlarda pik yanma sıcaklığı düşüş sergilemiştir.

Ana püskürtme avansının 20° KMA olduğu şartlarda elde edilen NO_x salımı değerleri, 10° KMA ana püskürtme avansında elde edilen değerler gibi birbirine yakın seyretmemiştir. 20° KMA ana püskürtme avansı için, 10° KMA ana püskürtme avansının aksine, değişen ön püskürtme avanslarının belirleyici rol oynadığı görülmüştür. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak 35° KMA ön püskürtme avansından 45° KMA ön püskürtme avansına kadar düşüş, ardından artış gözlemlenmiştir. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında ise farklı ön püskürtme avansı değerlerine göre ortaya çıkan değişim gradyanları, diğer 20° KMA ana püskürtme avansı verilerine göre nispeten düşük seyretmiştir. %30 ön püskürtme şartında 35° KMA ve 45° KMA arasında sınırlı artış gözlemlenirken, sonrasında düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında NO_x emisyonunun değişim eğilimi %20 ön püskürtme oranı ile benzerlik göstermektedir. Bu sonuçlarda elde ettiğimiz değişim eğilimleri efektif güç değerlerinin değişim eğilimleri ve OİB değerleri ile birebir uyum içerisindedir. Sağlıklı bir yanmada 45° KMA ön püskürtme avansında böyle bir eğilimin %20 ve %40 ön karışım oranlarında ortaya çıkmaması ve %30 ön karışım oranındaki değişimlere benzer eğilimlerin elde edilmesi gerekirdi. Fakat efektif güç değerlerinin değerlendirilmesi esnasında ortaya konan hipotez burada kendini güçlendirmektedir. Bu bölgedeki düşüşün sebebi, silindir içerisine püskürtülen yakıtın stagne olamayarak piston üst yüzeyine çarpmış ve yanmaya sağlıklı bir şekilde katılamamış olması olarak değerlendirilebilir. Bunun neticesinde de yanma sıcaklıkları daha düşük seviyede kalmış ve NO_x emisyonları daha küçük değerlerde seyretmiştir. Bu sebeple burada elde edilen NO_x düşüşü, gücün de bu durumdan olumsuz etkilenmesi sebebiyle kazanç olarak değerlendirilmemelidir.



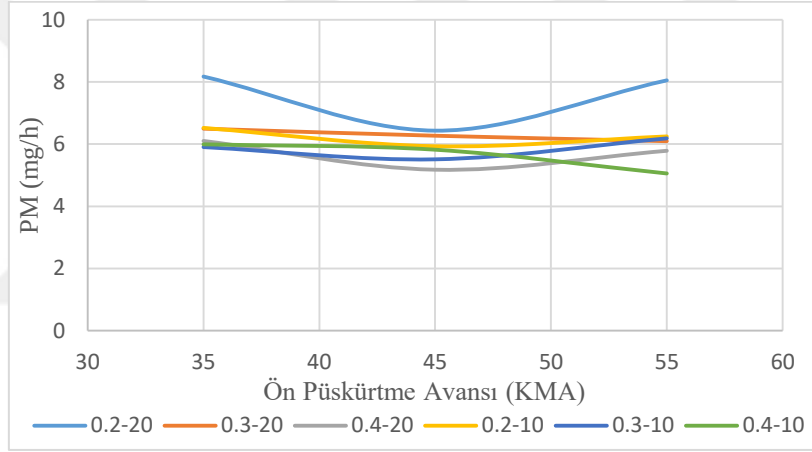
Şekil 3.53 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı NO_x emisyonu değerleri

3.8.9 PM Emisyonlarının İncelenmesi

Çift kademede püskürtme yapıldığı şartlarda elde edilen verilere bakıldığında PM emisyonlarında tek fazda yapılan püskürtmeye göre ciddi seviyede düşüş elde edildiği görülmektedir. Şekil 3.54 çift fazda yapılan deneysel çalışmalarda ortaya çıkan PM emisyon değerlerini mg/strok biriminde ortaya koymaktadır. Ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak genel hatlarıyla PM emisyonlarında düşüş ortaya çıktığı söylenebilir. Ancak bazı örneklemelerde ön püskürtme avansının 45° KMA değerinden 55° KMA değerine yükselmesiyle artış ortaya çıkmıştır. Genel eğilim olarak, ön püskürtme avansı arttıkça PM emisyonlarında düşüş beklenen bir durumdur ve ana püskürtme ile ön püskürtme arasındaki faz açısının artışına bağlı olarak yakıt ile havanın daha iyi karışması neticesinde bu düşüş ortaya çıkmıştır. 45° KMA ön püskürtme avansından 55° KMA ön püskürtme avansına geçişte yer yer gözlemlenen artışlar ise esas olarak yanmanın gerçekleştiği şartlardan ziyade yanmaya katılabilen yakıt miktarındaki değişime bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Bu şartlarda yakıtın piston üst yüzeyine çarpması sonucu yanmaya katılamaması (impingement) sorunu ortaya çıkmış ve yanmaya katılan yakıt miktarı, dolayısıyla da lokal oksijen açlığı çeken yakıt miktarı azalmıştır. Ön püskürtme kütlelerinin değişimine bağlı olarak yer yer gözlemlenen bu eğilim burada görülen düşüşün temel sebebi olarak değerlendirilmiştir.

Ön karışım oranının artması genel bir eğilim olarak PM emisyonlarını düşürücü etki göstermiştir. Ön karışım oranının artması neticesinde yanma başlayana kadar daha fazla yakıt hava ile karışmış ve lokal oksijen yetersizlikleri azalmıştır. Bunun

neticesinde PM değerleri düşüş sergilemiştir. %20 ön karışım oranı ve 20° KMA ana püskürtme avansında, ön püskürtme avansının 45° KMA'ya ulaşınca kadar geçen sürede ciddi seviyede PM düşüşü ortaya çıkmıştır. Devamında ise ön püskürtme avansının 45° KMA'dan 55° KMA'ya geçilmesine kadar geçen sürede PM emisyonları tekrar artış eğilimine girmiştir. Sadece ön püskürtme avansının değişimi neticesinde ortaya çıkan bu artış ilgili ön püskürtme avans değerinde ve kütleinde, bir önceki paragrafta belirtilen hususlara ek olarak, yakıt ve havanın karışım oluşturabilmek adına yetersiz koşullar barındırmasına işaret etmektedir. Ana püskürtme avansının 10° KMA değerinde yapıldığı şartlarda ortaya çıkan PM emisyonlarının, yani iki püskürtme avansı arasındaki faz açısının arttığı koşullarda ortaya çıkan PM emisyonlarının diğer işletme parametrelerinden daha az etkilendiği ve birbirine daha yakın değerler aldığı görülmektedir.



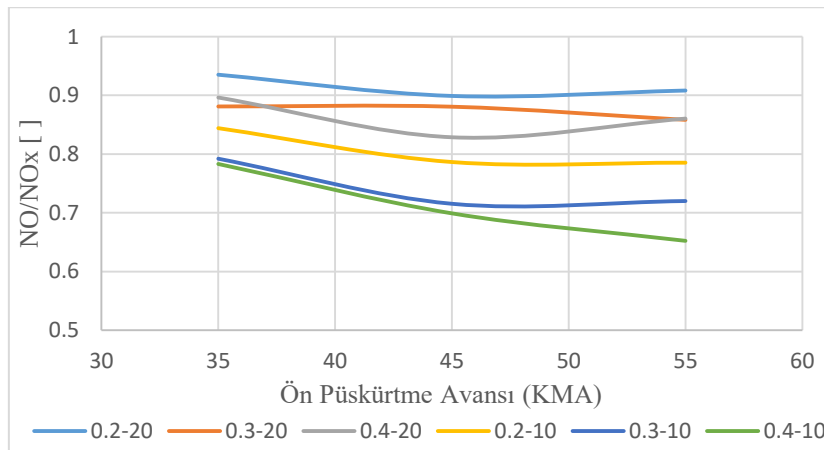
Şekil 3.54 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı PM emisyonu değerleri

3.8.10 NO/NO_x Oranlarının İncelenmesi

Dizel motorlarında NO₂/NO_x veya NO/NO_x oranı büyük önem taşımaktadır. Çünkü egzoz hattında bulunan NO_x indirgeme ünitelerinin dönüşüm verimleri NO_x kompozisyonuna sıkı sıkıya bağlıdır. Daha önce de bahsedildiği üzere deneysel çalışma esnasında NO₂ emisyonları ayrıca ölçülmemiştir. Fakat toplam NO_x emisyonu ve NO emisyonu değeri bilinmektedir. İz miktarda bulunabilecek ve birbirine dönüşebilecek diğer komponentlerin yarattığı belirsizlikten kaçınmak adına çalışmada NO/NO_x oranları üzerinden değerlendirme yapılacaktır.

Tek fazda yürütülen deneysel çalışmalarda NO/NO_x değerlerinde genel olarak belirli eğilimler gözlemlenmiş olsa da yer yer girift ilişkiler ortaya da çıkmıştı. Çift

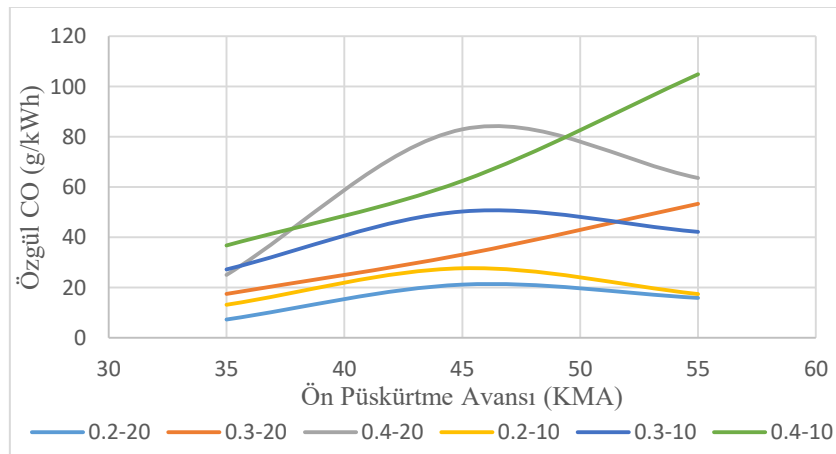
fazda ortaya konan deneylerde ise ortaya çıkan sonuçlar daha net eğilimler göstermektedir. Şekil 3.55 NO/NO_x değerlerini göstermektedir. Konvansiyonel çalışma bölgesinde dizel egzozunda ortaya çıkan toplam NO_x'un %5 ile %20 aralığında bir oranda NO₂ olabileceği bilinmektedir. Araştırma alanında NO_x kompozisyonun %65,2 ile %94,5'i NO'dan oluşmaktadır. Yani pratik bir yaklaşımla toplam NO_x içerisindeki NO₂ oranı %5,5 ile %34,8 arasında değişmektedir. Burada 20° KMA ana püskürtme avansında oluşan NO/NO_x oranı daha yüksektir. Bu da karışım oluşumuna ayrılan süre uzadıkça NO₂/NO_x oranının artış göstereceği teorisini destekler niteliktedir. Ön püskürtme avansı artış sergiledikçe de NO/NO_x oranı düşüş sergilemiş ve NO₂/NO_x oranı artmıştır. Burada ortaya çıkan tek istisnai durum 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranı altında ön püskürtme avansının 45° KMA'dan 55° KMA'ya arttırıldığı şarttır. Büyük ön püskürtme avansı aralıklarında hem ana püskürtme avansının hem de ön karışım oranının etkisi rahatlıkla görülmektedir. 55° KMA ön püskürtme avans değerinde en düşük NO₂/NO oranı %20 ön püskürtme oranı ve 20° KMA ana püskürtme avans değerindeyken, bunu sırasıyla %30 ön püskürtme oranı ve %40 ön püskürtme oranının izlediği rahatlıkla söylenebilir. Buna ilaveten 10° KMA ana püskürtme avansı değerinde oluşan NO₂/NO_x oranlarının da aynı ön püskürtme oranları ile artış sergilediği söylenebilir. Gerek ön karışım oranı gerekse de ön püskürtme avans verileri göz önünde bulundurulduğunda PCCI stratejisi baskın hale geldikçe NO/NO_x oranının düşüş sergileyip, NO₂/NO_x oranının artış gösterdiği bu verilere bakarak rahatlıkla söylenebilmektedir.



Şekil 3.55 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı NO/NO_x oranları

3.8.11 Özgöl CO Emisyonlarının İncelenmesi

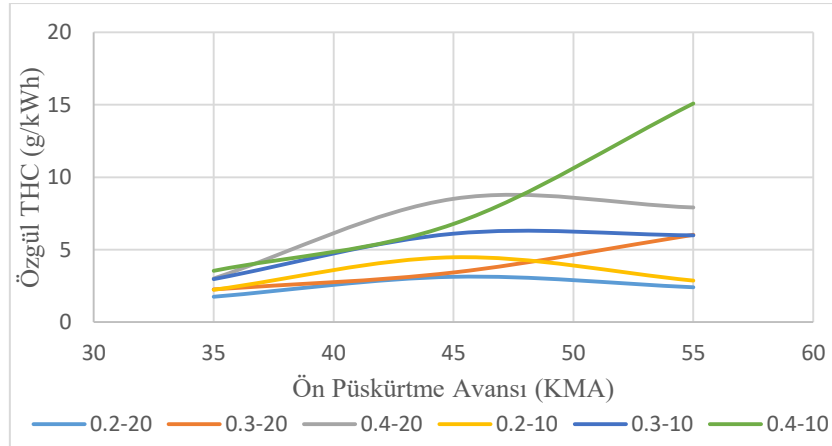
Şekil 3.56 çift fazda püskürtme şartında açığa çıkan özgöl CO emisyonları hakkında bilgi vermektedir. Ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak g/h cinsinden CO emisyonları düzenli artış göstermiştir. Fakat bazı ön püskürtme oranı ve ön püskürtme avanslarında, ön püskürtme avansının artışı ile efektif motor gücünde ortaya çıkan artışlar, özgöl CO emisyonlarının yüksek ön püskürtme avanslarında yer yer düşmesine yol açmıştır. Ön karışım oranının artışı, genel olarak özgöl CO emisyonlarını arttırıcı etki göstermiştir. Bunun temel sebebi ön püskürtme fazında silindir içerisine giren yakıtın yanma başlayana kadar geniş bir hacme yayılması ve buralarda fakir karışım yaratmasıdır. Yanma başladıktan sonra ise bu bölgelerde oluşan zayıf alev, karbonun oksidasyon reaksiyonlarını yer yer tam olarak tamamlayamamasına yol açmış ve özgöl CO emisyonları tırmanışa geçmiştir. Bu sebeple ana püskürme avansından bağımsız olarak en küçük ön karışım oranı, en düşük özgöl CO emisyonunu ortaya koymuş, en büyük ön karışım oranında ise özgöl CO emisyonları en yüksek seviyede kaydedilmiştir. Ön karışım oranının özgöl CO emisyonları üzerindeki belirleyici etkisi ana püskürtme avansına göre daha belirleyici bir rol oynamıştır. Öyle ki grafikte elde edilen eğriler üzerinde ana püskürtme avansının düşüşüne bağlı olarak özgöl CO emisyonlarında bir miktar düşüş yaşanmıştır. Fakat esas belirleyici faktör ön püskürtme oranıdır. Ön püskürtme avansının değişiminden yanmanın fazlaca etkilenmesi ve güç değerleri üzerinde karmaşık çıktılar yaratması bu kısımda ön püskürtme avansı arttıkça net bir eğilim görmememize yol açmıştır.



Şekil 3.56 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgöl CO emisyonu değerleri

3.8.12 Özgöl THC Emisyonlarının İncelenmesi

Şekil 3.57 belli bir ön püskürtme oranı ve ana püskürtme avansında, ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak özgöl THC emisyonlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar özgöl CO emisyonları ile büyük benzerlik göstermektedir. Özgöl THC emisyonlarının ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak ortaya koyduğu değişim gradyanı özgöl CO emisyonundaki değişime göre bir miktar daha büyük değerler almıştır. %20 ön püskürtme oranında nispeten kabul edilebilir özgöl CO artışları ile karşılaşmıştır. %30 ön püskürtme oranında ise daha büyük değişimler ortaya çıkmış, özellikle 10° KMA ana püskürtme avansında bu eğilim daha da artmıştır. %40 ön püskürtme oranı şartında ise ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak daha sert bir değişim eğilimi ortaya çıkmıştır. 45° KMA ön püskürtme avansından 55° KMA ön püskürtme avansına geçildiğinde bir yandan bu aralıkta g/h cinsinden artışların tek fazda olduğu kadar dramatik değişim oranları göstermemesi, daha önce açıklandığı üzere harici bir mekanizmanın harekete geçmesiyle güçte yer yer artış görülmesi sebebiyle özgöl THC emisyonunda bazı verilerde düşüş ortaya çıkmıştır. Bu eğilimin haricinde Özgöl THC emisyonu davranışı genel eğilim olarak hem tek faz verilerine hem de özgöl CO verilerine daha önce açıklanan gerekçelerle benzerlik göstermektedir.



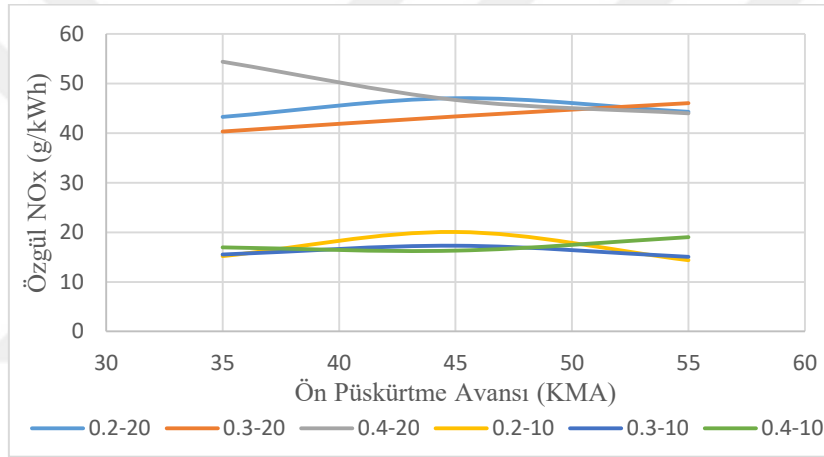
Şekil 3.57 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgöl THC emisyonu değerleri

3.8.13 Özgöl NO_x Emisyonlarının İncelenmesi

Belirli bir ön püskürtme oranı ve ana püskürtme avansında, ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak özgöl NO_x emisyonları Şekil 3.58 üzerinde gözükmemektedir.

10° KMA ana püskürtme avansında elde edilen verilerde ön püskürtme oranı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ciddi değişimler ortaya çıkmamış, nispeten daha kabul ve edilebilir değişimler gözlemlenmiştir. Buna mukabil 20° KMA ana püskürtme avansında özgül NO_x emisyonları hem ön püskürtme oranının hem de ön püskürtme avansının kuvvetli bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum 35° KMA ve 45° KMA ön püskürtme avansında son derece belirginken 55° KMA ön püskürtme avansında nispeten yakın değerler elde edilmiştir. Şekil 3.58’de ortaya çıkan eğriler Şekil 3.53 ile, yani g/h cinsinden NO_x salımları ile karşılaştırıldığında 10° KMA ana püskürtme avansında, ön püskürtme oranı ve ön püskürtme avansına bağlı olarak ciddi farklılıklar barındırmazken, 20° KMA ana püskürtme avansında önemli eğilim değişiklikleri ortaya çıkmıştır. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında motor gücündeki değişime de bağlı olarak ön püskürtme avansının 35° KMA’dan 45° KMA değerine gelişiyle özgül NO_x emisyonlarında bir miktar artış gözlemlenmiş, fakat 45° KMA ön püskürtme avansından 55° KMA ön püskürtme avansına geçildiğinde tekrar düşüş yaşanmıştır. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında ise ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak yaklaşık sabit özgül NO_x salımları ortaya çıkmış, son derece sınırlı değişimler yaşanmıştır. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ise ön püskürtme avansı artışı ile başlangıçta stabile yakın seyreden özgül NO_x salımları 45° KMA ön püskürtme avansından 55° KMA ön püskürtme avansına doğru gidildikçe artış göstermiştir. Bu şartta özgül NO_x emisyonundaki artış g/h cinsinden emisyon artışından değil, efektif gücün 45° KMA ön püskürtme avansında düşüş göstermesinden kaynaklanmaktadır. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında, 35° KMA ön püskürtme avansından 45° KMA ön püskürtme avansına gelindiğinde hem efektif güç hem de g/h cinsinden emisyon düşüş göstermiş, ancak güçte daha hızlı bir düşüş olması sebebiyle özgül NO_x emisyonu bir miktar artmıştır. 45° KMA ön püskürtme avansından 55° KMA’ya geçişte ise g/h cinsinden NO_x bir miktar artsa da efektif güçte yaşanan artış daha fazla olduğu için özgül NO_x değerlerinde bir miktar düşüş yaşanmıştır. Fakat bu düşüşün tatmin edici düzeyde olmadığı da görülmektedir. Burada 45° KMA ön püskürme avansının ortaya koyduğu güç değerleri sağlıklı bir kıyas yapmayı zorlaştırırsa da 35° KMA ön püskürtme avansı ve 55° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan özgül NO_x değerleri de ciddi farklılıklar ortaya koymamıştır. 20° KMA ana püskürtme avansı

ve %30 ön püskürtme oranında ise ön püskürtme avansı arttıkça özgül NO_x emisyonu artış göstermiştir. Bu şartta ön püskürtme avansının başlangıçta bir miktar arttığı sonrasında ise düşüşe geçtiği görülmektedir. Fakat efektif motor gücündeki değişimler neticesinde, bu çalışma noktalarında ön püskürtme avansı arttıkça özgül NO_x değeri düzenli artış sergilemiştir. Burada yaşanan artış istenen bir şey olmasa da %15 dolaylarında ve nispeten kabul edilebilir bir düzeydedir. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ön püskürtme avansı arttıkça özgül NO_x emisyonlarında düzenli düşüşler ortaya çıkmıştır. Bu çalışma noktalarında ön püskürtme avansının artışıyla g/h cinsinden emisyonlarda düzenli düşüş gözlemlenmese de hem g/h cinsinden emisyonlar hem de motor gücü birlikte düşünüldüğünde özgül NO_x emisyonlarında düşüş gerçekleşmiştir.



Şekil 3.58 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgül NO_x emisyonu değerleri

3.8.14 Özgül PM Emisyonlarının İncelenmesi

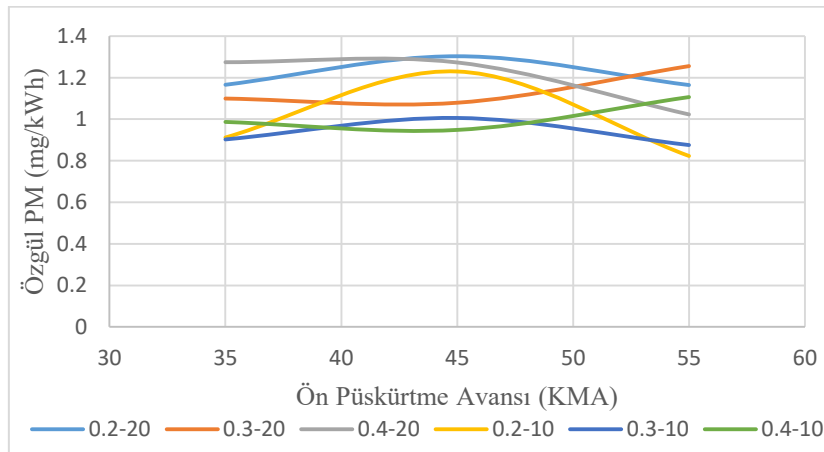
Şekil 3.59 üzerinde çift fazda gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait mg/kWh cinsinden özgül PM emisyonları görülmektedir. Şekil 3.59 üzerinde görülen eğrilere bakıldığında Şekil 3.54 üzerinde görülen mg/h cinsinde elde edilen PM değerlerine ait eğriler ile bir benzeşim kurulamamaktadır. Şekil 3.59'da görülen grafiği büyük oranda efektif güç değerinin baskıladığı ve şekillendirdiği söylenebilir. Çünkü mg/h cinsinden ortaya çıkan PM değişim oranlarına kıyasla, efektif güç değerinde ortaya çıkan işletme şartı değişimine bağlı farklılıklar çok daha belirgin düzeydedir.

Gerek ön püskürtme oranı gerekse de ana püskürtme avansındaki değişimlere bağlı olarak özgül PM emisyonlarında net ve düzenli bir değişim eğilimi ortaya

çıkamamıştır. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında ön püskürtme avansı artış gösterdikçe ilk olarak özgül PM değerinde artış, sonrasında ise düşüş ortaya çıkmıştır. 35° KMA ön püskürtme avansından 45° KMA ön püskürtme avansına geçildiğinde karşılaşılan özgül PM artışı ile 45° KMA ön püskürtme avansı ile 55° KMA ön püskürtme avansı arasındaki düşüş oransal olarak birbirine yakın değerler almıştır. Burada ortaya çıkan değişim eğilimlerini motor efektif gücündeki değişimin birincil faktör olarak etkilediği açıkça görülmektedir. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında ön püskürtme avansı arttıkça hem güçte hem de mg/h cinsinden PM emisyonunda düşüş yaşanmıştır. Fakat güçte yaşanan düşüş daha belirgin olduğu için ön püskürtme avansı arttıkça özgül PM emisyonları bu aralıkta artış sergilemiştir. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında, ön püskürtme avansı arttıkça özgül PM emisyonunda düzenli düşüş görülmüştür. Bu çalışma noktalarında efektif güç ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak önce düşüş ardından da artış sergilemiştir. mg/h cinsinden PM emisyonları da benzer eğilimler göstermiştir. Motor gücünde 35° KMA'dan 45° KMA'ya geçişte yaşanan düşüş PM emisyonundaki değişime göre daha düşük, 45° KMA'dan 55° KMA'ya geçişte ise daha büyüktür.

Özgül PM emisyonunda ön püskürtme avansına bağlı olarak ortaya çıkan en büyük değişim %20 ön püskürtme kütlesi ve 20° KMA ana püskürtme avansı şartında ortaya çıkmıştır. Esas olarak bu eğriyi şekillendiren her iki faktör de bu aralıkta büyük dalgalanmalar sergilemiştir. Dolayısıyla da ortaya çıkacak farklılıkların bu eğride kendini var etmesi beklenen bir durumdur. Bu eğri boyunca ön püskürtme avansının artışıyla öncesinde hızlı bir düşüş, sonrasında artış ve devamında tekrardan düşüş ortaya çıkmıştır. Bu eğilim benzer şekilde daha küçük değişim adımları ile %20 ön karışım oranı ve 10° KMA ana püskürtme avansında da elde edilmiştir. Yani en büyük değişim eğilimleri ve düzen barındırmayan değişimler %20 ön püskürtme oranı şartlarında oluşmuştur. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında ise özgül PM emisyonları 45° KMA ön püskürtme avansına kadar yaklaşık sabit seyretmiş, devamında ise artış eğilimine girmiştir. Yine 20° KMA ana püskürtme avansı %40 ön püskürtme oranında başlangıçta sabite yakın seyir oluşmuş, bunu bir miktar artış seyretmiş ve nihayetinde güçlü bir özgül PM düşüşü ortaya çıkmıştır. Benzer bir durum 10° KMA ana püskürtme avansında %20 ve %30 ön karışım oranları altında da gözlemlenmiştir. Ancak ön

karişım oranının %40'a çıktığı şartta yakıtın atomizasyon kabiliyeti bu durumdan kötü etkilenmiş ve PM emisyonları artış eğilimi sergilemiştir. Ancak yine de 55° KMA gibi yüksek olan bu ön püskürtme avans değeriinde, 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karişım oranında elde edilen özgül PM değeriinden ciddi farklılıklar ortaya çıkmamıştır. Bu da esas yükümlülüğün ön püskürtme avansı esansında yetersiz atomizasyonda olduğu sonucunu ortaya çıkartmaktadır. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak özgül PM emisyonları ön püskürtme avansının 35° KMA'dan 45° KMA'ya geçişiyle artış sergilemiş, ardından ise 55° KMA'ya geçildiğinde düşüşe geçmiştir. Bu aralıktaki da çalışma bölgesinin genelinde olduğu gibi efektif güç değeriindeki değişim eğilimi özgül PM emisyonları üzerinde belirleyici etki göstermiştir. Aynı durum ve eğilimler 10° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında da geçerlidir. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karişım oranında ise ön püskürtme avansının artışına bağlı olarak 35° KMA ön püskürtme avansından 45° KMA ön püskürtme avansına geçişte sınırlı miktarda özgül PM düşüşü yaşanmış, 45° KMA ön püskürtme avansından 55° KMA ön püskürtme avansına geçişte ise artış yaşanmıştır. Bu çalışma noktalarında hem mg/h cinsinden PM emisyonu hem de efektif motor gücü püskürtme avansı arttıka düşüş sergilemektedir. Ancak 45° KMA ön püskürtme avansında mg/h cinsinden PM emisyonundaki düşüş, 55° KMA püskürtme avansında da efektif güçteki düşüş daha büyük oranlarla gerçekteşiği için söz konusu değişim eğilimi ortaya çıkmıştır.

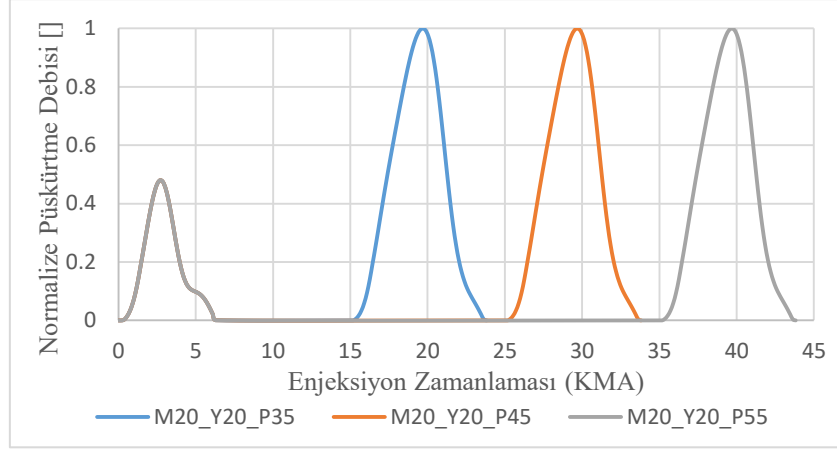


şekil 3.59 Çift fazda püskürtme şartında ön püskürtme oranı, ana püskürtme avansı ve ön püskürtme avansının değişimine bağlı özgül PM emisyonu değeri

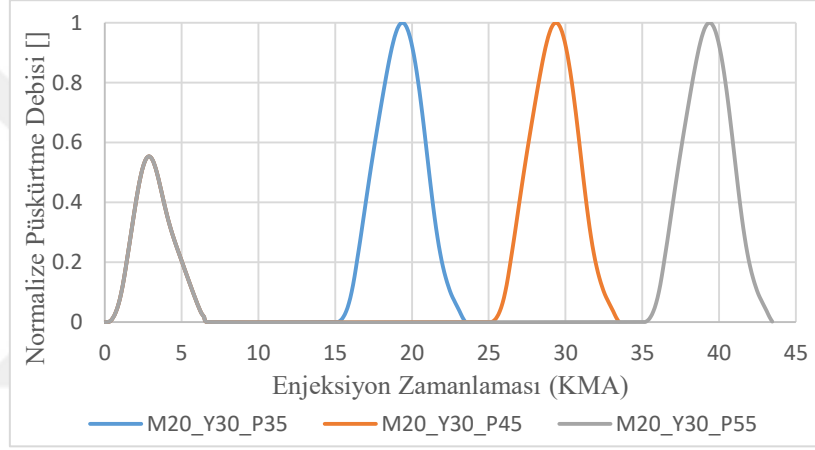
3.9 Çift Fazda Püskürtme Şartında Termodinamik Modelin Doğrulanması

3.9.1 Çift Fazda Enjeksiyon Profillerinin Çıkarılması

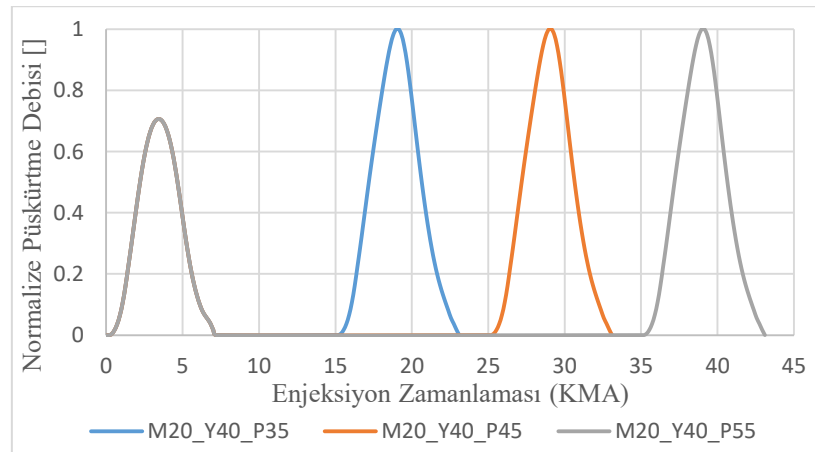
Bölüm 3.5.1 içerisinde tek fazda yakıt püskürtülmesinde ortaya çıkan enjeksiyon profillerini ortaya konmuştur. Çift fazda yakıt enjeksiyonu 800 bar püskürtme basıncı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.21 içerisinde bu işletme şartında enjektör enerjilendirme süresine bağlı olarak enjeksiyon haritası görülmektedir. Buradaki verilerden de yararlanarak profil içerisindeki veriler enterpolasyona tabi tutularak yakıt enjeksiyonunun çift fazda gerçekleştirildiği şartlarındaki enjeksiyon haritaları oluşturulmuştur. Aynı zamanda apsiste bulunan milisaniye skalası da KMA'ya dönüştürülmüştür. AVL-Boost programına enjeksiyon profilleri maksimum debiye referansla normalize değerlerle tanımlanmaktadır. Bu sebeple Şekil 3.60 - 65 arasında sunulan enjeksiyon profilleri maksimum püskürtme debisine göre normalize edilerek sunulmuştur. Grafiklerde bulunan veri etiketlerinde ana püskürtme avansı M ile, ön püskürtme yüzdesi Y ile ve ön püskürtme avansı P ile gösterilmiştir. Ön püskürtme avansı, enjektörün çevrim içerisinde ilk kez enerjilendirilmeye başladığı anı referansla 0 noktasında başlamaktadır. Ana püskürtme başlangıcı ise ön püskürtme başlangıcı ile aradaki faz açısına referansla çizilmiştir. Programa ise püskürtme avansı olarak ön püskürtme avansı girilmiş ve hedeflenen enjeksiyon simüle edilmiştir. Şekil 3.60 10° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında, Şekil 3.61 10° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında, Şekil 3.62 10° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında, Şekil 3.63 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında, Şekil 3.64 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında, Şekil 3.65 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ortaya çıkan normalize enjeksiyon haritalarını göstermektedir.



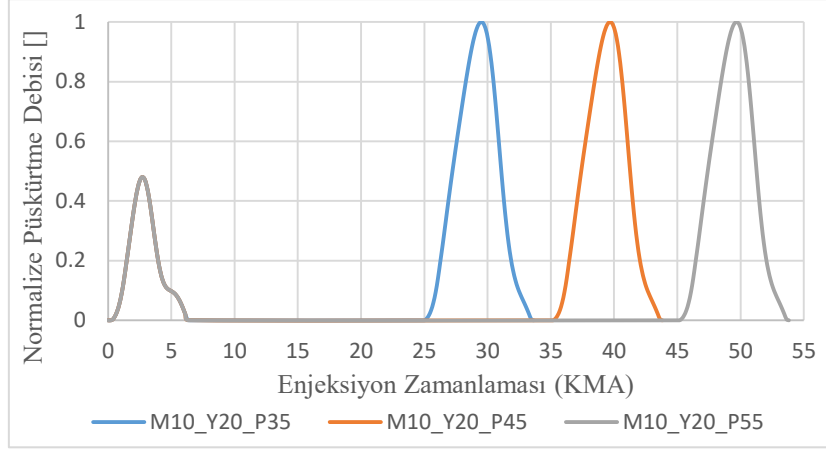
Şekil 3.60 1500 dev/dak hız, 15 mg/strok püskürtme kütlesi, 800 bar basınç, 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında enjeksiyon profilleri



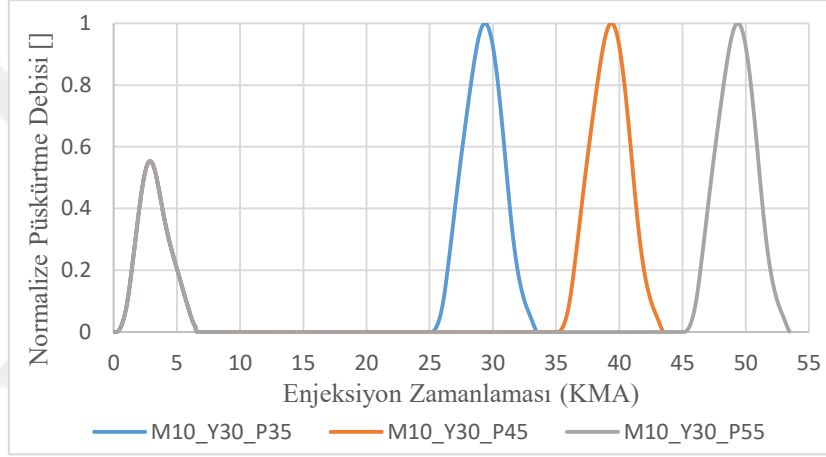
Şekil 3.61 1500 dev/dak hız, 15 mg/strok püskürtme kütlesi, 800 bar basınç, 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında enjeksiyon profilleri



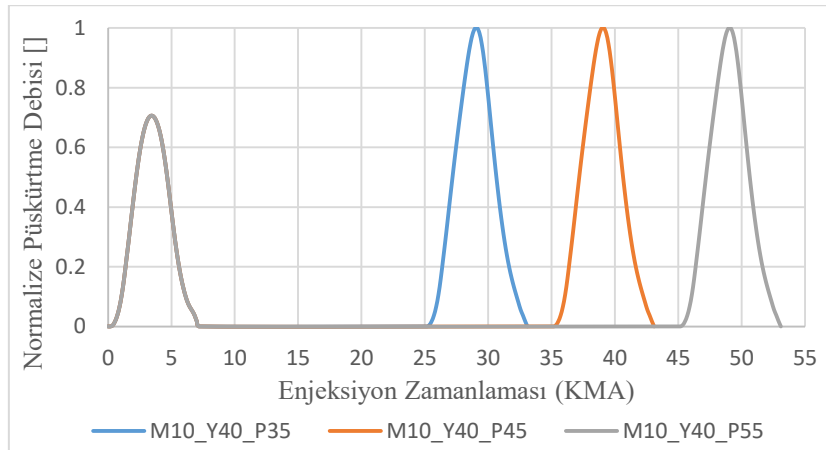
Şekil 3.62 1500 dev/dak hız, 15 mg/strok püskürtme kütlesi, 800 bar basınç, 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karışım oranında enjeksiyon profilleri



Şekil 3.63 1500 dev/dak hız, 15 mg/strok püskürtme kütlesi, 800 bar basınç, 10° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında enjeksiyon profilleri



Şekil 3.64 1500 dev/dak hız, 15 mg/strok püskürtme kütlesi, 800 bar basınç, 10° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında enjeksiyon profilleri

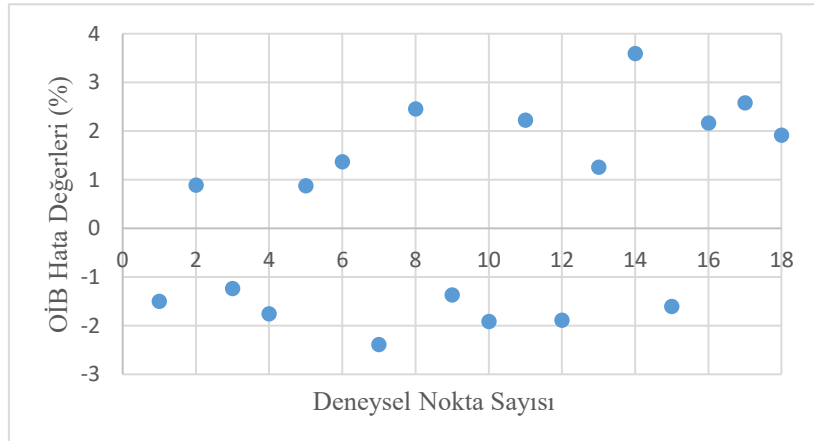


Şekil 3.65 1500 dev/dak hız, 15 mg/strok püskürtme kütlesi, 800 bar basınç, 10° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karışım oranında enjeksiyon profilleri

3.9.2 Çift Fazda Elde Edilen Verilerin Termodinamik Modelde Doğrulanması

Çift fazda yakıt püskürtme şartlarında deneysel verisi elde edilen 18 noktanın AVL-Boost ortamında doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Kurulu model olarak Bölüm 5.2 içerisinde tanımlanan model kullanılmış ve yeni enjeksiyon haritalarıyla doğrulama gerçekleştirilmiştir. Doğrulama esnasında ilk etapla deneysel verilere ait ve simülasyon sonucunda ortaya çıkan $P-\alpha$ eğrileri mümkün olduğunca birbirine yakınsatılmıştır. Bu işlem sırasında sıkıştırma prosesi süresince ortaya çıkan silindir içi basınç değeri, yanmanın başlangıç anı, kontrolsüz yanma süresince ortaya çıkan $dP/d\alpha$ değeri örtüştürülmüştür. Bu aşamada elde edilen nihai $P-\alpha$ diyagramları Ek-D’de görülmektedir. Bu aşamadan sonra maksimum silindir içi basınç, OİB ve egzoz gaz sıcaklığı doğrulamaları gerçekleştirilmiştir.

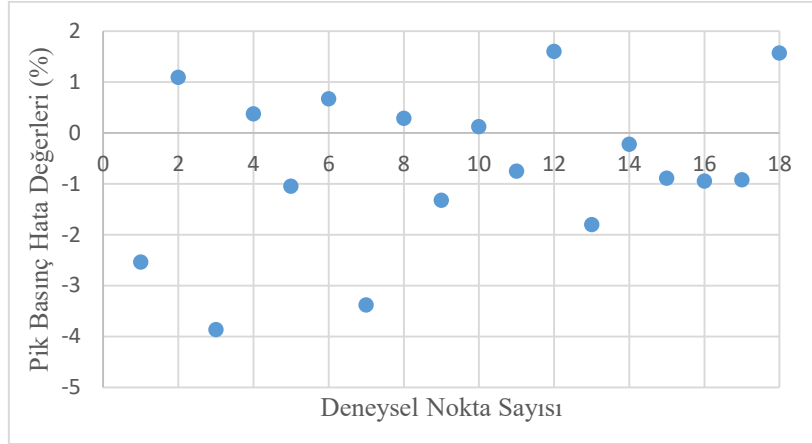
Çift fazda yakıt püskürtülmesi şartında deneysel veriler ile termodinamik doğrulama sonuçları arasında ortaya çıkan OİB yüzdesel hata değerleri Şekil 3.66’da görülmektedir. Doğrulaması yapılan 18 nokta içerisinde en yüksek OİB hata oranı %3,59 olarak ortaya çıkmıştır. Hata oranlarının çoğunlukla %2 altında kaldığı görülmektedir. Sadece 1 noktada %3 üzerinde hata görülmüş, 5 noktada %2 ile %3 arasında yüzdesel hata ortaya çıkmış, geriye kalan 12 noktada da %2 altında OİB hatası görülmüştür. Buradan yola çıkarak elde edilen OİB hata değerlerinin kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir.



Şekil 3.66 Çift fazda enjeksiyonunda termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki OİB hata oranları

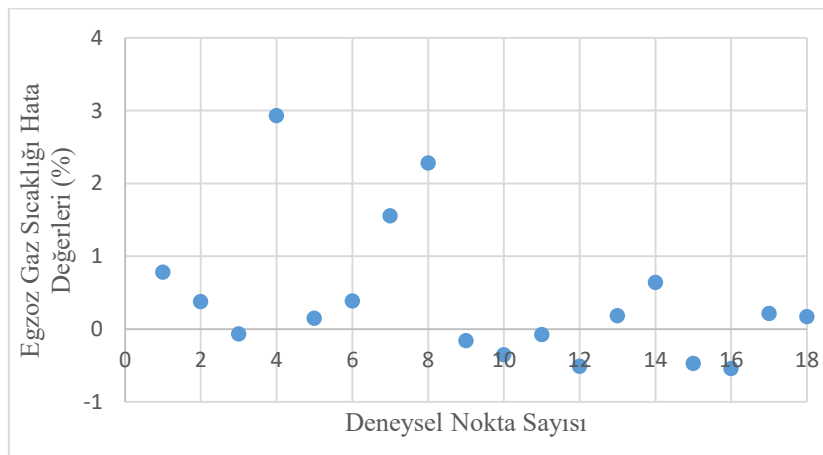
Çift fazda yakıt enjeksiyonu şartında yürütülen çalışmalarda deneysel veriler ile termodinamik model arasında ortaya çıkan silindir içi pik basınç değeri hataları Şekil 3.67 üzerinde görülmektedir. Silindir içi pik basınç değerlerinde 2 noktada

%3 ile %4 arasında, 1 noktada %2 ile %3 arasında yüzdesel hata ortaya çıkmıştır. Geriye kalan 15 noktada da %2 altında hata değeri görülmüştür. Pik basınç değerleri açısından da %1'in altında hata değerlerinde yoğunlaşma olduğu görülmektedir.



Şekil 3.67 Çift fazda enjeksiyonda termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki pik basınç hata oranları

Şekil 3.68 çift fazda yakıt enjeksiyonu şartında gerçekleştirilen deneyler ile termodinamik model sonuçları arasında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklığı yüzdesel hata değerleri görülmektedir. Egzoz sıcaklıkları 2 noktada %2 ile %3 arasında, 1 nokta %1 ile %2 hata oranları arasında, 15 nokta da %1 hata oranı altında yüzdesel hata değerleri ile doğrulanmıştır. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda, egzoz gaz sıcaklıklarının hata oranlarının genel itibariyle tatmin edici düzeyde olduğu söylenebilir.



Şekil 3.68 Çift fazda enjeksiyonda termodinamik model doğrulama sonucunda deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki egzoz gaz sıcaklığı hata oranları

Çift fazda yakıt enjeksiyonunda termodinamik modelin doğrulaması sonucunda elde edilen AVL-Boost parametrik katsayıları Tablo 3.11’de sunulmuştur.

Tablo 3.11 Çift fazda yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan parametrik katsayılar

Deney Prosedür Kodu	TG Kal. Fak.	Yanm a Par.	Tür. Par.	Ön Kr. Y. P.	Ön Kar. Y. S. P.	Piston Kal. Fak.	Silindir Kaf. Kal. Fak.	Cidar Kal. Fak.
M20_Y20_P35	3,337	2,927	1,234	0,593	0,168	1,08	1,08	1,12
M20_Y20_P45	3,834	2,713	1,087	0,495	0,145	1,52	1,52	1,6
M20_Y20_P55	3,976	2,628	1	0,643	0,0681	1,35	1,35	1,3
M20_Y30_P35	3,107	2,059	1,28	0,487	0,266	1,23	1,23	1,4
M20_Y30_P45	3,913	2,137	1,26	0,582	0,096	1,53	1,53	1,4
M20_Y30_P55	3,952	1,926	1,042	0,566	0,0976	1,7	1,7	1,67
M20_Y40_P35	2,914	2,459	1,26	0,581	0,267	1	1	1,32
M20_Y40_P45	3,725	1,837	1,194	0,4	0,202	2	2	2
M20_Y40_P55	4,013	1,637	1,176	0,71	0,082	2	2	1,6
M10_Y20_P35	4,938	3	1,144	0,522	0,159	1,35	1,35	1,5
M10_Y20_P45	5,568	2,416	1,105	0,566	0,09	2,2	2,2	1,9
M10_Y20_P55	4,674	2,252	1,084	0,405	0,182	1,35	1,35	1,2
M10_Y30_P35	4,942	2,285	1,085	0,435	0,152	1,8	1,8	1,55
M10_Y30_P45	5,387	2,112	1,023	0,537	0,096	2,1	2,1	1,95
M10_Y30_P55	5,242	1,918	0,975	0,652	0,091	1,8	1,8	1,5
M10_Y40_P35	3,836	2,005	1,074	0,524	0,187	1,7	1,7	1,6
M10_Y40_P45	5,086	1,955	1,044	0,585	0,127	1,9	1,9	1,65
M10_Y40_P55	5,372	1,784	0,977	0,592	0,092	2,55	2,55	2,4

TEK FAZDA YAKIT PÜSKÜRTME ŞARTINDA ORTAYA ÇIKAN TERMODİNAMİK MODEL SONUÇLARI

Çalışmanın bu kısmında tek fazda yakıt püskürtme şartında belirlenen artım aralıklarında tam faktöriyel çalışılması durumunda ortaya çıkacak sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu bölüm altındaki sonuçların eldesi birkaç aşama sonrasında mümkün olmuştur. İlk olarak Bölüm 3.4'te sunulan deneysel veriler yardımıyla Bölüm 3.5'te sunulduğu gibi termodinamik model, parametrik katsayılar ile doğrulanmamıştır. Ardından Bölüm 3.6'da belirtildiği üzere geri dönüşümlü yapay sinir ağı modellemesiyle AVL-Boost programında kullanılacak olan parametrik katsayılar elde edilmiştir. Nihayetinde AVL-Boost programında simülasyonlar koşularak sonuçlar elde edilmiştir. Program çıktısı olarak TG, yanma süreci uzunluğu, %50'lik kütleli yanma kesri (KYK50) (mass burned fraction) değerinin hangi konumda ortaya çıktığı, pik yanma sıcaklığı, pik yanma basıncı, silindir içi anlık basınç ve krank açısı eğrisi, ısı açığa çıkış oranı değeri, yanma başlangıcındaki sıcaklık değeri, yanma başlangıcındaki basınç değeri, OİB, indike özgül yakıt tüketimi, indike verim ve egzoz sıcaklığı verileri sunulmuştur. CO, NO_x ve PM emisyonları da hem g/h cinsinden hem de özgül emisyon olarak sunulmuştur.

AVL-Boost programında simülasyonlar koşturulurken her çıktının iterasyonlara göre ne denli stabil hale geldiği gözlemlenmiştir. Genel bir eğilim olarak performans parametrelerinin çıktı değerine daha erken yakınsadığı görülmüştür. Emisyon değerlerinin yakınsanması ise bir miktar daha gecikmeli olarak gerçekleşmiş ve daha ileri iterasyonlarda yakınsama görülmüştür. Gerek performans gerekse de emisyon değerlerinin anlık iterasyonlara göre çıktı değerine yakınsama davranışı göz önüne alındığında her nokta 30 iterasyonda koşulmuştur.

Araştırma uzayında daha önce de belirtildiği üzere motor hızı 1000 dev/dak, 150 dev/dak ve 2000 dev/dak değerindedir. Üç farklı motor yükü seçilmiştir ve yakıt püskürtme kütlesi 15 mg/strok, 20 mg/strok ve 25 mg/strok değerindedir. Püskürtme basıncı 600 bar, 800 bar, 1000 bar ve 1200 bar olarak dört farklı değer

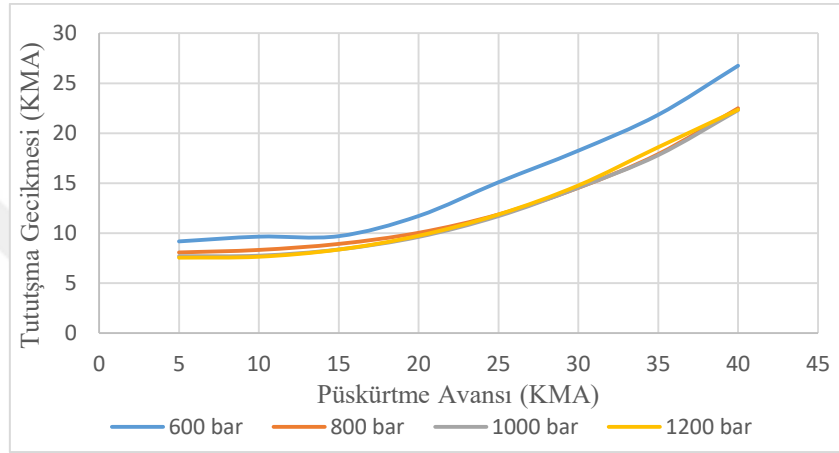
almıştır. Püskürtme avansı ise 5° KMA ÜÖN öncesi ile 40° KMA ÜÖN öncesi aralığında 5° KMA'lık adımla ile değiştirilmiştir.

4.1 Tutuşma Gecikmesi Süresi Verilerinin İncelenmesi

Farklı motor hızı, motor yükü, püskürtme basıncı ve püskürtme avansına bağlı olarak ortaya çıkan TG süreçleri Şekil 4.1 - 9 üzerinde görülmektedir. Püskürtme avansı arttıkça TG sürecinin artması beklenen bir durumdur. Ancak bu artışın hangi seviyede ortaya çıktığı büyük önem taşımaktadır. TG sürecinin yeterince uzun olması durumunda yanma odası içerisinde daha homojen bir karışım oluşacak ve buna bağlı olarak heterojen dolgu karakteristiği baskılanacaktır. Böylelikle daha fakir karışımda ortaya çıkan yanma daha düşük yanma sıcaklıklarını ortaya çıkartacak ve prensibin ana hedefine ulaşılacaktır.

Şekil 4.1 1000dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesinde püskürtme basıncı ve püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan TG süreçlerini KMA olarak sunmaktadır. Bu veri seti için 600 bar püskürtme basıncında, tüm püskürtme avanslarında diğer püskürtme basıncı veri setlerine göre daha yüksek TG süreci elde edilmiştir. Püskürtme basıncının düşüklüğü yakıt zerreciklerinin atomizasyon kabiliyetini olumsuz etkilediği için bu püskürtme basıncında daha büyük TG süreçlerin elde edilmesi beklenen bir durumdur. Ancak daha büyük püskürtme basınçlarında püskürtme avansının değişimine bağlı olarak belirgin farklar ortaya çıkmamıştır. Bu durum TG'de püskürtme basıncının yanı sıra silindir içi hava hareketlerinin gelişkinliğinin önemini vurgulamaktadır. Çünkü ilgili veri setinde silindir içi hava hareketleri motor hızının düşük olmasına bağlı olarak istenilen düzeyde değildir. Buna ilaveten püskürtülen yakıt kütlesinin düşük oluşu, enjektörün açılması ve kapanması esnasındaki akış kayıplarının belirgin oluşu da bu durumu tetikleyici etki göstermiştir. 800 bar, 1000 bar ve 1200 bar verileri incelendiğinde 20° KMA püskürtme avansına kadar belli belirsiz bir farklılık ortaya çıkmışken daha da artan püskürtme avanslarında bu üç püskürtme basıncı için ortaya çıkan TG farklılıkları tamamen belirsiz seyretmiştir. 600 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının 15° KMA değerine gelene kadar ortaya çıkan TG süreçleri 10° KMA dolaylarında, birbirine çok yakın değerler almıştır. Diğer püskürtme basıncı veri setlerinde de bu aralıktaki değişimler oldukça sınırlı seviyede kalmıştır. Ancak püskürtme avansının artışıyla püskürtme yapılan ortamın

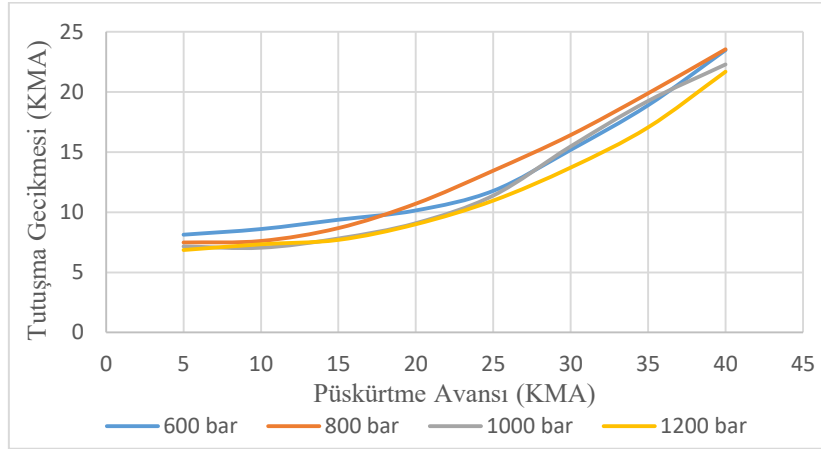
sıcaklığında karşılaşılan düşüş TG sürecinin püskürtme avansına bağımlılık seviyesini arttırmıştır. Bu eğilim özellikle 20° KMA püskürtme avansı sonrasında belirgin bir şekilde görülmektedir. Özellikle 600 bar püskürme basıncında daha belirgin bir şekilde görüldüğü üzere püskürtme avansının 35° KMA değerinden 40° KMA değerine çıkması ile paralel bir TG süreci artışı ortaya çıkmıştır. Yani bu aralıkta püskürtmenin başlangıcı farklılık gösterse de yanmanın başlangıcı hemen hemen aynı noktadadır. Bu tespit ileride incelenecek olan silindir içi anlık basınç verisi ve krank açısı grafiğinde de açık bir şekilde görülecektir.



Şekil 4.1 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

Şekil 4.2 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan TG süreçlerini sunmaktadır. Bu veri setinde püskürtme avansı arttıkça TG'nin istisnasız olarak artış sergilediği görülmektedir. 600 bar püskürtme basıncındaki verilere bakıldığında düşük püskürtme avanslarında daha büyük TG elde edilmiştir. Ancak püskürtme avansının daha da arttığı şartlarda Şekil 4.1'den farklı olarak en büyük TG daha farklı püskürtme basınçlarında elde edilmiştir. Her bir püskürtme avansında, en küçük TG 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkmıştır. Bu veri setinde TG'de genel olarak 20° KMA püskürtme avansından daha büyük püskürtme avanslarında belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır. Büyük püskürtme avanslarında ve PCCI bölgesinde 800 bar püskürtme basıncı daha büyük TG ortaya koymuştur. 15 mg/strok şartına göre farklı püskürtme basınçlarının sabit püskürtme avansında ortaya koyduğu en küçük ve en büyük TG daha düşük farklılıklar barındırmaktadır. Bu veri setinde de püskürtme avansı arttıkça TG sürecinde ortaya çıkan artış daha büyük değerler almıştır. Ancak burada bir önceki veri setinde olduğu gibi büyük

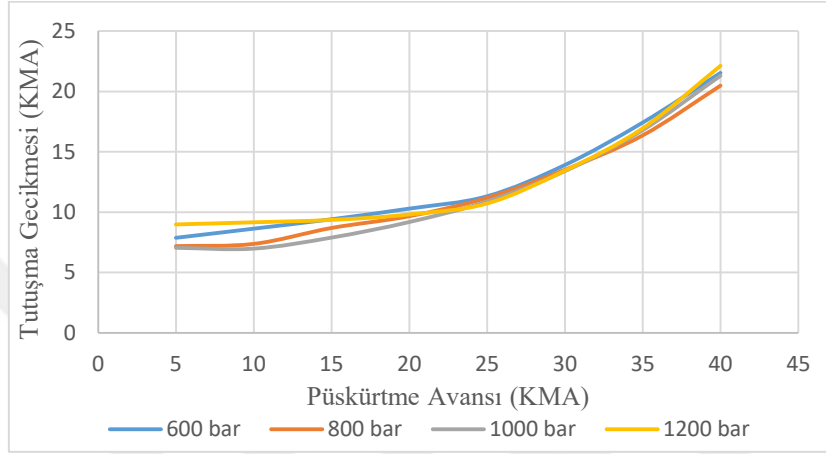
püskürtme avanslarında, püskürtme avansı arttıkça yer yer yanmanın benzer noktalarda başlaması trendi gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.2 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

Şekil 4.3 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda TG'yi göstermektedir. Şekil 4.3'ten bu motor yükünde 20 KMA'dan küçük püskürtme avanslarında püskürtme basıncının TG üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığı görülmüştür. Ancak büyük püskürtme avanslarında farklı püskürtme basınçları arasında ortaya çıkan TG farklılığı büyük oranda ortadan kalkmıştır. Bu durum hem motor hızının düşük olmasına bağlı olarak yanmaya hazırlanma sürecinin milisaniye olarak uzunluğuna, hem de motor yükünün artması sonucunda silindir içerisine gönderilen yakıtın daha çabuk tutuşabilirlik sınırlarına girmesiyle ilişkilendirilebilir. 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında farklı püskürtme basınçlarının TG üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu görülmüştür. Ancak burada ortaya çıkan eğilim püskürtme basıncının değişimiyle eş eğilimler olarak ortaya çıkmamıştır. Bu aralıkta en büyük TG süreçleri en düşük püskürtme basıncı olan 600 bar ve en yüksek püskürtme basıncı olan 1200 bar püskürtme basınçlarında ortaya çıkmıştır. Bu durumun sebebi özellikle 5° KMA püskürtme basıncı verisinde daha görülebilir olmak üzere yanmanın esas olarak genişleme fazına kayması ve karışım teşkili açısından daha kompleks mekanizmaların devreye girmesi olarak değerlendirilebilir. Bu şartta 600 bar püskürtme basıncında yakıt zerreciklerinin yeterli atomizasyona uğrayamaması ve TG'nin artışı ile açıklanabilirken, 1200 bar püskürtme basıncında ise yakıtın daha geniş bir hacme yayılarak fazlaca fakir bir karışım yaratması ve ilk alev çekirdeği oluşum şartına hava fazlalık katsayısı açısından daha uzun bir sürede ulaşılabilmesi ile açıklanabilir.

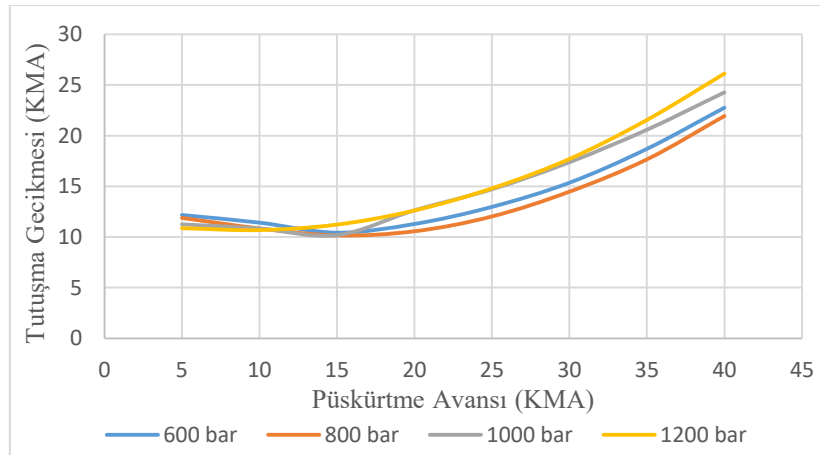
Şu ana kadar incelenen veri setlerinde açıkça görüldüğü üzere küçük püskürtme avanslarında motor yükünün değişimine bağlı olarak çok büyük TG farklılıkları ortaya çıkmamıştır. Ancak artan püskürtme avanslarında motor yükü arttıkça beklendiği üzere TG sürecinin kısaldığı görülmektedir. Buna ilaveten bu motor hızında motor yükü artışıyla yani silindir içerisine çevrim başına püskürtülen yakıt kütlelerinin artışıyla ortaya çıkan TG farklılıkları, büyük püskürtme avanslarında püskürtme basıncına olan hassasiyetini yitirmeye başlamıştır.



Şekil 4.3 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

Şekil 3.4 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlelerinde ortaya çıkan TG süreçleri hakkında bilgi vermektedir. Düşük püskürtme avanslarında, daha yüksek püskürtme basınçlarının daha düşük TG süreçleri verdiği görülmektedir. Yüksek püskürtme avanslarında ise büyük püskürtme basınçları daha büyük TG süreçlerini doğurmuştur. Küçük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan TG süreç farklılıkları, büyük püskürtme avanslarına nazaran daha küçük değerler almıştır. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında püskürtme avansının 5° KMA değerinden 15° KMA'ya artışına kadar TG sürecinde bir miktar düşüş göze çarpmakta olup bu püskürtme basınçlarında en küçük TG süreci 15° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Bu durum, ilgili püskürtme basıncı değerlerinde ve küçük püskürtme avanslarında yanma başlangıcının genişleme stroğuna kaymasından ve yakıtın TG süreci boyunca yüksek sıcaklık bölgesinde daha kısa süre kalmasından kaynaklanmaktadır. Sonrasında ise artan püskürtme avanslarında, püskürtme yapılan ortam sıcaklığı ÜÖN'den nispeten daha uzakta olduğu için daha küçük değerler almıştır. Bu şartlarda yakıt zerreciklerine olan ısı akısı düşüş sergilediği

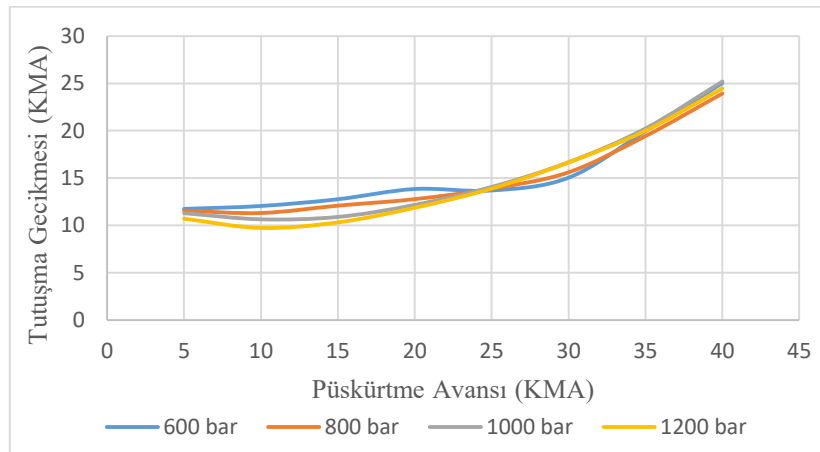
için TG süreci artış göstermiştir. 20° KMA püskürtme avansından büyük püskürtme avanslarındaki veriler incelendiğinde en düşük TG sürecinin 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıktığı net bir şekilde görülmektedir. Sonrasında ise 600 bar püskürtme basıncına en yakın TG değerlerini 800 bar püskürtme basıncı ortaya koymuştur. En yüksek TG değerleri ise 1200 bar püskürtme basıncında gözlemlenmiştir. 20° KMA ve 30° KMA püskürtme avansı aralığında 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarının ortaya koyduğu TG değerleri birbirine çok yakın seyretmiştir. Püskürtme avansının daha da artmasıyla beraber bu iki veri arasındaki farklılık da belirgin hale gelmiştir. 20° KMA püskürtme avansı sonrasında 600 bar püskürtme basıncından 800 bar püskürtme basıncına geçildiğinde ortaya çıkan TG düşüşü artan püskürtme basıncının karışım oluşumunu iyileştirici yönde etki ettirmesi ile açıklanabilir. Fakat az önce belirtildiği üzere bu aralıkta püskürtme basıncının daha da arttırılması TG sürecini tekrardan arttırmıştır. Bu durumun temel sebebi, artan püskürtme basıncı ile yakıt zerreciklerinin daha büyük bir basınç kuvvetine sahip oluşu ve dolayısıyla da daha büyük bir itkinin etkisi altında yakıt penetrasyon derinliğini artırmasıdır. Böylece yakıt yanma odasında daha büyük bir hacme yayılmış ve daha fakir bir makro karışım meydana gelmiştir. Bu da ilk alev çekirdeğinin oluşumunu güçleştirmiş ve TG süreci uzamıştır.



Şekil 4.4 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme kütlesinde ortaya çıkan TG verileri Şekil 4.5 üzerinde görülmektedir. Düşük püskürtme avanslarında tıpkı 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında olduğu gibi düşük püskürtme basınçları daha büyük TG değerleri ortaya koymuştur. PCCI stratejisinin uygulanabilir olduğu

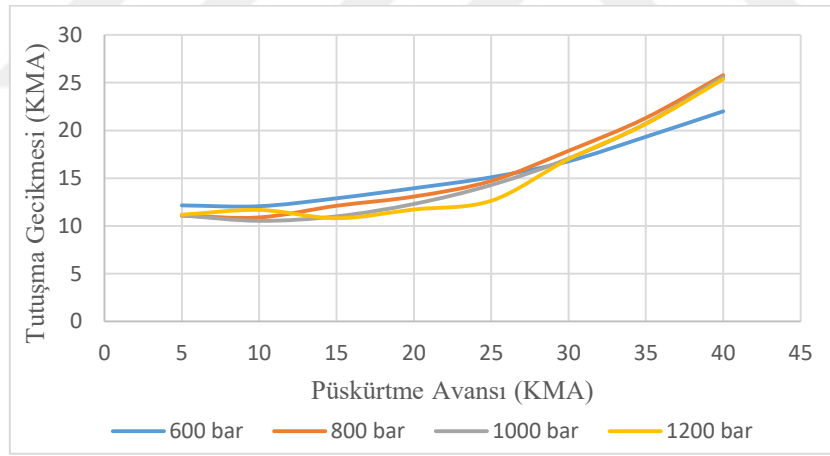
yüksek püskürtme avanslarında ise bir önceki veri setine benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu veri setinde de yüksek püskürtme avanslarında en düşük TG süreci 800 bar püskürtme basıncında elde edilmiştir. TG sürecindeki artış eğilimi ise genel olarak 10° KMA'dan büyük püskürtme avanslarında ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 20° KMA ile 30° KMA püskürtme avansı aralığında TG süreci belli belirsiz bir artış sergilemiştir. Diğer verilerde ise düzenli bir artış eğiliminin görüldüğü gözlemlenmiştir. Uç püskürtme avans değeri olan 40° KMA püskürtme avansına yaklaşıldığında, farklı püskürtme basıncı değerlerinin oluşturduğu TG farklılıkları son derece küçük değerlere hapsolmuştur. Bu farklılıkların azalmaya başlaması 30° KMA püskürtme avansı sonrasında göze çarpmaktadır. Fazlaca arttırılmış püskürtme avanslarında farklı püskürtme basınçlarının ortaya koyduğu farklılıkların azalması eğilimi motor yükü arttıkça 1000 dev/dak motor hızında da gözlemlenmişti. Fakat burada aradaki değer farklarının daha küçük bir banda sıkıştığı görülmektedir. Bu veri aralığında daha büyük püskürtme basınçlarının daha büyük TG süreci verdiği püskürtme avansı 25° KMA olarak görülmüştür. Şu ana kadar karşımıza çıkan verilere bakıldığında PCCI bölgesinde daha yüksek püskürtme basınçları ile çalışmanın TG sürecini uzatarak stratejiyi destekler etki göstereceği söylenebilir. Bu veri setinde 35° KMA gibi büyük püskürtme avanslarının aşılması durumunda yanma başlangıç noktasının ciddi farklılıklar barındırmadığı görülmektedir. İleride değinilecek olan ısı açığa çıkış hızı grafiklerinde bu durum daha net bir şekilde karşımıza çıkacaktır.



Şekil 4.5 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

Şekil 4.6 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok püskürtülen yakıt kütleleri şartında TG değerlerini göstermektedir. Elde edilen verilere göre püskürtme avansının

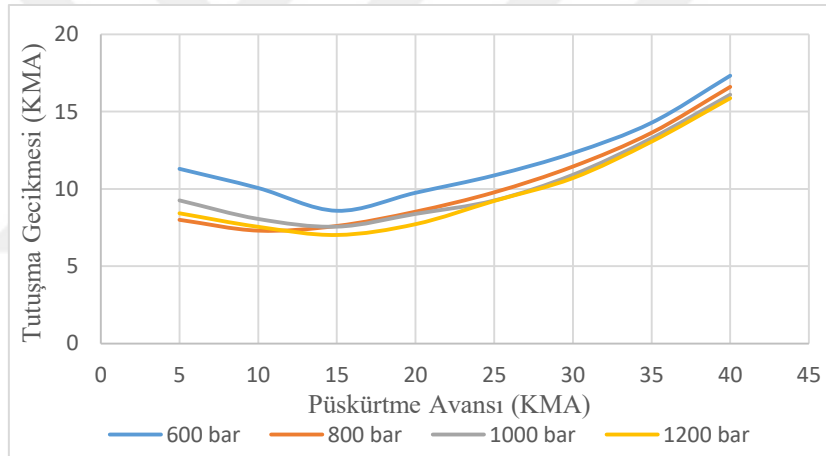
artışına bağlı olarak başlarda belli belirsiz bir TG düşüşü ortaya çıkmış, sonrasında da belirgin bir artış gözlemlenmiştir. TG sürecinde ortaya çıkan artışların başlangıcı püskürtme basıncından bağımsız olarak 10° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında 15° KMA püskürtme avansına kadar belirgin değişiklikler ortaya çıkmamış ve son derece birbirine yakın TG süreçleri ortaya çıkmıştır. 600 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında 10° KMA püskürtme avansı değerinden itibaren TG süreci artış eğilimine girmiştir. Motor yükünün artışına bağlı olarak TG değerlerinde düşüş olacağı bilinmektedir. Şekil 4.6 üzerinde yer alan veriler de bunu destekler niteliktedir. 40° KMA gibi yüksek püskürtme avanslarında ve düşük püskürtme basınçlarında bu eğilim daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında TG süreci diğer püskürtme basınçlarına nazaran 4° KMA dolaylarında daha kısa sürmüştür. Bu bölgede sadece 600 bar püskürtme basıncı verisi diğer püskürtme basınçlarından ayrıksı davranış sergilemiş geri kalan püskürtme basınçları ise 20 mg/strok şartlarındaki kümelenmeye benzer sonuçlar ortaya koymuştur.



Şekil 4.6 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan sonuçlar Şekil 4.7’de görülmektedir. Bu veri setinde tüm püskürtme basınçlarının benzer bir değişim eğilimi gösterdiği görülmektedir. En küçük TG sürecinin 10° KMA ile 15° KMA püskürtme avansı bandında ortaya çıktığı görülmektedir. Dikkat edilecek olursa önceki veri setlerine göre en küçük TG sürecinin elde edildiği püskürtme avansı daha büyük değerler almıştır. Bu durum motor hızının artışına bağlı olarak belli bir krank açısında geçen sürenin kısalmasına bağlıdır. Her ne kadar motor hızı

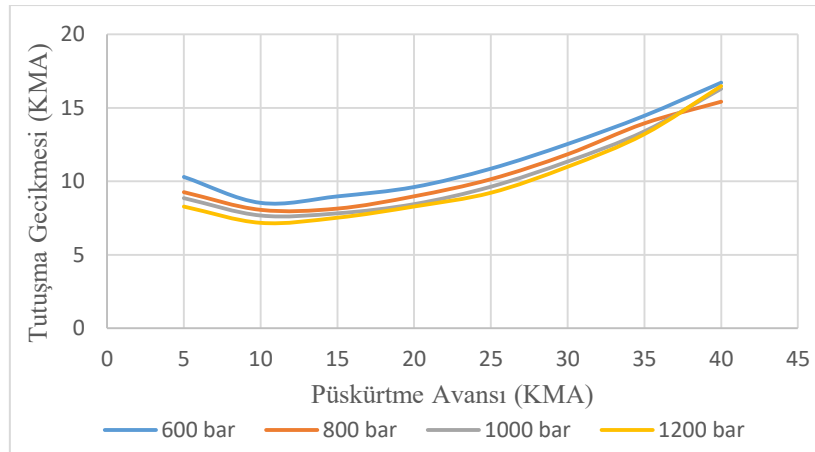
arttıkça yanma odası içerisindeki türbülans seviyesi artış göstermiş ve milisaniye başına karışım oluşum kabiliyeti iyileşse de gerçek zaman skalası olan krank mili açısı referansını takip edememiştir. Belirtilen bu püskürtme avansının üzerindeki püskürtme avanslarında ortaya çıkan TG artış gradyanı ise daha küçük değerler almıştır. Veri setinde 600 bar püskürtme basıncında elde edilen veriler tüm püskürtme avanslarında için en büyük TG süresini vermektedir. Küçük püskürtme avanslarında daha belirgin olan bu fark püskürtme avansı arttıkça daha küçük farklılıklara dönüşmüştür. Erken püskürtme şartında TG süreci itibariyle 600 bar püskürtme basıncını, 800 bar püskürtme basıncı takip etmiş ve sonrasında 1000 bar ile 1200 bar püskürtme basınçları benzer TG süreçleriyle beraber bu değerleri takip etmiştir. Özellikle 25° KMA püskürtme avansından sonra 600 bar püskürtme basıncı haricindeki veriler püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak oldukça yakın değerler ortaya koymuştur.



Şekil 4.7 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan sonuçlar Şekil 4.8'de görülmektedir. Şekil 4.8 verileri, bir önceki veri seti olan Şekil 4.7 üzerinde görülen eğriler ile değişim eğilimi açısından büyük bir benzerlik barındırmaktadır. Burada her bir püskürtme basıncında ortaya çıkan en küçük TG süreci 10° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. Bunun ötesine geçildiğinde ise başlarda belli belirsiz bir TG artışı ortaya çıkmışken 20° KMA püskürtme avansından büyük püskürtme avanslarında daha güçlü TG artış eğilimi ortaya çıkmıştır. Fakat gözlemlenen bu artış, daha düşük motor hızlarında ortaya çıkan değişim eğilimlerine göre daha küçük birinci türeve sahiptir. Bu veri setinde de tüm püskürtme avanslarında ortaya çıkacak olan en büyük TG süreci 600 bar püskürtme

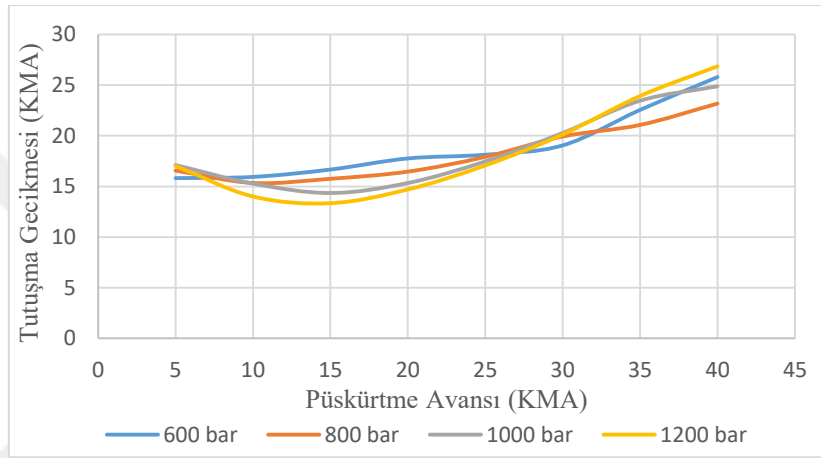
basıncında yani veri setindeki en küçük püskürtme basıncında ortaya çıkmıştır. 35° KMA püskürtme avansına kadar, püskürtme basıncının artışına bağlı olarak düzenli TG süreci kısılması ortaya çıkmıştır. Ancak püskürtme avansının daha da artırılması ile 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncı verilerinin değişim eğilimi pek bir farklılık göstermezken 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncı değerlerinde TG sürecindeki değişim miktarı artış sergilemiştir. Bu durum daha önce de belirtildiği üzere yakıtın daha büyük bir hacme yayılması ve daha fakir bir karışım oluşturmaya bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten daha yüksek püskürtme basıncı, yakıtın daha iyi pülverize olmasını sağlayacaktır. Bu durumda yakıt daha büyük bir yüzey alanından ısı transferine maruz kalacaktır. Bu da TG süresince yakıtın, yanma odası içerisinde ısı çekimini arttıracak ve TG sürecinde silindir içi sıcaklık değerlerinde düşüş eğilimi yaratacak veya termodinamik olarak hacim küçülmesi sonucunda doğacak olan sıcaklık artış eğilimini bir miktar baskılayacaktır. Bu da ilgili püskürtme basıncı ve püskürtme avanslarında TG artım eğilimi açıklayan bir başka faktör olarak değerlendirilebilir. Ancak bu faktörün güvenilir bir hipotez olup olmadığı çalışmanın ilerleyen kısımlarında değinilecek olan ısı açığa çıkış hızı verilerinin bu araştırma noktalarında nasıl bir davranış gösterdiğinin irdelemesi ile anlaşılabilir.



Şekil 4.8 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan TG verileri Şekil 4.9 üzerinde görülmektedir. Bu veri seti için de daha önceki yorumlara benzer irdelemeler yapmak mümkündür. Diğer veri setlerinden farklı olarak, bu şartta püskürtme avansının değişimiyle ortaya çıkan TG farklılıklarının daha küçük değerler aldıkları görülmektedir. Özellikle 25° KMA ile 30° KMA püskürtme

avanslarında ortaya çıkan TG değerleri birbirine oldukça yakındır. 25° KMA püskürtme avansından büyük püskürtme avanslarında TG sürecinin yeterince artış göstermemesi yanma odası içerisinde tutuşabilir karışım oluşumunun kısa sürede ortaya çıkmasına ve yeterli düzeyde makro karışım oluşmadan yanmanın başlamasıyla açıklanabilir. Bu söylem eldeki veriler ışığında yapılan bir yorumdan ibaret olup kesin kanaat barındırmamaktadır. Çünkü bu iddianın yerinde bir iddia oluşu silindir içi basınç ve krank açısı eğrileri üzerinde kontrolsüz yanma yani ön karışımli yanma fazında ortaya çıkan $dp/d\alpha$ verilerinin incelenmesi gerekmektedir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında bu verilere yer verilmiştir.



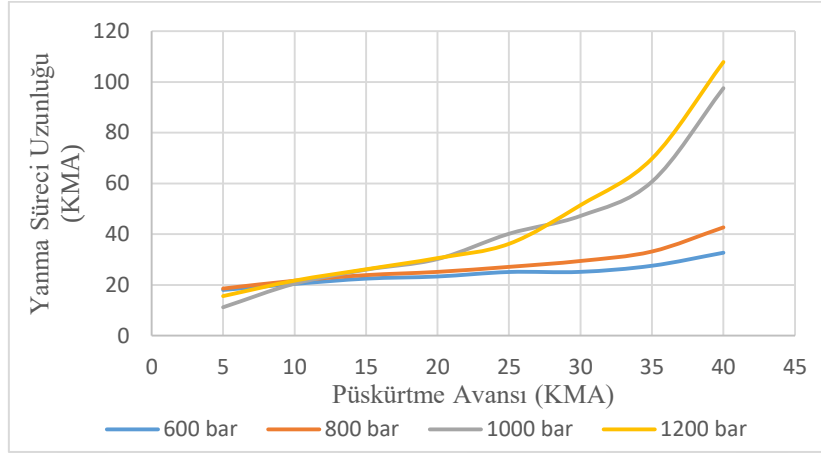
Şekil 4.9 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan tutuşma gecikmesi süreleri

4.2 Yanma Süreci Verilerinin İncelenmesi

Çalışmanın temel hedefi daha yavaş bir yanmanın ortaya çıkması neticesinde yanma esnasında oluşan sıcaklık değerlerinin düşürmektir. Bu amaçla da daha fakir karışımlarla çalışılmaktadır. Bölüm 4.1 TG süreçleri hakkında bilgi vermektedir. TG sürecinin uzaması sonucunda ön karışım karakteristiği iyileşecek ve yanma odası içerisinde daha homojen bir karışım ortaya çıkacaktır. Fakat sadece TG süreçleri göz önünde bulundurularak bir yorum yapmak yetersiz olacaktır. Çünkü daha büyük TG süreçlerinin elde edilmesindeki temel amaç daha homojen karakterli bir yanma oluşmasının yanında yanma sürecinin daha uzun bir periyoda yayılmasıdır. Böylelikle ısı açığa çıkış hızı düşüş gösterecek ve yanma odası içerisinde ortaya çıkan sıcaklık değerleri aşağı yönlü bir seyir gösterecektir. Bu amaçla çalışmaya dahilinde yanma süreci verilerine yer verilmiştir. Şekil 4.10 - 18 araştırma uzayında ortaya çıkan yanma süreci uzunluğu verilerini sunmaktadır.

Şekil 4.10 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan yanma süreci değerlerini göstermektedir. Püskürtme avansının ÜÖN'ye yakın olduğu şartlarda yanma süreci en küçük değerlerini almıştır. Buna ilaveten bu aralıkta püskürtme basıncı arttıkça yanma daha kısa sürede tamamlanmıştır. 10° KMA püskürtme avansında tüm püskürtme basınçları için yaklaşık aynı değerde yanma süreci uzunlukları ortaya çıkmıştır. Devamında ise daha büyük püskürtme basınçlarının daha uzun yanma süreçlerini ortaya çıkardığı görülmüştür. 15° KMA püskürtme avansında belli belirsiz olarak gözlemlenebilen bu eğilim 20° KMA püskürtme avansında belirginleşmiş ve 30° KMA püskürtme avansı sonrasında ise ciddi farklılıklar ile kendini var etmiştir. 600 bar püskürtme basıncında elde edilen değerlere bakıldığında, başlangıçta 20° KMA dolaylarında süren yanma yaklaşık 30° KMA püskürtme avansına kadar ciddi farklılıklar ortaya koymaksızın bu değeri korumuştur. Ardından ise yanma sürecinde bir miktar artış gözlemlenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında elde edilen verilerde de 600 bar püskürtme basıncına benzer değişim eğilimleri ortaya çıkmıştır. Her iki püskürtme basıncında da 25° KMA püskürtme avansına kadar birbirine yakın değerler ortaya çıkmıştır. Ancak sonrasında, 800 bar püskürtme basıncının ortaya koyduğu yanma süreci uzunluğu değerleri 600 bar püskürtme basıncına göre daha büyük değerler almış ve 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde yanma süreci 40° KMA değerini bir miktar aşmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında elde edilen sonuçlara bakıldığında, püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan yanma süreci uzunluğu değerleri daha büyük farklılıklar ortaya koymuştur. Özellikle 25° KMA püskürtme avansından daha büyük püskürtme avanslarında yanma sürecinde ortaya çıkan artış daha büyük değerler almıştır. 35° KMA püskürtme avansı aşıldığında ise bu artış son derece ciddi düzeye çıkmıştır. 35° KMA püskürtme avansında 60° KMA dolaylarında süren yanma prosesi, 40° KMA püskürtme avansında 100° KMA'ya yaklaşmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise 1000 bar verilerine son derece benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ancak tahmin edileceği üzere, büyük püskürtme avanslarında ortaya çıkan yanma süreci uzunluğu 1200 bar püskürtme basıncında bir miktar daha yüksek değerler almıştır. Erken püskürtme şartında daha büyük püskürtme basınçlarının daha büyük yanma süreci değerleri vermesi yakıtın yanma odası içerisine daha büyük basınç kuvvetiyle girmesine ve yakıtın yanma odasına daha iyi yayılmasına, buna bağlı olarak daha fakir karakterli bir makro karışımda yanmanın ortaya çıkmasıyla açıklanabilir. Bu bölgelerde Bölüm 4.1'den de

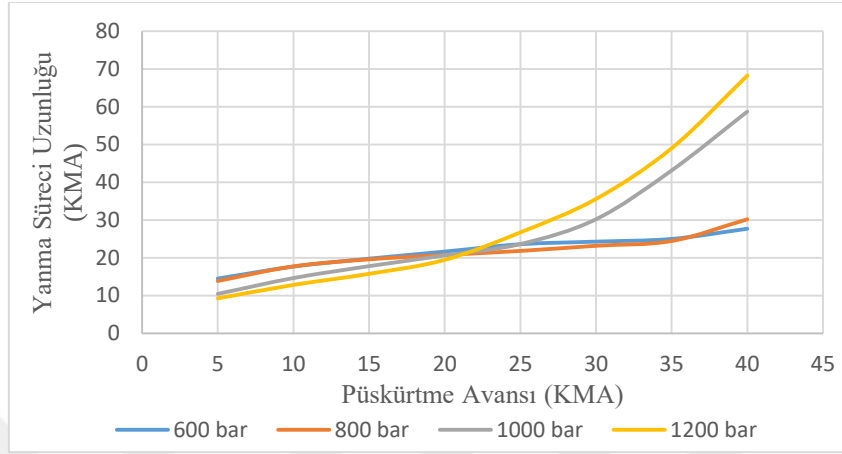
hatırlanacağı üzere TG sürecinin uzaması da yakıtın stagnasyon derinliğindeki artışa bağlanmıştı. Böylelikle bir önceki alt bölümde ortaya konan hipotezin yanma süreci verilerine bakılarak tutarlı bir değerlendirme olduğu söylenebilir.



Şekil 4.10 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan yanma süreci değerleri Şekil 4.11 üzerinde görülmektedir. Ortaya çıkan yanma süreci değişim eğilimleri genel karakter olarak bir önceki veri seti ile büyük benzerlik taşımaktadır. Ancak tahmin edileceği üzere farklı değişim eğilimlerinin ortaya çıktığı konumlar değişkenlik göstermiştir. Bu veri setinde küçük püskürtme avanslarında, düşük püskürtme basınçları daha büyük yanma süreci uzunlukları ortaya koymuş ve yüksek püskürtme basınçlarında yanma daha kısa sürede tamamlanmıştır. Bu karakter 20° KMA püskürtme avansına kadar gözlemlenmiştir. Püskürtmenin daha erken yapılması yani püskürtme avansının daha büyük değerlere ötelenmesiyle yüksek püskürtme basınçlarının ortaya koyduğu yanma süreci uzunluğu daha geniş bir zamana yayılmıştır. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncı verilerinde ortaya çıkan bu farklılık özellikle 25° KMA püskürtme avansından büyük püskürtme avanslarında kayda değer farklılıklarla kendini var etmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında, bu çalışma aralığındaki püskürtme avansının artışıyla en büyük yanma süreci verileri ortaya çıkmıştır. 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında ise bir önceki veri setine benzer şekilde püskürtme avansının artması ile ortaya çıkan yanma süreci değerlerindeki artış miktarı büyük püskürtme basınçlarına göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca, bir önceki veri setinde de gözlemlendiği üzere 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında her bir püskürtme avansında ortaya çıkan yanma süreci uzunlukları birbirine yakın

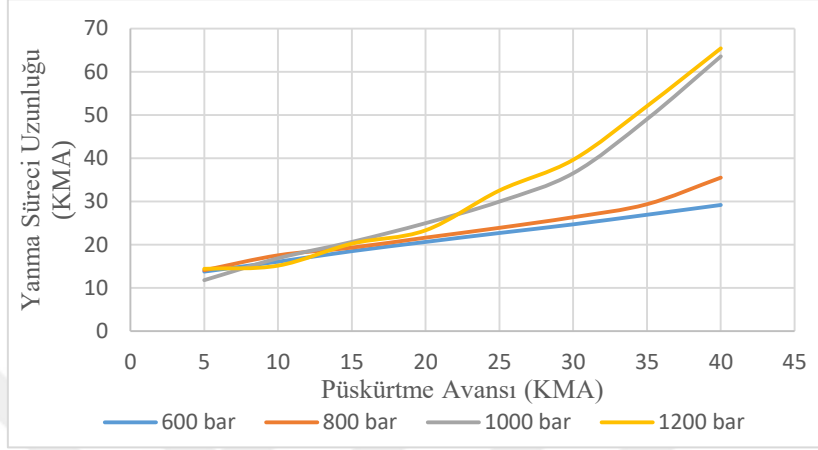
değerler almıştır. Bu iki püskürtme basıncı verisi bir eş eğilim grubu olarak değerlendirilebilir. Benzer şekilde 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncı verileri de her iki veri setinde de eş değişim eğilimleri sergilemiş ve karakteristik davranış olarak bir ortaklık ortaya koymuştur.



Şekil 4.11 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan yanma süreci değerleri Şekil 4.12'de görülmektedir. Şekil 4.12 verileri incelendiğinde püskürtme avansı ve püskürtme basıncının değişimine bağlı ortaya çıkan değişim eğilimlerinin bu alt başlık dahilinde incelenen önceki iki veri seti ile birebir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Püskürtmenin daha erken yapıldığı PCCI bölgesinde püskürtme basıncı ve püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan yanma sürecindeki değişimler aynı karakterde ve aynı gerekçelerle açık bir şekilde tekrardan ortaya çıkmıştır. Ancak burada düşük püskürtme avanslarında ortaya çıkan yanma süreci uzunluğu değerleri motor yükünün de daha yüksek olmasıyla beraber birbirine oldukça yakın değerler almış ve küçük püskürtme avanslarında püskürtme basıncının yanma süreci üzerindeki etkisi büyük oranda baskılanmıştır. Bu baskılanma 15° KMA püskürtme avansında belli belirsiz bir şekilde ortadan kalkmaya başlarken 20° KMA'dan büyük püskürtme avanslarında etkisini yitirmiştir. Şu ana kadar incelenen üç grafiğe de bakıldığında silindir içerisine sevk edilen yakıt miktarı arttıkça, yani motor yükü arttıkça, ortaya çıkan yanma süreci uzunlukları daha küçük değerlere gerilemiştir. Konvansiyonel dizel yanmasının baskın olduğu püskürtme avanslarında bu farklılık ciddi boyutlarda değildir. Ancak PCCI çalışma bölgesinde motor yükü arttıkça yanma sürecinde ortaya çıkan süreç kısaltmaları daha belirgin olarak kendini

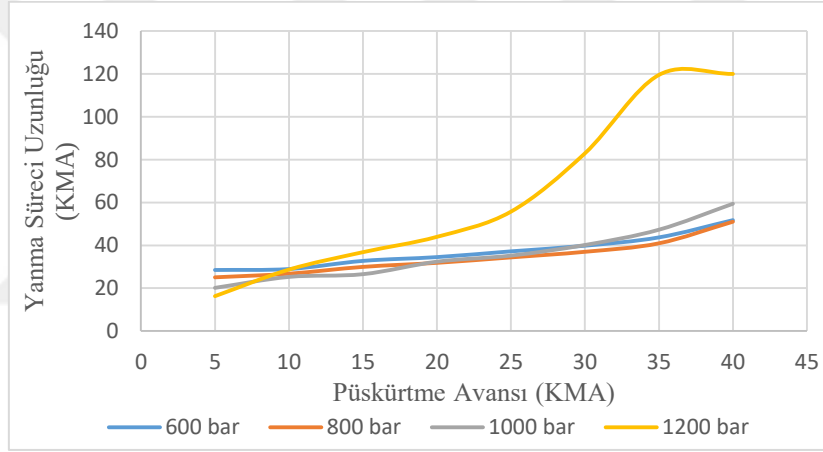
göstermiştir. Bu etki özellikle yüksek püskürtme basınçlarında daha gözle görülebilir bir durumdadır. Çünkü bu bölgelerde silindir içerisine sevk edilen yakıt miktarının artışına paralel olarak fakir karışımlı yanma karakteristiği bir miktar baskılanmıştır. Her ne kadar yanma hala fakir karakteristikte gerçekleşse de daha küçük hava fazlalık katsayıları ile yanma ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.12 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan yanma süreci uzunluğu verileri Şekil 4.13'te görülmektedir. Elde edilen veriler genel seyir açısından 1000 dev/dak verileriyle bir uyum içerisindedir. Bu veri setinde de düşük püskürtme avanslarında yüksek püskürtme basınçları daha düşük yanma süreci değerlerini ortaya koymuş, püskürtme avansı arttıkça yüksek püskürtme basınçlarının daha büyük yanma süreci uzunlukları ortaya koyduğu görülmüştür. Motor hızının artışıyla yüksek püskürtme basınçlarının daha uzun yanma süreçleri ortaya koyduğu değer, 1000 dev/dak verilerine kıyasla daha küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkmıştır. 10 ° KMA püskürtme avansı söz konusu eğilim için geçiş noktası olarak adlandırılabilir. 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan yanma süreci uzunluğu nispeten daha stabil değerler ortaya koymuştur. Özellikle püskürtme avansının 20° KMA'ya artışına kadar kayda değer değişiklik göstermediği, 30° KMA püskürtme avansından büyük püskürtme avanslarında ise farklılığın belirginleştiği görülmektedir. Bunun yanı sıra 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan verilere bakıldığında değişim miktarının bir miktar daha yüksek seyretmesiyle beraber 600 bar ve 800 bar verilerine daha yakın değerler aldığı görülmüştür. 1200 bar püskürtme basıncında ise tüm püskürtme avanslarında hızlı bir değişim ortaya

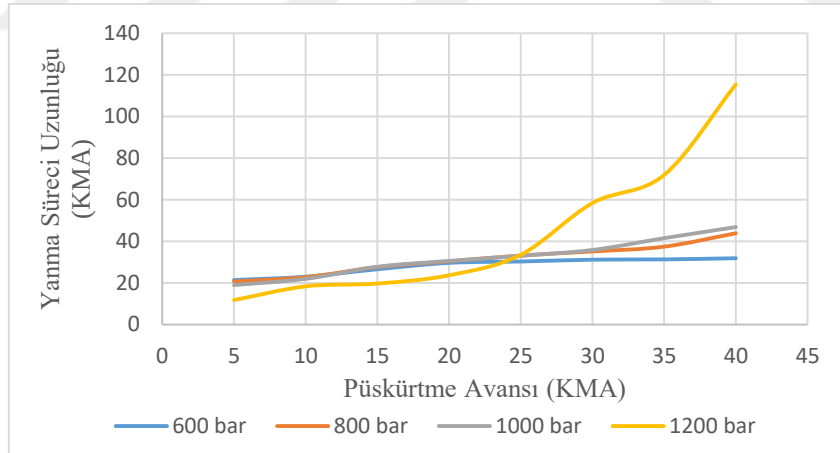
çıkıştır. Özellikle 25° KMA ile 35° KMA püskürtme avansları arasında yanma sürecinde çok ciddi artışlar ortaya çıkmış ve yanmanın tamamlanması daha uzun bir süre almıştır. Püskürtme avansının 35° KMA'dan 40° KMA'ya artışında ise yanmanın tamamlandığı süre bu durumdan pek etkilenmemiştir. Bu da 35° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan yanmanın lokal hava fazlalık katsayısı cepheleri açısından benzer karakter göstermesi ile açıklanabilir. Bu alt bölüm başlığı altında daha önce yorumlanan verilere bakıldığında yani 1000 dev/dak motor hızında elde edilen verilere bakıldığında yanma sürecinin KMA olarak uzadığı, ancak yanma hızının m/s olarak ise hızlandığı göze çarpmaktadır. Buna ilaveten de 1000 bar püskürtme basıncı serisinin 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncı serilerine daha yakın değerler gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.13 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

Şekil 4.14 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan yanma süreci değerlerini gözler önüne sermektedir. Ortaya çıkan sonuçlar 15 mg/strok sonuçları ile eş değişim eğilimleri göstermektedir. Burada göze çarpan önemli bir sonuç ise 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında 5° KMA ile 20° KMA püskürtme avansları arasında ortaya çıkan değerlerin birbiriyle son derece yakın olmasıdır. 1200 bar püskürtme basıncı verilerine bakıldığında 25° KMA püskürtme avansına kadar daha kısa yanma süreçleri gözlemlenirken, daha da artan püskürtme avansı ile 1200 bar püskürtme basıncında yanmanın daha uzun sürede tamamlandığı görülmüştür. 600 bar püskürtme basıncı verileri incelendiğinde, 5° KMA püskürtme avansından 15° KMA püskürtme avansına geçilene kadar yanma sürecinde sınırlı bir artış gözlemlenmiş, fakat sonrasında

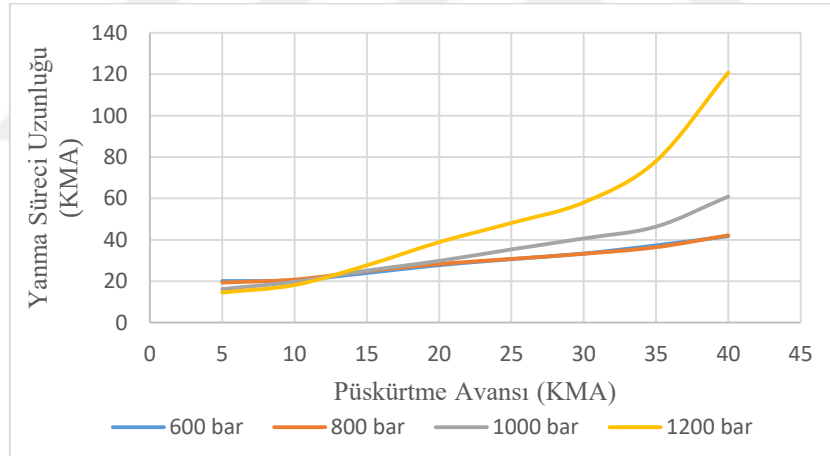
püskürtme avansı arttıkça yanmanın tamamlandığı süreç bu durumdan ciddi seviyede etkilenmemiştir. 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında 20° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra ortaya çıkan değerlerde yanma sürecinin püskürtme avansı artışına bağlı olarak düzenli bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir. Bu bölgedeki artış gradyanının çok büyük sayısal değerler almadığı göze çarpmaktadır. 1200 bar püskürtme basıncında ise aynı püskürtme avanslarında yanmanın tamamlandığı süreç ciddi bir tırmanış yaşamıştır. Ortaya çıkan verilere göre motor yükü arttıkça yanma sürecinde meydana gelecek olan kısalmanın düşük püskürtme basınçlarında daha belirgin şekilde kendini var ettiği görülmektedir. Ancak püskürtme basıncı yüksek bir değer aldığı anda yanma süreci bu durumdan pek etkilenmemektedir. Burada yanma sürecini ısı girişinin tamamen sona erdiği an ile referanslı olarak ölçüldüğünü hatırlamakta fayda vardır. Bu bölgede yüksek püskürtme basıncı etkisiyle enjektör çıkışında damlacık çapı küçülen yakıt zerreciklerinin yanma odasındaki hava hareketlerinin de yardımıyla piston oyuk bölgesi dışına savrulmaları ve burada adeta bir art yanma etkisi göstererek yanmaya katılmaları ile yanma sürecini uzatmaları önemli bir faktör olarak göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.14 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

Şekil 4.15 üzerinde 1500 dev/dak motor hızı 25 mg/strok yakıt püskürtülmesi şartında ortaya çıkan veriler görülmektedir. Genel eğilim açısından şu ana kadar ortaya çıkan verilerle paralellik barındıran sonuçlar gözlemlenmiştir. Ancak motor yükünün artışıyla yüksek püskürtme basınçlarının daha kısa yanma periyotlarını ortaya koyduğu püskürtme avansları daha küçük değerlere hapsolmuştur. 10° KMA püskürtme avansının aşılmasıyla 15° KMA püskürtme avansına gelindiğinde bu

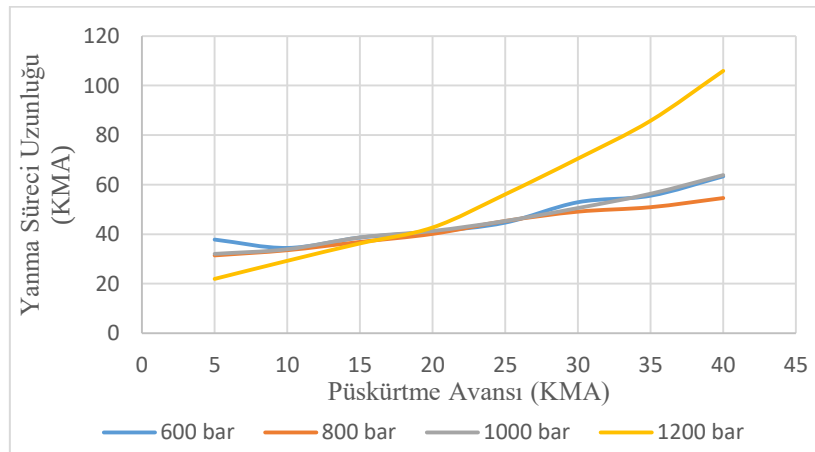
eğilimin ortadan kalktığı ve yüksek püskürtme basınçlarının daha büyük yanma süreçlerini ortaya çıkardığı görülmüştür. Bu veri setinde 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında tüm püskürtme avanslarında birbirine çok yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının artışıyla yanma sürecinde kabul edilebilir seviyede artış gözlemlenmiştir. Fakat 1200 bar püskürtme basıncında ve fazlaca erken yapılan püskürtme şartlarında oldukça uzun yanma süreci verileri ortaya çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında PCCI bölgesinde yanmanın tamamlandığı toplam sürenin motor yükünden yaklaşık olarak bağımsız olduğu görülmüş ve yanma süreci uzunlukları bu aralıkta birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Fakat buradan yola çıkarak yanmanın bu üç motor yükü için de benzer karakterler gösterdiğini söylemek imkansızdır. Burada yanmanın genel karakteristiği ile ilgili olarak sağlıklı bir yorum yapmak için ısı açığa çıkış hızı grafiklerinin altında kalan alanın incelenmesi gerekmekte ve aynı zamanda KYK50 (%50'lik kütleli yanma kesrisin yakalandığı konum) değerinin hangi noktaya denk geldiği de önemli bir parametre olarak incelenmelidir.



Şekil 4.15 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

2000 dev/dak motor hızında ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan yanma süreci uzunlukları Şekil 4.16 üzerinde görülmektedir. Motor hızının artışıyla beraber, daha önceki verilerde yer yer gözlemlenen püskürtme avansı değişimine bağlı olarak nadiren de olsa ortaya çıkan yaklaşık sabit yanma süreci değerlerinin tamamen ortadan kalktığı görülmektedir. Bu veri setinde, her bir püskürtme basıncında püskürtme avansının değişimiyle yanma sürecinde meydana gelen değişimin daha gözle görülebilir bir hale geldiği görülmektedir. Düşük püskürtme

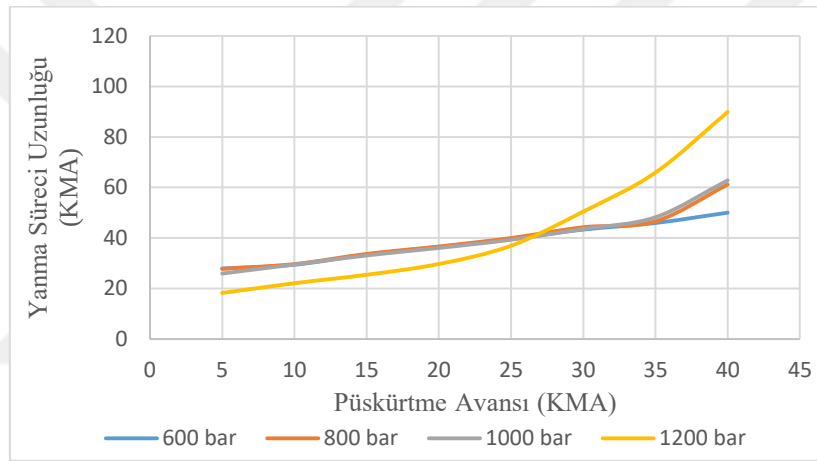
avanslarında, yüksek püskürtme basınçlarının daha düşük yanma süreci değerlerini ortaya koyması bu veri setinde de gözlemlenmiştir. 600 bar püskürtme basıncı veri seti göz önüne alındığında püskürtme avansının 5° KMA değerinden 10° KMA değerine yükselmesiyle yanma sürecinin bir miktar kısaldığı görülmüştür. Bu durumun 5° KMA püskürtme avansında, püskürtme basıncının düşük seviyede olması sebebiyle TG sürecinin uzaması ve genişleme fazına fazlaca kayan yanmada pistonun hareketi sebebiyle ortaya çıkacak olan sıcaklık düşüş eğiliminin kimyasal tepkime hızlarını düşürmesinden kaynaklandığı söylenebilir. 10° KMA püskürtme avansı ile 30° KMA püskürtme avansı aralığında 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarının benzer yanma süreç uzunluklarına yol açtığı görülmüştür. 1200 bar püskürtme basıncında ise ortaya çıkan yanma süreçleri belirgin bir şekilde diğer püskürtme basınçlarından ayrışmış davranış sergilemiştir. Motor hızının 1500 dev/dak değerinden 2000 dev/dak değerine çıkışı neticesinde silindir içi türbülans etkilerinin artışıyla yanma hızının m/s cinsinden artacağı rahatlıkla söylenebilir. Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, ortaya çıkan yanma hızı artışı 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basıncı altında raslantısal olarak KMA cinsinden 1500 dev/dak şartında ortaya çıkan yanma süreçleriyle hemen hemen aynı değerleri almıştır. Yani motor hızındaki artış m/s cinsinden yanma hızı ile hemen hemen aynı çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında elde edilen verilerde ise KMA cinsinden ortaya çıkan yanma hızının daha yüksek eğilimle ortaya çıktığı ve yanma sürecinin kısaldığı görülmektedir.



Şekil 4.16 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan yanma süreci verileri Şekil 4.17 üzerinde görülmektedir. Şekildeki grafik içerisinde

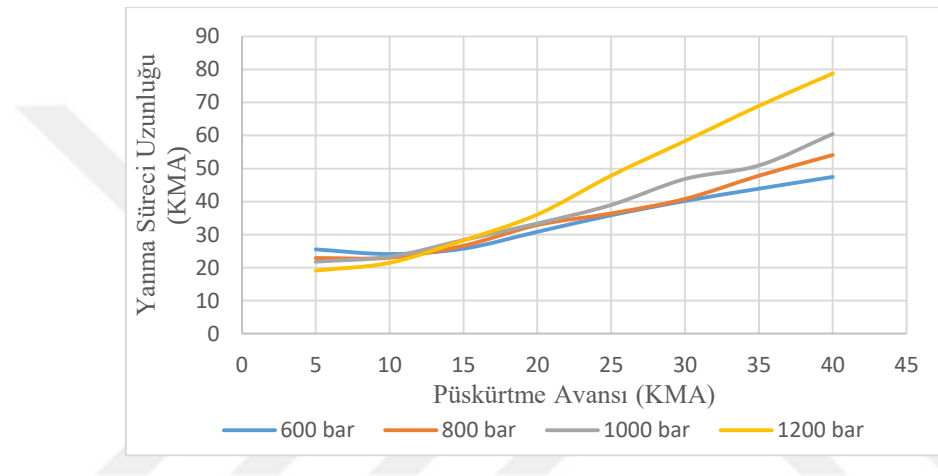
yer alan 32 veriye bakıldığında püskürtme avansının artışıyla yanmanın tamamlanması için gereken sürenin istisnasız olarak arttığı görülmüştür. Yüksek püskürtme avanslarında büyük püskürtme basınçlarının yanma sürecini uzatması bu veri setinde de gözlemlenmiştir. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında 35° KMA püskürtme avansına kadar benzer yanma süreci uzunlukları gözlemlenmiştir. 35° KMA püskürtme avansından 40° KMA püskürtme avansına geçişte ise 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında ortaya çıkan yanma süreci artışı, 600 bar püskürtme basıncında yaşanan artışa göre daha büyük değerler almıştır. Motor yükü artışına bağlı olarak 1200 bar püskürtme basıncında gözlemlenen yanma süreci uzunluğundaki düşüş diğer püskürtme basıncı veri setlerine göre daha büyük değerdedir.



Şekil 4.17 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

Şekil 4.18 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında ortaya çıkan yanma süreci verilerini göstermektedir. Genel eğilim olarak önceki veri setlerine göre farklı bir değişim eğilimi gözlemlenmemiştir. Benzer eğilimler farklı skalada ve farklı noktalarda ortaya çıkmıştır. Motor yükünün artışıyla yanma sürecinde meydana gelen kısaltmalar düşük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncına göre ciddi farklılıklar barındırmazken artan püskürtme avanslarında püskürtme basıncının etkisi tüm veri setlerinde gözle görülebilir bir hale gelmiştir. PCCI stratejisinin uygulanabilir olduğu yüksek püskürtme avanslarında, motor yükü arttıkça yanma sürecinde ortaya çıkan kısaltmalar kendini daha belirgin olarak göstermektedir. Bu şartlar altında ortaya çıkan yanmada $dP/d\alpha$ değerinin daha büyük sayısal değerlere ulaştığı tahmin edilebilir ve aynı zamanda buna bağlı olarak

dizel vuruntusu seviyesinin de artış gösterdiği öngörülebilir. Bu yorumların gerçekçi ve güvenilebilir olması için aynı zamanda püskürtmenin daha erken zamanda yapılmasına rağmen NO_x emisyonlarında bir düşüş sağlanamayıp, aksine artış görülmesi gerekmektedir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında da görüleceği üzere bahsi geçen işletme noktaları arasında püskürtme avansı arttıkça daha yüksek vuruntu seviyesinde bir yanma ortaya çıkmış ve NO_x emisyonları artış göstermiştir. Bu da yapılan yorumların doğruluğunu ve güvenilirliğini destekleyen bir faktör olarak düşünülebilir. Bu aralıkta PCCI stratejisi uygulanabilir olmaktan çıkmış ve motor yükü açısından sınırlandırılmıştır.



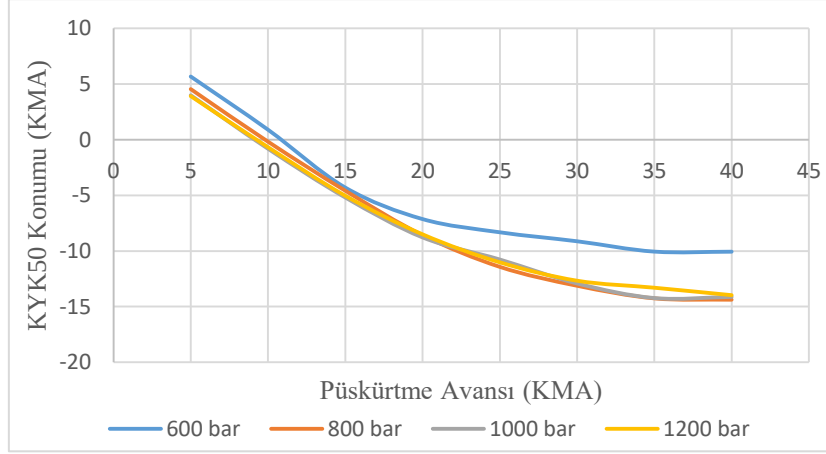
Şekil 4.18 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma süreci değerleri

4.3 KYK50 Verilerinin İncelenmesi

Şu ana kadar TG ve yanma süreci sürelerine dair bilgi verilmiştir. TG'nin uzamasıyla beraber yanma sürecinin de uzadığı görülmüştür. Ancak birçok veri setinde yanmanın tamamlanması çok uzun zaman almıştır. Bu eğilim özellikle 1200 bar püskürtme basıncında ve büyük püskürtme avanslarında karşımıza çıkmıştır. Bölüm 4.2'de belirtildiği üzere yanma sürecinin bu denli uzun sürmesi ısı girdisi yaratan son yakıt zerreciklerinin oksidasyonunun gecikmesine bağlı olarak ortaya çıktığı yorumlanmıştır. Bu sebeple yanma hızının bir başka ölçütü olan %50'lik ısı girişinin yaşandığı kütleli yanma kesri (KYK50) (mass burned fraction 50%, MBF50) değerlerinin de incelenmesi büyük yarar sağlayacaktır. Böylelikle yanmanın ilk evrelerinde ana hatlarında yanma hızının ne seviyede olduğu hakkında destekleyici bir kanaat oluşacaktır. Buna ilaveten yanma odası içerisinde ilk oluşan alev merkezlerine uzakta bulunan fazlaca fakir karakteristikteki dolgunun

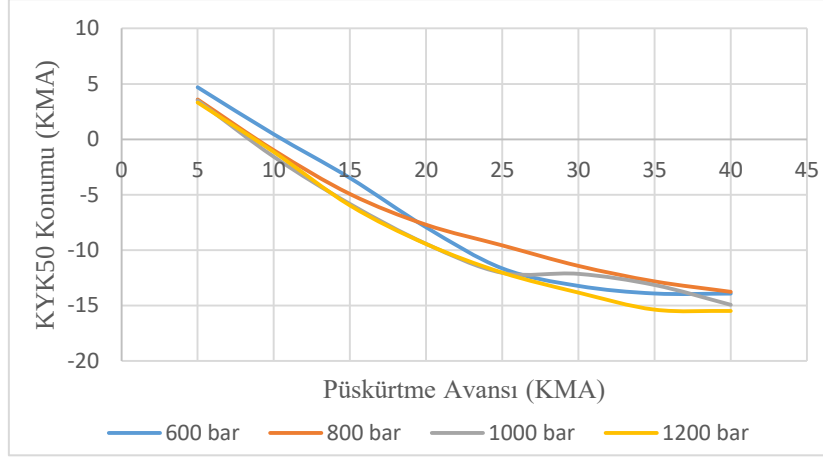
yavaş oksidasyonu sonucunda ortaya çıkabilecek olan fazlaca uzamış yanma süreci değerlerinin yarattığı durum hakkında bilgi sahibi olunabilecektir. Bu amaçla Şekil 4.19 - 26 ile KYK50 değerinin elde edildiği konum ortaya konmuştur.

Şekil 4.19 motor hızının 1000 dev/dak ve püskürtülen yakıt kütlesinin 15 mg/strok olduğu şartlarda ortaya çıkan KYK50 noktalarını sunmaktadır. Elde edilen verilere göre tüm püskürtme avanslarında püskürtme basıncının artırılmasıyla KYK50 noktasının daha erken elde edildiği görülmüştür. Burada “-” olarak görülen değerler ilgili noktanın ÜÖN’den önce ortaya çıktığını temsil etmektedir. Yani ilgili değerler ÜÖN sonrasına referans ile verilmiş ve grafikler üzerinde görülen pozitif değerler ilgili noktanın ÜÖN sonrasında elde edildiğini göstermektedir. Bu veriler ışığında küçük püskürtme avanslarında püskürtme basıncı arttıkça, yanmanın başlangıç noktasına referansla KYK50 noktasının daha erken elde edildiği söylenebilir. Fakat püskürtme avansının artışı ile düşük püskürtme basınçlarında KYK50 noktası daha erken elde edilmiş ve püskürtme basıncı arttıkça enjeksiyon başlangıcına referansla KYK50 noktasına ulaşılması daha uzun süre almıştır. Püskürtme basıncının değişimine bağlı veriler incelendiğinde 800 bar, 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında birbirine oldukça yakın KYK50 değerleri ortaya çıkmıştır. Fakat 600 bar püskürtme basıncında püskürtmenin daha erkene alınması ile karşımıza çıkan KYK50 değerlerine daha kısa sürede ulaşıldığı görülmüştür. Özellikle 30° KMA püskürtme avansı sonrasında bu fark 4° KMA ve 5° KMA dolaylarında gözlemlenmiştir. Yanma süreci açısından ortaya çıkan farklara bakıldığında KYK50 noktasındaki değişimlerin çok daha düşük seviyede değerler aldığı görülmüştür. Bu da yanma hızındaki esas farklılığın yanmanın ısı girişi açısından ilk yarısından ziyade yanmanın ikinci yarısında ortaya çıkan ısı giriş hızlarının düşüşünden kaynaklanmaktadır. Bu durum gerek püskürtme basıncı gerekse de püskürtme avansının artışına bağlı olarak ısı açığa çıkış hızı grafiklerinin üzerinde de görülebilmektedir. Bu da yapılan değerlendirmenin yerinde tespitler olduğu anlamına gelmektedir.



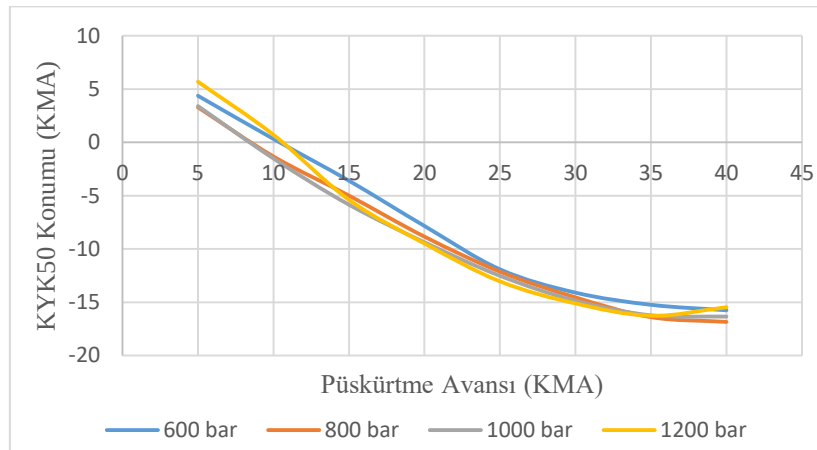
Şekil 4.19 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan KYK50 konumları

Püskürtülen yakıt kütlesinin aynı motor hızında 15 mg/strok'tan 20 mg/strok'a çıkartılması sonucunda ortaya çıkan KYK50 değerleri Şekil 4.20 üzerinde görülmektedir. Motor yükünün bir miktar artışıyla özellikle küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkan KYK50 farklılıkları belirginliğini büyük oranda yitirmiştir. Bu aralıkta sadece 600 bar püskürtme basıncı değerleri yanmanın bir miktar daha düşük hızlarda seyrettiğine dair emareler sunmaktadır. Püskürtmenin erken yapıldığı PCCI bölgesinde ise ortaya çıkan KYK50 noktalarının püskürtme basıncına hassasiyeti azalmış durumdadır. Bir önceki veri setinde 30° KMA'dan büyük püskürtme avanslarında ortaya çıkan 4° KMA ile 5° KMA dolaylarındaki KYK50 noktası farkı 2° KMA seviyesine gerilemiştir. Buna ilaveten motor yükünün artışıyla beraber 600 bar püskürtme basıncında yanmanın ilk yarısının daha kısa sürede tamamlandığı görülmüştür. Diğer püskürtme basınçlarında ise bu aralıkta belirgin farklar ortaya çıkmamıştır. Daha önce 35° KMA püskürtme avansından 40° KMA püskürtme avansına geçişte yanmanın başlangıç noktasının çoğunlukla veri setinde bu durumdan pek etkilenmediği görülmüştür. Burada da püskürtme avansı açısından aynı geçiş söz konusu olduğunda KYK50 noktalarının da gözle görülebilir farklar yaratmadığı görülmüştür. Ancak bu noktalarda yanma sürecinin daha uzun sürdüğü görülmüştür. Bu da yanmanın esas olarak ısı girişi açısından ikinci yarısının daha yavaş seyretmesi ile mümkündür.



Şekil 4.20 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları

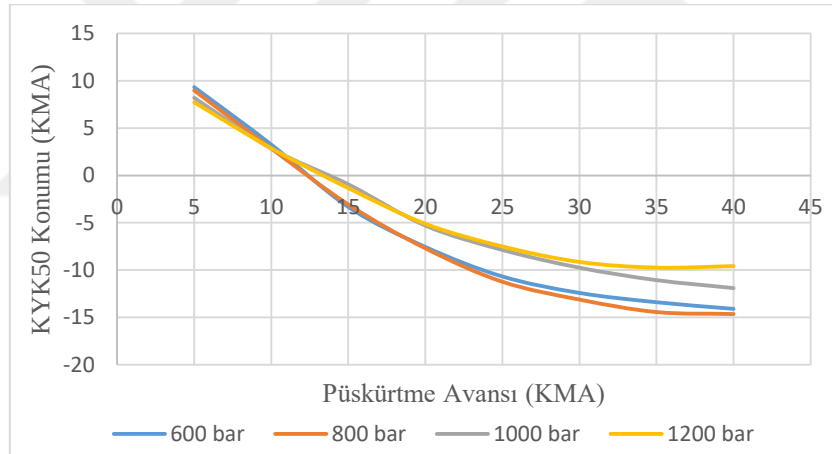
1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme kütleğinde ortaya çıkan KYK50 değerleri Şekil 4.21 üzerinde görülmektedir. Bu veri setinde düşük püskürtme avanslarında KYK50 noktasının ortaya çıktığı konum bir miktar farklılık barındırmıştır. Ancak püskürtme avansının artışıyla ve PCCI rejimi bölgesine geçildikçe aradaki bu farkların hemen hemen ortadan kalktığı görülmüştür. Daha önceki veri setleri ile bu veri seti karşılaştırıldığında küçük püskürtme avanslarında ve konvansiyonel dizel yanmasının gerçekleştiği şartlarda KYK50 değerleri açısından ciddi farklılıklar gözlemlenmemiştir. Ancak püskürtmenin daha erken yapıldığı koşullarda yanmanın ilk fazının bir miktar daha hızlanarak daha kısa sürede tamamlandığı görülmüştür.



Şekil 4.21 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları

Şekil 4.22 üzerinde 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan KYK50 değerleri görülmektedir. Düşük püskürtme

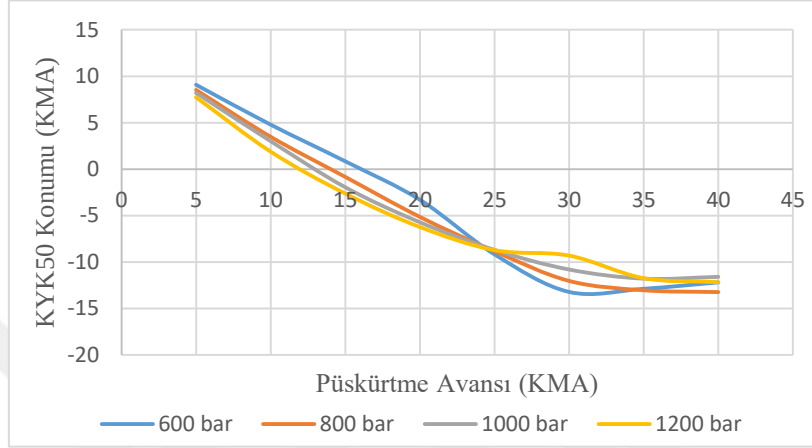
avanslarında daha önceki veri setlerine benzer şekilde püskürtme basıncının artırılması ile KYK50 değerine daha kısa sürede ulaşıldığı görülmüştür. Konvansiyonel yanma stratejisinde genellikle KYK50 noktasının ÜÖN'ye denk getirilmesi hedeflenmektedir. Motor hızının artışıyla bu noktanın tahmin edileceği üzere bir miktar daha büyük püskürtme avanslarında ortaya çıktığı görülmüştür. Konvansiyonel şarta göre püskürtmenin daha erken yapıldığı durumda ortaya çıkan KYK50 değerleri düşük ve yüksek püskürtme basınçlarında daha belirgin farklar ortaya koymuştur. Burada 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçları her bir püskürtme avans değerinde birbirine daha yakın sonuçlar vermiştir. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncı verileri de kendi aralarında birbirlerine daha yakın değerler ortaya koymuştur. Bu veri setinde de daha önceki veri setlerinde gözlemlendiği üzere püskürtme avansının artışıyla yanma sürecinde ortaya çıkan büyümenin esas olarak yanmanın ikinci %50'lik ısı girişi sürecinde ortaya çıktığı söylenebilir.



Şekil 4.22 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan KYK50 konumları

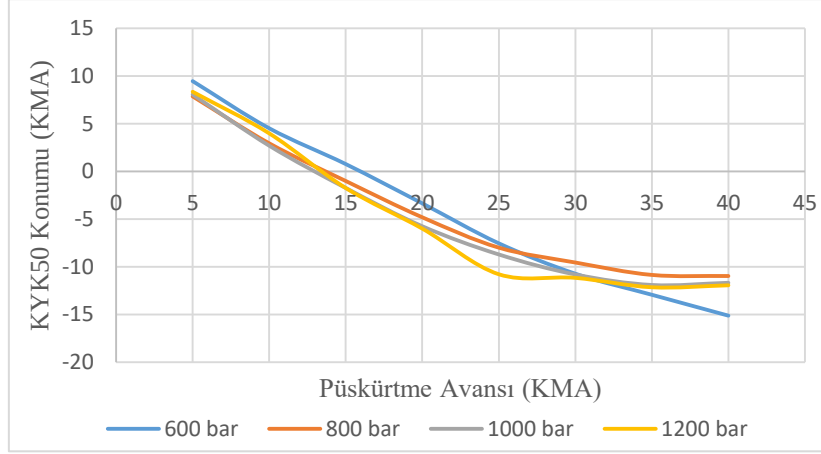
1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok çevrim başına yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan KYK50 değerleri Şekil 4.23 üzerinde gözükmemektedir. Bu çalışma aralığında 25° KMA püskürtme avansına kadar püskürtme basıncındaki artış KYK50 noktasına daha erken ulaşılmasını sağlamıştır. Devamında ise, yani PCCI bölgesinde düşük püskürtme basınçları ile çalışmak KYK50 noktası açısından bir miktar daha avantajlı hale gelmiştir. Fakat burada yer yer girift sonuçlar ortaya çıkmış ve mutlak bir eğilim gözlemlenmemiştir. Şu ana kadar incelenen tüm veri setlerinde olduğu gibi bu veri setinde de daha yavaş gerçekleşen yanmanın, yanmanın ısı girişi açısından ikinci %50'lik kısmında ortaya çıktığı söylenebilir.

Bu yorum yapılırken yanma süreci süreleri ve KYK50 noktası değerleri birlikte değerlendirilmiştir. Verilerine bakıldığında püskürtme avansının belli bir değerin üzerine çıkışı ile yanmanın başlangıç noktasının belirgin farklar barındırmadığı görülmüştü, KYK50 noktası verilerine bakıldığında da 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında tıpkı yanmanın başlangıç noktası gibi ısı girişinin ilk %50'lik kısmında da ortaya çıkan değişim eğilimleri benzerlik göstermiştir.



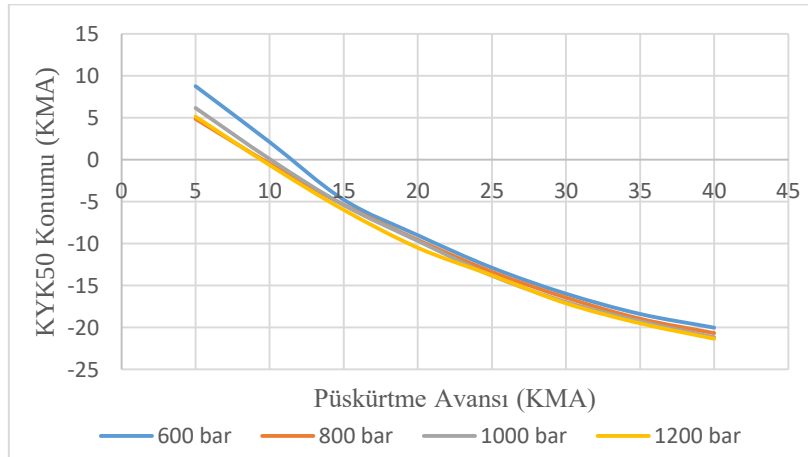
Şekil 4.23 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları

Şekil 4.24 üzerinde görülen verilerde de şu ana kadar ortaya çıkan değişim eğilimlerine aksi bir durum ortaya çıkmamıştır. Bu şartta püskürtme basıncı açısından eğilim değişimi yaratan geçiş bölgesi 25° KMA ile 30° KMA püskürtme avansı arasına ötelenmiştir. Motor yükü artışıyla geçiş noktasının daha büyük püskürtme avanslarında ortaya çıktığı bu veriler ışığında söylenebilir. 1500 dev/dak motor hızında, motor yükünün artışıyla büyük püskürtme avanslarında ortaya çıkan KYK50 değeri ile püskürtme başlangıcı arasındaki faz açısının yaklaşık aynı değerde olduğu püskürtme avansı aralığı ise daha erken elde edilmiştir. Buna ilaveten büyük püskürtme avanslarında KYK50 noktasına yanma odasında bulunan yakıt miktarının artışıyla bağlı olarak daha erken ulaşılmıştır. Yani motor yükü artışı ile yanma hızında meydana gelen artış daha net bir şekilde gözlemlenmiştir. PCCI rejimi bölgesinde ve 600 bar püskürtme basıncında, yanmanın ısı açığa çıkışı açısından ilk yarısının diğer püskürtme basınçlarına göre belirgin bir şekilde kısaldığı görülmektedir. Bu durum püskürtme basıncının düşüklüğü sonucunda yakıtın yanma odası içerisinde daha küçük bir hacim içerisinde karışım oluşturduğu ve yanmanın ortaya çıktığı bölgelerde lokal yakıt fazlalık katsayısının (equivalence ratio) daha büyük değerler aldığı hipotezi ile açıklanabilir.



Şekil 4.24 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan KYK50 konumları

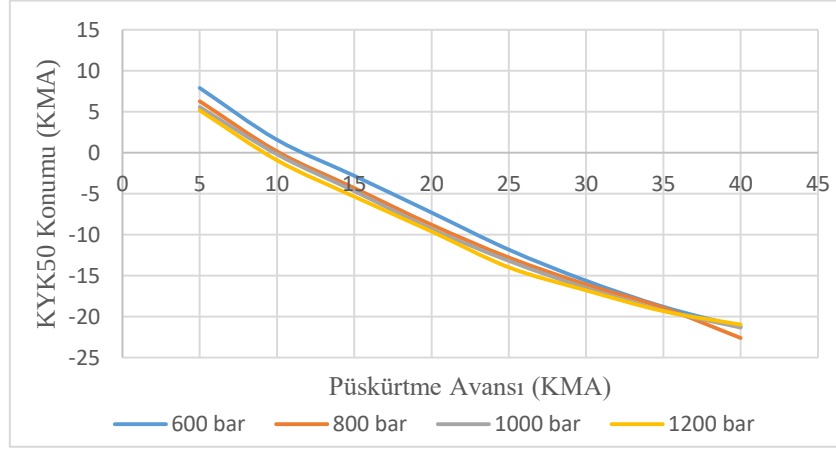
2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan KYK50 değerleri Şekil 4.25 üzerinde görülmektedir. Bu motor hızı ve motor yükü ikilisinde püskürtme basıncına bağlı olarak KYK50 değerinde karakter değişimi yaşanan herhangi bir veri gözlemlenmemiştir. Tüm püskürtme avanslarında 600 bar püskürtme basıncında KYK50 değerine daha uzun sürede ulaşıldığı görülmektedir. KYK50 değerine en kısa sürede ulaşılan püskürtme basıncı 1200 bar verileridir. Yanma başlangıcının genişleme fazında ortaya çıktığı 5° KMA gibi küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkan KYK50 noktası farklılıkları bir miktar daha belirgin iken püskürtmenin her bir öne çekilişinde gözlemlenen KYK50 farklılıkları büyük oranda ortadan kalkmış ve daha küçük değerlere sıkışmıştır.



Şekil 4.25 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan KYK50 konumları

Şekil 4.26 üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında ortaya çıkan KYK50 değerleri görülmektedir. Bu veri setinde gözlemlenen

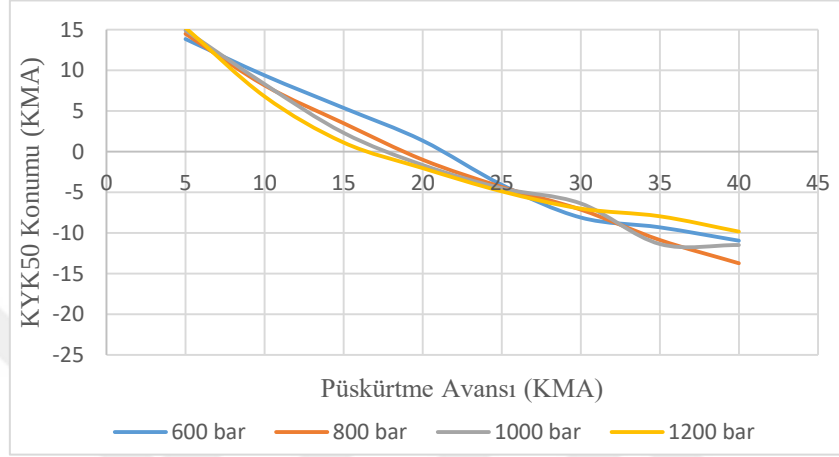
tüm değişim eğilimleri Şekil 4.25 için ortaya konan saptamalarla birebir aynıdır ve herhangi bir trend farklılığı gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.26 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan KYK50 konumları

Şekil 4.27 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan KYK50 değerlerini ortaya koymaktadır. Bu motor yükünde göze çarpan ilk sonuç ÜÖN'ye çok yakın yapılan püskürtme şartlarında, KYK50 noktasının aynı motor hızında ve daha düşük motor yükünde elde edilen sonuçlara göre, daha geç ortaya çıktığını gözler önüne sermektedir. Bu şart MK yanma stratejisinin baskın olduğu püskürtme avans aralığındadır. Bu aralıkta püskürtülen yakıt kütlesi arttıkça yakıtın silindir içerisinden çekeceği toplam ısı miktarı artış göstereceği için ortaya çıkacak iç soğumanın yarattığı diferansiyel sıcaklık farkı, daha düşük motor yüklerine nazaran, daha büyük değerler almıştır. Bu da yanmanın nispeten daha düşük ortam sıcaklıklarında ortaya çıkmasına yol açmış ve KYK50 noktasına daha geç ulaşılmıştır. Bu çıkarımın makul bir öngörü olabilmesi için bu aralıkta daha düşük motor yüklerine göre daha uzun TG süreçlerinin ortaya çıkmış olması bir zorunluluktur. Şekil 4.7 - 9'a bakıldığında da bu bölgede TG sürecinin ilgili motor yükü için artış gösterdiği görülmüştür. Bu da yapılan yorumun makul gerekçelerle temellendirildiğini göstermektedir. 25° KMA püskürtme avansından büyük püskürtme avanslarında elde edilen verilere bakıldığında net bir değişim eğilimi ortaya çıkmamıştır. Bu kısımda püskürtme avansı arttıkça, püskürtme başlangıcı ile KYK50 noktasının elde edildiği nokta arasındaki faz açısı sabit bir değişim eğilimi göstermemiş, yer yer artışlar yer yer azalmalar ortaya çıkmıştır. Bu da ilgili enjeksiyon kütlesinin, bu veri seti için büyük püskürtme avanslarında dizel vuruntusu emarelerinin ortaya çıkmasından ve belirgin değişim trendlerinin elde

edilememesinden kaynaklanmaktadır. Bu savı desteklemek adına $P-\alpha$ eğrilerinin daha dik artım davranışı gösterdiğine bakmak ve NO_x emisyonlarının bu aralıkta artış sergilediğini görmek, dahası indike verim değerlerinde diğer veri aralıklarına göre bir miktar daha dramatik düşüşler gözlemlemek gerekmektedir. Gerçekten de çalışmanın ileriki kısımlarında da görüleceği üzere bu eğilimler açıklıkla gözlemlenmiştir.



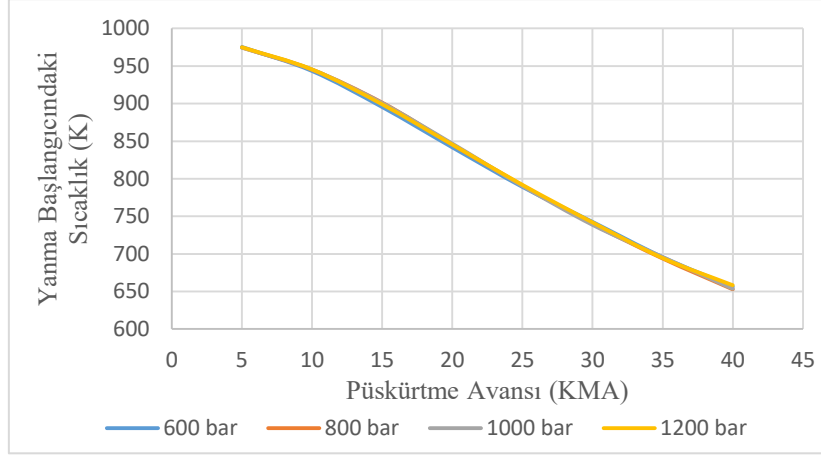
Şekil 4.27 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan KYK50 konumları

4.4 Yanma Başlangıcındaki Sıcaklık Verilerinin İncelenmesi

Ticari motorinin kendi kendine tutuşma sıcaklığının 500 K dolaylarındadır. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda, yakıt kendi kendine tutuşma sıcaklığına silindir içerisinden çektiği ısı yardımıyla ulaşmaktadır. Bunun için de yanma odası içerisindeki sıkıştırma havası ile yakıt arasında bir sıcaklık farkı bulunması zorunludur. Hatta bu sıcaklık farkının mümkün mertebe yüksek olması birim zamanda yakıt zerreciğine olan ısı transferini arttıracak için yanma başlangıcını kolaylaştıracak bir etki ortaya koyacaktır. Bölüm 2.1’de de belirtildiği üzere yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığına erişmesi yanmanın başlangıcı için yeterli görülemez. Aynı zamanda yakıtın hava fazlalık katsayısı açısından da tutuşabilir bir karışım oluşturma zorunluluğu vardır. Yanmanın başlangıcını, lokal hava fazlalık katsayısı ile anlık ortam sıcaklığı birlikte tayin eder. Çünkü lokal hava fazlalık katsayısının değişimine bağlı olarak ortaya çıkacak olan moleküler boyutlardaki alev çekirdeğinin kararlı bir alev çekirdeği oluşturabileceği sıcaklık değeri farklılık göstermektedir. Farklı püskürtme basıncı ve püskürtme avanslarında yanma odası içerisinde oluşacak olan dolgunun lokal hava fazlalık

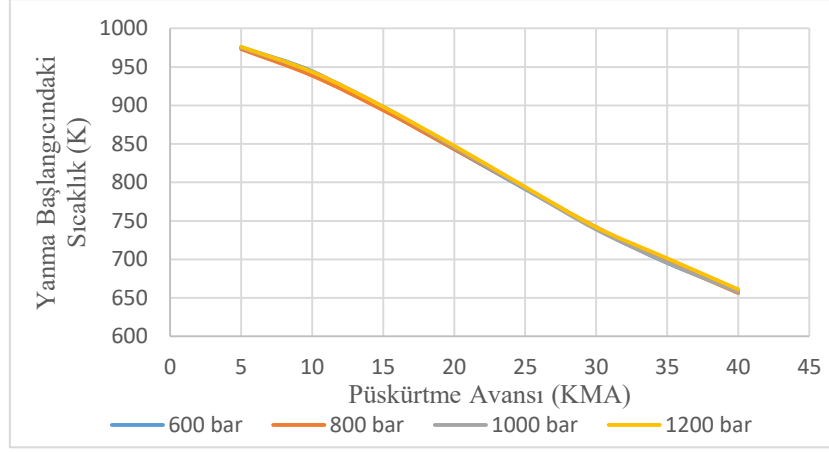
katsayısı değerleri farklılık barındıracaktır. Bu da yanma odası içerisinde oluşacak olan ilk kararlı alev cephelerinin ortaya çıkış sıcaklığını etkileyecektir. Araştırma uzayında bu etkinin gözle görülebilir bir şekilde ortaya çıkıp çıkmadığını görebilmek adına bu kısım çalışmaya dahil edilmiş ve yanmanın başladığı sıcaklık değerleri Şekil 4.29 - 36 üzerinde ortaya konmuştur.

Şekil 4.29 yanmanın başladığı anda silindir içerisindeki ortalama sıcaklık değerlerini 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok işletme şartında göstermektedir. Grafik üzerinde iki temel sonuç göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki yanmanın başladığı ortam sıcaklığının bu veri setinde yakıt enjeksiyon basıncından pratik bir yaklaşımla bağımsız oluşur. Sekiz farklı püskürtme avans değeri için de bu çıktı düzenli olarak gözlemlenmiştir. Her bir basınç verisi için çizilen eğriler neredeyse birbiriyle örtüşmüş durumdadır. Bu eğriler üzerindeki sayısal değerler tek tek incelendiğinde ise püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak birkaç K seviyesinde farklılıklar gözlemlenebilmiştir. Bu fark da yanmanın başladığı ortam sıcaklığının yanında son derece küçük kalmakta olup ihmal edilebilir düzeydedir. İlk bakışta özellikle PCCI bölgesinde püskürtme basıncının değişimiyle yanmanın başladığı ortam sıcaklığında bir miktar farklılıkların olmasını beklemek olağandır. Fakat burada püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak lokal hava fazlalık katsayılarının değişimi herhangi bir etki yaratmamıştır. Bu da her şartta yanma odası içerisinde stokiometrik hava fazlalık katsayısına yakın bir cephede yanmanın başladığına ve tüm püskürtme basınçlarında dolgu karakteristiği değişkenlik gösterse de alev çekirdeklerinin benzer dolgu karakteristiklerinde ortaya çıktığını göstermektedir. Şekil 4.28 bizlere püskürtme avansı arttıkça yanmanın ilk olarak ortaya çıktığı sıcaklık değerinin düşüş gösterdiğini sunmaktadır. Küçük püskürtme avanslarında TG süreci daha kısa sürmüştür. Bunun sebebi yakıt ile havanın yüksek sıcaklık ortamında etkileşim yaşamaya başlamasıdır. Bu sıcaklık değerlerinde kısa süre içerisinde yakıt yanmaya hazır hale gelebilmektedir. Ancak yüksek püskürtme basınçlarında yakıt ve sıkıştırma havası arasındaki bağıl sıcaklık farkı daha düşük seviyededir. Böylelikle yakıt yanmaya daha uzun sürede hazır hale gelmektedir. Grafik üzerinde görülen verilerin yanmanın başladığı esnadaki yakıt sıcaklık değeri olmadığını altı muhakkak çizilmelidir, bu sıcaklık silindir içi yığın sıcaklık değeridir.



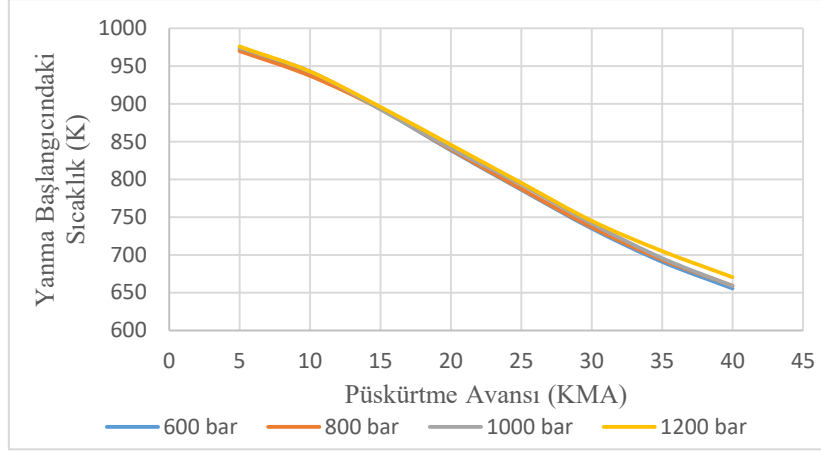
Şekil 4.28 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri

1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyon şartında ortaya çıkan yanma başlangıcı sıcaklık değerleri Şekil 4.29 üzerinde görülmektedir. Püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan değişim eğilimleri bir önceki veri seti ile birebir uyum içerisinde. Yani her bir püskürtme avansında püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak kayda değer bir fark ortaya çıkmamıştır. Fakat 15 mg/strok yakıt püskürtme şartına göre grafikler üzerinde çok belli belirsiz ayrımlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Püskürtme basıncının artışına bağlı olarak yanmanın başladığı sıcaklık değerinde erken püskürtme şartlarında az da olsa bir artış ortaya çıkmıştır. Küçük püskürtme avanslarında ise böyle bir eğilim gözlemlenmemiştir. PCCI rejiminin baskın olduğu büyük püskürtme avanslarında, motor yükündeki artışla ortaya çıkan yanmanın başladığı andaki ortam sıcaklığı değerinde yaşanan artış, silindir içerisinde daha fazla yakıt bulunmasına ve kütleli değeri artan bu yakıtın yanma odası içerisinde daha fazla ısı çekerek yakıtın yanmaya hazırlanma sürecini uzatmasından kaynaklanmaktadır. Bu sürecin uzamasıyla piston ÜÖN'ye biraz daha yaklaşmış ve silindir içi yığın sıcaklık değeri az da olsa artış göstermiştir. 1200 bar püskürtme basıncında erken püskürtme karakterinin belirginleşmesiyle, yani püskürtme avansının arttırılmasıyla ilk kararlı alev çekirdeklerinin oluştuğu sıcaklık değeri çok düşük miktarda da olsa diğer püskürtme basınçlarından büyük değer almıştır.



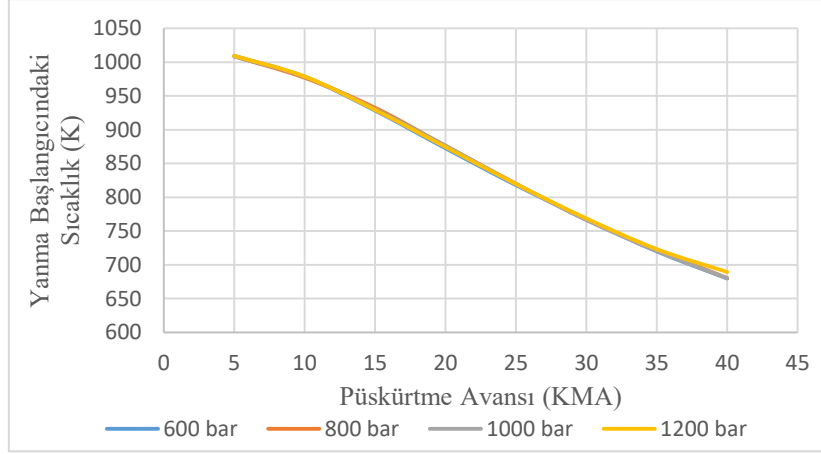
Şekil 4.29 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri

1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok işletme şartında ortaya çıkan yanma başlangıcı sıcaklık değerleri Şekil 4.30 üzerinde görülmektedir. Bu veri setinde, şu ana kadar incelenen her iki veri setinde de ortaya çıkan sonuçlara uyumlu çıktılar elde edilmiştir. Küçük püskürtme avanslarında farklı püskürtme basınçlarının benzer sonuçlar ortaya koyma eğilimi devam etmiştir. Motor yükünün artışıyla birlikte büyük püskürtme avanslarında yanma başlangıç sıcaklığındaki zayıf artış eğilimi bu veri setinde de gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncı verilerinde gözlemlenmeye başlanan ufak farklılıklar burada kendini bir miktar daha belirginleştirmiş ve yanmanın başlangıç sıcaklığının ayırt edilebilir bir farka 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ulaştığı görülmüştür. Burada ortaya çıkan ayrışmanın temel sebebi artan püskürtme basıncı ile yakıt atomizasyon rejiminin iyileşmesidir. Hem yakıt kütlelerinin artışı hem de Sauter ortalama çapının düşüşüyle ortaya çıkan yakıt yüzey alanı artışı yanma odası içerisinde çekilen ısıyı arttırmış ve yakıtın yanmaya hazırlanma süresini arttırmıştır. Söz konusu farklılığın karışımın lokal düzeydeki fakirleşmesine ve hava fazlalık katsayısı dengesizliklerinin azalmasına da bağlı olarak ortaya çıkabileceği yönünde çıkarımlar yapmak mümkündür. Fakat bu genellemeyi yapabilmek için söz konusu eğilimin farklı işletme şartlarında ve daha geniş bir püskürtme basıncı yelpazesinde de gözlemlenmiş olmasına gerek vardır.



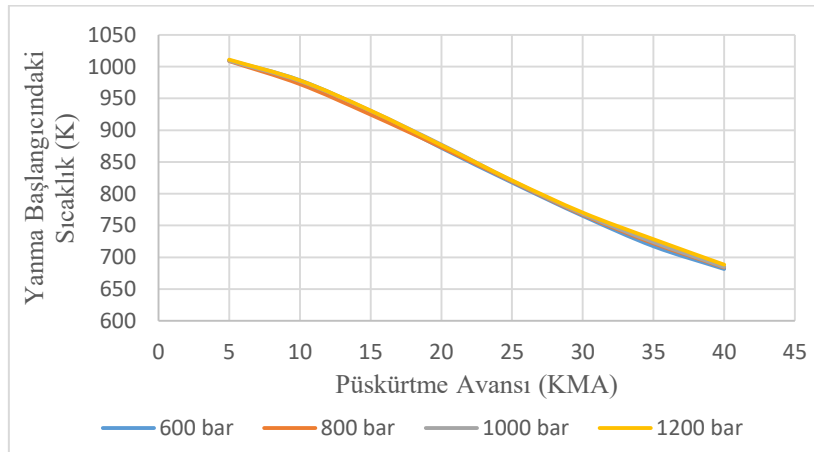
Şekil 4.30 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri

1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan yanma başlangıcı sıcaklık değerleri Şekil 4.31 üzerinde görülmektedir. Genel değişim eğilimleri açısından aynı yakıt enjeksiyon kütlelerinde ve 1000 dev/dak motor hızında elde edilen verilere son derece benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Sadece 1200 bar püskürtme basıncında, daha büyük motor yüklerinde belirginleşmeye başlayan yanma başlangıcı sıcaklık değerlerindeki farklılık bu sefer 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda da kendini göstermiştir. Bu farklılık sadece 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Bunun haricinde püskürtme basıncına bağlı olarak herhangi bir değişim eğilimi farklılığı gözlemlenmemiştir. İki veri seti arasında gözlemlenen tek fark yanmanın başladığı andaki yığın ortam sıcaklığı değerlerinin bir miktar daha yüksek oluşudur. Düşük püskürtme avanslarında bu farklılık 30 K dolaylarında iken yüksek püskürtme avanslarında ortaya çıkan farklılık bu değerlerin bir miktar daha üzerindedir. Motor hızı arttıkça yanmanın başladığı sıcaklık değerindeki artış, dt zaman aralığında dm kütlelerindeki yakıt transfer olan ısı miktarı artsa da da zaman aralığında yakıt transfer olan toplam ısı miktarının düşmesinden kaynaklanmaktadır. Böylelikle yanmanın başlangıcı görece ÜÖN'ye daha yakın bir konumda ortaya çıkmış ve söz konusu sıcaklık değerleri artış göstermiştir.



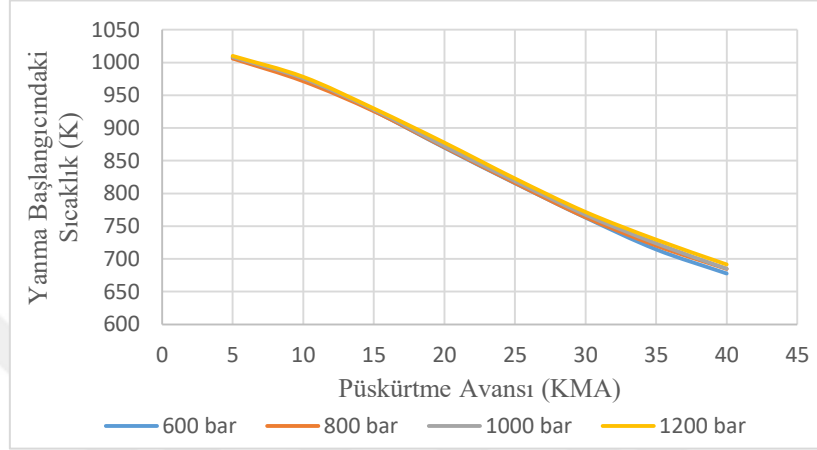
Şekil 4.31 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri

1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki yanma başlangıcı sıcaklıkları Şekil 4.32’de görülmektedir. Bu veri setinde de önceki örneklemelerdeki gibi motor yükü değişimiyle kayda değer fark ortaya çıkmamıştır. Ancak 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avansı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan yanma başlangıcı sıcaklıklarına 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında da ulaşılmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında yanma başlangıcı sıcaklığı bir önceki motor yükü ile yaklaşık aynı değeri alırken diğer püskürtme basınçlarında artış görülmüştür. Bu durum 1200 bar püskürtme basıncında yanma başlangıcının kısmen de olsa kimyasal kinetik kontrollü olarak ortaya çıktığına, diğer püskürtme basınçlarında ise yanma başlangıcının hala daha karışım kontrolü ile belirlendiğine dair ipuçları ortaya koymaktadır.



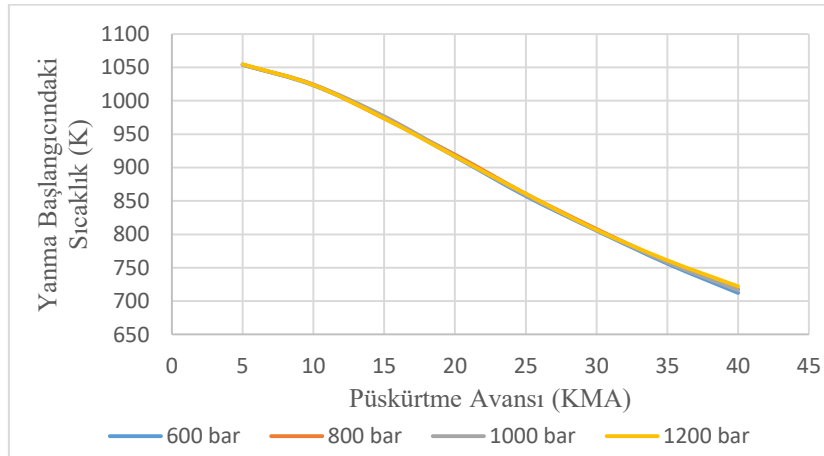
Şekil 4.32 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri

1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok'ta yanma başlangıcı sıcaklık değerleri Şekil 4.33'te görülmektedir. Şekil 4.33't verileri de önceki veri setlerine uygun eğilimler göstermiştir. Motor yükünün artışıyla yüksek püskürtme avanslarında ortaya çıkan farklılık daha erken görülmeye başlamıştır. Daha büyük püskürtme basınçlarının daha yüksek yanma başlangıcı sıcaklıklarına yol açma eğilimi 30° KMA püskürtme avansından itibaren gözlemlenebilir olmaya başlamıştır.

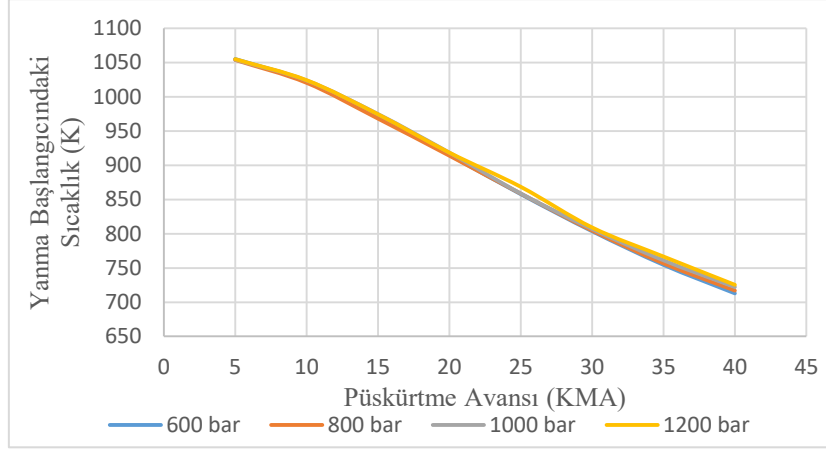


Şekil 4.33 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri

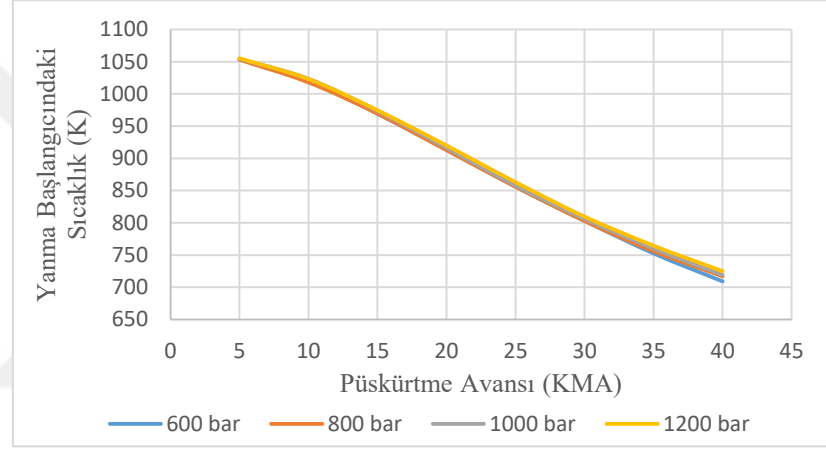
Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36 2000 dev/dak motor hızında 15 mg/strok, 20 mg/strok ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda yanma başlangıcı sıcaklıklarını göstermektedir. Bu hızda elde edilen verilerde de şu ana kadar ortaya çıkan karakteristik kendini var etmiştir. İlâveten motor hızının artışıyla yanma başlangıç sıcaklıklarının 30 K ile 40 K arasında yukarı ötelendiği söylenebilir.



Şekil 4.34 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri



Şekil 4.35 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri



Şekil 4.36 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan yanma başlangıç sıcaklığı değerleri

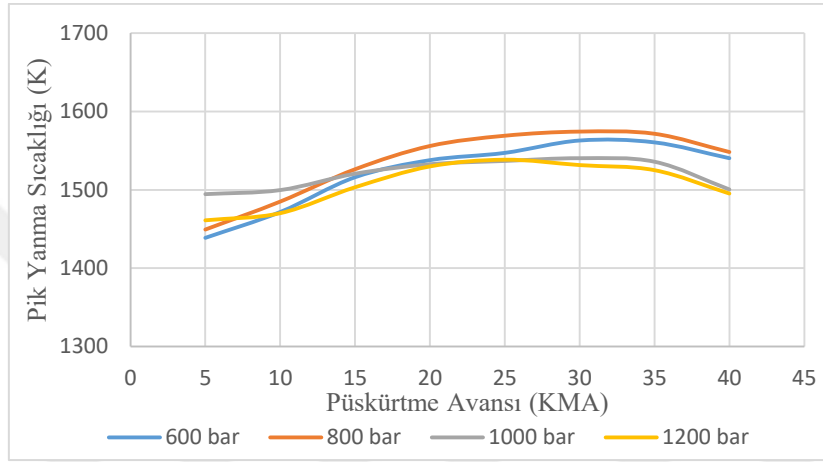
4.5 Pik Yanma Sıcaklığı Değerlerinin İncelenmesi

Şu ana kadar yer alan alt bölümlerde yanma başlayana kadar yanma odası içerisinde ortaya çıkan fiziksel koşullara dair incelemeler yapılmıştır. Bu alt bölümde ise yanma esnasında ortaya çıkan pik sıcaklık değerleri hakkında bilgi verilecektir. Bölüm 2.2 ve Bölüm 2.3 içerisinde içten yanmalı motorlarda ortaya çıkan NO_x salımlarının ortamdaki anlık sıcaklık değeri ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmişti. Yanma sıcaklıklarının yüksek sıcaklık bandına ulaşması engellendiğinde NO_x emisyonu oluşumunun büyük oranda önüne geçildiği bilinmektedir. Bölüm 2.3 içerisinde de belirtildiği üzere 1600 K sıcaklık seviyesinin altında kaldığı takdirde NO_x oluşumunun büyük oranda önüne geçilmiş olur ve bu şartlarda gerçekleştirilen yanmaya DSY adı verilir. Çalışmanın bu kısmında, tüm

araştırma uzayında yanma esnasında ortaya çıkan pik sıcaklık değerleri incelenmiş ve bu sıcaklık değerlerine bağlı kalınarak PCCI stratejisinin geçerliliğini koruyabildiği işletme şartlarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Şekil 4.37 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerlerini göstermektedir. Bu işletme şartında püskürtme avansı ve püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak 1438,7 K ve 1574,4 K arasında değişen anlık pik yanma sıcaklıkları ortaya çıkmıştır. Kaydedilen bu sıcaklık değerleri DSY için kaba bir sınır olarak tariflenen sıcaklık değerinin altında kalmaktadır. Hali hazırda bu sıcaklık değerlerine bağlı kalınarak bu veri setinde ortaya çıkacak tüm noktalarda NO_x salımlarının nispeten düşük değerler alacağı öngörülebilir. Püskürtme avansının 15° KMA'ya artışına kadar elde edilen verilerde düzenli bir değişim eğilimi ortaya çıkmamıştır. Burada sabit bir eğilimin yakalanmasının altında bazı noktalarda yanmanın genişleme fazına kayması, bazı noktalarda ise püskürtme basıncı farklılığına bağlı olarak TG sürecinin farklılık göstermesi ve ÜÖN öncesinde açığa çıkan yanma ısısının farklılık göstermesi yatmaktadır. Konvansiyonel dizel yanmasının gerçekleştiği püskürtme avanslarına gelindiğinde ise daha düşük püskürtme basınçlarının pik yanma sıcaklığını arttırıcı etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu süreçte 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan pik yanma sıcaklığındaki artım nispeten büyük değerler almıştır. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncına ait veriler ise nispeten daha stabil davranış sergilemiştir. Püskürtme avansının daha da arttırılması ve TG süreçlerinin uzamasına imkan verilmesiyle ortaya çıkan pik yanma sıcaklıkları arasındaki farklar artış göstermeye başlamıştır. Aynı zamanda bu aralıkta pik yanma sıcaklıkları ön karışım miktarının artması ve dolgu homojenliğinin iyileşmesiyle düşüş eğilimine girmiştir. PCCI bölgesinde gözlemlenen bu düşüşler literatür verileriyle de uyum içerisindedir. DSY veya PCCI bölgesinde yüksek püskürtme basınçlarında çalışmak pik yanma sıcaklığını düşürücü etki göstermiştir. Bu düşüş eğilimi yanma odası içerisinde daha homojen bir karışım ortaya çıkması ve daha fakir karakterli yanmanın oluşmasına bağlı olarak alev hızlarında ortaya çıkacak olan düşüş neticesinde gözlemlenmiştir. Aynı zamanda yanmanın daha erken başlaması ile yanma odası hacminde ortaya çıkan artış ısı kayıpları da arttırdığı için ortaya çıkan bu eğilim etkisini bir miktar daha arttırmıştır. 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında pik yanma sıcaklığında

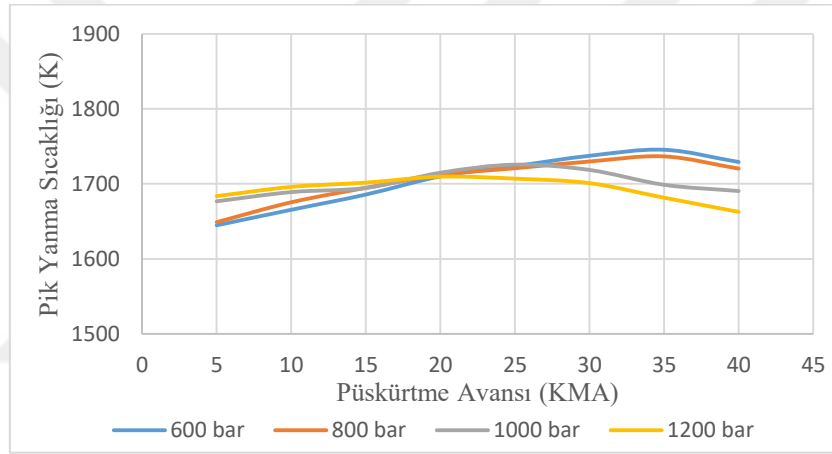
ortaya çıkan gözle görülebilir düşüşler 35° KMA püskürtme avansı sonrasında ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında da uzunca bir süre yaklaşık stabil kalan pik yanma sıcaklığı değeri yine 35° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra daha güçlü bir düşüş eğilimine girmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında 25° KMA püskürtme avansından büyük püskürtme avanslarında zayıf bir düşüş eğilimi gözlemlenmiş, daha erken bir zamanda ortaya çıkan bu düşüş eğilimi püskürtme avansının her bir artışında etkisini bir miktar daha güçlendirerek göstermeye devam etmiştir.



Şekil 4.37 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

Şekil 4.38 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerlerini göstermektedir. Motor yükünün bir miktar artışı ile bu veri setinde değişim eğilimleri açısından daha düzenli sonuçlar ortaya çıkmıştır. Pik yanma sıcaklıkları tahmin edileceği üzere bir miktar üst değerlere çıkarak 1648,9 K ile 1736,6 K arasında değerler almıştır. Elde edilen pik sıcaklık değerlerindeki minimum ve maksimum değerler arasında oluşan salım miktarı da daha düşük bir banda gerilemiştir. Küçük püskürtme avanslarında püskürtme basıncı arttıkça pik yanma sıcaklığı artış göstermiştir. 20° KMA püskürtme avansı civarında ise hemen hemen tüm püskürtme basınçlarında rastlantısal olarak birbirine çok yakın pik yanma sıcaklıkları elde edilmiştir. Sonrasında ise püskürtme avansının daha da artmasıyla ve PCCI karakterinin baskın hale gelmesiyle düşük püskürtme basınçları daha büyük pik yanma sıcaklıkları ortaya koymuştur. 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında pik yanma sıcaklığında ortaya çıkan düşüş 35° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme

basıncında ise bu değer 25° KMA püskürtme avansı dolaylarında gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının 5° KMA ile 30° KMA arasında değişimiyle son derece küçük pik yanma sıcaklığı farklılıkları ortaya çıkmış, en yüksek değer ise 20° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir. 20° KMA püskürtme avansından 30° KMA püskürtme avansına kadar ufak değişimlerle düşüş sergileyen pik yanma sıcaklığı değeri 30° KMA püskürtme avansı sonrasında daha hızlı bir düşüş eğilimine girmiştir. 30° KMA püskürtme avansında 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değeri, aynı püskürtme avansında 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerinden yaklaşık 30 K daha yüksektir. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avansında bu farklılık 60 K dolaylarına çıkmıştır.

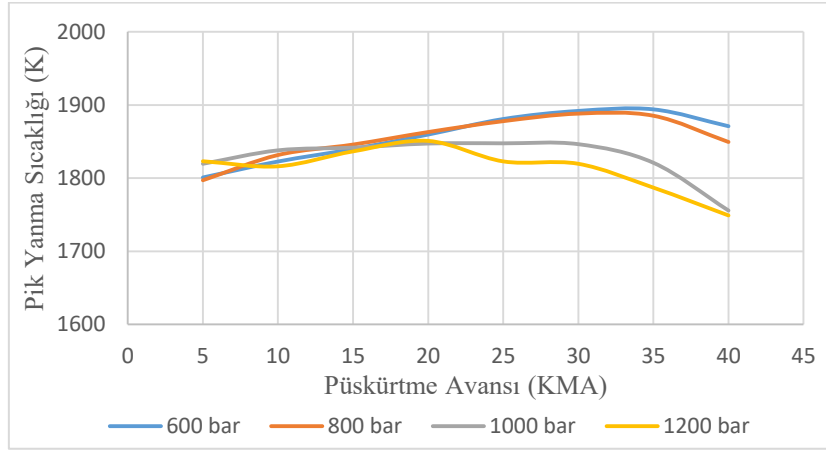


Şekil 4.38 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

Şekil 4.39 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerlerini göstermektedir. Daha önceki veri setlerinde en düşük pik yanma sıcaklığı değeri geç püskürtme şartında, en yüksek pik yanma sıcaklığı değeri ise ÜÖN'den uzaklaşıldıkça yani erken püskürtme şartında ortaya çıkmıştır. Bu veri setinde ise hem en yüksek hem de en düşük pik yanma sıcaklığı değerleri erken püskürtme şartında yani büyük püskürtme avans değerlerinde ortaya çıkmıştır. Düşük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncı farklılığına bağlı olarak ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri birbiri ile ciddi farklılıklar barındırmayıp nispeten yakın değerler almıştır. Hatta püskürtme avansının artmaya başlamasıyla ve konvansiyonel yanma rejiminin baskın hale gelmesiyle beraber aradaki farklılık iyiden iyiye ortadan kalkmıştır. 15° KMA püskürtme avansı dolaylarında yakalanan bu nokta sonrasında düşük püskürtme

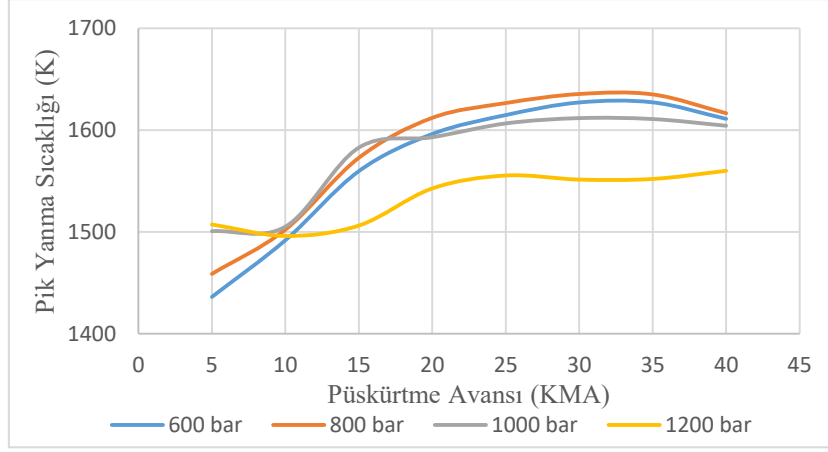
basınçlarının püskürtme avansının artışıyla daha yüksek pik yanma sıcaklığı değerlerini ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan bu artış eğilimi 35° KMA püskürtme avansına kadar devam etmiş ve tüm veri seti içerisinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı da bu noktada elde edilmiştir. 800 bar püskürtme basıncında ise pik yanma sıcaklığı değeri 30° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. Devamında ortaya çıkan düşüş gradyanı bir miktar daha büyük değerler almıştır. Daha yüksek püskürtme basınçlarında aynı püskürtme avans değerleri için bu düşüş eğilimi güçlenerek devam etmesi durumunda, bu eğilimin yanma odası içerisindeki lokal hava fazlalık katsayısı dengesizliklerinin azalması daha homojen ve fakir karışım karakteristiği dolayısıyla da daha yavaş bir yanmanın ortaya çıkmasından kaynaklı olduğu sonucuna varılabilir. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında elde edilen sonuçlar incelendiğinde özellikle 30° KMA püskürtme avansı sonrasında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı düşüş eğiliminin daha yüksek bir mertebede ortaya çıktığı görülmüştür. Bu da ortaya atılan geçici sebebin tutarlılık barındırdığını göstermektedir. 1000 bar püskürtme basınç eğrisinin genel değişim formu tekil olarak incelendiğinde tıpkı 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında olduğu gibi yanma odası içerisinde elde edilen pik yanma sıcaklığı değerlerinin nispeten geniş bir aralıkta stabil kaldığı tekrardan gözlemlenmiş ve ardından hızlı sayılabilecek bir düşüş trendi ortaya çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan pik yanma odası sıcaklığı değerleri 20° KMA püskürtme avansında en yüksek değerini almıştır. Bu nokta bir önceki veri setinde ortaya çıkan en yüksek yanma odası sıcaklığı değeri ile aynıdır. Ancak sonrasında ortaya çıkan düşüş eğilimi daha güçlü bir şekilde kendini var etmiştir. Burada motor yükünün artışıyla ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerlerinin esas itibariyle artış göstermesi tahmin edilebilirdi. Ancak yüksek püskürtme basıncının etkisi ile düşük ortam basıncında silindir içerisine enjekte edilen yakıt, yanma odası içerisindeki hava tarafından sağlıklı bir şekilde stagne edilemediği için silindir cidarlarına çarpmış ve yanmaya katılamamıştır. Buna bağlı olarak pik yanma sıcaklıklarında düşüşler ortaya çıkmıştır. Bu hipotezin güvenilirliği, ilgili işletme şartlarında ortaya çıkan THC emisyonunun artış göstermesiyle ve indike termik verim değerlerinin kötüleşmesiyle desteklenebilir. İlgili işletme şartında ileriki kısımlarda görülebileceği üzere bu iki parametrenin kötüleştiği görülmektedir. Dolayısıyla bu aralıkta her ne kadar motor yükü artmış olsa da yanmaya

katılamayan yakıt miktarı artış sergileyeceği için pik yanma odası sıcaklığı değeri düşüş eğilimine girmiştir.



Şekil 4.39 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

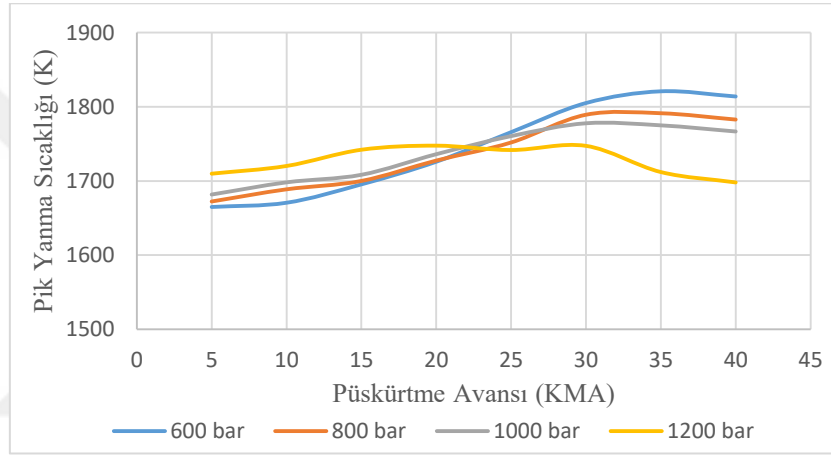
Şekil 4.40 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerlerini göstermektedir. Bu veri seti içerisinde de düşük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının artışına bağlı olarak ortaya çıkan pik yanma sıcaklığının artış eğilimi gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan sıcaklık farklılıkları ise 1000 dev/dak motor hızına göre daha yüksek seviyede ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten motor hızının artması sonucunda ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri de artış sergilemiştir. Püskürtme avansının artışıyla 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında 100 K'yi aşan pik yanma sıcaklığı artışı ortaya çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan pik sıcaklık farklılığı ise daha makul seviyelerdedir. 20° KMA ile 35° KMA püskürtme avans aralığında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri nispeten düşük farklılıklarla belli bir bandta değerler almıştır. Devamında püskürtme avansının daha da öne çekilmesiyle düşük püskürtme basınçlarında daha belirgin bir düşüş ortaya çıkmıştır. 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında, büyük püskürtme avanslarında kayda değer farklılıklar ortaya çıkmamıştır. Fakat yine de en düşük pik yanma sıcaklıkları 1200 bar püskürtme basıncında elde edilmiştir.



Şekil 4.40 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

Şekil 4.41 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme kütlelerinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerlerini göstermektedir. Bu veri setinde ortaya çıkan değişim eğilimleri daha net ve kararlı eğilimler göstermiştir. Bu işletme noktalarının tamamından deneysel veri alınmasının ve modellemenin daha hassas bir şekilde başarılmasının da bunda önemi büyüktür. Bu motor hızı ve yakıt enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı 1672,3 K ve 1820 K aralığında değerler almıştır. Ortaya çıkan sıcaklık değerleri NO_x emisyonlarının belirgin artış göstermeye başladığı eşik sıcaklık değerini aşmış durumdadır. Ancak yine de konvansiyonel dizel yanmasına göre oldukça makul ve düşük sayılabilecek sıcaklık değerlerinde çalışıldığı söylenebilir. Burada elde edilen sonuçlara göre, püskürtme basıncı arttıkça farklı püskürtme avanslarında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değişimi daha küçük değerlere sıkışmıştır. İnceleme seti içerisindeki en büyük pik sıcaklık farklılıkları 600 bar serisinde ortaya çıkmıştır. Hatta hem en düşük hem de en yüksek pik sıcaklık değerleri bu seride elde edilmiştir. 600 bar püskürtme basıncında, püskürtme avansının 5° KMA'dan 10° KMA'ya geçişi ile pik yanma sıcaklığında belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Ardından püskürtme avansının 35° KMA değerine uğraşmasına kadar pik yanma sıcaklığında artışlar ortaya çıkmıştır. 35° KMA püskürtme avansından 40° KMA püskürtme avansına geçildiğinde ise pik yanma sıcaklığında belli belirsiz bir düşüş görülmüştür. 800 bar püskürtme basıncında, püskürtme avansının 30° KMA'ya artışı kadar pik yanma sıcaklığında düzenli bir artış ortaya çıkmıştır. Sonrasında ise daha yavaş bir düşüş eğilimiyle pik yanma sıcaklığı azalmaya başlamıştır. 1000 bar püskürtme basıncında elde edilen veriler 800 bar püskürtme basıncında elde edilen verilerle

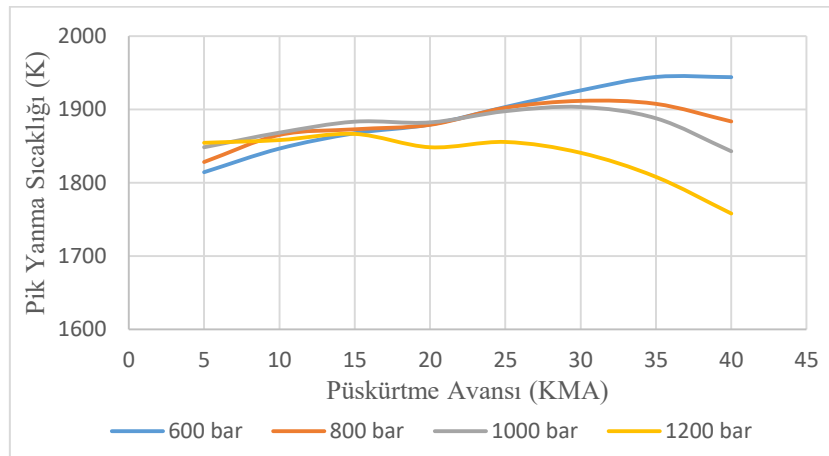
büyük benzerlik taşımaktadır. Ancak burada, püskürtme avansının değişimiyle gözlemlenen pik sıcaklık farklılıkları daha küçük değişim gradyanlarıyla kendini var etmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında, püskürtme avansının artışıyla 15° KMA ile 20° KMA bölgesinde yaklaşık pik sıcaklık değeri elde edilmiştir. Sonrasında 30° KMA püskürtme avansına kadar belli belirsiz bir düşüş, sonrasında da pik yanma sıcaklıklarında gözle görülür bir azalma ortaya çıkmıştır. Bu motor hızında, motor yükü arttıkça her ne kadar pik yanma sıcaklığı değeri artış gösterse de her bir püskürtme basıncında püskürtme avansı artışına bağlı olarak pik sıcaklığın düşüş eğilimine girdiği nokta daha küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.41 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

Şekil 4.42 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma sıcaklıklarını göstermektedir. Püskürtülen yakıt kütlelerinin artışıyla pik yanma sıcaklıklarında ortaya çıkacak artış tahmin edilen bir durumdur. Püskürtülen yakıt kütlelerinin 20 mg/strok'tan 25 mg/strok'a çıkarılması ile elde edilen en küçük pik yanma sıcaklığı 80 K, en büyük pik yanma sıcaklığı ise 120 K dolaylarında artış göstermiştir. Bu veri setinde elde edilen en küçük pik yanma sıcaklığı 1757,9 K, en büyük pik yanma sıcaklığı da 1944,2 K değerindedir. Gerek püskürtme basıncı gerekse de püskürtme avansının değişimine bağlı olarak düzenlilik arz eden değişim eğilimleri ortaya çıkmıştır. Elde edilen hem en düşük hem de en yüksek pik yanma sıcaklığı değeri 40° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. Küçük püskürtme avanslarında daha önceki veri setlerinde de gözlemlendiği gibi yüksek püskürtme basınçları daha büyük pik yanma sıcaklıklarını ortaya koymuştur. Püskürtme avansının artışı ve erken püskürtme

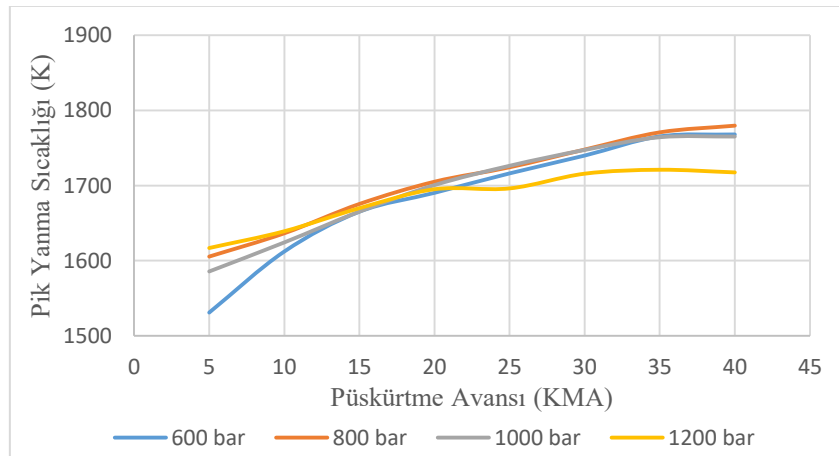
rejimi bölgesinde ise düşük püskürtme basıncı daha yüksek pik yanma sıcaklıklarının oluşmasına ortam hazırlamıştır. 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan değişim eğilimleri, 20 mg/strok veri setinde 600 bar için ortaya çıkan eğilimler ile büyük oranda örtüşmektedir. İlgili püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansına kadar düzenli bir artış gözlemlenmiş, sonrasında ise pik yanma sıcaklığı takriben yatayda seyretmiştir. 800 bar verisi incelendiğinde püskürtme avansının 5° KMA değerinden 10° KMA değerine ulaşmasıyla pik yanma sıcaklığında belirgin bir artış ortaya çıkmıştır. Sonrasında 30° KMA püskürtme avansına kadar pik yanma sıcaklığı oldukça küçük değişimler göstermiştir. Püskürtme avansının 30° KMA'nın üzerine çıkmasıyla pik yanma sıcaklıklarında düşüşler ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan sonuçlar 800 bar verisi ile büyük benzerlik taşımaktadır. Bu püskürtme basıncında, küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı bir miktar daha yüksek, büyük püskürtme avanslarında ise daha düşüktür ve ortaya çıkan farklılıklar daha büyük bir gradyanla kendini var etmiştir. 1200 bar püskürtme basıncı verilerine bakıldığında 15° KMA püskürtme avansına kadar sabite yakın seyreden değerler gözlemlenmiş ve son derece belirsiz bir artış ortaya çıkmış, sonrasında da pik yanma sıcaklıklarında düşüş gözlemlenmiştir. 25° KMA püskürtme avansından daha büyük püskürtme avanslarına gidildikçe, bu düşüş eğilimi etkisini arttırmıştır. Püskürtme avansını 25° KMA'dan 40° KMA'ya ötelenmesiyle pik yanma sıcaklığında 100 K dolaylarında düşüş ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.42 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

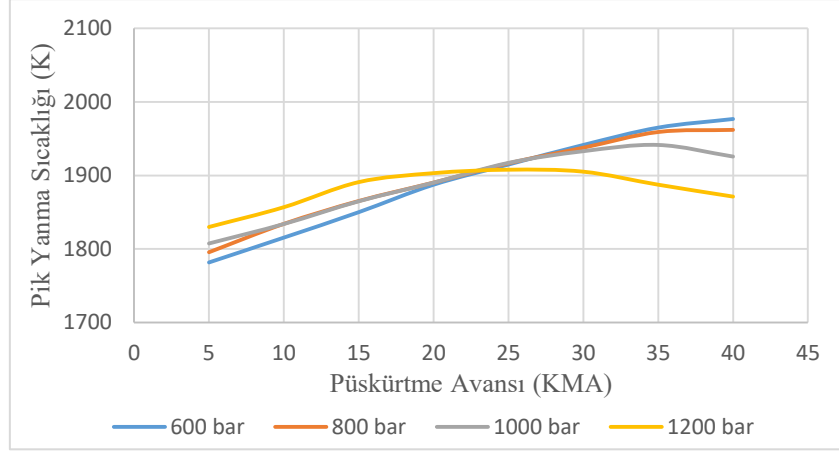
Şekil 4.43 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında gözlemlenen pik yanma sıcaklıklarını vermektedir. Grafikteki genel değişim

eğilimleri incelendiğinde 1500 dev/dak ve aynı yakıt püskürtme kütlesinde elde edilen değişim eğilimleriyle büyük bir benzerlik yakalanmıştır. Motor hızının artışıyla pik yanma sıcaklıklarında artış ortaya çıkmıştır. Veri seti içerisinde ortaya çıkan en düşük pik yanma sıcaklığı değeri 1531 K, en yüksek pik yanma sıcaklığı değeri ise 1779,7 K'dir. İlgili işletme şartında, tüm püskürtme basınçlarında püskürtme avansı arttıkça pik yanma sıcaklığında düzenli artışlar ortaya çıkmıştır. Tıpkı daha önceki veri setlerinde de gözlemlendiği gibi küçük püskürtme avanslarında, yüksek püskürtme basınçları daha büyük pik yanma sıcaklıklarına yol açmıştır. Püskürtme avansı arttıkça da büyük püskürtme basınçları pik yanma odası sıcaklık değerinin düşüşüne sebep olmuştur. Püskürtme basıncı arttıkça, püskürtme avansı değişimine bağlı olarak ortaya çıkan pik yanma sıcaklığındaki değişim daha düşük bir seviyeye inmiştir. 600 bar püskürtme basıncında, püskürtme avansının 15° KMA değerine kadar artışıyla beraber pik yanma sıcaklığında ciddi değişimler ortaya çıkmıştır, püskürtme avansının daha da artışıyla ortaya çıkan değişimler ise daha makul seviyededir. 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde 600 bar serisi ile belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır. Ancak püskürtme avansının artışıyla bu farklar büyük oranda perdelenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansından 40° KMA püskürtme avansına geçildiğinde pik yanma sıcaklığında anlamlı bir değişim ortaya çıkmamıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise 30° KMA püskürtme avansına kadar nispeten daha yavaş bir artış, sonrasında ise stabile yakın bir davranış gözlemlenmiştir.



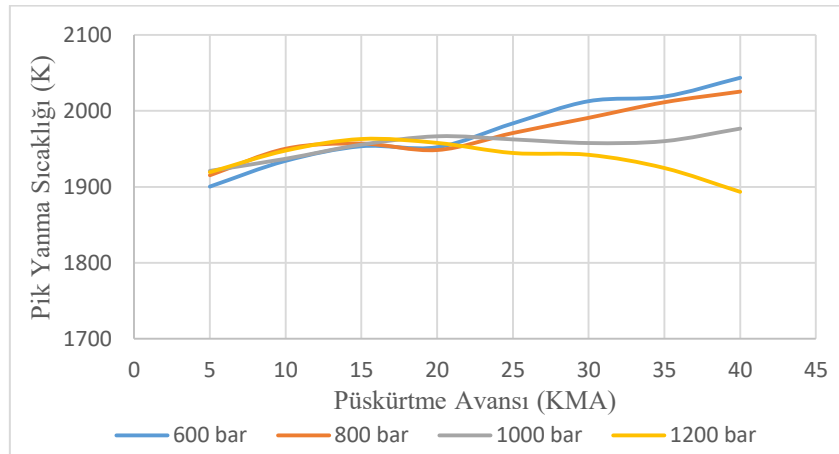
Şekil 4.43 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

Şekil 4.44 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında gözlemlenen pik yanma sıcaklıklarını vermektedir. Veri seti içerisinde, genel çalışma uzayında ortaya çıkan değişim eğilimleri ve bilhassa da 1500 dev/dak ve 20 mg/strok veri setindeki değişim eğilimlerine son derece benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu grupta elde edilen verilere bakıldığında en düşük pik yanma sıcaklığının 1781,6 K, en yüksek pik yanma sıcaklığının ise 1962 K değerinde olduğu görülmüştür. Hem en düşük hem de en yüksek pik yanma sıcaklığı 600 bar veri setinde ortaya çıkmıştır. 600 bar veri setinde püskürtme avansının değişimine bağlı olarak 200 K civarında pik yanma sıcaklığı farklılıkları gözlemlenmiştir. 600 bar veri setinde püskürtme avansının artışıyla pik yanma sıcaklıklarında düzenli artış gözlemlenmiştir. 30° KMA püskürtme avansına kadar nispeten yüksek farklılıklar ortaya çıkmış, sonrasında ise artış eğilimi zayıflayarak devam etmiştir. 800 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının 35° KMA'ya gelişine kadar bir miktar daha yavaş bir artış söz konusudur. Püskürtme avansının 35° KMA'dan 40° KMA'ya geçişinde ise belirgin bir değişim ortaya çıkmamıştır. 1000 bar püskürtme basıncında ise 30° KMA püskürtme avansına kadar pik yanma sıcaklıklarında artış görülmüş, 30° KMA püskürtme avansı ile 35° KMA püskürtme avansı dahilinde pik yanma sıcaklıkları son derece yakın değerler almış, 40° KMA'ya geçişte ise düşüş gözlemlenmeye başlanmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında 20° KMA püskürtme avansına kadar pik yanma sıcaklıklarında artış gözlemlenmiş, bu noktada ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değeri 30° KMA püskürtme avansına kadar takriben korunmuş sonrasında ise düşüşe geçmiştir. 5° KMA püskürtme avansında en büyük püskürtme basıncı, en küçük püskürtme basıncına göre yaklaşık 50 K daha yüksek pik yanma sıcaklığı ortaya koymuştur. 20° KMA ve 25° KMA aralığında püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan farklar en düşük seviyededir. Bu aralıktan sonra yüksek püskürtme basınçları daha düşük pik yanma sıcaklıkları ortaya koymuş ve 40° KMA püskürtme avansında iki sınır püskürtme basınç değeri arasındaki pik yanma sıcaklığı farkı 100 K değerini aşmıştır.



Şekil 4.44 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

Şekil 4.45'te 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki pik yanma sıcaklıkları görülmektedir. Veri setinde önceki veri setlerindeki eğilimler ışığında farklılıklar görülmüştür. Küçük püskürtme avanslarında birbirine yakın pik yanma sıcaklığı değerleri gözlemlenmiş ve püskürtme basıncında artış pik yanma sıcaklığını arttırmıştır. Püskürtme avansının 10° KMA ile 20° KMA aralığındaki bölümü oldukça yakın değerler sergilemiştir. Düşük püskürtme basınçlarının daha yüksek pik yanma sıcaklığı ortaya koyduğu aralık motor yükünün artışıyla ÜÖN'ye daha yakın bir konuma yerleşmiştir. 600 bar 800 bar ve 1000 bar veri setlerinde püskürtme basıncının artışıyla pik yanma sıcaklığı artmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise 15° KMA püskürtme avansına kadar belli bir artış, sonrasında da püskürtme avansının daha da artışıyla daha güçlü düşüş ortaya çıkmıştır.



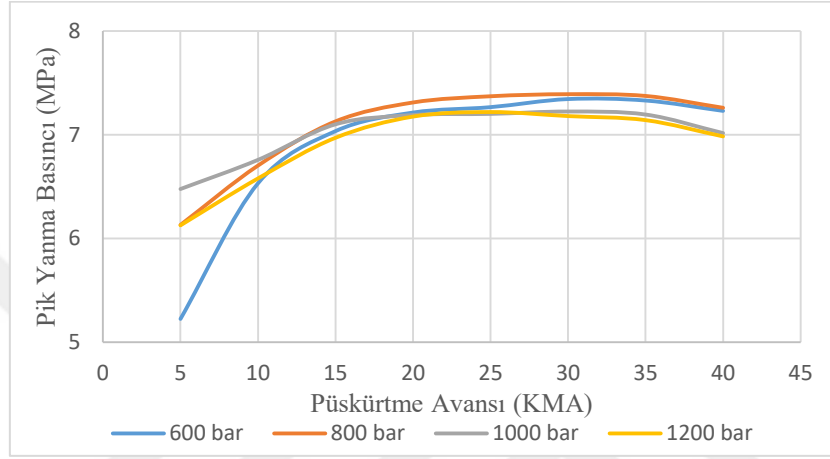
Şekil 4.45 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri

4.6 Silindir İçi Pik Basınç Değerlerinin İncelenmesi

Silindir içi pik basınç değerleri performans parametreleri üzerinde esas itibariyle doğrudan formüle edilmiş bir etkiye sahip değildir. Her ne kadar ortaya çıkan pik basınç değerleri bizlere OİB veya diğer performans parametreleri üzerinde bir öngörü geliştirmemize olanak tanısa da bu bazen yanıltıcı olabilmektedir. Çünkü termodinamik çevrimin üreteceği iş için esas önemli olan pik basınç değerinin tek bir noktadaki sayısal değeri değil, bu değere nerede erişildiği ve elde edilen yüksek basınç seviyesinde ne kadar süre kalındığıdır. Silindir içi pik basınç değerleri bu gerekçeyle doğrudan efektif veya indike iş ile ilişkilendirilemez ise de bu konuda bize bazı tahminler vermesi sebebiyle çalışmaya dahil edilmiştir. Şekil 4.46 - 54 üzerlerinde yanma esnasında ortaya çıkan pik basınç değerleri görülmektedir.

1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma basıncı verileri Şekil 4.46'da görülmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere 5° KMA püskürtme avansında yanma büyük oranda ÜÖN sonrasında gerçekleşmektedir. Bu sebeple de 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan pik yanma basıncı değerlerinin nispeten düşük olması anlaşılabilir bir durumdur. Bu püskürtme avansında, püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak net bir eğilim ortaya çıkmamıştır. 5° KMA püskürtme avansında en düşük pik yanma basıncı 600 bar püskürtme basıncında elde edilirken, en yüksek pik yanma basıncı 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkmış, püskürtme basıncının 1000 bar'dan 1200 bar değerine çıkmasıyla beraber pik yanma basıncı tekrardan düşüş eğilimine girmiştir. Bu durum yanmanın başladığı andaki silindir içerisinde var olan karışım karakteristiği gereğince oluşmuştur. Püskürtme basıncının artışıyla ilk etapta yakıtın atomizasyon rejimi iyileşmiş ve TG süreci düşüş göstermiştir. Bu durum Bölüm 4.1 verileri üzerinde de görülmektedir. Ancak püskürtme basıncının 1200 bar seviyesine çıkışıyla TG süresinde kayda değer bir farklılık ortaya çıkmasa da pik basınç değeri düşüş sergilemiştir. Bu da yanmanın daha düşük bir hızla ilerlemesiyle ve ısı açığa çıkış hızının daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Püskürtme avansının artışıyla yanma konvansiyonel dizel yanmasına yakınsamış ve silindir içi pik yanma basınç değerleri tırmanışa geçmiştir. Püskürtme avansı daha da arttırılarak erken püskürtme evresine geçilmiş ve silindir içi pik basınç değerleri düşmeye başlamıştır. Erken püskürtme veya PCCI rejimi bölgesinde gözlemlenen pik basınç değerindeki düşüş bir yandan yanma hızının azalmasına, bir diğer

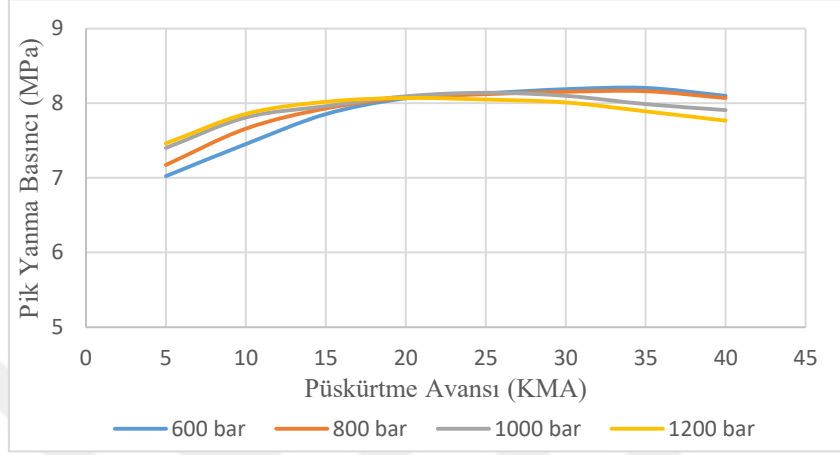
yandan da yanmanın erken başlaması sonucunda termal kayıpların artmasına bağlıdır. Termal kayıplar artış gösterdikçe, iş gazından cidarlara doğru olan ısı transferinin artışı sonucunda yanma odasında anlık sıcaklık düşmüş, bu da bir basınç düşüşüne ortam hazırlamıştır. Farklı püskürtme basınçları için püskürtme avansının 15° KMA ile 20° KMA arasındaki bir değerinden 30° KMA ile 35° KMA değerine geçene kadar silindir içi pik basınç değerlerinde ciddi farklar ortaya çıkmamıştır. Sonrasında ise bir miktar düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 4.46 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma basıncı verileri Şekil 4.47'de sunulmuştur. Veriler incelendiğinde püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak düzenli bir değişim eğilimi ortaya çıkmıştır. Küçük püskürtme avanslarında püskürtme basıncı arttıkça yanma odasında ortaya çıkan pik basınç değeri artış göstermiştir. 20° KMA püskürtme avansında bu etki ortadan kalkmış ve tüm püskürtme basınçlarında birbiriyle yaklaşık pik yanma odası basıncı gözlemlenmiştir. Sonrasında ise püskürtme avansının daha da artışıyla belli bir süre silindir içi pik basınç değerinde gözle görülür bir değişim ortaya çıkmamıştır. 30° KMA püskürtme avansı ve sonrasında ise 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarının da pik yanma odası basıncı düşüş eğilimine girmiştir. 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncında ise söz konusu pik basınç değeri düşüş eğilimi 35° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avansı geçişinde gözlemlenmiştir. Küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkan pik yanma basıncı farklılıkları, erken püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma odası basıncı farklılıklarından daha yüksek değerdedir. Ancak erken püskürtme

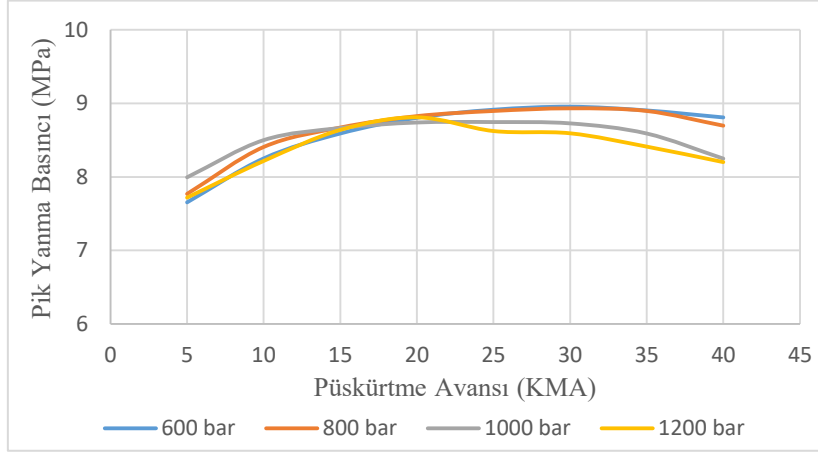
bölgesinde yanma başlangıcının birbirine göre daha büyük farklılıklar barındırdığı görülmüştür. Her ne kadar yanma başlangıcı daha büyük farklılıklar ortaya koymuş olsa da ÜÖN öncesinde silindir içerisine giren ısı miktarı ve genişleme fazı etkilerinin henüz ortaya çıkmamış olması sebebiyle bu farklılık daha makul düzeyde kalmıştır.



Şekil 4.47 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

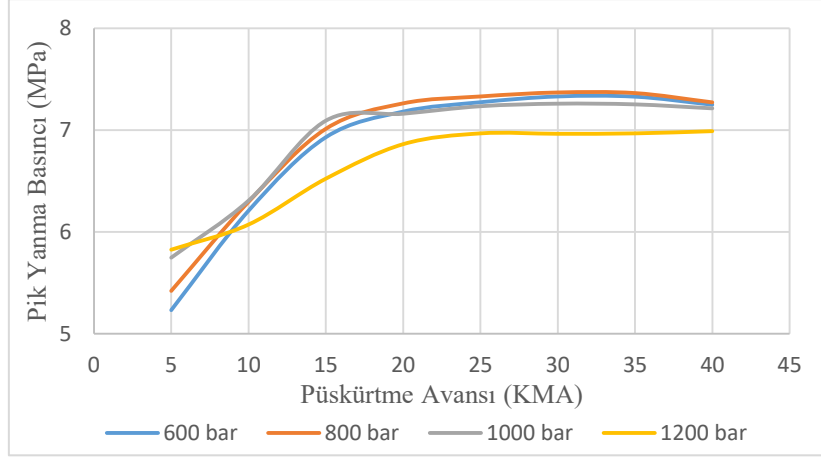
1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma basıncı verileri Şekil 4.48’de görülmektedir. Şekil 4.48’de elde edilen veriler Şekil 4.47 verileri ile büyük bir uyum içerisinde olup son derece benzer değişim eğilimleri ortaya çıkmıştır. İki grafik arasındaki farklılık ise düşük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan farklılığın daha makul bir bantta kendini var etmesi, daha yüksek püskürtme avanslarında ise bu farklılığın daha büyük değerler almasından kaynaklanmaktadır. 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında PCCI bölgesinde düşüş eğilimi bir miktar daha erken ortaya çıkmış ve 30° KMA püskürtme avansının üzerine çıkıldığında pik yanma basıncında düşüş ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansının değişimiyle gözlemlenen değişim ise erken püskürtme şartlarında yine makul seviyelerde seyretmiştir. Daha yüksek püskürtme basınçları olan 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında düşüş eğilimi daha erken başlamış ve püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan düşüş daha yüksek seviyede kalmıştır. Şu ana kadar incelenen üç veri seti için bir irdeleme yapmak gerekirse silindir içerisine enjekte edilen yakıt miktarı arttıkça yani motor yükü arttıkça bilindiği üzere pik basınç değerleri artış göstermiştir. Düşük püskürtme avanslarında, özellikle de 5° KMA gibi yanmanın genişleme fazına kaydığı durumlarda, farklı püskürtme basınçları arasında ortaya çıkan

silindir içi pik basınç değeri motor yükü arttıkça daha küçük farklılıklar barındırmıştır.



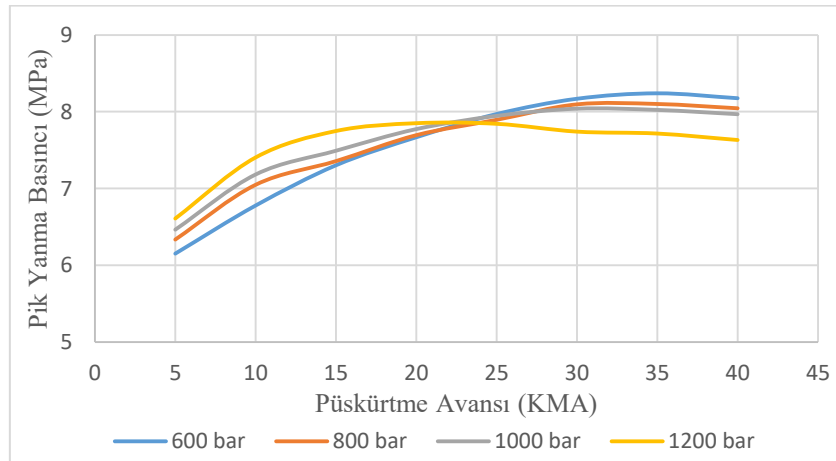
Şekil 4.48 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

Şekil 4.49 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan pik yanma basıncı değerlerini göstermektedir. Bu veri setinde motor hızının artışıyla yanma odasında oluşan pik basınç değerinde kayda değer farklılıklar gözlemlenmemiştir. Buna ilaveten belli bir püskürtme avansı sonrasında her bir püskürtme basıncı için daha stabil pik yanma odası basıncı değerleri ortaya çıkmıştır. Pik yanma odası basıncının düşük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının artışı ile daha büyük değerler alma eğilimi burada da karşımıza çıkmıştır. Devamında ise, püskürtme avansının artması ve PCCI rejiminin baskın hale gelmesiyle yüksek püskürtme basınçlarında daha düşük pik basınç verileri ortaya çıkmıştır. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında püskürtme avansının 20° KMA'ya ulaşmasına kadar silindir içerisinde ortaya çıkan pik yanma basıncı değeri düzenli ve ciddi bir artış göstermiştir. Püskürtme avansının bu değeri aşarak daha da artmasıyla beraber pik yanma basıncı değerlerinde pek bir farklılık ortaya çıkmamıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu karakter 25° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır.



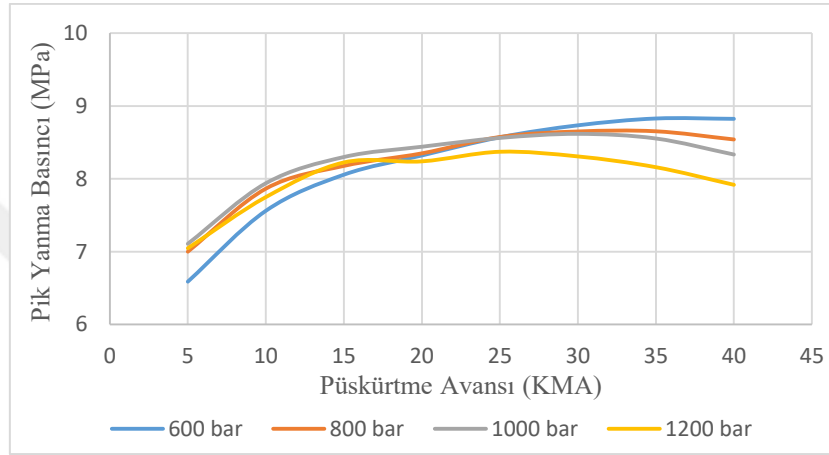
Şekil 4.49 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

Şekil 4.50 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan pik yanma basıncını MPa olarak vermektedir. Bu veri setinde püskürtülen yakıt kütlesinin 1/3 oranında arttırılması ile pik yanma basıncı 1 MPa dolaylarında artmıştır. Püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan farklılıklar bu veri setinde daha belirgin olarak görülmüştür. Püskürtme avansının 20° KMA ile 25° KMA aralığında püskürtme basıncında eğilim değişimi ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme avansında ÜÖN'ye daha yakın yapılan enjeksiyonlarda püskürtme basıncı arttıkça pik yanma odası basıncı artmıştır. ÜÖN'ye daha uzakta yapılan enjeksiyonlarda ise yüksek püskürtme basınçları daha düşük pik yanma odası basınçlarına ortam hazırlamıştır. Püskürtme basıncı arttıkça her bir püskürtme basıncı setinde pik yanma basıncının düşüşe geçtiği nokta daha erken ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.50 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

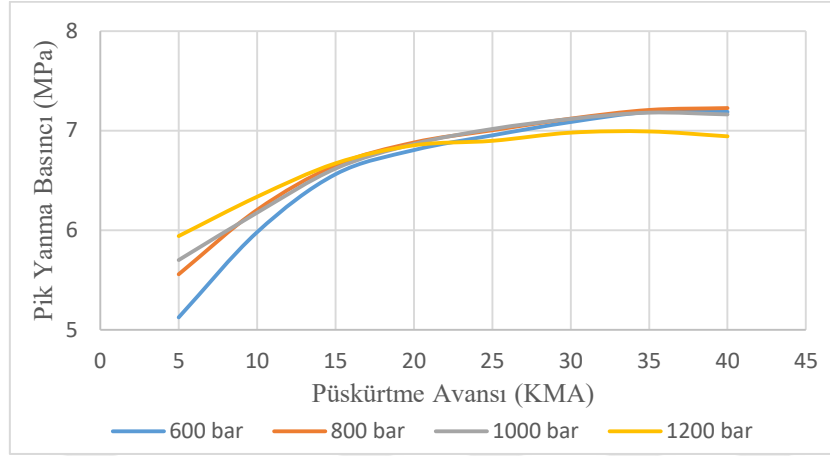
Şekil 4.51 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma basıncı değerlerini göstermektedir. Motor yükünün artışına bağlı olarak küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkan pik yanma basıncı farklılıkları daha küçük bir banda sıkışmış ve buna mukabil büyük püskürtme avanslarında yani erken püskürtme şartında farklı püskürtme basınçlarında ortaya çıkan farklılık artmıştır. Püskürtme basıncı arttıkça her bir püskürtme basıncı serisinde gözlemlenen pik yanma odası basınç değerinin düşüşe geçtiği an daha küçük püskürtme avanslarında gözlemlenmiştir.



Şekil 4.51 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

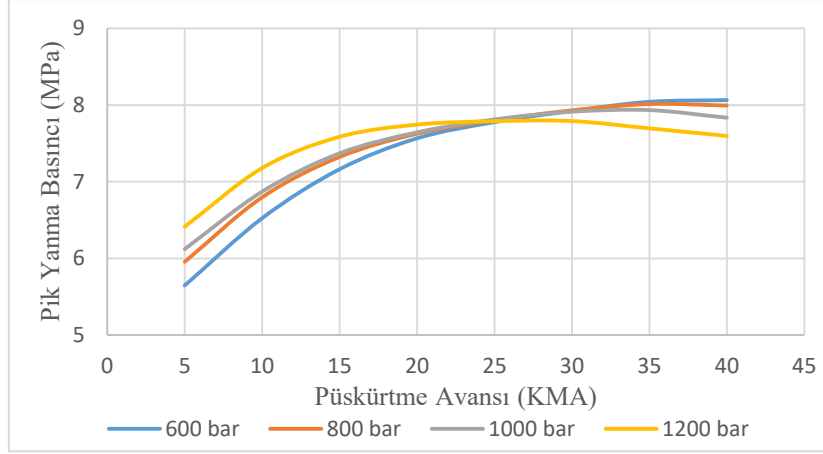
Şekil 4.52 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma basıncı değerlerini göstermektedir. Grafikteki verilere bakıldığında motor hızının artarak 2000 dev/dak değerine gelmesiyle silindir içerisinde ortaya çıkan pik yanma basıncı değerlerinde bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. Küçük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan farklılık son derece belirgin bir şekilde kendini göstermiştir. Özellikle yanma başlangıcının genişleme stoğuna kaydığı durumda bu fark daha da belirgin olarak gözlemlenmiştir. 15° KMA ve 20° KMA püskürtme avanslarında püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan farklılık büyük oranda ortadan kalkmış ve birbirine çok yakın silindir içi pik basınç değerleri gözlemlenmiştir. Püskürtme avansının daha da artmasıyla birlikte 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında birbirine çok yakın pik yanma basıncı değerleri görülmeye devam etmiştir. Fakat 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan pik basınç değerleri diğer püskürtme basınçlarında ortaya çıkan yanma odası pik basınç değerlerine göre daha düşük değerler almıştır. Buna ilaveten 1200 bar püskürtme

basıncında 25° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avansı aralığında yanma odası içerisinde oluşan pik yanma basıncı değeri belirgin bir değişim göstermemiştir.



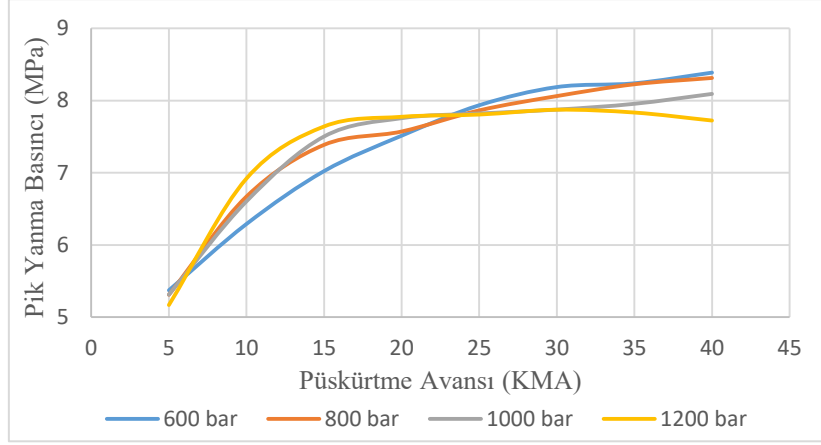
Şekil 4.52 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

Şekil 4.53 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan pik yanma basıncı değerlerini göstermektedir. Bu veri setinde motor yükü artışıyla ortaya çıkan pik yanma basıncı değerlerindeki yukarı yönlü ötelenme bir miktar daha düşük seviyede gerçekleşmiştir. Yani motor hızının artışı ile, motor yükünde ortaya çıkacak artışlar sonucunda daha sakin bir pik basınç artışı görülmüştür. Bunda motor maksimum moment devrinin üzerine çıkılmış olmasının büyük payı bulunmaktadır. 25° KMA püskürtme avansından daha küçük püskürtme avanslarında çalışıldığında püskürtme basıncının arttırılması pik yanma basıncı açısından daha iyi sonuçlar ortaya koymuştur. Püskürtmenin daha erken gerçekleştirilmesi ile yani püskürtme avansının 25° KMA'dan daha büyük değerler alması ile düşük püskürtme basınçlarında çalışmanın pik yanma basıncını arttırdığı görülmüştür. Bir önceki veri setine göre yani aynı motor hızında daha düşük motor yükünde çalışıldığı duruma göre püskürtme başlangıcının ÜÖN'ye yaklaşması ile farklı püskürtme basınçlarının doğurduğu pik yanma basıncı değer farklılıkları daha küçük bir bantta yayılım göstermiştir. PCCI bölgesinde yani erken püskürtme şartında, püskürtme avansı arttıkça farklı püskürtme basınçlarında ortaya çıkacak olan pik yanma basıncı değerlerindeki farklılık püskürtme basıncına daha hassas bir hale gelmeye başlamış ve farklı püskürtme basınçlarının ortaya koyduğu farklı pik yanma basıncı değerleri gözle görülebilir bir hal almıştır.



Şekil 4.53 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

Şekil 4.54 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan pik yanma basıncı değerlerini göstermektedir. Grafik üzerindeki sonuçlara bakıldığında püskürtmenin geç yapıldığı şartlarda püskürtme basıncı farklılığına bağlı olarak ortaya çıkan pik yanma basıncı değerleri birbirine son derece yakın değerler almaya başlamıştır. 5° KMA püskürtme avansı verilerine bakıldığında aradaki farklar neredeyse belirsizdir. Bu püskürtme avansı değerinden itibaren püskürtme avansının bir miktar artışıyla ve konvansiyonel dizel yanması şartına geçişle birlikte pik yanma basıncı değerlerinde hızlı bir artış ortaya çıkmıştır. Yüksek püskürtme basıncında çalışmanın sağlamış olacağı pik yanma basıncı avantajı 25° KMA püskürtme avansı dolaylarına kadar devam etmiştir. Sonrasında ise daha düşük püskürtme basınçları pik yanma basıncı açısından daha avantajlı bir hal almıştır. Şu ana kadar incelenen sekiz veri setinde de püskürtme avansının artışıyla bir noktadan sonra ortaya çıkan pik yanma basıncı değerleri ya stabilleşmiş ya da düşüş eğilimine girmiştir. Özellikle daha düşük yakıt enjeksiyon kütlelerinde bu düşüş net bir şekilde görülmektedir. Ancak motor hızı ve motor yükü açısından her ikisinin de en büyük değer aldığı bu veri setinde sadece 1200 bar püskürtme basıncında belli bir değerden sonra son derece sınırlı bir düşüş ortaya çıkmıştır. Diğer üç püskürtme basıncında da püskürtme avansının 40° KMA'ya artışına kadar pik yanma basıncı değerlerinde artış ortaya çıkmıştır. Bunun muhtemel sebebi araştırma uzayında artan motor yüküyle yanma hızının da artış göstermesidir. Yani dp/da değerinde artış ortaya çıkmasıdır. Bu artış, çalışmanın devamındaki ilgili alt başlık içerisinde de görülmektedir. Bu durum ilgili bölgede PCCI stratejisinin uygulanabilir sınırların dışına çıktığına dair emareler sunmaktadır.



Şekil 4.54 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan silindir içi pik basınç değerleri

4.7 Krank Konumuna Bağlı Anlık Basınç Verilerinin İncelenmesi

Krank mili konumuna bağlı olarak silindir içi anlık basınç datalarının incelenmesi yani $P-\alpha$ diyagramlarının incelenmesi diğer çıktıların yorumlanmasına göre bir miktar daha güçtür. Çünkü şu ana kadar incelenen verilerde belli bir noktadaki çıktının tekil değeri üzerinde yorumlar yapılmış ve çalışmanın bundan sonraki kısmında da büyük oranda yapılacak olan irdelemeler bu formdadır. Ancak $P-\alpha$ ve ısı açığa çıkış hızı grafiklerinde krank konumunun değişimine bağlı olarak irdeleme yapıldığı için tek bir grafik üzerinde geniş bir veri setinin incelenmesi imkansızdır. Bu sebeple $P-\alpha$ diyagramları incelenirken her bir motor hızı, motor devri ve püskürtme basıncı için birer grafik çizilmiştir. Her bir grafik içerisinde 8 farklı püskürtme avansında ortaya çıkan $P-\alpha$ verileri bulunmaktadır. Hatırlanacağı üzere çalışmanın bu kısmında 288 farklı noktadan veri alınmıştır. Krank mili konumuna bağlı olarak anlık silindir içi basınç verisi grafiklerinde ise her bir grafiğin içerisinde 8 farklı noktaya ait veri sunulabilmiş ve böylelikle toplam 36 grafik ortaya çıkmıştır. Bu grafiklerin tamamının bu alt bölüm içerisinde verilmesi art arda çok uzun şekil listeleri oluşturacağı için ortaya çıkan grafikler Ek-B'de sunulmuştur.

1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt enjeksiyonu ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan veriler incelendiğinde 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında yanmanın genişleme fazında başladığı ve bu sebeple de silindir içi pik basınç değerinin yüksek değerlere çıkamadığı, özellikle 5° KMA püskürtme avansında $dP/d\alpha$ değerinin de oldukça düşük olduğu görülmüştür. Yanmanın en

yüksek hızla başladığı ve kontrolsüz yanma fazında en yüksek basınç artışının görüldüğü püskürtme avansı ise 15° KMA püskürtme avansıdır. Sonrasında silindir içi pik basınç değerlerinde tepe noktasının yakalandığı bölgelerde çok ciddi farklılıklar ortaya çıkmamıştır. Ancak püskürtme avansı arttıkça düzenli olarak kontrolsüz yanma fazında gözlemlenen $dP/d\alpha$ değeri düşüş göstermiştir. Püskürtme basıncının 800 bar'a çıkışıyla her bir püskürtme avansında ortaya çıkacak olan yanmanın daha erken başlayarak daha erken sonra erdiği söylenebilir. Bu şartlarda 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan yanma sonucunda elde edilecek performans değerleri yanmanın ÜÖN'den daha az ıraksaması sebebiyle bir miktar iyileşme gösterecektir. Bu püskürtme avanslarında ortaya çıkacak olan iyileşmenin diğer püskürtme avanslarına nazaran daha belirgin olduğu söylenebilir. 15° KMA ve 20° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan P- α diyagramının püskürtme basıncı artışı ile bir miktar farklılık gösterse de ciddi bir değişim ortaya koymadığı görülmüştür. Fakat 25° KMA ve daha büyük püskürtme avanslarında ortaya çıkan farklılık daha gözle görülebilir bir düzeydedir. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avansında oluşan P- α değerlerinin hemen hemen çakışık olduğu görülmüştür. Yani yanma çok benzer bir zamanda ortaya çıkmış, kontrolsüz yanma fazı sonrasında ulaşılan basınç değeri de son derece düşük sayısal farklılıklar ortaya koymuş, ancak sonrasında 40° KMA püskürtme avansı şartında ortaya çıkan P- α eğrisi 35° KMA'ya ait olan P- α eğrisinin bir miktar altında kalmıştır. Bu şartlarda salt performans parametreleri gözetilerek püskürtme avansının 40° KMA değerine artırılmasının bir faydası olmayacağı aşikardır. Genişleme fazında ise 40° KMA eğrisi en düşük silindir içi basınç hattını oluşturmuştur. Bu durum yanmanın sağlıklı bir şekilde gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu şartlarda egzoz gaz emisyonlarında ortaya çıkacak olan eksik yanma ürünlerinin artış göstermesi kaçınılmazdır. Püskürtme basıncının 1000 bar değerine çıkmasıyla 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avansında ortaya çıkması muhtemel olan performans iyileşmesi daha gözle görülebilir bir hale gelmiştir. İlgili şartlarda yanmanın biraz daha kısa sürede tamamlandığı ve genişleme etkilerinin nispeten makul düzeyde kaldığı görülmüştür. 25° KMA ve sonrasında püskürtme avansı değişimine bağlı olarak ortaya çıkan $dP/d\alpha$ değerlerinin çok daha makul bir seviyeye düştüğü görülmektedir. Püskürtme basıncının 800 bar'dan 1000 bar'a artışıyla 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında gözlemlenen eğilime 30° KMA püskürtme avansı da dahil olmaya aday hale gelmiştir. Püskürtme basıncının 1200 bar değerine

çıkışıyla bu durum daha da belirginleşmiştir. Fakat püskürtme basıncının 1200 bar değerine geldiğinde, püskürtme basıncı artışıyla 5° KMA değerinde şu ana kadar gözlemlenen iyileşmenin ortadan kalktığı görülmektedir.

1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt enjeksiyonu ve 600 bar yakıt püskürtme basıncında ortaya çıkan verilere bakıldığında püskürtülen yakıt kütlesinin artışı ile ÜÖN'ye çok yakın yapılan püskürtmelerde yanmanın başladığı nokta bir miktar daha genişleme fazına kaymış ve ÜÖN'den uzaklaşmıştır. Ancak motor yükünün artışından kaynaklı olarak bu şartlarda genişleme fazının baskın hale gelmesi ve yanma devam etse dahi silindir içi basınçta ortaya gelen düşüş eğilimi ortadan kalkmıştır. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan eğilim yine hemen hemen birbiri ile üst üste binmiş durumdadır. Bunun yanı sıra 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avanslarında da yanma birbirine son derece benzer karakterlerde ortaya çıkmıştır. PCCI'yi gerçekleyecek şekilde erken püskürtme yapıldığı şartlarda kontrolsüz yanma fazı süresince ortaya çıkan $dP/d\alpha$ değerleri geç püskürtme şartına göre daha büyük değerler almıştır. Bunun sebebi geç püskürtme şartında yanma esnasında, yanma odası hacminde ortaya çıkan artışlardır. Erken püskürtme şartında ise silindir içi basıncı bir yandan yanma sonucu ortaya çıkan ısı girişiyle arttırmakta bir diğer yandan da pistonun ÜÖN'ye doğru hareketi sonucunda yanma odasının hacmi küçülmektedir. Böylelikle eğrilerin dikliği artmaktadır. Püskürtme basıncının 800 bar değerine çıkışı ile hem yanmanın başladığı nokta bir miktar daha erken ortaya çıkmış hem de kontrolsüz yanma fazı sonucunda ortaya çıkan basınç değerleri bir miktar daha yüksek seviyeye ulaşmıştır. Buna ilaveten farklı püskürtme avanslarında ortaya çıkan yanmanın başlangıç noktası da belirgin sınırlarla birbirinden ayrılmış durumdadır. Daha önceki inceleme noktalarında olduğu gibi 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında yanmanın başlangıç noktası ve kontrolsüz yanma fazının büyük oranlı benzeşimi ortadan kalkmıştır. Bu püskürtme basıncında 20° KMA püskürtme avansı ve sonrasında ortaya çıkan $dP/d\alpha$ değerleri daha küçük değerler alma yolunda ilerlemiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan veriler 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan verilerin bir devamı niteliğindedir. Püskürtme basıncının artışıyla kontrolsüz yanma fazı sonucunda oluşan basınç değeri bir miktarda daha düşük seviyeye ulaşmış ve geri kalan basınç artışı kontrollü yanma fazında gerçekleşmiştir. Püskürtme basıncının 1200 bar değerine çıkışıyla kontrolsüz

yanma fazında ortaya çıkan karakteristikler daha belirgin bir şekilde kendini ortaya koymuştur. Buna ilaveten genişleme fazının belli bir süresince ortaya çıkan anlık basınç dataları da birbirinden ayrılmaya başlamıştır. Bu ayrışmanın temel sebebi yanma süreçlerinde meydana gelen farklılık olarak değerlendirilebilir. Püskürtme basıncının 1200 bar değerine gelmesi aynı zamanda 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarının ortaya koyduğu anlık basınç değerlerinin ÜÖN öncesi karakteristiğini tekrardan birbirine yakınsatmıştır. Püskürtme basıncının artışıyla az önce gözlemlenemeyen bu eğilimin tekrardan gözlemlenebilir hale gelişi fazlaca artan püskürtme basıncının yarattığı pülverizasyon gelişimi etkisinin yerini karışımın bir miktar mikro karışım fakirleşmesine bırakması olarak düşünülebilir.

1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında elde edilen veriler incelendiğinde, püskürtülen yakıt kütlelerinin artışıyla tahmin edileceği üzere pik yanma odası basınç değeri artış göstermiştir. Buna paralel olarak kontrolsüz yanma fazının sonunda elde edilen basınç değerleri de daha üst seviyelere ulaşmıştır. Kontrolsüz yanma fazı esnasında gözlemlenen eğrinin birinci türevi de tahmin edileceği üzere daha yüksek seyretmiştir. 35° KMA ve 40° KMA gibi yüksek püskürtme avanslarında gözlemlenen neredeyse eş eğilimlilik de ortadan kalkmaya başlamıştır. Yanmanın başlangıcı da tahmin edileceği üzere daha erken bir zamanda ortaya çıkmıştır. Fakat bu durum özellikle düşük püskürtme avanslarında geçerliliğini korumaktadır. Püskürtme avansının fazlaca arttığı durumlarda ortaya çıkan bu karakter farklılığı bir miktar baskılanmıştır. Püskürtme basıncının aynı motor hızı ve motor yükü için 800 bar değerine çıkışıyla ÜÖN öncesi davranışta kayda değer bir karakter farklılığı ortaya çıkmamıştır. Fakat genişleme stroğunda ortaya çıkan anlık basınç değerleri farklılık barındırmaya başlamıştır. ÜÖN'ye daha yakın yapılan püskürtmelerde hem yanma başlangıcı hem de yanmanın sona ermesi daha ileri bir zamana ötelendiği için genişleme prosesi esnasında bir miktar daha yüksek anlık basınç seviyeleri gözlemlenmiştir. Püskürtme avansının özellikle 40° KMA değerine çıktığı şartta ise genişleme fazında ortaya çıkan daha düşük anlık silindir içi basınç hatları belirginleşmeye başlamıştır. Bu noktada silindir içi basınç değerinin daha düşük olması da etkileyici bir faktör olarak düşünülebilir. Püskürtme basıncının 1000 bar değerine gelişiyle konvansiyonel püskürtme avansı aralıklarında kontrolsüz yanma süresince gözlemlenen basınç artış gradyanlarının daha yüksek

değerler aldığı görülmektedir. Genişleme stroğu esnasında gözlemlenen yanma odası anlık basınç değeri farklılıkları püskürtme basıncının artışıyla birlikte daha da belirgin hale gelmiştir. Ayrıca 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ÜÖN öncesinde ortaya çıkan basınç karakteristiği tekrardan birbirine yakınsamaya başlamıştır. Buna ilaveten bir önceki püskürtme basınç değerine göre 30° KMA püskürtme avansında da anlık basınç değerlerinde bir miktar eğilim benzeşimi söz konusu olmuştur. Püskürtme basıncının 1200 bar'a gelmesiyle beraber karmaşık sonuçlar karşımıza çıkmaktadır. Şu ana kadar püskürtme basıncının artışıyla özellikle küçük püskürtme avanslarında, yani 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında yanma başlangıcının ÜÖN'ye bir miktar daha yakınsadığı görülmüştür. Fakat bu püskürtme basıncında durum kötüleşmeye başlamıştır. Genişleme stroğu boyunca ortaya çıkan basınç farklılıkları daha da belirginleşmiş durumdadır. Buna ilaveten erken püskürtme şartlarındaki eğrilerin birbirine fazlaca yakınsama davranışı bir miktar daha geniş püskürtme avans değerlerini kapsar hale gelmiş ve 30° KMA ile 40° KMA püskürtme avansı aralığında birbirine oldukça benzer ÜÖN öncesi basınç değerleri gözlemlenmiştir. Pik püskürtme avansında ortaya çıkan artış ile özellikle yüksek püskürtme basınçlarında ortaya çıkan pik basınç düşüşü daha belirgin olarak gözlemlenmiştir. Bu durum karışım oluşum kabiliyetinin yetersiz olduğu şartlarda yüksek püskürtme basıncının yol açtığı dolgu karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Bu eğiliminin sebebi ise şu ana kadar birkaç farklı yerde detaylı olarak açıklanmıştır.

1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi ve 600 bar püskürtme basıncında elde edilen verilere bakıldığında, yanmanın ÜÖN sonrasında başladığı 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan P- α diyagramlarında yanmanın son derece uygunsuz şartlarda gerçekleştiği görülmektedir. Bu şartlarda hem silindir içi pik basınç değeri son derece düşük seyretmiş hem de oldukça yavaş bir yanma ortaya çıkmıştır. Böylece kontrolsüz yanma fazındaki basınç artış gradyanları çok düşük seviyede kalmıştır. Buna bağlı olarak bu verilerde son derece kötü performans çıktıları ortaya çıkacağı aşikardır. Kaba hatlarıyla 15° KMA püskürtme avansı ile 25° KMA püskürtme avansının ortaya koyduğu verilere bakıldığında 25° KMA'ya kadar yanmanın geliştiği ve eğri altında daha büyük bir integrale sahip olduğu görülmektedir. Bu püskürtme avansı değerinden itibaren kontrolsüz yanma fazı daha düşük alev hızlarıyla

gerçekleşmeye başlamıştır. Püskürtme basıncının 800 bar'a çıkışıyla birlikte her bir püskürtme basıncı eğrisinin altında kalan alan artış göstermiştir. Ön karışımlı yanma fazının daha kendine has karakter ortaya koyduğu da görülmeye başlamıştır. Özellikle 20° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan yanmada ön karışımlı yanma fazı boyunca hızlı bir silindir içi basınç artışı gözlemlenmiş durumdadır. Sonrasında ise $dP/d\alpha$ değeri düşüş sergilemeye başlamıştır. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan anlık silindir içi basınç verisi büyük bir benzerlik içerisindedir. Bu püskürtme basıncında ortaya çıkan verilerde genişleme fazı süresince henüz belirgin ayrışmalar ortaya çıkmamıştır. Bunun sebebi bir yandan püskürtme basıncının henüz yeteri kadar yüksek bir değere ulaşmayışı, diğer yandan da püskürtülen yakıt kütlesinin düşük oluşu sebebiyle genişleme eğrisinde kayda değer farklılıkların ortaya çıkmasına yol açacak şartların tam olarak oluşmamasıdır. Püskürtme basıncının 1000 bar değerine gelişiyle genişleme fazındaki bu bahsi geçen ayrışma yavaş yavaş gözle görülebilir bir hal almaya başlamıştır. Erken püskürtme şartında 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında gözlemlenen ÜÖN öncesi karakter benzeşimine, büyük oranda 30° KMA püskürtme avansı verileri de dahil olmaya başlamış ve bu üç püskürtme avansında da $dP/d\alpha$ değerlerinin bir miktar düşüş sergilediği açıkça görülmektedir.

1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi ve 600 bar püskürtme basıncı verilerinden hareketle 15° KMA püskürtme avansı dahil olmak üzere ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde yanmanın büyük oranda genişleme fazına kaydığı ve bu sebeple de çevrimden elde edilecek net işin düşüş sergileyeceği görülmüştür. 30° KMA, 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ise ÜÖN öncesi basınç karakterlerinin birbiri ile çok yakın olduğu görülmüştür. Hatta 40° KMA püskürtme avansında kontrolsüz yanma fazı belli belirsiz bir şekilde ÜÖN'ye, 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avansına göre, daha yakın gerçekleşmiştir. Püskürtme basıncının 800 bar değerine çıkışıyla 5° KMA püskürtme avansında yanmanın başlangıç noktası ciddi farklılıklar ortaya koymamıştır. Fakat daha büyük püskürtme avanslarında yanma başlangıcı bir miktar erken ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten $dP/d\alpha$ eğrilerinin de kontrolsüz yanma fazında daha büyük değerler aldığı görülmüştür. Ayrıca 30° KMA püskürtme avansında ÜÖN öncesinde ortaya çıkan basınç karakteristiği 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarından ayrışmaya başlamıştır. Kontrolsüz yanma fazı süresince

ortaya çıkan eğrinin türevi göz önünde bulundurulduğunda en büyük yanma hızının bu sürede 20° KMA püskürtme avansında ortaya çıktığı söylenebilir. Püskürtme basıncının 1000 bar değerine çıkışıyla kontrolsüz yanma fazında silindir içerisinde sokulan ısının arttığı ve bu fazın daha kısa sürede tamamlandı görülmektedir. Burada da yanmanın 20° KMA püskürtme avansının aşılması sonrasında yavaşlamaya başladığı ve ön karışımli yanma fazında ortaya çıkan eğrinin birinci türevinin daha küçük değerler almaya başladığı görülmüştür. Aynı motor hızı ve motor yükünde püskürtme basıncının 1200 bar değerine gelişiyle daha kompleks sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme basıncı değerinde sadece ÜÖN öncesinde değil aynı zamanda ÜÖN sonrasında da püskürtme avansının değişimine bağlı olarak belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır. ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde pik basınç değeri daha geç ortaya çıkmıştır. 25° KMA püskürtme avansına kadar ortaya çıkan verilerde ÜÖN sonrası basınç verileri gözle görülür bir şekilde ayırt edilebilmektedir. 30° KMA püskürtme avansında ise silindir içi basınç verileri diğer verilere göre beklenmedik şekilde düşük çıkmıştır. Arada çok büyük ve hayati farklar oluşmasa da bu veride bir uyumsuzluk olduğu aşıkardır. Bu durumun temel sebebi deneysel çalışma esnasında elde edilen veriler ile simülasyon çalışmasının ortaya koyduğu sonuçlar arasındaki makastır. Bu çalışma noktasında püskürtülen yakıt kütlesi ve püskürtmenin başladığı noktaya dair deneysel olarak elde edilen hatalar birbirini büyüterek bu sonucu doğurmuştur.

1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme kütlesinde elde edilen verilere bakıldığında püskürtülen yakıt kütlesinin artışıyla beraber tahmin edileceği üzere eğri daha büyük yanma basıncı değerlerine ötelenmiştir. 600 bar püskürtme basıncında elde edilen verilere bakıldığında 15° KMA püskürtme avansına kadar yanma başlangıcının genişleme stroğuna kaydığı görülmüştür. Bu şartlarda, performans parametreleri ilgili durumdan son derece olumsuz etkilenecektir. 5° KMA, 10° KMA ve 15° KMA püskürtme avanslarında motor yükü artışıyla gözle görülebilir yanma başlangıç noktası dolayısıyla da TG farkı gözlemlenmemiştir. P- α verileri göz önünde bulundurulduğunda bu püskürtme basıncında elde edilecek olan en büyük net işin 20° KMA ile 30° KMA püskürtme avans aralığında ortaya çıkacağı açıktır. Püskürtülen yakıt kütlesindeki artış, geç yapılan püskürtme şartında yanma başlangıcında ve basınç eğrilerinin karakteristik yapısında ciddi bir eğilim farklı yaratmamış olsa da erken püskürtme şartında her bir püskürtme

avansında ayrıksı karakterler ortaya çıkmıştır. Daha önce incelenen veri setlerinin birçoğunda 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ÜÖN öncesi basınç karakteri büyük oranda birbiriyle benzerlik göstermekteydi. Hatta zaman zaman 30° KMA püskürtme avansında elde edilen basınç değerlerinin de bu iki püskürtme avansında ortaya çıkan basınç eğriliğine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Fakat burada motor yükünün artışı ile yanma başlangıcının daha öngörülebilir oluşu sebebiyle her bir püskürtme avansında ortaya çıkan P- α eğrileri net bir şekilde birbirinden ayrılmıştır. 600 bar püskürtme basıncında genişleme fazında ortaya çıkan ayrışmalar ise ciddi farklılıklar ortaya koymamıştır. 800 bar püskürtme basıncında yanma başlangıcı birkaç KMA erken ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten kontrolsüz yanma fazında daha dik basınç eğrileri gözlemlenmiştir. 25° KMA püskürtme avansı sonrasında ise kontrolsüz yanma fazında ortaya çıkan eğrinin birinci türevi bir miktar daha küçük değerler almıştır. Aynı zamanda 600 bar püskürtme basıncında gözlemlenemeyen ancak birçok veride karşımıza çıkan bir karakter burada tekrardan kendini var etmiş ve 35° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan P- α değerleri büyük oranda benzeşim göstermiştir. Püskürtme basıncının 1000 bar değerine çıkışı ile kontrolsüz yanma fazla ile kontrollü yanma fazı birbirinden daha net olarak ayrılmaya başlamış ve iki faz arasındaki geçişler çoğu zaman çıplak gözle görülebilir bir hal almıştır. Düşük püskürtme avanslarında genişlemenin de etkisiyle kontrollü yanma fazı eğri üzerinde gözle görülebilir değildir. Fakat püskürtme avansı arttıkça bu fark net olarak gözlemlenebilmektedir. Özellikle 20° KMA püskürtme avansı ve sonrasında iki faz arası geçiş eğri üzerine son derece belirgin bir şekilde sirayet etmiştir. Aynı zamanda, bu püskürtme basıncında genişleme fazında ortaya çıkan eğriler farklı püskürtme basınçları için gözle görülebilir farklar doğurmaya başlamıştır. Püskürtme basıncının 1200 bar değerine gelişiyse ortaya çıkan basınç verilerinde ÜÖN sonrası karakter son derece belirgin farklılıklar göstermiş ve çevrimden elde edilen net işi ciddi seviyede etkileyebilecek bir hal almıştır. Bu şartta genişleme fazının ilk 20° - 25° KMA'lık sürecinde püskürtme avansı değişimine bağlı olarak takriben 10 bar değerine kadar basınç farklılıkları ortaya çıkmaya başlamıştır. Büyük püskürtme avansı değerlerinde ÜÖN öncesi ortaya çıkan basınç karakterleri arasındaki yakınsama bu püskürtme basıncında 25° KMA püskürtme avansından itibaren ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında hiçbir eğri birbiriyle benzeşim göstermemiştir. Bu da motor yükü arttıkça püskürtme basıncının yanma

parametreleri üzerinde oynadığı rolün ne denli artış gösterdiğini açıkça gözler önüne sermektedir.

2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesinde elde edilen verilere bakıldığında motor devrinin artışına bağlı olarak KMA cinsinden yanma sürecinin uzadığı ve yanmanın daha geniş bir banda yayıldığı rahatlıkla eğri formlarından görülebilmektedir. 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında yanmanın başladığı noktaya bakıldığında, her ne kadar işletme şartı değişmiş olsa da yanmanın başladı krank açısı konumu hemen hemen aynı kalmıştır. Bu iki püskürtme avansında yanma tıpkı daha önceki veri setlerinde olduğu gibi ÜÖN sonrasında başlamıştır. Bu veri setinde püskürtme avansının artışına bağlı olarak konvansiyonel püskürtme avanslarında ve bu değere göre daha erken yapılan püskürtme sonucunda oluşan yanmada kontrolsüz yanma sonucunda erişilen pik basınç değerinin düşüş sergilediği net bir şekilde görülmektedir. Motor hızının artışıyla farklı püskürtme avanslarının ÜÖN öncesi sergilediği karakter belirgin bir şekilde farklılık göstermeye başlamıştır. Püskürtme basıncının 600 bar değerinden 800 bar seviyesine çıkışıyla ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde, yani 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında yanma belirgin bir şekilde daha erken başlamıştır. Artan püskürtme avanslarında da bu eğilim daha düşük bir farklılık ile kendini var etmeye devam etmiştir. Püskürtme basıncının 1000 bar ve 1200 bar seviyesine çıkışıyla harici bir eğilim gözlemlenmemiş ve şu ana kadar ortaya çıkan değişim eğilimleri aynı şekilde devam etmiştir.

2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan verilerde motor yükünün artışına bağlı olarak silindir içi pik basınç değerlerinde tahmin edileceği üzere bir miktar artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda motor yükü artışıyla farklı püskürtme avanslarında ortaya çıkan P- α grafiği farklılıkları daha belirgin hale gelmiştir. 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında her ne kadar silindir içerisine giren yakıt miktarı artış gösterse de beklenen silindir içi basınç artış değeri ortaya çıkmamıştır. Çünkü genişleme stroğunda hacim genişlemesi sonucu ortaya çıkacak olan düşüş eğilimi ortadan kalkmamıştır. Buna bağlı olarak yanma da daha yavaş gerçekleşmiştir. Püskürtme basıncının 800 bar değerine ulaşması ile durum yine bir miktar iyileşmeye başlamıştır. Aynı zamanda püskürtme basıncının artışıyla farklı püskürtme avanslarında ortaya çıkan P- α eğrileri de birbirinden daha ayrık davranış göstermiştir. ÜÖN sonrasında yani

genişleme stroğunda ortaya çıkan farklılıklar ise neredeyse belirsizdir. Motor yükü arttıkça yanma hızının bir miktar artışı neticesinde genişlemede ortaya çıkan farklılıklar bir miktar perdelenmiştir. Püskürtme basıncının daha da artmasıyla kontrolsüz yanma fazında ortaya çıkan basınç artış gradyanı daha büyük değerlere ötelenmiştir. Özellikle 20° KMA ve 25° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan iyileşme daha belirgin seviyededir. Sonrasında ise yanmanın tekrardan yavaşlamaya başladığı görülmektedir. 1200 bar püskürtme avansında ise genişleme fazında ortaya çıkan eğilim farkları daha belirgin hale gelmiştir.

2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ve 600 bar püskürtme basıncında elde edilen verilere bağlı olarak ÜÖN'ye daha yakın yapılan püskürtme şartlarında yanmanın daha da geç başladığı görülmüştür. Bu durum yakıtın, yanma odasından daha fazla ısı çekmesi ve ortaya çıkan iç soğumanın daha belirgin olarak kendini var etmesinden kaynaklanmaktadır. 20° KMA ve daha küçük püskürtme avanslarında yanma tamamen genişlemede başlamış durumdadır. Hatta makul sayılabilecek bir yanmanın 30° KMA dolaylarında püskürtme avans değerinde ortaya çıktığına dair emareler görülmektedir. Püskürtme basıncının 800 bar değerine ulaşması ile yanma başlangıcı, 20° KMA püskürtme avansında ÜÖN öncesinde başlasa da ısı girişinin önemli kısmı ÜÖN sonrasında gerçekleşmiştir. 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında yanmanın başlangıcı ciddi farklılıklar doğurmamıştır. Daha erken yapılan püskürme şartlarında ise yanma başlangıcı bir miktar durumdan etkilenmiştir. Püskürtme basıncı arttıkça özellikle 40° KMA püskürtme avansında ÜÖN öncesi eğri altında kalan alan daha fazla artış gösterirken genişleme fazında eğri altında kalan alan düşüş göstermiştir. Bu şartlarda OİB ve OEB değerlerinin düşüş göstermesi beklenmektedir, Şekil 4.9'a bakıldığında bu eğilim de gözlemlenmiştir.

4.8 Isı Açığa Çıkış Hızı Verilerinin İncelenmesi

Yanma süreci verileri ve KYK50 noktalarının incelenmesi esansında yanma hızlarının ne seviyede olduğuna dair bir fikir sahibi olunmuştur. Bu kısımda ise yanmanın anbean hangi hızda gerçekleştiği irdelenmiş ve ısı açığa çıkış hızları her bir krank açısı için J/s skalasında gösterilmiştir. Tıpkı krank konumuna bağlı basınç verileri gibi ısı açığa çıkış hızı grafikleri de noktasal değil de eğrisel bir karakter gösterdiği için her bir motor hızı, yakıt püskürtme kütlesi ve püskürtme basıncında

ayrı ayrı grafikler çizerek yorumlama yapmak mümkündür. Bu şartlarda 36 adet grafik ortaya çıkmaktadır. Art arda bu kadar fazla sayıdaki grafik çalışma içerisinde çok uzun sayfalar işgal edeceği için bu kısımda sözel yorumlamalar yapılmış ve ısı açığa çıkış hızı grafikleri Ek-C dahilinde sunulmuştur.

1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt enjeksiyonu ve 600 bar yakıt püskürtme basıncı şartındaki ısı açığa çıkış hızı eğrileri incelendiğinde, püskürtme avansı arttıkça genel bir eğilim olarak yanmanın daha uzun bir periyoda yayıldığı görülmektedir. Pik ısı açığa çıkış hızı 20° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir. Sonrasında ise püskürtme avansı arttıkça pik ısı açığa çıkış hızı değeri güçlü bir düşüş eğilimine girmiştir. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan pik ısı açığa çıkış hızı değeri, 20° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan pik ısı açığa çıkış hızının yarısı seviyesindedir. Aynı zamanda püskürtme avansının artışıyla ısı açığa çıkış sürecinin uzadığı görülmektedir. Bu durumdan yanma süreci uzunlukları incelenirken de bahsedilmişti. Püskürtme basıncının 800 bar seviyesine çıkışıyla beraber 5° KMA püskürtme avansında elde edilen pik ısı açığa çıkış hızı 10° KMA püskürtme avansında bir miktar düşüş sergilemiş, sonrasında 20° KMA püskürtme avansına kadar artış göstermiş ve ilgili püskürtme basıncı içerisindeki en yüksek değerine ulaşmıştır. Püskürtme avansının daha da artışıyla yani erken püskürtme rejimine geçilmesiyle pik ısı açığa çıkış hızları tekrardan düşüş eğilimine girmiştir. Püskürtme basıncının 1000 bar değerine çıkışıyla 5° KMA püskürtme avansında en büyük pik değer ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansının artışı ile 15° KMA püskürtme avansı da dahil olmak üzere pik ısı açığa çıkış hızı düşüş sergilemiş, sonrasında 20° KMA püskürtme avansında pik değer tekrardan artmış ve erken püskürtme stratejisini gerçekleyecek şekilde püskürtme avansı arttırılmaya devam ettiğinde ise pik ısı açığa çıkış hızı değerleri tekrardan düşüş eğilimine girmiştir. Burada 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızları birbiri ile son derece benzerlik göstermektedir. Bu iki püskürtme avansında sadece tepe noktası değerlerinde bir miktar farklılık gözle görülebilir olarak karşımıza çıkmaktadır. Püskürtme basıncı arttıkça ÜÖN'ye yakın yapılan enjeksiyonlarda pik ısı açığa çıkış hızı yüksek değer almış, sonrasında bir düşüş yaşanmış ve çevrim başına en yüksek ısı çıkışının alındığı yerlerde tekrardan bir artış eğilimine girmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında da bu eğilim aynı şekilde gözlemlenmiştir. Ancak elde edilen bu pik

değerde çok kısa bir süre kalınabildiği ve belli bir süreliğine dahi de olsa bu değer korunmadığı görülmektedir. Yani bu yüksek ısı açığa çıkış hızı çok kısa bir süre silindir içerisinde var olabilmektedir. Bu sebeple de performans çıktılarına doğrudan yansıyamamaktadır. Yukarıda belirtilen durumlara ilaveten püskürtme basıncı arttıkça bu düşük motor yükünde ortaya çıkan pik ısı açığa çıkış hızı değerleri düşüş sergilemiştir. Fakat bunu bir genel eğilim gibi düşünmek şu aşamada pek sağlıklı bir çıkarım ortaya koyamayacaktır. Daha yüksek motor yüklerinde püskürtme basıncı artışına bağlı olarak ortaya çıkacak olan eğilimlerin de bir genelleme yapmadan önce değerlendirilmesi gerekmektedir.

1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt enjeksiyonu ve 600 bar yakıt püskürtme basıncında elde edilen verilerde ÜÖN'ye çok yakın yapılan ve yanma başlangıcının genişleme fazına kaydığı 5° KMA püskürtme avansında yine yüksek pik ısı açığa çıkış hızı değeri ortaya çıkmış ve bu değerde son derece kısa bir süre kalınabilmektedir. 15° KMA püskürtme avansına kadar pik değerde düşüş gözlemlenmiş, sonrasında 20° KMA püskürtme avansında ise artış ortaya çıkmış ve en büyük değer ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansının daha da artarak DSY rejimine geçildiğinde ise püskürtme avansının artışına bağlı olarak düzenli pik değer düşüşü ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 15° KMA ve 20° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı eğrilerine bakıldığında ısı giriş momentinin birbirinden oldukça farklılık barındırdığı görülmektedir. Püskürtme basıncının 800 bar'a çıktığında ise 5° KMA püskürtme avansından 10° KMA püskürtme avansına geçişte pik ısı açığa çıkış hızı bir miktar artış göstermiş ve 15° KMA püskürtme avansında bu değer büyük oranda korunabilmektedir. Püskürtme avansının daha da artışı ile düzenli bir düşüş ortaya çıkmıştır. 25° KMA ve daha büyük püskürtme avanslarında elde edilen pik değerlere bakıldığında öncesindeki veriler ile belirgin bir tepe nokta farklılığı gözlemlenmektedir. 1000 bar püskürtme basıncında da bu eğilim aynı şekilde ortaya çıkmıştır. Hatta erken püskürtme şartlarında ısı açığa çıkış eğrilerinin tepe noktasının aldığı değerlerde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum yanma hızının düşüş göstermeye başlaması ile açıklanabilir. Püskürtme basıncının bir miktar daha artarak 1200 bar değerine çıkışıyla bu eğilim daha da güçlenmiştir. Ayrıca 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı eğrileri birbirine oldukça yakınsamıştır.

1000 dev/dak motor hızında yakıt enjeksiyonunun 25 mg/strok değerinde olduğu şartlarda ÜÖN'ye yakın yapılan yakıt enjeksiyonlarında pik ısı açığa çıkış hızı değeri 600 bar püskürtme basıncında da düşük püskürtme avanslarında yüksek değerler almış ve sonrasında 15° KMA püskürtme avansının kadar düşüş eğilimine girmiştir. Ardından püskürtme avansının daha da arttırılması ile gerek pik değer gerekse de eğri formu uzunca bir süre benzerlik göstermiştir. 30° KMA püskürtme avansının üzerine çıkıldığında ise bu eğilim yavaş yavaş ortadan kalkmıştır. Püskürtme basıncının 800 bar seviyesine gelmesi ile önceki verilere bir miktar daha benzer değişim eğiliminin ortaya çıkmasından söz edilebilir. Ancak burada belirtilmelidir ki 5° KMA püskürtme avansında elde edilen pik değer oldukça yüksek seviyeye çıkmıştır. Püskürtme avansının artışıyla 10° KMA püskürtme avansında öncelikle bir miktar pik değer düşüşü ortaya çıkmış, ardından 15° KMA püskürtme avansına kadar bir artış ve sonrasında da düzenli pik değer gerilemesi görülmüştür. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avansında hem eğri formları birbirine oldukça yakınsamış durumdadır hem de krank konumuna bağlı olarak iki eğri birbiriyle çok büyük oranda örtüşmüş durumdadır. Püskürtme basıncının 1200 bar seviyesine gelişiyle karşımıza daha karmaşık sonuçlar çıkmıştır. 20° KMA püskürtme avansına kadar bir miktar aşağı ve yukarı yönlü sapmayla birlikte pik ısı açığa çıkış hızı değeri birbirine yakın seyretmiştir. Ardından 25° KMA püskürtme avansında kayda değer bir düşüş gözlemlenmiştir. Sonrasında ise şu ana kadar elde edilen verilerin aksine püskürtme avansının artışıyla pik ısı açığa çıkış hızı değerleri artmaya başlamıştır. Yani bu motor yükü ve motor hızında püskürtme avansının artışına bağlı olarak yanma hızı düşüş göstermemiş aksine hızlanmıştır. Bu durum ilgili işletme şartı aralığında dizel vuruntusu emarelerin ortaya çıkmaya başladığını göstermektedir.

1500 dev/dak motor hızında yakıt enjeksiyonunun 15 mg/strok olarak gerçekleştiği ve püskürtme basıncının 600 bar olduğu şartlarda, 1000 dev/dak motor hızında ortaya çıkan verilerin aksine, 5° KMA gibi ÜÖN'ye çok yakın başlayan püskürtmede en yüksek ısı açığa çıkış hızı pik değerleri gözlemlenmemiştir. 5° KMA'dan başlayarak 25° KMA püskürtme avansına kadar pik ısı açığa çıkış hızı değeri artış göstermiştir. Sonrasında ise düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. Her bir püskürtme avansında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı profilleri belirgin olarak birbirinden ayrılmış durumdadır. Püskürtme basıncının 800 bar değerine çıkışıyla

ÜÖN'ye çok yakın gerçekleştirilen enjeksiyonlarda pik ısı açığa çıkış hızı tekrar artış eğilimine girmiştir. Bu durum 600 bar püskürtme basıncında bir modelleme hatası olabileceği şüphesini ortaya koymaktadır. 800 bar püskürtme basıncında, püskürtme avansının 25° KMA'ya artışına kadar pik ısı açığa çıkış hızı değeri artış sergilemiş ve sonrasında ise düşüş eğilimi başlamıştır. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış hızı grafikleri büyük oranda benzeşim göstermeye başlamıştır. Yanmanın başlangıç noktası ve ısı açığa çıkışının ilk periyodu büyük bir yakınsama içerisindedir. Fakat 35° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan pik değer bir miktar daha yüksektir. Yani bu iki eğrinin tepe noktaları farklılık sergilemiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmede ortaya çıkan karakter aynı şekilde devam etmiş ve hatta tüm püskürtme avansları içerisinde en büyük pik ısı açığa çıkış hızı değeri 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Ardından püskürtme avansının 10° KMA'ya çıkışıyla bir miktar düşüş gözlemlenmiş ve sonrasında 25° KMA püskürtme avansına kadar yavaş da olsa artış ortaya çıkmıştır. Erken püskürtme şartlarında ise kayda değer bir düşüş gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında, 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan en büyük pik değer elde edilmesi durumu yine geçerlidir. Devamında püskürtme avansının artışıyla daha küçük değişim farklılıkları ortaya çıkmıştır. 10° KMA püskürtme avansından başlayarak 25° KMA püskürtme avansına kadar küçük değişim eğilimleriyle pik ısı açığa çıkış hızı değerinde artış gözlemlenmiş, sonrasında daha büyük değişim hızı ile düşüş ortaya çıkmıştır. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan iki eğrinin birbirlerine yakınsama davranışı daha ileri düzeydedir. Buna ilaveten 30° KMA püskürtme avansında da diğer işletme şartlarına göre birbiriyle daha fazla uyum içerisinde olan ısı açığa çıkış hızı grafiği gözlemlenmiştir.

1500 dev/dak motor hızında 20 mg/strok yakıt enjeksiyonu ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan verilere göre 5° KMA püskürtme avansında nispeten büyük pik değerler ortaya çıkmış ve sonrasında 15° KMA püskürtme avansına kadar düşüş gözlemlenmiştir. Ardından tekrar artış eğilimi ortaya çıkmış, 30° KMA püskürtme avansına kadar bu artış devam etmiştir. Sonrasında ise bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Isı açığa çıkış hızı verilerine bakıldığında 40° KMA püskürtme avansında ısı girişinin başladığı nokta dolayısıyla da yanmanın başlangıç noktası 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avanslarına göre ÜÖN'ye daha yakın bir

konumunda gerçekleşmiştir. Burada her ne kadar püskürtme daha erken yapılırsa da yanmanın başlangıcı ÜÖN'ye daha yakındır. Bu durumun gerekçeleri TG irdelemesi kısmında açıklanmıştır. Püskürtme basıncının 800 bar değerine gelmesiyle pik değer 5° KMA püskürtme avansında görülmesi davranışı değişmemiştir. Sonrasında ise 25° KMA püskürtme avansına kadar düzenli bir düşüş ortaya çıkmıştır. 30° KMA, 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan eğrinin genel profili birbirine benzerlik göstermektedir. Püskürtme basıncı 1000 bar'a çıkarıldığında ise püskürtme avansının en küçük değerinden en büyük değerine doğru artışı esnasında bu sefer 15° KMA püskürtme avansına kadar pik değerde düşüş gözlemlenmiş, sonrasında ise ısı açığa çıkış hızının pik değeri bir miktar artış sergilemiştir. 20° KMA ve 25° KMA püskürtme avanslarında yaklaşık aynı pik değer ortaya çıkmıştır. Sonrasında ise püskürtme avansının artışına bağlı olarak bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarına bakıldığında yanmanın hemen hemen aynı yerde başladığı ve ısı açığa çıkış hızı açısından son derece benzer karakter taşıdığı rahatlıkla söylenebilir. 1200 bar püskürtme basıncında da 1000 bar verilerine benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. İki püskürtme basıncı arasındaki fark ise 1200 bar püskürtme basıncında 25° KMA püskürtme avansından büyük püskürtme avanslarında ortaya çıkan eğrilerin tepe noktasının daha hızlı şekilde küçük değerlere hapsoluşudur.

1500 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt enjeksiyonu ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan veriler incelendiğinde en büyük pik ısı açığa çıkış hızı değerinin 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıktığı, bu değer 15° KMA püskürtme avansına kadar hızlı bir düşüş gösterdiği, sonrasında bir miktar artış sergileyip 25° KMA püskürtme avansından sonra çok yavaş bir düşüşe geçtiği görülmüştür. Fakat burada şu ana kadar henüz gözlemlenmemiş olan harici bir eğilim daha ortaya çıkmıştır. 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı tekrardan artış göstermiştir. Bu durum ilgili işletme şartında dizel vuruntusu emarelerinin oluşmaya başladığına işaret etmektedir. Püskürtme basıncının 800 bar değerine çıkışı ile püskürtme avansı arttıkça istisnasız ve düzenli bir şekilde pik ısı açığa çıkış hızı değeri düşüş sergilemiştir. Fakat 20° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra ortaya çıkan pik değer değişimleri son derece küçük farklılıklar göstermektedir. Püskürtme basıncının artışına bağlı olarak, 600 bar püskürtme basıncı ve 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan, dizel

vuruntusu emarelerinin büyük oranda sönümlendiği görülmektedir. 1000 bar püskürtme basıncında ise şu ana kadar ortaya çıkan hakim eğilimler haricinde yeni bir eğilim gözlemlenmemiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise pik değerin ortaya çıktığı yer 25° KMA püskürtme avansıdır. Devamında artan püskürtme avanslarında da önceki püskürtme basınçlarına göre daha yüksek değerler ortaya çıkmıştır. Bu koşullarda ortaya çıkacak olan yanmanın DSY karakterine uygun olmayacağı dolayısıyla da bu bölgede erken püskürtmenin avantajlarından yararlanılamayacağı öngörülebilir.

2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında motor hızının artışıyla beraber pik ısı açığa çıkış hızı verilerinde bir miktar farklılık ortaya çıkmıştır. Motor hızı arttıkça her ne kadar yanma KMA cinsinden hız artışı gösterse de ms ölçeğine göre yanma daha uzun bir sürece yayılmaktadır. Bu durum ısı açığa çıkış hızının pik değerinin hangi püskürtme avansında ortaya çıktığını etkilemiştir. 600 bar püskürtme basıncında elde edilen verilere bakıldığında 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında 200 J/°KMA bandında pik ısı açığa çıkış hızı değeri gözlemlenmiştir. Sonrasında püskürtme avansı arttıkça 25° KMA püskürtme avansında bu değer 450 J/°KMA bandına kadar ulaşmıştır. Sonrasında ise tekrar düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Bu değişim trendi esas olarak beklentilere daha uygun değerlerdir. Aynı zamanda pik ısı açığa çıkış hızı düştükçe ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı eğrisinin daha geniş bir aralıkta parabolik bir form sergilediği görülmektedir. Püskürtme basıncının 800 bar değerine çıkışıyla beraber ısı açığa çıkış hızı eğrilerinin pik değeri 20° KMA püskürtme avansında en yüksek seviyeye ulaşmıştır. 5° KMA püskürtme avansından 20° KMA püskürtme avansına gelene kadar pik değerde daha şiddetli bir artış, erken püskürtme şartına geçişte ise daha düşük dozlu bir düşüş gözlemlenmiştir. Püskürtme basıncı, aynı motor hızı ve yakıt püskürtme kütlelerinde, 1000 bar değerine çıktığında, daha önceki verilerde 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan pik değer artışı yeniden gözlemlenmiştir. Bunun haricinde karşımıza harici bir sonuç çıkmamıştır. Püskürtme basıncının 1200 bar değerine gelişiyle, 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan tablo ile uyum içerisinde olan çıktılar gözlemlenmiştir. Fakat küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkan pik değer artış sergilemiş, erken püskürtme şartında ise gözlemlenen pik değer biraz daha düşüş sergilemiştir.

2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda püskürtme basıncının değişimiyle farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı bir miktar daha yüksek pik ısı açığa çıkış hızı değeri ortaya koyarken, sonrasında 25° KMA püskürtme avansına kadar birbirine son derece yakın pik ısı açığa çıkış hızı değerleri gözlemlenmiştir. Aynı zamanda ısı açığa çıkış hızı eğrilerinin genel profili de birbirine son derece benzer çıkmıştır. Sonrasında ise bir artış gözlemlenmiş ve 35° KMA püskürtme avansında seri içerisindeki pik değer ortaya çıkmıştır. 35° KMA'dan 40° KMA püskürtme avansına geçişte ise bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. Püskürtme basıncının 800 bar değerine çıkarılmasıyla birlikte bir önceki veri setini destekler nitelikte sonuçlar gözlemlenmiştir. Fakat yanmanın genel olarak daha kısa sürede tamamlandığı ve dolayısıyla da ısı açığa çıkış hızlarının daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. Buna ilaveten, bu püskürtme basıncında pik ısı açığa çıkış hızı değerinin 40° KMA püskürtme basıncında elde edildiği görülmüştür. 1000 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının 5° KMA değerinden başlayarak 15° KMA değerine gelişine kadar pik ısı açığa çıkış hızı değerinde düşüş gözlemlenmiş ve ısı açığa çıkış prosesinin daha uzun bir sürece yayıldığı görülmüştür. Devamında ise püskürtme avansı atıkça başlangıçta pik ısı açığa çıkış hızında bir miktar artış yaşanmış, ancak bu değerler birbirine yakın seyretmiştir. Püskürtme basıncının 1200 bar değerine gelişiyile tıpkı 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan değişim eğilimleri gözlemlenmiştir. 5° KMA püskürtme avansından 25° KMA püskürtme avansına gelene kadar pik ısı açığa çıkış hızı değerlerinde düzenli bir düşüş görülmüş, 25° KMA püskürtme avansından 30° KMA püskürtme avansına geçişte bir miktar artış ortaya çıkmış ve devamında bu değer 40° KMA püskürtme avansına kadar kendini yaklaşık sabit bir formda korumuştur.

2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt enjeksiyonu ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı eğrileri göz önünde bulundurulduğunda 5° KMA püskürtme avansından 20° KMA püskürtme avansına kadar pik ısı açığa çıkış hızı değerinde düzenli düşüşler ortaya çıktığı görülmüştür. Buna ilaveten 15° KMA ve 20° KMA püskürtme avanslarında daha geniş bir plato bölgesi gözlemlenmiştir. Bu iki püskürtme avansında yanmanın daha yavaş ilerlediği buradan yola çıkarak söylenebilir. Devamında püskürtme avansının daha da artışıyla beraber yani 25° KMA ve üzeri püskürtme avanslarında pik ısı açığa çıkış

hızı değerleri birbirine yakın seyretmiştir. 30° KMA, 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ise birbirine yakın ısı açığa çıkış hızı profilleri elde edilmiştir. Püskürtme basıncının 800 bar değerine çıkışıyla ısı açığa çıkış hızı eğrilerinin pik değeri doğrusala daha yakın bir dağılım göstermeye başlamıştır. Bu püskürtme basıncında 40° KMA püskürtme avansında ısı açığa çıkış hızı eğrisi pik değeri tekrardan bir artış eğilimine girmiş ve 20° KMA püskürtme avansının dahi üzerine çıkmıştır. Aynı zamanda eğri ikinci derece terim kat sayısı daha yüksek olan bir parabol formuna bürünmeye başlamıştır. Bu şartta dizel vuruntusu emarelerinin ortaya çıktığına ve PCCI ve stratejisi açısından dezavantajlı durumların başlayacağına işaret etmektedir. Püskürtme basıncının 1000 bar değerine artışı ile beraber püskürtme avansının artışıyla 35° KMA püskürtme avans değerine kadar ısı açığa çıkış hızının pik değerinde düzenli düşüşler gözlemlenmiştir. 40° KMA püskürtme avansında ise pik ısı açığa çıkış hızı tekrardan artış eğilimine girmiştir. Bu durumda vuruntulu yanma eğilimi bir önceki püskürtme basıncında olduğu gibi 40° KMA püskürtme avansında bir miktar daha düşük seviyede de olsa gözlemlenmiştir. Burada dikkat çeken bir başka sonuç ise küçük püskürtme avanslarına göre 40° KMA püskürtme avansında ısı açığa çıkış hızı eğrisi altında kalan alan integrali daha küçük değerlere sıkışmıştır. Burada her ne kadar vuruntulu bir yanma karşımıza çıksa dahi yanma odasına gönderilen yakıtın tamamının yanmaya sokulamadığını bizlere açıkça göstermektedir. 1200 bar püskürtme basıncında ise 20° KMA püskürtme avansı sonrasında az önce bahsi geçen durum gözlemlenmeye başlamıştır.

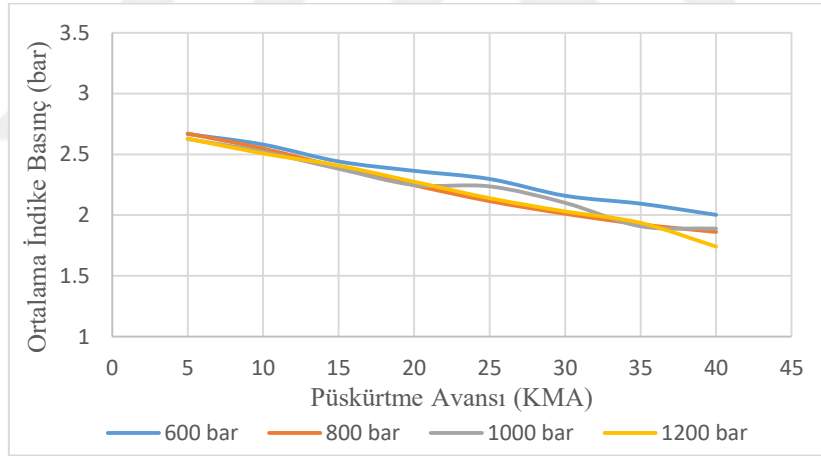
4.9 Ortalama İndike Basıncı Verilerinin İncelenmesi

Ortalama indike basınç (OİB) birim hacimden elde edilen ve sürtünme kayıplarından arındırılmış net işi temsil etmesi sebebiyle belirli termodinamik şartlarda oluşan yanmanın, motor büyüklüğü ve mekanik kayıplardan bağımsız olarak değişen işletme parametrelerine bağlı olarak ne şekilde değiştiği ve optimum koşullara ne denli yaklaşıldığına kanaat getirmek adına kullanılabilecek en sağlıklı kıyas metodudur. Bu sebeple OİB değerleri çalışmaya dahil edilmiş ve her bir motor hızı, motor yükü, püskürtme avansı ve püskürtme basıncında ortaya çıkan değerler göz önüne alınmıştır. Bu bölüm başlığında elde edilen OİB değerleri içerisinde deneysel veriler ile karşılaştırma yapılmış ve araştırma uzayının büyük bir kısmında

oldukça benzer ve güvenilirlik sınırları içerisinde yer alan değerlerin elde edildiği görülmüştür. Fakat yanma başlangıcının genişleme fazına kaydığı 5° KMA püskürtme avansında elde edilen veriler göz önünde bulundurulduğunda sistematik olarak deneysel veri ve simülasyon çalışması sonucu elde edilen veri arasındaki hata oranlarının yüksek çıktığı görülmüştür. Bu araştırma noktalarında P- α grafiklerinin birbiriyle örtüşme davranışı kötü durumda değildir. Ancak Bölüm 3.5 dahilinde de belirtildiği gibi diğer püskürtme avanslarında ortaya çıktığı kadar iyi bir benzeşim yakalanamamış ve eğriler güçlükle yakınsatılmıştır. Bu noktalarda egzoz gaz sıcaklıkları da oldukça yakın değerler almıştır. Yine de yanmanın beklenmedik bir anda ortaya çıkışı ve fazlaca genişlemeye kayması sonucunda OİB değerlerinin istenilen düzeyde modellenemediği görülmüştür. Bu sebeple 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan OİB değerlerine temkinli bir şekilde yaklaşmak gerekmektedir.

Şekil 4.55 içerisinde 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok püskürtülen yakıt kütlesi şartında ortaya çıkan OİB değerlerini görülmektedir. Bu veri seti içerisinde elde edilen OİB değerleri 1,741 bar ile 2,692 bar arasında değerler almıştır. Veri seti içerisinde, püskürtme avansının artışına bağlı olarak OİB değerlerinde düzenli bir düşüş eğilimi görülmüştür. 5° KMA püskürtme avansında elde edilen veriler az önce belirtilen sebeplerle değerlendirme dışı bırakıldığında, motor hızının nispeten düşük olması ve ÜÖN'ye ulaşana kadar kat edilecek olan süre KMA cinsinden sabit olsa da milisaniye cinsinden sahip olunan süre artış gösterecektir. Bu sebeple yanmanın diğer motor hızlarına göre KMA cinsinden daha erken başlaması beklenen bir durumdur. Bu veri setinde püskürtme avansının artışıyla yanmanın başladığı nokta sıkıştırma stroğu esnasında daha erken bir zamana denk düşmektedir. Böylelikle gerçek termodinamik çevrimin ideal çevrime yakınsama davranışı kötüleşmiş ve OİB değerleri düşmeye başlamıştır. Püskürtme avansının 15° KMA değerine ulaşana kadar geçen sürede farklı püskürtme basınçlarında ciddi OİB farklılıkları gözlemlenmemiştir. Buradan yola çıkarak bu şartlarda yanma odası içerisinde oluşan hava hareketleri ve türbülans seviyesinin birbiriyle benzer yanma karakteristikleri ortaya koyduğu söylenebilir. Yakıt enjeksiyonunun 15° KMA püskürtme avansından daha büyük avanslar ile gerçekleştiği durumda püskürtme basıncına bağlı olarak daha belirgin farklar gözlemlenmeye başlamıştır. Ancak yine de OİB açısından dramatik farklar ortaya çıkmamıştır. Bu veri setinde

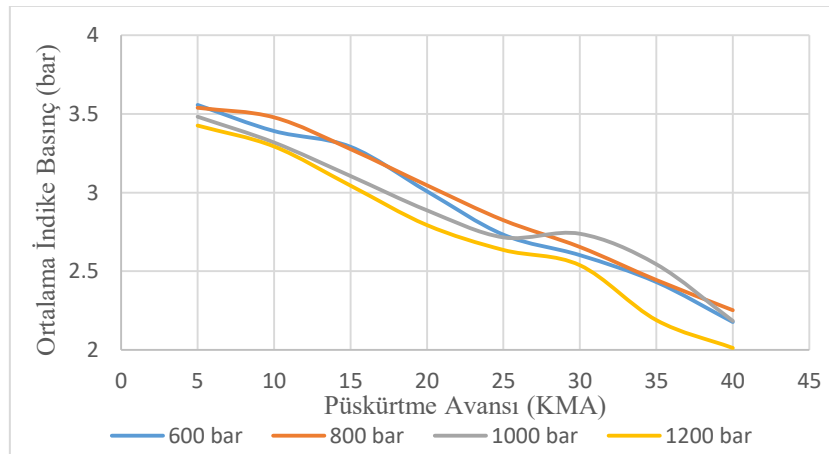
tüm püskürtme avanslarında düşük püskürtme basınçları ile çalışmak daha iyi OİB değerlerini ortaya koymuştur. 20° KMA püskürtme avansında elde edilen en büyük ve en küçük OİB değerleri arasındaki fark 0,09 bar değerindedir. Bu değer 25° KMA püskürtme avansında 0,12 bar, 30° KMA püskürtme avansında 0,13 bar, 35° KMA püskürtme avansında 0,11 bar ve 40° KMA püskürtme avansında 0,26 bar olarak ölçülmüştür. 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan bu sayısal fark %13'lük bir farka karşılık gelmektedir. Bu aralıkta püskürtme basıncı arttıkça OİB değeri kötüleşmektedir. Ortaya çıkan bu OİB farkı OEB değerinde kendini büyüterek var edecektir. Çünkü yakıt basınçlandırma işi püskürtme basıncının artışıyla artış gösterecektir. Bu da bahsi geçen işletme şartında performans çıktıları açısından yüksek püskürtme basınçları ile çalışmanın mantıksız olduğu sonucunu doğurmaktadır. Fakat burada karar verilirken aynı işletme şartlarında ortaya çıkan emisyon değerleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Ek bir irdeleme olarak düşük püskürtme basınçlarında püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan OİB farklılıkları daha makul seviyede gerçekleşmiştir.



Şekil 4.55 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan OİB değerleri

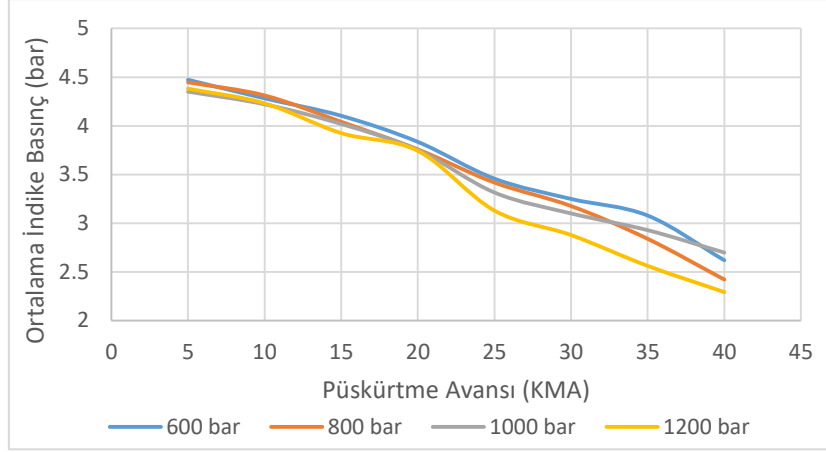
Şekil 4.56 içerisinde 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan OİB değerlerini göstermektedir. Bu veri seti içerisinde ortaya çıkan değişim eğilimlerini incelemeyen önce kaba hatları ile bir önceki veri seti ile bu grafiğin karşılaştırılmasında yarar vardır. Çünkü motor yükü arttıkça ortaya ne denli bir değişim eğilimi çıkacağının görülmesi bu yolla mümkündür. Püskürtülen yakıt kütlelerinin 15 mg/strok değerinden 20 mg/strok değerine artışıyla birlikte tahmin edileceği üzere OİB değerleri artış göstermiştir. Düşük püskürtme avanslarında bu artış 0,8 – 0,9 bar aralığında gözlemlenmiştir. En büyük püskürtme

avansı değerinde ise fark 0,2 bar seviyesinde ortaya çıkmıştır. Buradan hareketle motor yükü artışına bağlı olarak püskürtme avansı arttıkça ortaya çıkan OİB farklılıkları daha da artmaktadır. Düşük püskürtme basınçlarında son derece belirgin olan farklılık, 40° KMA püskürtme avansında büyük oranda belirginliğini yitirmiş ve aradaki fark ilk durumdaki farkın yaklaşık olarak %25'ine düşmüştür. Buradan hareketle motor yükü arttıkça püskürtme avansı üzerinde gerçekleştirilebilecek olan manipölasyonlar sınırlanmaktadır. Motor yükü arttıkça bu sınırın daraldığı literatür çalışması kısmında da belirtilmiştir. Bu veri setinde püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak her bir püskürtme avansında ortaya çıkan farklılıklar daha belirgin bir hal almıştır. Bu iki durum bizlere motor yükü arttıkça ilgili noktadaki püskürtme parametrelerinin daha büyük öneme sahip olmaya başladıklarını göstermektedir. Bu veri setinde zaman zaman girift ilişkiler ortaya çıksa da genel olarak büyük püskürtme basınçlarında çalışmak OİB açısından yine daha kötü sonuçlar ortaya koymuştur. Hatta bu veri setinde ortaya çıkan bu kötüleşme eğilimi düşük püskürtme avanslarında da gözlemlenebilmiştir. Esas olarak motor yükünün artışıyla özellikle konvansiyonel yanma şartlarında böyle bir eğilimin ortaya çıkması pek beklenen bir durum değildir. Ancak motor yükünün düşük oluşu böyle bir etkiyi doğurmuştur. Eğer ki motor yükü yeteri kadar artırılır ve işletme parametrelerinin yanma başlangıcı ve ilerlemesine olan etkisi daha yüksek bir seviyeye gelirse bu eğilimin özellikle konvansiyonel dizel yanmasının hakim olduğu püskürtme basıncı değerlerinde tersine bir eğilim göstermeye başlayacağı düşünülebilir.



Şekil 4.56 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değerleri

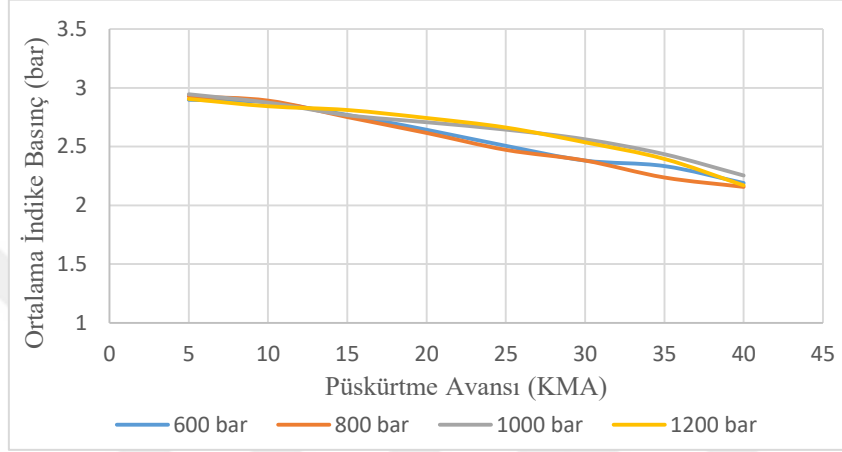
Şekil 4.57 dahilinde 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan OİB değerleri görülmektedir. Bu veri setinde de motor yükünün artışıyla konvansiyonel dizel yanması bölgesinde ortaya çıkan OİB artışı değeri daha yüksek seviyededir. Püskürtme avansının fazlaca arttığı durumlarda ise ortaya çıkan düşüş önceki veri setlerine göre daha hayati bir durum almıştır. Püskürtme avansının artışını bağlı olarak 2,1 bar OİB değer farklılıkları görülmüştür. Bu farklılık yüksek püskürtme basınçlarında daha da belirgindir. 1200 bar püskürtme basıncı serisinde püskürtme avansının artışıyla %48 civarında OİB düşüşü gözlemlenmiştir. Bu düşüş kati olarak kabul edilebilir sınırların dışındadır. Daha düşük püskürtme basınçlarında, püskürtme avansı artışıyla ortaya çıkan kötüleşmenin izafî olarak daha küçük değerlerde kalmasının sebebi yanma başlayana kadar ortaya çıkan karışımın iç yapısı ile ilişkilendirilebilir. Yanmanın kısa sürede başlaması için uygun olmayan şartlarda yapılan püskürtme neticesinde püskürtme basıncı arttıkça yakıt yanma odası içerisinde daha büyük bir hacme yayılım göstermiştir. Böylelikle daha fakir karakteristikte ve daha yavaş bir yanma ortaya çıkmıştır. Neticede termal kayıplar artmış ve ısı giriş prosesi ideal çevrimden daha ıraksak bir hal almıştır. Bu da ortaya çıkan dramatik düşüşlerin kaynağı olarak değerlendirilebilir. Bölüm 4.2 ve Bölüm 4.3 içerisinde yer alan yanma süreci uzunluğu ve KYK50 noktalarına ulaşılan süre bu durumu açıkça ortaya koymaktadır. 25 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında püskürtme basıncına bağlı olarak ortaya çıkan değişimler göz ardı edilse dahi püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan değişimler son derece yüksek seyretmiştir. Bu şartlarda düşürülmesi hedeflenen NO_x ve PM emisyonlarında varsayımsal olarak bir iyileşme gözlemlense dahi performans parametrelerinin son derece kötüleşmesi sebebiyle bu veri setinde yer alan yüksek püskürtme avans değerlerinde PCCI stratejisinin pek uygulanabilir olmadığı düşünülebilir. Çünkü konsantrasyona bağlı olarak bu iki emisyonunda düşüşler ortaya çıksa dahi özgül emisyonlar cinsinden iyileşme kat edilemeyeceği son derece bariz olarak görülmektedir. Ayrıca bu durumda ortaya çıkacak olan yakıt sarfiyatı değerleri de konvansiyonel dizel yanmasıyla makul farklar ortaya koymanın ötesine geçecek ve kabulü mümkün olmayan farklar ortaya koyacaktır.



Şekil 4.57 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan OİB değerleri

Şekil 4.58’de 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan OİB değerleri görülmektedir. Motor hızının artışına bağlı olarak OİB değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 1500 dev/dak motor hızı, test motorunun maksimum moment devri civarlarında yer almaktadır. Buradan yola çıkarak esasen, sonuçlara bakılmaksızın OİB değerlerinin artış göstereceğini söylemek mümkündür. İncelenen motor hızı ve yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan OİB değerleri farklı püskürtme basınçları için 2,95 bar ile 2,17 bar arasında değişkenlik göstermektedir. Aynı motor yükünde 1000 dev/dak motor hızında ortaya çıkan verilere göre, püskürtme avansının artışına bağlı olarak daha geniş bir aralıkta daha küçük değişim gradyanları ortaya çıkmıştır. Özellikle püskürtme başlangıcının 20° KMA püskürtme avansına artışına dek son derece küçük değişimler ortaya çıkmıştır. Püskürtme basıncı arttıkça, OİB değerlerinde ortaya çıkan değişimler yüksek püskürtme basınç değerleri olan 1000 bar ve 1200 bar değerlerinde daha kabul edilebilir değerler almıştır. Püskürtme avansının 25° KMA değerine gelişine kadar bu iki püskürtme basıncında ortaya çıkan OİB farklılığı yaklaşık olarak %8 dolaylarındadır. Sonrasında ise püskürtme avansının daha da artmasıyla OİB değerindeki düşüş eğilimi bir miktar hızlanmıştır. Bir önceki motor hızı olan 1000 dev/dak’a göre konvansiyonel yanma aralığında yüksek püskürtme basınçları ile çalışmanın daha makul sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Motor hızının maksimum moment devrine yaklaşmasıyla ve silindir içi hava hareketlerinin artışıyla bağlı olarak, yanma geleneksel olarak kabul görmüş karaktere yaklaşmış ve yüksek püskürtme basınçları bu aralıkta daha yüksek OİB değerlerini ortaya çıkartmıştır. Bu bölgede 800 bar püskürtme basıncının, 600 bar püskürtme

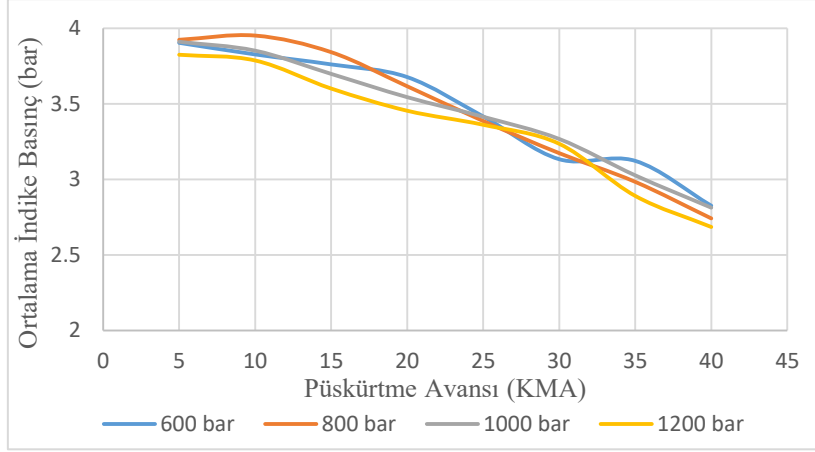
basıncına göre daha düşük OİB değerleri vermesinin esas itibarıyla teorik bir izahı bulunmamaktadır. Ancak belirtmek gerekir ki burada ortaya çıkan farklılık son derece küçük değerler almış ve belirgin bir ayrışmayı ortaya koymamıştır. Böyle bir sonucun ortaya çıkmasındaki temel sebep deneysel verilerin elde edilişi esnasında talep edilen şart ile gerçekte ortaya çıkan şartın az da olsa belli hatalar barındırması ve bu hatanın da buradaki sonuç üzerinde yarattığı belirsizlikten kaynaklı olarak ortaya çıktığını söylemek mümkündür.



Şekil 4.58 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değerleri

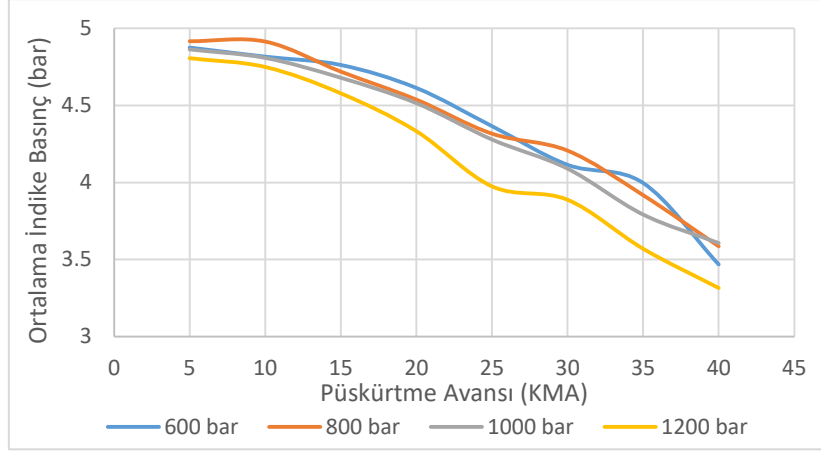
Şekil 4.59’de 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değerleri gözükmemektedir. Bu grafik gerek motor yükü artışı gerekse de motor hızı artışı açısından incelenmelidir. Motor hızı artışına bağlı olarak bir önceki veri setinde ortaya çıkan durum burada da geçerlidir. Yani motor hızı artışında motorun maksimum moment devrine yaklaşması neticesinde OİB değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Püskürtülen yakıt kütlelerinin 15 mg/strok değerinden 20 mg/strok değerine artışıyla da tahmin edileceği üzere OİB değerleri artmıştır. Motor yükü artışıyla ortaya çıkacak olan bu iyileşme tahmin edilebilen temel bir bilgidir. Görülmesi gereken bir başka sonuç, yine teorik bilgilere paralel olarak, bir önceki motor hızına göre eşit motor yükü artışında OİB değerinde gözlemlenen artışın daha büyük değerlere ötelenmiş olmasıdır. Bu veri setinde püskürtme basıncı değişimiyle ortaya çıkan OİB farklılıkları her bir püskürtme avansında belirgin hale gelmiştir. Düşük püskürtme avanslarında, yüksek püskürtme basınçları ile çalışmanın daha düşük OİB değerlerine yol açtığı görülmüştür. Püskürtme avansının bir miktar artarak konvansiyonel yanmaya ait püskürtme avans değerlerine gelindiğinde ise bu etkinin ortadan kalkmış olduğu görülmektedir.

Püskürtme avansının daha da arttırılarak PPCI rejimine geçilmesi ile genel bir eğilim olarak yüksek püskürtme basınçlarında ortaya çıkacak olan izafi OİB düşüşü artış sergilemiştir. Şu ana kadar incelenen veri setlerinde püskürtme avansının artışıyla hiçbir noktada OİB değerinde artış ortaya çıkmamıştır. Fakat burada bazı noktalarda püskürtme avansı artışına bağlı olarak belli bir aralıkta OİB değerleri sabit seyretmiş veya belli bir artış göstererek ardından düşüş eğilimine girmiştir. Bundan sonra incelenecek olan veri setlerinde de özellikle aynı motor yükü ve 2000 dev/dak motor hızında, bu eğilimin kendini güçlendirerek ortaya çıkması beklenmektedir. Grafik üzerinde sunulmuş olan işletme şartlarında ortaya çıkan en büyük OİB değeri ile en küçük OİB değeri arasında 1,3 bar farklılık gözlemlenmiştir. Her bir püskürtme basıncı için püskürtme avansının değişimine bağlı olarak 1,1 bar ile 1,15 bar arasında düşüşler ortaya çıkmıştır. Böylelikle alt ve üst değerler arasında 1/3 oranı seviyesinde değişim oranı gözlemlenmiştir. Ancak püskürtme avansının 30° KMA değerinde iken bu farklılık %20 seviyesinde, 35° KMA değerinde ise %25 dolaylarındadır. Bu farklar azımsanmayacak bir düzeyde ve taşıtın yakıt sarfiyatı üzerinde belirgin farklar ortaya koyacak seviyededir. Fakat belirli bir emisyon regülasyonuna uygun olarak çalışan bir motor göz önünde bulundurulduğunda bu farkların doğrudan bu nispette yakıt sarfiyatına yansıyacağından söz etmek bir miktar hatalı bir bakış açısı olacaktır. Her ne kadar yakıt sarfiyatı açısından gözlemlenen kötüleşme tamamen ortadan kalkmayacak olsa da bu değerleri emisyon kontrol stratejileriyle birlikte değerlendirmek gerekmektedir. Çünkü bu noktalarda çalışmanın ileri kısımlarında da görüleceği üzere NO_x ve PM emisyonları düşüş göstermektedir. Bu sebeple de post enjeksiyona olan ihtiyaç ve bağımlılık azalmaktadır. Buradan elde edilecek kazanç ile konvansiyonel yanmanın ortaya koyduğu yakıt sarfiyatı ve OİB değerlerine erişilemeyecek olursa da durum yukarıdaki rakamların ortaya çıkaracağı yakıt sarfiyatı farklılığı kadar kötü olmayacaktır. Buna ilaveten yanma sürecinin uzaması ve yanmanın daha geç tamamlanması neticesinde egzoz gaz sıcaklıklarında ortaya çıkacak olan artışın da emisyon indirgeme üniteleri üzerindeki dönüşüm verimliliğini arttırıcı etkisi ilaveten hesaba katılmalıdır. Böylelikle bu ünitelerin sıcaklığını arttırmak adına gerçekleştirilen geç-post püskürtmenin (late-post injection) veya egzoz hattına enjekte edilen yakıtın üstleneceği yükün de azalmış olduğunu belirtmekte yarar vardır.



Şekil 4.59 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan OİB değerleri

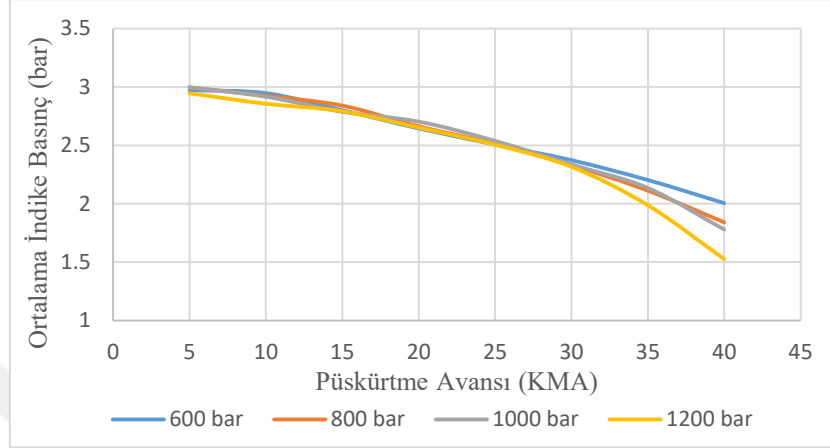
Şekil 4.60'de 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan OİB değerleri görülmektedir. Aynı yakıt püskürtme kütlesinde 1000 dev/dak motor hızına göre, püskürtme avansı değişimiyle bu veri setinde uç değerler arasındaki farklılık biraz daha küçük değerler almıştır. Tahmin edileceği üzere düşük püskürtme avansı değerlerinde farklı püskürtme basınçlarının yarattığı OİB değerleri daha küçük farklılıklar barındırırken, püskürtme avansının belli bir değerin üzerine çıkışıyla gözlemlenen farklılıklar daha büyük değerlere ulaşmıştır. Bu veri seti içerisindeki OİB değerleri 4,915 bar ile 3,315 bar arasında değerler almıştır. Buradan hareketle en düşük ve en yüksek OİB farklılığı değerlerinin 1,6 bar değişkenlik gösterdiği söylenebilir. Her bir püskürtme basıncı için ise yaklaşık olarak 1,2 bar ile 1,5 bar arasında değişen OİB farklılıkları ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan OİB farklılıkları bir önceki veri setine göre oransal olarak az da olsa daha küçük farklılıklar ortaya koymuştur. 30° KMA ve 35° KMA püskürtme avansında da yine bir miktarda daha düşük sayısal değerde olan farklılık oranları gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında elde edilen sonuçlara bakıldığında, püskürtme avansının değişimiyle daha kötü sonuçlar elde edilmiştir. Püskürtme avansı arttıkça ortaya çıkan OİB düşüş eğilimi daha yüksek seviyededir. 600 bar püskürtme basıncında özellikle 20° KMA püskürtme avansına kadar nispeten düşük değişim miktarları ortaya çıkmış ve hatta belli bir aralıkta stabil sayılabilecek değerler ortaya çıkmıştır. Püskürtme basıncı arttıkça nispeten yakın sonuçların ortaya çıktığı püskürtme avansı aralık değeri daha dar bir banda sıkışmıştır. 800 bar püskürtme basıncında başlarda sınırlı bir seviyede de olsa OİB'de belli belirsiz bir artış da gözlemlenmiştir.



Şekil 4.60 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan OİB değerleri

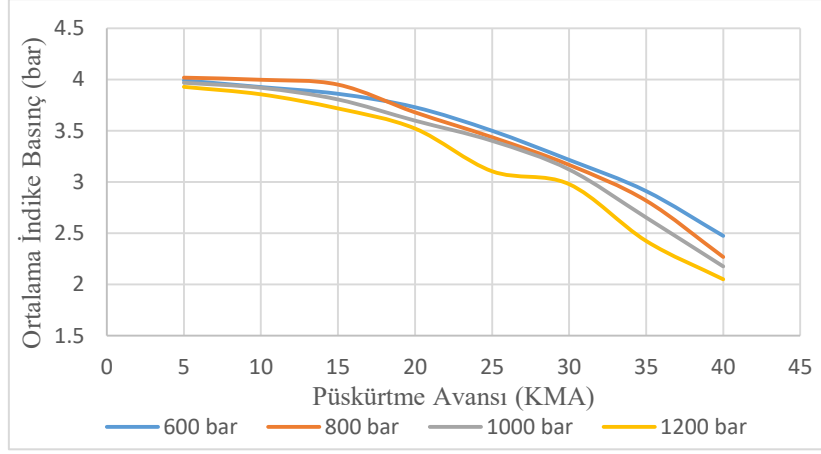
Şekil 4.61 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan OİB değerlerini sunmaktadır. Bu veri seti aynı yakıt püskürtme kütlelerinde ve 1500 dev/dak motor hızında elde edilen veriler ile karşılaştırıldığında, püskürtme avansının küçük değerler aldığı aralıkta ciddi bir OİB farklılığı ortaya koymamıştır. Ancak yüksek püskürtme avanslarında daha belirgin düşüşler ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansının değişimiyle bu veri setinde farklı püskürtme basınçlarında elde edilen OİB değerleri ciddi farklılık sergilemiştir. 30° KMA püskürtme avansına ulaşana kadar, püskürtme avansı arttıkça OİB değerlerinde bir düşüş gözle görülebilir bir şekilde kendini var etmiş, lakin her bir püskürtme avansında püskürtme basıncı değişimine bağlı olarak belirgin farklılıklar ortaya çıkmamıştır. Motor hızının artışıyla silindir içi hava hareketlerinde ortaya çıkacak olan iyileşme ve türbülans seviyesindeki artış yakıtın yanmaya hazırlanma sürecini kısaltmaktadır. Hava hareketlerinin iyileşmesi sonucunda karışım oluşumunda ortaya çıkacak olan iyileşme, bu düşük motor yükü şartında püskürtme basıncının etkisine göre başat faktör haline gelmiş ve püskürtme basıncının yanma üzerindeki belirgin etkisi yeterince görülmemiştir. Buna ilaveten motor yükünün de düşük seviyede olması sebebiyle püskürtme basıncının yaratacağı nispeten sınırlı etki daha da küçülmüştür. Püskürtme avansının 30° KMA değerini aşmasından sonra her ne kadar motor hızı artmış olsa da erken bir zamanda püskürtme yapıldığı için yanma odası hacmi yeterince küçülmemiş ve silindir içerisindeki türbülans seviyesi de yeteri düzeyde artmamıştır. İşte bu eşik püskürtme avansı değeri sonrasında püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan OİB farklılıkları gözle görülebilir bir hal almış ve yüksek püskürtme basınçlarında şu ana kadar genel bir eğilim

olarak görmüş olduğumuz üzere OİB değerleri düşüş sergilemiştir. Püskürtme basıncının artışıyla, bu aralıkta ortaya çıkan düşüş eğilimindeki artış net bir şekilde görülmektedir. Uç püskürtme avansı değerleri arasında 600 bar püskürtme basıncı için OİB açısından yaklaşık olarak %30 seviyesinde bir fark oluşmuşken 1200 bar püskürtme basıncında bu farklılık %50 seviyesine yaklaşmıştır.



Şekil 4.61 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan OİB değerleri

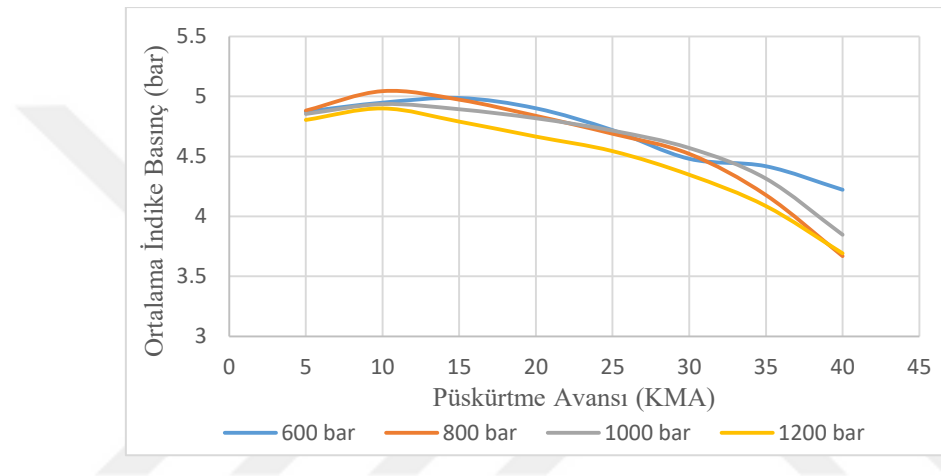
Şekil 4.62 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan OİB değerlerini sunmaktadır. Aynı motor hızında püskürtülen yakıt kütlelerinin artışı ile farklı püskürtme basınçlarında ortaya çıkan OİB değerleri arasındaki farklılık bu veri setinde belirgin hale gelmiştir. Püskürtme avansının küçük değerler aldığı ve nispeten ÜÖN'ye daha yakın başlayan şartlarda farklı püskürtme basınçları arasındaki değişim tahmin edileceği üzere daha sınırlı kalmış ve püskürtme avansının artışıyla farklı püskürtme basınçları arasında oluşan OİB farklılığı daha belirgin hale gelmiştir. 600 bar püskürtme basıncında püskürtme avansı değişimine bağlı olarak ortaya çıkan OİB düşüşleri bir miktar daha küçük değişim gradyanlarıyla ortaya çıkmıştır. Püskürtme basıncı arttıkça da bu farklılık dramatik artışlara doğru yönelmiştir. 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan OİB düşüşleri her bir püskürtme basıncında elde edilen pik değere nazaran %35'i aşan oranlarda farklılıklar göstermiştir. Hatta yer yer bu farklılık %45'i de aşmıştır. Dolayısıyla bu veri seti içerisinde emisyon değerlerinde büyük düşüş yakalansa dahi 40° KMA püskürtme avansında performans itibarıyla uygulanabilir olmaktan öte bir durumdadır. Düşük püskürtme avanslarında ise, püskürtme avansının belli bir değere artışına kadar ortaya çıkan nispeten stabile yakın değer aralığı bir miktar belirginleşmiştir.



Şekil 4.62 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan OİB değerleri

Şekil 4.63 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan OİB değerlerini göstermektedir. Bu veri seti içerisinde de püskürtme basıncı değişimine bağlı olarak OİB farklılıkları her bir püskürtme avansı için belirgin olarak gözlemlenmiştir. Yani motor yükü arttıkça püskürtme basıncının OİB üzerinde oynadığı rol gitgide belirginleşmektedir. Tüm püskürtme basınç serilerinde püskürtme avansının artışıyla ilk etapta OİB değerinde bir miktar artış gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında 10° KMA püskürtme avansına kadar gözlemlenen bu artış, 600 bar püskürtme basıncında 15° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Sonrasında ise tüm püskürtme basınçlarında püskürtme avansının artışına bağlı olarak bir düşüş gözlemlenmiştir. 30° KMA püskürtme avansı sonrasında ortaya çıkan OİB değerleri hızlı bir düşüş eğilimine girmiştir. Ancak bu süreye kadar karşımıza çıkan OİB düşüşleri daha makul seviyededir. Söz konusu aralıkta ilk değere göre %10 bandında düşüşler ortaya çıkmıştır. Ancak tüm püskürtme avansı değerleri göz önünde bulundurulduğunda 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan düşüş kabaca %15 bandında iken 800 bar serisinde ortaya çıkan düşüş %25 dolaylarında, 1000 bar ve 1200 bar değerlerinde de %20 seviyelerinde gözlemlenmiştir. 600 bar püskürtme basıncında püskürtme avansı artırıldıkça ortaya çıkan değişim diğer veri setlerine göre daha makul seviyededir. Bu durumun sebebi püskürtme basıncı düştükçe yakıt zerreciklerinin ortalama çapının artış göstereceği, bunun sonucunda da kaynama ve karışım oluşturma kabiliyetinin kötüleşeceği, bu durumun da yakıt hava karışımı daha küçük bir etkin hacimde oluşmasına sebebiyet vereceği düşünülebilir. Bu şartlarda oluşan alev çekirdekleri civarında yakıt hava karışımı diğer püskürtme basınçlarında

karşılaştığı kadar fakir karakteristik göstermez ve bu da yanma hızının yükselmesine yol açar. Böylelikle OİB değerlerindeki kötüleşme eğilimi bir miktar frenlenmiş olur. Bu öngörünün tutarlı bir çıktıya dönüşebilmesi için bu noktada ortaya çıkan PM emisyonlarının aynı püskürtme avansında diğer püskürtme basınçlarına göre daha yüksek çıkması bir zorunluluktur. Çalışmanın ileriki kısımlarında yapılan değerlendirmelerde de görüleceği üzere bu işletme şartında gerçekten de püskürtme basıncının 600 bar değerinde olduğu şartta diğer püskürtme basınçlarını göre ilgili püskürtme avansı değerinde oldukça yüksek PM emisyonu ortaya çıkmıştır.



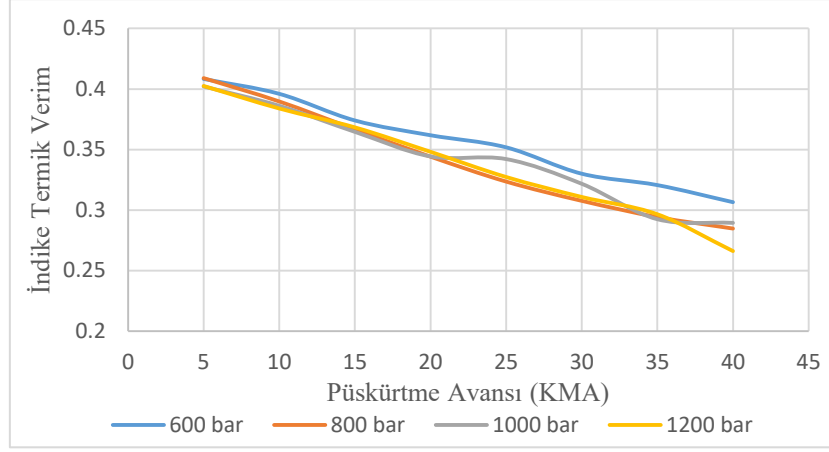
Şekil 4.63 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan OİB değerleri

4.10 İndike Termik Verim Değerlerinin İncelenmesi

Bölüm 4.9’da OİB değerleri incelenmiştir. Bu bölümde ise indike termik verim sonuçları üzerinde durulacaktır. Aynı motor hızı ve yakıt püskürtme kütlesi şartındaki veri setlerinde oluşacak olan değişim eğilimleri esas itibariyle ortalama indike basınç ve indike verim açısından birebir aynıdır. Hatta bu değişimi ortaya çıkartan sebepler de aynadır. OİB değerleri motor boyutlarından bağımsız olarak birim hacimden elde edilen işi temsil etmektedir. Bu sebeple ortaya çıkan değer mukayese açısından son derece elverişli bir veri sunsa da sisteme giren enerji miktarına bağlı olarak kıyas yapmayı mümkün kılmaz. Elde edilen performans değerlerinin daha sağlıklı irdelemesini yapmak adına indike termik verim değerleri de çalışmaya dahil edilmiştir. Böylelikle farklı veri setleri arasında kıyas yapmak daha mümkün hale gelmiştir. Aynı motor hızında ve farklı motor yüklerinde veya

farklı motor hızlarında yanmanın bu durumdan nasıl etkilendiğini daha iyi anlamak indike termik verim değerlerinin incelenmesiyle mümkündür.

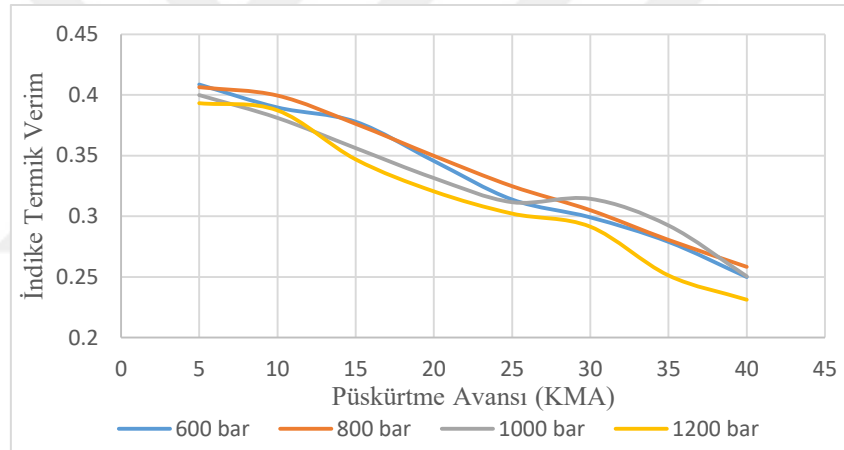
Şekil 4.64 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike verim değerlerini ortaya koymaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere, burada ortaya çıkan değişimlerin altında yatan sebeplere OİB verilerinin incelenmesi sırasında değinildiği için burada sadece sayısal değerlerin büyüklükleri üzerinden bir irdeleme yapılacaktır. 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan değerlere temkinli yaklaşılması gerektiğinden OİB verilerinin incelenmesi esnasında bahsedilmişti. Tahmin edileceği üzere burada da bu durum geçerlidir. ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde indike verim farklılıkları son derece düşük seviyede kalmıştır. Püskürtme avansının artışıyla farklı püskürtme basınçlarının ortaya koyduğu indike verim farklılıkları bir miktar daha belirgin bir hal almıştır. 600 bar püskürtme basıncında tüm veri seti için her bir püskürtme avansında en yüksek ortalama indike verim değerleri ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncı için 5° KMA püskürtme avansında indike verim 0,41 olarak hesaplanmıştır. 5° KMA püskürtme avansından 25° KMA püskürtme avansına kadar indike verimde nispeten daha makul değişimler söz konusu olup bu püskürtme avansında indike verim 0,35 olarak hesaplanmıştır. 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde ise indike verim 0,31 değerine gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında, püskürtme avansının artışıyla 0,40 ile 0,28 arasında indike verim değerleri ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında ise bu değerler 0,40 ile 0,29 arasında değişmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında da yine benzer sonuçlar ortaya çıkmış ve indike verim 0,4 ile 0,27 aralığında değerler almıştır. Burada gözlemlenen bir başka sonuç ise 30° KMA püskürtme avansı sonrasında 1200 bar harici püskürtme basınçlarında, püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan indike verim düşüşünün daha makul bir forma büründüğüdür. 35° KMA ile 40° KMA püskürtme avans aralığında özellikle 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında bu durum daha da baskın olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.64 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

Şekil 4.65 üzerinde 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok püskürtme kütlelerinde ortaya çıkan indike verim değerleri görülmektedir. Yakıt enjeksiyon kütlelerinin artışıyla ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde indike verim değerlerinde ciddi bir değişim ortaya çıkmamıştır. Mevcut incelenen veriler, Şekil 4.64 ile karşılaştırıldığında 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında oldukça yakın değerlerin ortaya çıktığı görülmektedir. Fakat erken püskürtme şartında ortaya çıkan indike verim değerlerinin kötüleştiği görülmektedir. 40° KMA püskürtme avansında 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında 0,31 ile 0,26 arasında indike verim değerleri ortaya çıkmıştı. Bu veri setinde yani 20 mg/strok yakıt püskürtme kütlelerinde ise 0,26 ile 0,23 arasında indike verim değerleri ortaya çıkmıştır. Motor yükü artışına bağlı olarak bu sonucun beklenen bir durum olduğu söylenebilir ve bu durumun gerekçesi Bölüm 4.9 başta olmak üzere birçok kere açıklanmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansında 0,41'lik indike verim gözlemlenmiştir. Püskürtme avansı arttıkça indike verim değerlerinde düzenli düşüş ortaya çıkmıştır. 15° KMA püskürtme avansına kadar ortaya çıkan düşüş son derece makul seviyede olup bu püskürtme avansında gözlemlenen indike verim 0,38 değerindedir. Sonrasında ise düşüş eğilimi hızlanmış ve 15° KMA ile 25° KMA püskürtme avansları arasında daha hızlı bir düşüş görülmüştür. Püskürtme avansının daha da artmasıyla düşüş eğilimi bir miktar azalmış ve 40° KMA püskürtme avansında 0,24'e gerileyen indike verim değeri ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 0,41'lik indike verim görülmüştür. 10° KMA püskürtme avansında da buna çok yakın bir değer ortaya çıkmış ve ortada bir ciddi bir farklılık gözlemlenmemiştir. Sonrasında ise neredeyse

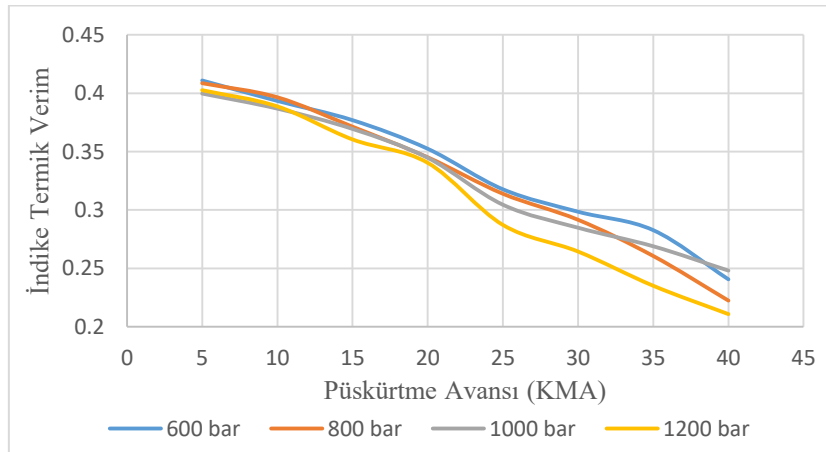
birinci dereceden bir fonksiyonmuşçasına yani doğrusala çok yakın bir düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde 0,25 indike verim gözlemlenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 0,40 değerinde indike verim görülmüş, sonrasında 25° KMA püskürtme avansında kadar hızlı bir düşüş ortaya çıkmış ve bu püskürtme avansında indike verim 0,31'e gerilemiştir. Püskürtme avansının 40° KMA'ya gelişiyle de indike verim 0,26 değerini almıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise indike verim, püskürtme avansının değişimine bağlı olarak, 0,39 ile 0,23 arasında değerler almıştır. Tekrardan görüldüğü üzere yüksek püskürtme basınçlarında erken püskürtme şartında performans değerleri, düşük püskürtme basınçlarına göre daha kötü değerler almaktadır. Yakıt enjeksiyonundan kısa süre sonra yanmanın başlayamayacağı durumlarda yüksek püskürtme basınçları aşırı fakir karışım bölgelerinin oluşmasına yol açmakta ve indike verimi düşürmektedir.



Şekil 4.65 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

Şekil 4.66 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok çevrim başına yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike verim değerlerini göstermektedir. Püskürtülen yakıt kütleleri, dolayısıyla da motor yükü, artışına bağlı olarak daha önceki incelemelerde de karşılaşılan durum yine gözlemlenmiştir. ÜÖN'ye çok yakın yapılan ve yanma başlangıcının genişleme stroğuna kaydığı 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan değerler yine pek bir değişiklik göstermemiş ve 0,4 dolaylarında değerler almıştır. Fakat erken püskürtme şartında 15 mg/strok ve 20 mg/strok yakıt püskürtme kütlelerine göre daha kötü indike verim değerleri ortaya çıkmıştır. 40° KMA püskürtme avansında 0,25 ile 0,21 arasında indike verim değerleri görülmüştür. Bu denli büyük farklar da kabul edilebilir nitelikte değildir. 1200 bar

gibi büyük püskürtme basınçlarında ve yüksek püskürtme avanslarında ortaya çıkan kötüleşmenin şiddetini arttırması ise daha belirgin bir şekilde karşımıza çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan indike verim değeri 0,41'dir. Püskürtme avansının artışına bağlı olarak 20° KMA püskürtme avansına kadar nispeten makul değişimler ortaya çıkmış, sonrasında ise 25° KMA püskürtme avansına kadar düşüş eğilimi hızlanmıştır. Devamında erken püskürtme rejimine geçiş ile indike verimde ortaya çıkan düşüş eğilimi tekrardan sağırlaşmış ve 25° KMA ile 35° KMA arasında nispeten kabul edilebilir düşüşler ortaya çıkmıştır. Fakat 35° KMA'dan sonra yanma bu durumdan oldukça olumsuz etkilenmiş ve tekrardan hızlı düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. 35° KMA ile 40° KMA püskürtme avansında 0,04'lük düşüş ortaya çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansında 0,24'lük indike verim gözlemlenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu durum bir miktar daha kötüleşmiş ve iki uç püskürtme zamanlamasında ortaya çıkan indike verim değerleri 0,41 ve 0,23 olarak gözlemlenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında da benzer bir eğilim ortaya çıkmıştır. Az önce de bahsedildiği üzere püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan en büyük kötüleşme 1200 bar püskürtme basıncında yaşanmış ve 40° KMA püskürtme avansında 0,21 değerinde indike verim görülmüştür. Buna ilaveten püskürtme basıncı arttıkça konvansiyonel yanma ile PCCI yanma arasındaki geçiş bölgesinde ortaya çıkan indike verim düşüşleri daha belirgin olarak kendini göstermiştir.

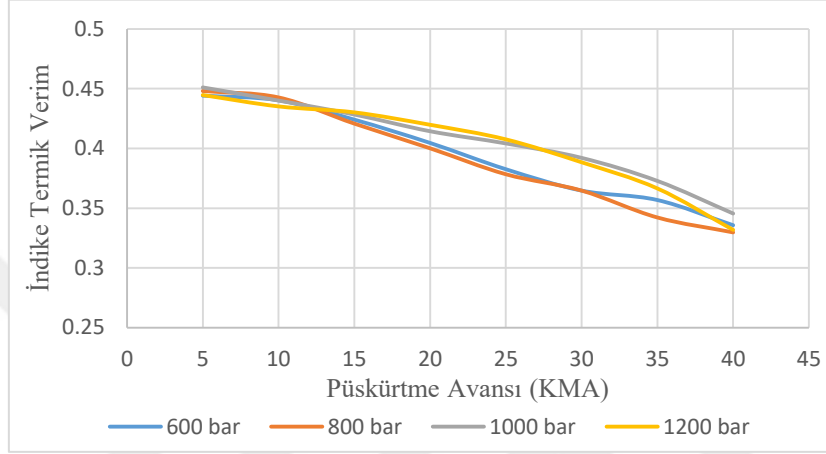


Şekil 4.66 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike verim değerleri Şekil 4.67'de sunulmuştur. Bu grafiğe bakarak, eşit yakıt enjeksiyon kütlelerinde motor devrinin 1000 dev/dak'tan 1500 dev/dak'a çıkmasıyla

indike verimde artış gözlemlenmiştir. ÜÖN'ye yakın yapılan 5° KMA gibi düşük püskürtme avansındaki enjeksiyonlarda 0,40 dolaylarında olan indike verim 0,45 bandına çıkmıştır. Diğer sınır püskürtme avans değeri olan 40° KMA püskürtme avansında ise 0,27 ile 0,3 bandında olan indike verim değerleri 0,33 ile 0,35 aralığına yükselmiştir. Küçük püskürtme avanslarında indike verim değişimleri nispeten kabul edilebilir düzeyde değerler almış ve farklı püskürtme basınçlarında birbirine oldukça yakın değerler ortaya çıkmıştır. 15° KMA püskürtme avansı sonrasında, püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan farklılıklar belirginleşmeye başlamıştır. Bu motor hızında ve motor yükünde erken püskürtme şartlarında daha yüksek püskürtme basınçları ile çalışmak daha makul indike verim değerleri ortaya koymuştur. Düşük püskürtme basınçlarında dramatik düşüş eğilimi bir miktar daha erken ortaya çıkmıştır. Yüksek püskürtme basınçları ise daha büyük püskürtme avanslarına kadar nispeten makul değişimler ortaya koymuştur. Örneğin 25° KMA püskürtme avansında 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçları 0,40'ın bir miktar üzerinde indike verim değerleri ortaya koymaktadır. Fakat 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında ise bu değer 0,38 seviyesindedir. Püskürtme avansının daha da artmasıyla yüksek püskürtme basınçlarında ortaya çıkan düşüş eğilimi hızı artış göstermiştir. Buna mukabil düşük püskürtme basınçlarında ise indike verimdeki gerileme eğilimi yavaşlamaya başlamıştır. Bu sonuçlara bakarak motor hızının değişimi neticesinde püskürtme basıncı değişiminin ortaya koyduğu sonuç farklılaşmıştır. Özellikle 35° KMA püskürtme avansı sonrasında değişim eğilimlerine bakıldığında, püskürtme avansının 40° KMA'nın da üzerine çıkarılmasıyla 1000 dev/dak motor hızındaki eğilimin tekrardan yakalanabileceği görülmektedir. Fakat bu püskürtme avansında motor hızı arttıkça yanma odası içerisinde gelişen türbülans karışım oluşumunu iyileştirilmiş ve yüksek püskürtme basınçlarının alev çekirdeklerine uzak bölgelerde aşırı fakir karışım yaratma eğiliminin önüne geçmiştir. Böylelikle bir miktar daha yüksek indike verim değerleri ortaya çıkmıştır. Yüksek püskürtme basınçlarında 35° KMA püskürtme avansı sonrasında ortaya çıkan indike verim kötüleşmesi bahsi geçen etkinin yavaş yavaş ortaya çıkmaya başladığına dair ipuçları ortaya koymaktadır. Bu sebeple, çalışma aralığının dışına çıkarak püskürtme avansı aşırı bir şekilde arttırıldığında 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarının daha düşük indike verim ortaya koyacağı açıktır. 600 bar püskürtme basıncındayken 5° KMA püskürtme avansı 0,44 indike verim değeri verirken 30° KMA püskürtme avansına kadar hızlı bir

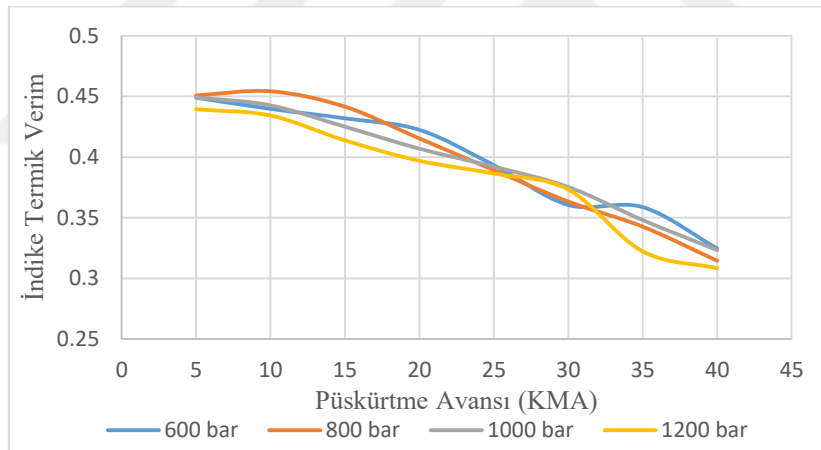
düşüş yaşanmış ve 30° KMA püskürtme avansında 0,36 indike verim gözlemlenmiştir. Sonrasında ise düşüş eğilimi yavaşlamış ve 40° KMA püskürtme avansında bu değer 0,33'e gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında da benzer bir eğilim görülmüş ve indike verim 0,45 ile 0,33 arasında değerler almıştır. 1000 bar püskürtme basıncında iki uç püskürtme avansı arasındaki değerler 0,45 ile 0,35 arasında değişmektedir. 1200 bar püskürtme basıncında ise söz konusu indike verim 0,44 ve 0,33 arasında değerler almıştır.



Şekil 4.67 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike verim değerleri Şekil 4.68 üzerinde sunulmuştur. Tıpkı 1000 dev/dak motor hızında elde edilen verilerde olduğu gibi, 1500 dev/dak motor hızında da motor yükü arttıkça, yani yakıt enjeksiyon kütle artışına bağlı olarak, ÜÖN'ye çok yakın yapılan püskürtmelerde indike verim değeri kayda değer değişiklik göstermemiş ve yine 0,45'e yakın değerler almıştır. Fakat erken püskürtme şartlarında ve özellikle 40° KMA püskürtme avansında motor yükü artışına bağlı olarak ortaya çıkan indike verim değeri daha düşük değerler almıştır. 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında 0,33 ile 0,35 arasında olan bu değer 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında 0,31 ile 0,32 bandına sıkışmıştır. Bu veri setinde püskürtme avans artışına bağlı olarak ilk kez indike verimin artış gösterdiği görülmüştür. 800 bar püskürtme basıncında, 5° KMA püskürtme avansından 10 KMA püskürtme avansına geçildiğinde indike verimde artış gözlemlenmiştir. Esas olarak çalışmanın büyük bir kısmında ortaya çıkması umulan bu eğilim henüz ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansında 0,45 olan indike verim, 20° KMA püskürtme avansına kadar son derece makul değişimler ortaya koymuş

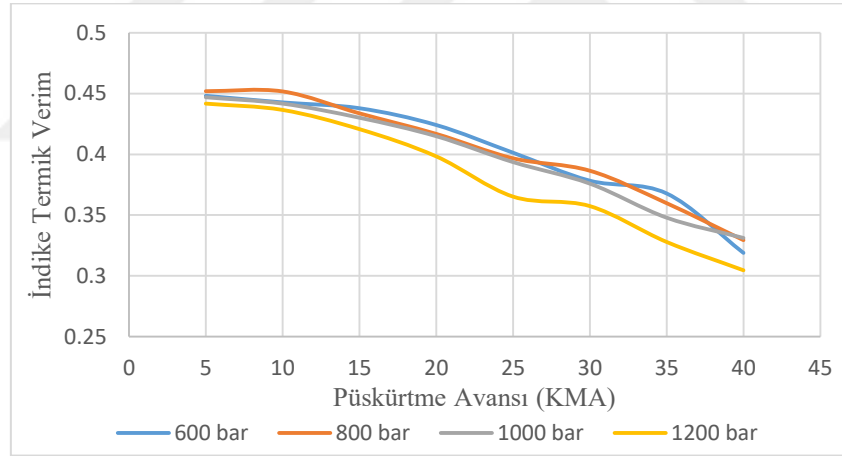
ve bu püskürtme avansında indike verim 0,42 değerindedir. Fakat, sonrasında düşüş eğilimi bir miktar hızlanmış ve 40° KMA püskürtme avansında indike verim 0,32'ye gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansı 0,45'lik indike verim ortaya koymuş, az önce bahsedildiği üzere püskürtme avansının 10° KMA'ya artışıyla birlikte az da olsa bir artış ortaya çıkmış, sonrasında ise neredeyse sabit adımlarla indike verimde düşüş gözlemlenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansına kadar nispeten makul sayılabilecek düşüşler ortaya çıkmış ve 5° KMA püskürtme avansında 0,45 olan indike verim 30° KMA'da 0,37 değerini bir miktar aşmıştır. Ardından püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan düşüş eğilimi hızlanmış ve 40° KMA püskürtme avansında gözlemlenen indike verim değeri 0,32'ye gerilemiştir. 1200 bar püskürtme avansında ise bu değerler sırası ile 0,44 ve 0,31 olarak ortaya çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında 5° KMA ile 30° KMA püskürtme avansı aralığında ortaya çıkan yüzdesel termik verim düşüşü en makul seviyededir. Ancak sonrasında hızlı bir kötüleşme görülmüştür.



Şekil 4.68 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike verim değerleri Şekil 4.69'da sunulmuştur. Bu veri setinde, sınır püskürtme avans değerlerinde ortaya çıkan indike verimde daha önceki veri setleriyle belirgin bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Yani 5° KMA püskürtme avansında 0,45 civarında indike verim gözlemlenmiş, 40° KMA püskürtme avansında ise 0,33 ile 0,30 arasında indike verim ortaya çıkmıştır. Motor yükünün artışıyla farklı püskürtme basınçları arasında ortaya çıkan varyasyon tüm püskürtme avanslarında kendini daha iyi bir şekilde göstermiştir. Bu da beklenen bir durumdur. 600 bar püskürtme

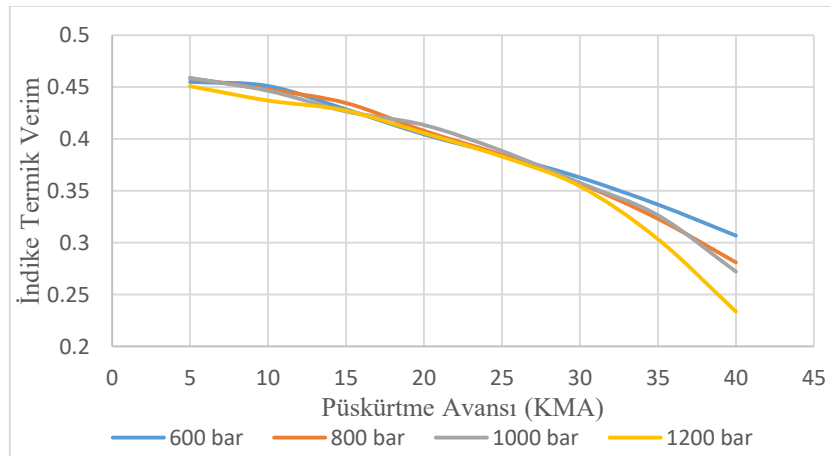
basıncında, püskürtme avansının 5° KMA'dan 15° KMA'ya artışı kadar indike verim neredeyse yatayda seyretmiş, sonrasında ise düşüş eğilimi gözlemlenmeye başlamıştır. 800 bar püskürtme basıncında ise, bir önceki veri setinde gözlemlendiği gibi, 5° KMA püskürtme avansından 10° KMA püskürtme avansına geçişte indike verimde bir miktar artış ortaya çıkmış, sonrasında düzenli düşüşle karşılaşmıştır. 1000 bar püskürtme basıncı verilerinin 800 bar püskürtme basınç verileri ile paralellik gösterdiği görülmüştür. 1200 bar püskürtme basıncında ise erken püskürtme şartında ortaya çıkan indike verim değerleri daha kötü değerler almaya başlamıştır. Daha düşük yakıt enjeksiyon kütlesi şartlarında da 1200 bar püskürtme basıncında bu eğilim gözlemlenmiştir. Fakat bahsi geçen veri setlerinde, değişen püskürtme basınçlarına göre 0,01 - 0,02 aralarında farklar oluşmuştur. Bu veri setinde ise indike verim farklılığı 0,03 bandındadır. Bu bölgede ortaya çıkan indike verimin 0,3 - 0,33 bandında olduğu görülmektedir. Bu da 1200 bar püskürtme basıncında ve 40° KMA püskürtme avansında, diğer püskürtme basınçlarına göre ortaya çıkan relatif düşüşün %10 seviyesine kadar ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.69 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

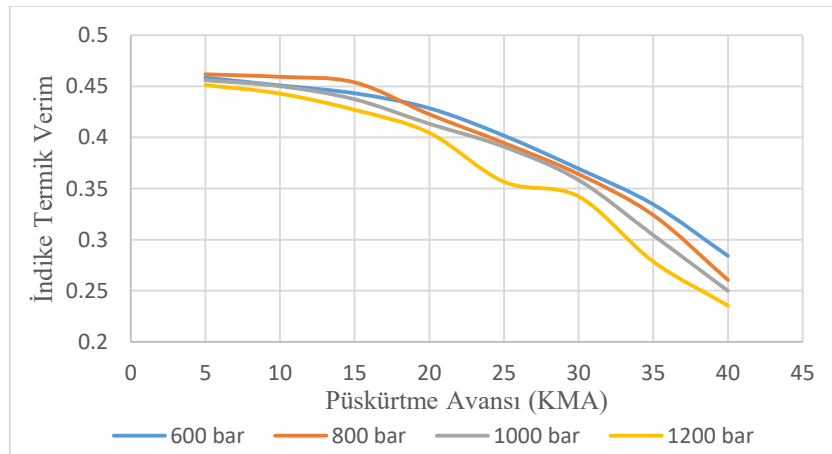
Şekil 4.70 üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike verim değerleri görülmektedir. Motor hızının daha da artarak araştırma uzayındaki en yüksek değeri olan 2000 dev/dak değerine gelişle küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkan indike verim değeri 1500 dev/dak motor hızında karşımıza çıkan değerler ile son derece yakın seyretmiştir. Konvansiyonel dizel yanmasını gerçekleyen püskürtme avanslarında, bu veri seti için püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak ciddi bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu durumun motor yükünün düşüklüğüne bağlı olduğu ve silindir içi hava

hareketlerinin yakıt püskürtme basıncına kıyasla daha hakim bir unsur olarak TG ve atomizasyon sürecini tayin etmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Fakat 30° KMA püskürtme avansı sonrasında püskürtme basıncının indike verim üzerinde son derece belirleyici bir rol oynadığı açık bir şekilde görülmektedir. Erken püskürtme bölgesinde, yani PCCI rejiminin baskın olduğu çalışma bölgesinde, düşük püskürtme basınçlarının indike verim açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu aralıkta püskürtme basıncı arttıkça indike verim düzenli olarak düşüş eğilimi göstermektedir. Aynı zamanda püskürtme basıncı arttıkça ortaya çıkan indike verim düşüş gradyanı daha büyük değerler almıştır. 600 bar püskürtme basıncında, 5° KMA püskürtme avansı 0,46 indike verim ortaya koyarken 25° KMA püskürtme avansında bu değer 0,39'a gerilemiştir. Esasında diğer püskürtme basınçlarında da bu değer 0,01 gibi küçük bir sapma ile gözlemlenmiştir. Ancak 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan indike verim değerleri büyük farklılıklar barındırmaktadır. 30° KMA püskürtme avansında farklı püskürtme basınçları arasında ortaya çıkan indike verim farkı 0,007 gibi son derece küçük bir değer almaktadır. 35° KMA püskürtme avansında bu değer 0,033 gibi göz önünde bulundurulması gereken bir değere ötelenmiştir. 40° KMA püskürtme avansında ise 0,073 fark bulunmaktadır. Ortaya çıkan indike verim değerleri göz önünde bulundurulduğunda 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan farklılık son derece ciddi boyuttadır. Bu bölgede arzu edilen emisyon seviyelerine inilebilse dahi yakıt sarfiyatının kabul edilemez değerlere ulaşacak olmasından dolayı motoru bu şartlarda opere etmek pek makul görülmemektedir.



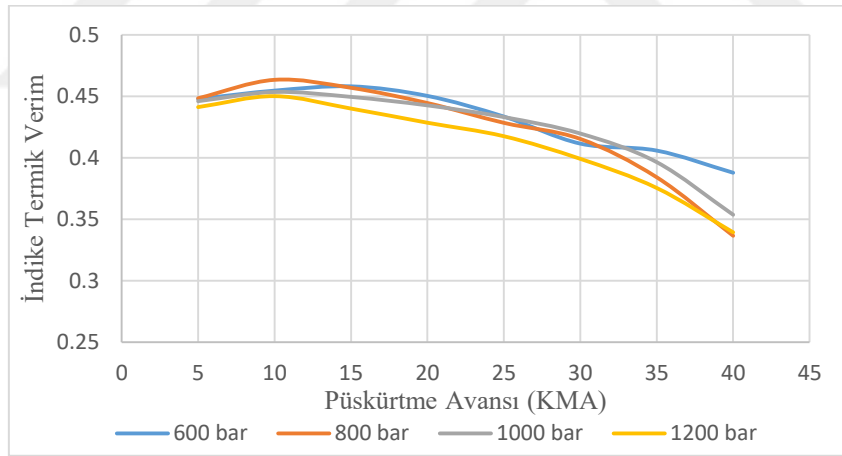
Şekil 4.70 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

Şekil 4.71 üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki indike verim görülmektedir. 5° KMA püskürtme avansında yine 0,45 civarında indike verim ortaya çıkmıştır. Bir önceki veri setine kıyasla, püskürtülen yakıt kütlelerinin artışıyla daha geniş bir püskürtme avans aralığında püskürtme basıncının indike verim üzerinde belirgin etkiler yaratmaya başladığı görülmüştür. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA ve 15° KMA püskürtme avans aralığında son derece belli belirsiz indike verim artışı ortaya çıkmıştır. Sonrasında ise düşüş eğilimi her püskürtme avans artışında etkisini artırarak karşımıza çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında da benzer bir durum gözlemlenmiştir. Fakat 15° KMA püskürtme avansı sonrasında ortaya çıkan düşüş eğilimi daha güçlü bir şekilde kendini göstermiş ve 35° KMA püskürtme avansı sonrasında düşüş hızlanmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında düşüş eğilimine daha erken girilmiş, düşüş eğiliminin hızlanması ise 30° KMA’da ortaya çıkmıştır. En kötü sonuçlar 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkmıştır. Ayrıca 1200 bar püskürtme basıncında, diğer püskürtme basınçlarına göre belirgin farklılıkların ortaya çıkmaya başladığı püskürtme avansı de daha erken kendini var etmiştir. Bu sınırın 20° KMA püskürtme avansı olduğunu düşünmek makul olacaktır. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında ortaya çıkan en büyük indike verim değerinin 0,46 olduğu, 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değer 0,45 olarak gözlemlendiği görünmüştür. En kötü indike verim değerlerinin ortaya çıktığı 40° KMA püskürtme avansında ise, püskürtme basıncının artışına bağlı olarak sırasıyla 0,28, 0,26, 0,25 ve 0,24 değerinde indike verim gözlemlenmiştir.



Şekil 4.71 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

Şekil 4.72 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok çevrim başına yakıt püskürtülmesi durumunda ortaya çıkan indike verim değerlerini göstermektedir. Genel bir eğilim olarak daha önceki veri setlerinde karşılaşılan sonuçlar ve genel eğilimler tekrardan karşımıza çıkmıştır. Fakat burada 5° KMA gibi ÜÖN'ye çok yakın konumdaki püskürtme avansından uzaklaştıkça ilk etapta zaman zaman gözlemlenmeye başlanan indike verim artışı bir miktar daha belirgin bir hale gelmiş ve tüm püskürtme basınçlarında gözlemlenebilmiştir. Püskürtme avansının artışıyla 600 bar püskürtme basıncında 15° KMA'ya kadar, diğer püskürtme basınçlarında ise 10° KMA püskürtme avansına kadar indike verimde artış gözlemlenmiştir. Sonrasında ise düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. Bu bölgede düşük püskürtme basınçlarında çalışmanın indike verim açısından ortaya koyacağı avantaj çok daha belirgin olarak gözlemlenmiştir. 600 bar püskürtme basıncı serisinde püskürtme avansının artışıyla karşı karşıya kaldığımız indike verim düşüşü son derece makul seviyede seyretmiş ve verim kaybı açısından kabul edilebilir düzeyde bir fark ortaya çıkmıştır. Tahmin edileceği üzere püskürtme basıncı arttıkça bu durumdaki davranış PCCI bölgesinde kötüleşmiştir.



Şekil 4.72 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan indike termik verim değerleri

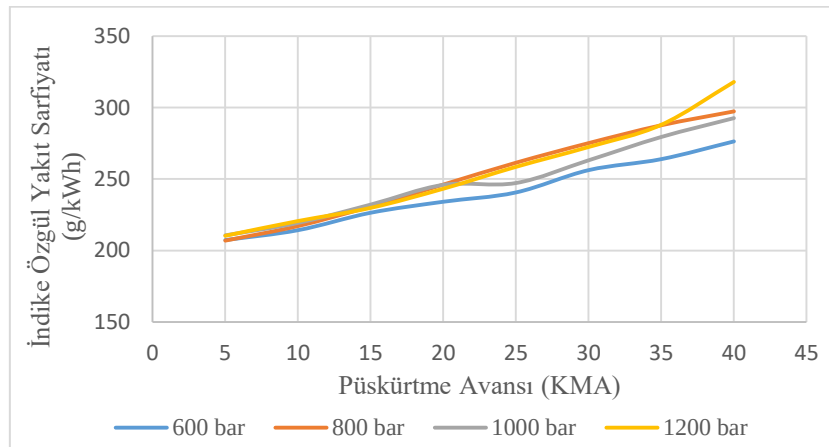
4.11 İndike Özgöl Yakıt Sarfıyatı Değerlerinin İncelenmesi

İndike özgül yakıt sarfıyatı verileri, indike verim ile mutlak olarak ters değişim eğilimi göstermektedir. Bu sebeple Bölüm 4.10'da edilen grafiklerin püskürtme avansı eksenine göre simetrik karşımıza çıkacaktır. Fakat yine de motorun ne kadar ekonomik çalıştırıldığına yönelik kıyas sunması açısından bölüm çalışmaya dahil edilmiştir. Özgöl yakıt sarfıyatının düşüşü, yükselişi veya sabit bir bandta değerler

alışına dönük olarak geçerli olan sebepler indike verim için yapılan yorumlamalarla ve hatta OİB değerlerinin ilgili veri setiyle yapılan yorumlamalarla aynı gerekçelere sahiptir. Aradaki tek fark indike verim ve OİB değerlerinde ortaya çıkan azalma veya artış eğiliminin, indike özgül yakıt sarfiyatına ters olarak yansıyacak olmasıdır. Yani indike verim artış gösterdikçe indike özgül yakıt sarfiyatı değeri düşüş gösterecektir. Özgül yakıt sarfiyatına dair yapılan yorumlamalar genelde efektif motor gücü göz önünde bulundurularak ortaya konulmaktadır. Fakat bu çalışmada kullanılan AVL-Boost programında değişen işletme şartlarına bağlı olarak sağlıklı yanıt üretebilen bir motor sürtünme modeli bulunmamaktadır. Programa sadece hızın birinci derece bir fonksiyonuyla girdi yapmak mümkündür. Bu haliyle OEB değerlerini sağlıklı bir şekilde elde etmek mümkün değildir. Deneysel verilerden elde edilen OEB datalarından yola çıkarak YSA modeli ile efektif güç değerlerinin elde edilmesi termodinamik tabana dayanmadığı için yeterince güvenli bulunmamıştır. Ayrıca incelediğimiz konu, işletme şartlarının değişimine bağlı olarak yanmanın bu durumdan nasıl etkilendiğidir ve salt yanmayı etkileyen durumları incelerken indike parametrelerden faydalanmakta bir sakınca bulunmamaktadır. Bu sebeple özgül yakıt sarfiyatı değerleri indike parametrelere bağlı olarak yani indike güce bağlı olarak sunulmuştur.

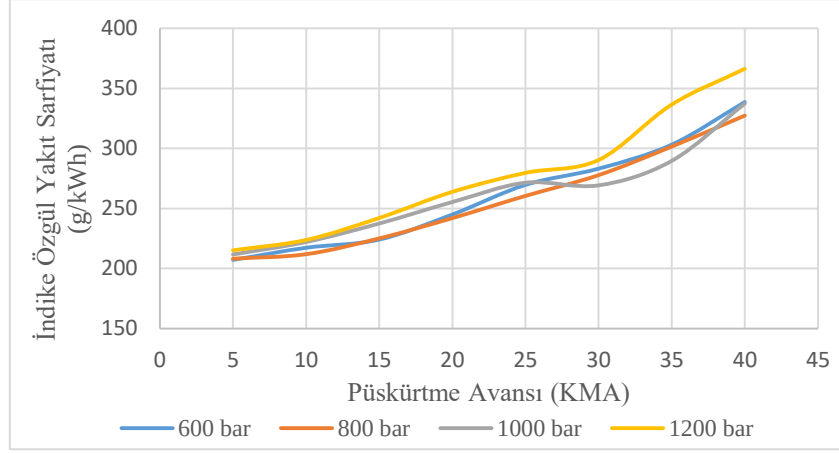
1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri Şekil 4.73 üzerinde görülmektedir. İndike verim hakkında yapılan yorumlardan da tahmin edileceği üzere 5° KMA gibi küçük püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Bu püskürtme avansında en küçük ve en büyük indike özgül yakıt sarfiyatı değeri %1 dolaylarında farklılıklar barındırmıştır. Püskürtme avansı arttıkça tahmin edildiği üzere indike özgül yakıt sarfiyatı artış göstermiştir. Bu veri seti için 15° KMA püskürtme avansına kadar püskürtme basıncı değişiminin ciddi bir etkisi gözlemlenmemiştir. Püskürtme avansı daha da arttırıldığında ise en düşük püskürtme basınç değeri olan 600 bar serisinde indike özgül yakıt sarfiyatı açısından ortaya konan avantaj gözle görülebilir hale gelmiştir. Diğer püskürtme basınçlarında ise belirli bir püskürtme avansında ortaya çıkacak olan indike özgül yakıt sarfiyatı farklılığı 20° KMA püskürtme avansından itibaren gözle görülür bir hal almaya başlamıştır. Çalışma bölgesindeki en büyük püskürtme basıncı olan 1200 bar serisinde 35° KMA püskürtme avansı sonrasında özgül yakıt sarfiyatında

dramatik artış eğilimleri oluşmaya başlamış ve bu veri setinde karşılaşılan en ciddi artış eğilimi bu bölgede karşımıza çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında, 5° KMA püskürtme avans değerinde 207,3 g/kWh özgül yakıt sarfiyatı gözlemlenirken, 40° KMA püskürtme avansında 276,3 g/kWh indike özgül yakıt sarfiyatı gözlenmiştir. Bu püskürtme basınç değerinde 30° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avansı arasında 20 g/kWh'lik indike özgül yakıt sarfiyatı farkı görülmüştür. Bu değişim PCCI bölgesi için en makul değişim olarak adlandırılabilir. Az önce değinildiği üzere püskürtme basıncı arttıkça bu bölgelerde indike özgül yakıt sarfiyatı değerindeki artış daha üst değerlere tırmanmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ise püskürtme avans artışına bağlı olarak son derece düzenli ve lineer bir skalaya yakın indike özgül yakıt sarfiyatı artışı görülmüştür. Ortaya çıkan değerler ise iki uç püskürtme avansı için 206,9 g/kWh ve 297,3 g/kWh değerindedir. 1000 bar püskürtme basıncında ise bu değerler sırası ile 210,6 g/kWh ve 292,6 g/kWh değerlerini almıştır. 1200 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 210,3 g/kWh indike özgül yakıt sarfiyatı değeri vermiş, sonrasında 35° KMA püskürtme avansına kadar 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçları ile yaklaşık değerler ortaya konmuş, ancak püskürtme avansının 40° KMA'ya çıkışı ile 317,9 g/kWh indike özgül yakıt sarfiyatı ile karşılaşmıştır. Bu da diğer püskürtme basınçlarına göre kayda değer bir farklılık anlamına gelmektedir. Görüldüğü üzere fazlaca yüksek püskürtme basınçları ile çalışmak, belli bir değeri aşan püskürtme avanslarında ciddi farklılıkları ortaya koymaktadır.



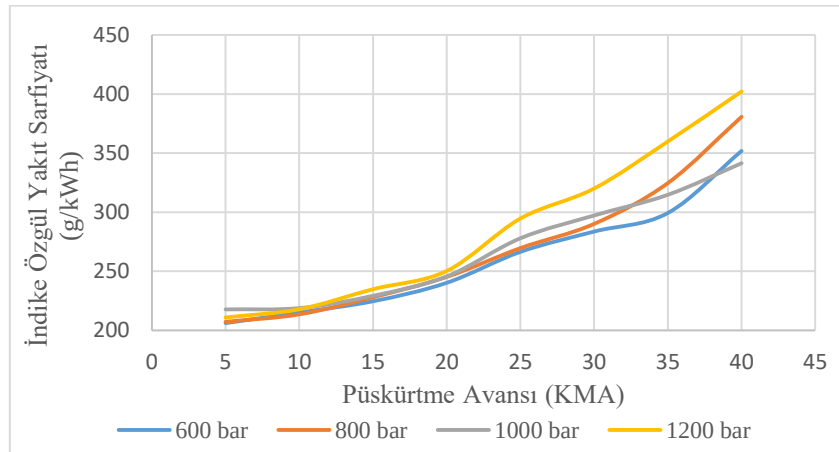
Şekil 4.73 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri

1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfıyatı değerleri Şekil 4.74'te görülmektedir. Bu veri setinde, bir önceki veri setine aykırı olarak tüm püskürtme avanslarında farklı püskürtme basınçları için ortaya çıkan özgül yakıt sarfıyatı değerleri belirgin farklar barındırmıştır. Yani püskürtme basıncının değişimine hassasiyeti son derece düşük bir bölge karşımıza çıkmamıştır. Motor yükünün artışıyla farklı püskürtme avansları arasında oluşan indike özgül yakıt sarfıyatı farkı bir önceki veri setine göre daha büyük değerler almıştır. Bu durumun gerekçeleri Bölüm 4.10'da detaylı olarak belirtilmiştir. 600 bar püskürtme basıncı ve 5° KMA püskürtme avansında 207,6 g/kWh değerinde indike özgür yakıt sarfıyatı ortaya çıkmış, 15° KMA püskürtme avansına kadar bu püskürtme basıncında ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfıyatı artışı makul denebilecek bir düzeydedir. Devamında püskürtme avansının artışıyla indike özgül yakıt sarfıyatı değerlerindeki kötüleşme hızlanmış ve 40° KMA püskürtme avansında 338,7 g/kWh'ye ulaşmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan değerler, 600 bar püskürtme basıncına göre genel olarak daha iyi sonuçlar vermiş, hatta PCCI bölgesinde daha iyi indike özgül yakıt sarfıyatı değerleri görülmüştür. Bu şartta püskürtme basıncının artışıyla atomizasyon rejimi bir miktar iyileşmiş ve yanma başlayana kadar geçen süre bir miktar artmıştır. Bu süreçte yanma odasında yayılım gösteren yakıt yüzey alanının artışı sonucunda silindir içerisinden daha fazla ısı çekilmiş ve akabinde yanma ortaya çıkmıştır. Makro karışımın homojenliği bir miktar arttıktan sonra yanma ortaya çıkmıştır. Fakat henüz aşırı fakir karışım bölgeleri oluşmamıştır. 1000 bar püskürtme basıncında da bu durum aynı şekilde kendini var etmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 211,7 g/kWh indike özgül yakıt sarfıyatı ortaya koyarken, 40° KMA püskürtme avansında bu değer 337,4 g/kWh olarak hesaplanmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değerler sırasıyla 215,2 g/kWh ve 366,4 g/kWh değerlerini almıştır. Fakat püskürtme basıncının 1200 bar değerine gelişiyse yanma odası içerisinde alev cephesinin fazlaca yavaş ilerlediği fakir bölgeleri artış göstermiş ve indike özgül yakıt sarfıyatı bu durumdan olumsuz etkilenmiştir. Bu noktada karşımıza çıkan yüksek TG değeri ve bu şartta ortaya çıkan yanma sürecinin uzunluğu bu görüşü destekler niteliktedir.



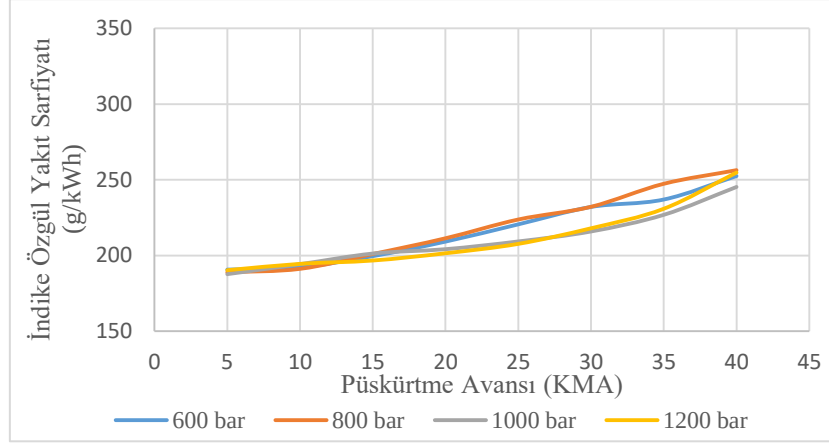
Şekil 4.74 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfıyatı değerleri

1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda indike özgül yakıt sarfıyatı Şekil 4.75'te bulunmaktadır. Konvansiyonel dizel yanmasının gerçekleştiği püskürtme avanslarında motor yükünün artışıyla, indike özgül sarfıyatı düşüş sergilemiştir. Fakat PCCI bölgesinde püskürtme avansının artışıyla indike özgül sarfıyatı değerleri daha şiddetli bir kötüleşme eğilimine girmiştir. Aynı zamanda farklı püskürtme basınçları arasındaki farklılık da artmıştır. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında farklı püskürtme basınçları için ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfıyatı değeri 60 g/kWh bandında farklılık göstermiştir. Daha önce incelen veri setlerinde farklılığın bu denli yüksek değerler almadığı görülmektedir. Buna ilaveten, düşük püskürtme avanslarında püskürtme basıncının indike özgül yakıt sarfıyatına etkisi bir miktar daha görünebilir bir hal almıştır.



Şekil 4.75 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfıyatı değerleri

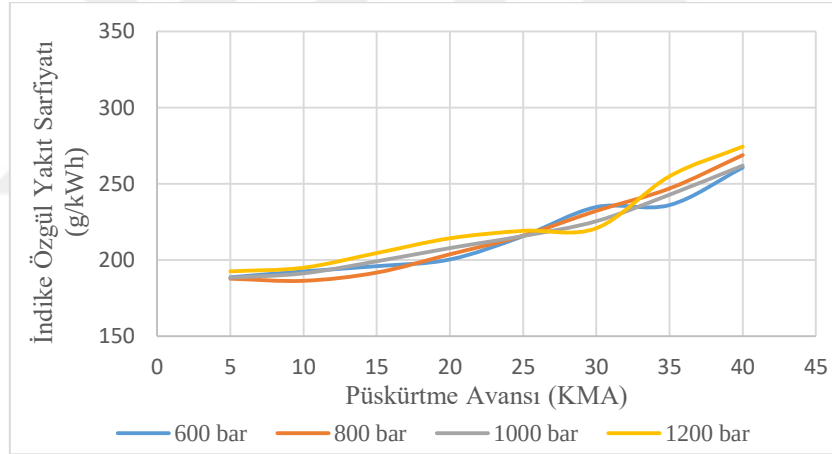
Şekil 4.76 üzerinde 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri görülmektedir. Püskürtülen yakıt kütlesinin düşüklüğüne bağlı olarak bu veri setinde de 15° KMA püskürtme avansı öncesinde farklı püskürtme basınçlarında ciddi bir değişim eğilimi gözlemlenmemiştir. Aynı zamanda 5° KMA ile 15° KMA püskürtme avansları arasında her bir püskürtme basınç değeri için ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri birbirine oldukça yakın değerler almış ve aradaki farklılıklar kabul edilebilir değerler almıştır. Devamında ise 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında bir miktar daha erken artış eğilimi görülmüştür. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında ise indike özgül yakıt sarfiyatı değerindeki artış eğiliminin hızlanması daha geç bir zamanda ortaya çıkmıştır. Bu veri setinde, aynı yakıt enjeksiyon kütlesi için 1000 dev/dak motor hızına göre özgül yakıt sarfiyatı verilerinin bir miktar daha iyileştiği söylenebilir. Bu durum motorun maksimum moment devri civarlarında çalışmasına bağlıdır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 190 g/kWh değerinde özgül yakıt sarfiyatı ortaya koymuş, sonrasında bu değer 15° KMA püskürtme avansına kadar makul bir artış sergilemiş, sonrasında 30° KMA püskürtme avansına kadar daha hızlı bir artış eğilimi karşımıza çıkmış, 30° KMA'dan büyük püskürtme avanslarında ise artış eğiliminde bir yavaşlama gözlemlenmiş ve nihayetinde 40° KMA püskürtme avansında 252,5 g/kWh indike özgül yakıt sarfiyatı ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ise benzer bir değişim eğilimi gözlemlenmiştir. Bu püskürtme basıncında uç püskürtme avansı değerlerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri sırasıyla 188,9 g/kWh ve 256,4 g/kWh değerindedir. 1000 bar püskürtme basıncında bir miktar daha iyi sonuçlar ortaya çıkmış ve bu değerler 187,7 g/kWh ve 245,3 g/kWh değerini almıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri 190,3 g/kWh ve 254,8 g/kWh'dir.



Şekil 4.76 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgöl yakıt sarfıyatı değerleri

Şekil 4.77 üzerinde 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike özgöl yakıt sarfıyatı değerleri sunulmuştur. Bu veri setinde püskürtme basıncının 25° KMA değerine gelinceye kadar makul sayılabilecek indike özgöl yakıt sarfıyatı değerleri ortaya çıkmıştır. Özellikle 15° KMA püskürtme avansına kadar, hatta düşük püskürtme basınçlarında 20° KMA püskürtme avansına kadar, elde edilen değerlerin oldukça kabul edilebilir olduğu rahatlıkla söylenebilir. Devamında püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan değişimlerin önceki veri setlerine göre nispeten makul olduklarını söylemek mümkündür. Bir önceki veri setinin incelemesinde değinildiği gibi motorun maksimum moment devrinde oluşunun da bunda payı büyüktür. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı için 188,7 g/kWh indike özgöl yakıt sarfıyatı değeri gözlemlenmiş, 20° KMA püskürtme avansına kadar son derece küçük değişimler ortaya çıkmış ve 200 g/kWh dolaylarına gelinmiş, sonrasında ise püskürtme avansının artışıyla indike özgöl yakıt sarfıyatında yaşanan artış hız kazanmıştır ve bu eğilim 30° KMA püskürtme avansına kadar sürmüştür. Devamında ise püskürtme avansının daha da artışıyla birlikte ortaya çıkacak değişimler daha makul bir banda düşmüştür. 800 bar püskürtme basıncında, püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan indike özgöl yakıt sarfıyatı değerleri 187,8 g/kWh ile 268,9 g/kWh arasında değişkenlik göstermektedir. 800 bar püskürtme basıncında indike özgöl yakıt sarfıyatındaki değişim hızının arttığı nokta 15° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. Bu püskürtme basıncında en düşük indike özgöl yakıt sarfıyatı değeri 10° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında da benzer bir eğilim olduğundan

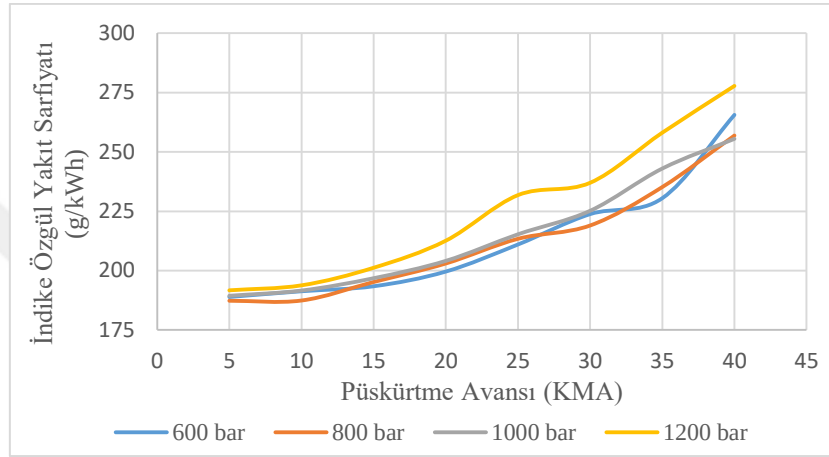
bahsetmek mümkündür. 1200 bar püskürtme basıncında ise genel olarak daha büyük indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri ortaya çıkmıştır. Fakat burada 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avanslarında 1200 bar püskürtme basıncının, diğer püskürtme basınçlarını göre, en düşük indike özgül yakıt sarfiyatı değerlerini ortaya koyduğu görülmektedir. Bu durum, püskürtme basıncının artışıyla ilgili püskürtme avanslarında hem daha homojen bir karışım yaratılmasının hem de yanma başlangıcın yine de makul bir noktada olmasıyla açıklanabilir. Bu süre içerisinde daha küçük Sauter ortalama çapına sahip olan yakıt zerreciklerinin yanma odası içerisinde daha fazla ısı çekmesi ve yanmanın diğer püskürtme basınçlarını göre biraz daha geç başlamasıyla mümkündür. Sonrasında ise atomizasyon kabiliyetinin düşüklüğü sebebiyle yanma odası içerisinde aşırı fakir karışım bölgeleri oluşmuş ve THC emisyonunu artırıcı bir karakter baskın hale gelmeye başlamıştır. Bunun neticesinde indike özgül yakıt sarfiyatı ilgili püskürtme avanslarında tekrardan en kötü duruma bürünmüştür.



Şekil 4.77 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri

Şekil 4.78 üzerinde 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri sunulmuştur. ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde daha önceki veri setlerinde de görüldüğü üzere indike özgül yakıt sarfiyatı değerinde ciddi bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Fakat PCCI bölgesinde özellikle de uç püskürtme avansı değeri olan 40° KMA püskürtme avansında daha düşük motor yüklerine göre indike özgül yakıt sarfiyatında bir miktar artış gözlemlenmiştir. Bu durum bizlere motor yükü arttıkça PCCI bölgesinde çalışmanın daha güç olduğuna dair değerlendirmeleri hatırlatmaktadır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 188,9 g/kWh

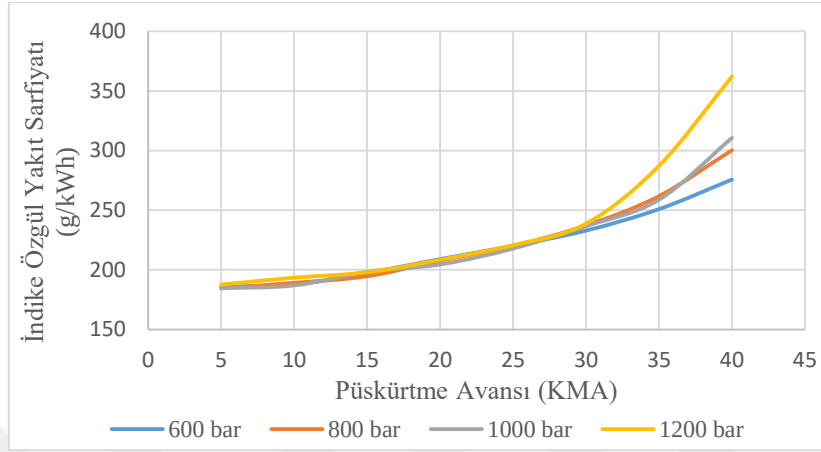
indike özgül yakıt sarfıyatı değeri ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansı değişimine bağlı olarak esas itibarıyla 35° KMA püskürtme avansına kadar ortaya çıkan değişimlerin nispeten makul olduğu söylenebilir. Fakat sonrasında indike özgül yakıt sarfıyatı hızlıca artış eğilimine girmiştir 40° KMA püskürtme avansında 265,6 g/kWh indike özgül yakıt sarfıyatı ortaya çıkmıştır. Daha yüksek püskürtme basınçlarında ise bu denli sert bir geçiş yaşanmamıştır. Fakat artış eğilimi sürekli olarak daha yüksek seyretmiştir. Özellikle 1200 bar püskürtme basıncında bu durum daha da hayati bir fark almıştır.



Şekil 4.78 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfıyatı değerleri

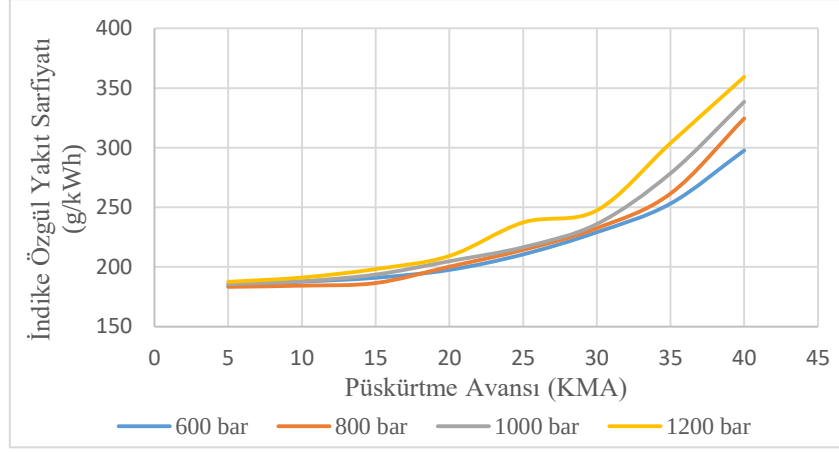
Şekil 4.79 üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfıyatı değerleri bulunmaktadır. Daha önceki veri setlerinden farklı olarak, burada 30° KMA püskürtme avansına kadar farklı püskürtme basınçlarının indike özgül yakıt sarfıyatı üzerinde belirgindir bir etki ortaya çıkarmadığı görülmüştür. Bu durumun iki temel sebebi vardır. Bunlardan birincisi motor hızının artışıyla yanma odası içerisindeki hava akış hızının ve türbülans seviyesinin artmasıdır. Böylelikle silindir içerisindeki hava hareketlerinin artışı sonucunda karışım oluşumu iyileşmiş ve püskürtme basıncı üzerine düşen yük büyük oranda ortadan kalkmış ve hatta perdelenmiştir. Bir diğer sebep ise motor yükünün yani püskürtülen yakıt kütlelerinin düşük oluşu ve halihazırda ortada çok ciddi farkları yaratabilecek bir ısı girdisinin bulunmamasıdır. Bahsi geçen iki unsur birleştiğinde de bu tablo karşımıza çıkmıştır. 30° KMA püskürtme avansı sonrasında ise değişen püskürtme basıncının, farklı püskürtme avanslarında sergilediği etki belirginleşmeye başlamıştır. Püskürtme avansı 30° KMA değerinden 40° KMA değerine doğru gittikçe 600 bar püskürtme basıncında

daha önceki püskürtme avans aralığındaki değişim eğilimlerine uyumlu bir artım ortaya çıkmıştır. Püskürtme basıncının artışıyla birlikte bu durum gitgide kötüleşmiştir. 1200 bar verilerine bakıldığında ortaya çıkan artışın son derece dramatik seviyelerde olduğu söylenebilir.



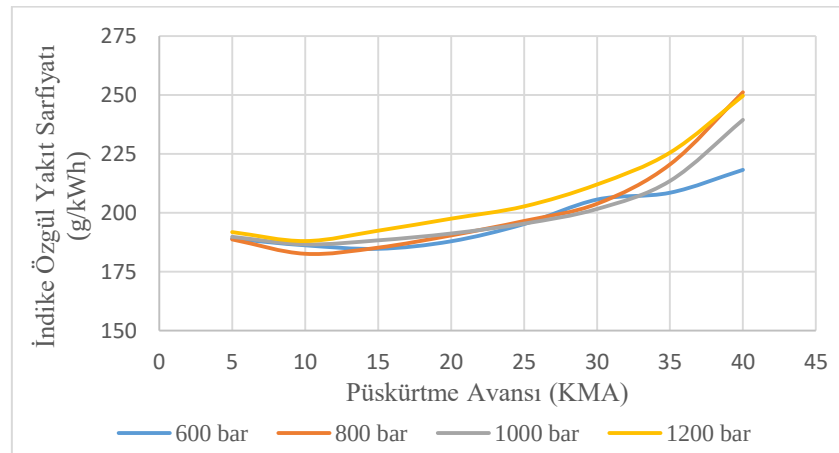
Şekil 4.79 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri

Şekil 4.80 üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan indike özgül yakıt sarfiyatı değerleri görülmektedir. Püskürtülen yakıt kütlelerinin 15mg/strok değerinden 20 mg/strok değerine gelişle esas olarak harici bir yanma mekanizması veya sonuçlara harici bir yönde etki edecek bir çıktı gözlemlenmemiştir. Fakat püskürtülen yakıt kütlelerinin artışıyla her bir püskürtme avans değerinde püskürtme basıncı değişimine bağlı olarak indike özgül yakıt sarfiyatında ortaya çıkan farklılıkların gözlemlenebildiği püskürtme avansı bir miktar daha küçük değerlere yönelmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında 20° KMA püskürtme avansı sonrası bu ayrışmanın ortaya çıktığı söylenebilir. Diğer püskürtme basınçlarında ise bu ayrışma 30° KMA püskürtme avansı sonrasında kendini var etmiştir. Motor yükünün artışıyla bu veri setinde de PCCI bölgesinde indike özgül yakıt sarfiyatının kötüleştiği görülmektedir. Bu sınır kabaca 25° KMA püskürtme avansı olarak görülmüştür. Yani daha küçük püskürtme avanslarında, motor yükü arttıkça indike özgül yakıt sarfiyatında bir avantaj ortaya çıkarken, PCCI bölgesinde motor yük artışına bağlı olarak aynı püskürtme avanslarında çalışıldığı takdirde indike özgül yakıt sarfiyatı bu durumdan kötü etkilenmektedir.



Şekil 4.80 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgöl yakıt sarfıyatı değerleri

Şekil 4.81’de 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda indike özgöl yakıt sarfıyatı görülmektedir. Burada daha önceki verilere paralel sonuçlar görülmüştür. 1200 bar püskürtme basıncının, diğer püskürtme basınçlarına göre farklı sonuçlar ortaya koyması daha küçük püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 15° KMA püskürtme avansından itibaren bu eğilimin belirginleşmiştir. Diğer püskürtme basınçlarında 30° KMA püskürtme avansına kadar yakın indike özgöl yakıt sarfıyatları görülmüştür. 40° KMA püskürtme avansında 800 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarının hemen hemen aynı özgöl yakıt sarfıyatı vermesinin teorik bir izahı bulunamamıştır. Bu durum gerek termodinamik modelin doğrulanması gerekse de yapay sinir ağı modelleme sürecinde ortaya çıkan belirsizliklerin birbirini büyüterek bu noktaya etki etmesinden kaynaklı olduğu düşünülebilir.



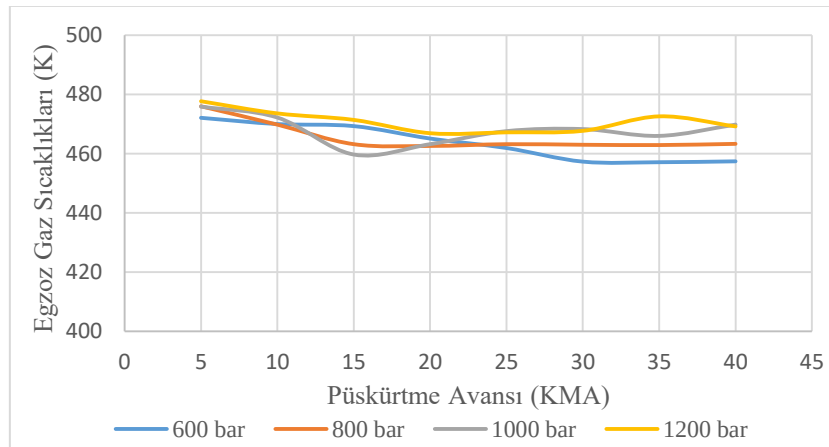
Şekil 4.81 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgöl yakıt sarfıyatı değerleri

4.12 Egzoz Gaz Sıcaklıklarının İncelenmesi

Farklı püskürtme basınçları ve farklı püskürtme avansları yanmanın başlangıç noktasını, yanma hızını ve yanma esnasında oluşan sıcaklık değerlerini doğrudan etkileyecektir. Benzer şekilde ısı transferi ve egzoz gaz sıcaklıkları da farklılık gösterecektir. PCCI stratejisinde egzoz gaz sıcaklıklarının nasıl bir eğilim gösterdiğini sunmak adına bu bölüm çalışmaya dahil edilmiştir. İndike parametreler cinsinden değerlendirme yapıldığında yakıt ısı enerjisi çıktı olarak indikçe iş, egzoz entalpisi, ısı transferi ve eksik yanma kaynaklı enerji kayıplarının toplamına eşittir. Egzoz gaz sıcaklığı değerlerinin incelenmesinin önemi burada yatmaktadır. PCCI rejiminde indike işin genellikle düşüş gösterdiği bilinmektedir. Fakat buradaki kaybın ne derecede ısı transferine ve egzoz gaz sıcaklığına etkiyeceğini incelemek gerekmektedir. Bölüm 3.5 içerisinde de değinildiği üzere egzoz gaz sıcaklıklarının termodinamik model üzerinde doğrulaması esnasında çok büyük oranda %3 altında hata değerleri ortaya çıkmıştır. Hata değerleri arasındaki en büyük yoğunlaşma ise %1 ile %2 aralığındadır. Bu sebeple sonuçlarda ortaya çıkan küçük değer farklılıklarının hata payı içerisinde olma riskine karşı yapılacak çıkarımlara temkinli bir şekilde yaklaşmakta fayda vardır. Güvenilir ve net şekilde bir eğilimden bahsetmek için bu hata payı dışındaki değişimlerin gözlemlenmesi gerekmektedir. Fakat birçok veri setinde özellikle sabit bir püskürtme avansında püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan sonuçların bu hata payı içerisinde yer aldığını peşinen belirtmekte fayda vardır.

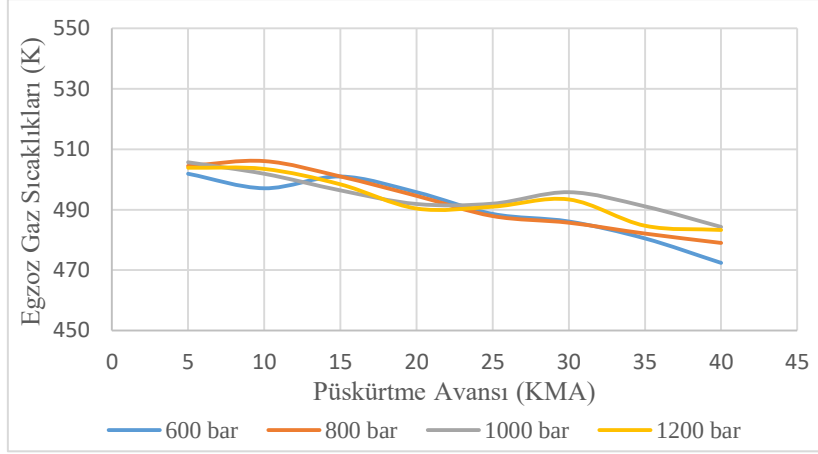
Şekil 4.82 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklığı değerlerini Kelvin ölçeğine göre sunmaktadır. ÜÖN'ye çok yakın gerçekleşen 5° KMA püskürtme avansında, püskürtme basıncının artışıyla çok küçük artışlar ortaya çıkmıştır. Püskürtme basıncının 600 bar'dan 1200 bar değerine çıkışıyla egzoz gaz sıcaklığında yaşanan artış sadece 5 K'dir. Bu da hata payı içerisinde yer alan bir değerdir. Bu sebeple net bir değişim trendinden sağlıklı bir şekilde söz etmek mümkün değildir. Genel bir eğilim olarak bu veri seti içerisinde yanma başlangıcının genişleme fazına kaydığı ve PCCI yanmayı ortaya koyan püskürtme avanslarında, düşük püskürtme basınçlarının daha düşük egzoz gaz sıcaklığı değerleri ortaya koyduğu, konvansiyonel yanma bölgesinde ise bu durumdan söz edilemeyeceği görülmektedir. Püskürtme avansının artışıyla egzoz gaz sıcaklıklarının genellikle düşüş sergilediği görülmektedir. 1000 bar püskürtme

basıncı ve 15° KMA püskürtme avansı verisi burada istisnai bir durum olarak karşımıza çıkmıştır. Bu istisnai durumun yüzdesel hatalardan kaynaklı bir belirsizliğin yol açtığı sonuç olma ihtimali son derece yüksektir. 600 bar püskürtme basıncında iken 5° KMA püskürtme avansı 472,1 K egzoz gaz sıcaklığı ortaya koyarken 40° KMA püskürtme avansında bu değer 457,4 K'ye gerilemiştir. Bu püskürtme basıncında egzoz gaz sıcaklığında gözlemlenen düşüşün temel olarak 10° KMA ile 30° KMA püskürtme avans aralığında ortaya çıktığını söylemek mümkün olup geri kalan püskürtme avanslarında ise ortaya çıkan değişim son derece düşük seviyededir. 800 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 476 K egzoz gaz sıcaklığı ortaya koyarken, 40° KMA püskürtme avansında bu değer 463,3 K'ye gerilemiştir. Burada da egzoz gaz sıcaklığındaki düşüş eğilimi 20° KMA dolaylarında pratik olarak durmuştur. 1000 bar püskürtme basıncında ise 15° KMA püskürtme avansına kadar egzoz gazı sıcaklıklarında bir düşüş yaşanmış, bu noktada az önce de bahsedildiği üzere genel değişim trendine uymayan bir veri ortaya çıkmış, sonrasında ise bir miktar artış gözlemlenmiştir. Bu püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 475,9 K egzoz gaz sıcaklığı değerine sahipken, 15° KMA'da bu değer 459,7 K, 40 KMA püskürtme avansında ise 469,8 K değerini almıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 477,7 K egzoz gaz sıcaklığı elde edilirken, 20° KMA püskürtme avans değerine kadar düzenli bir düşüş ortaya çıkmış ve egzoz gaz sıcaklığı 466,9 K değerine gerilemiş, sonrasında 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde de 468,2 K egzoz gaz sıcaklığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.82 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

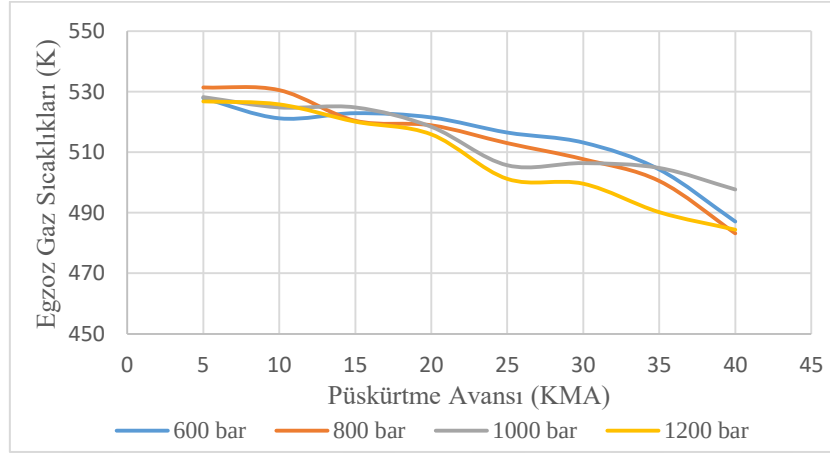
Şekil 4.83 üzerinde 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklığı değerleri görülmektedir. Bu veri seti içerisinde tüm püskürtme avanslarında aynı eğilim net olarak ortaya çıkmasa da genel olarak püskürtme basıncı arttıkça özellikle PCCI bölgesinde egzoz gaz sıcaklıklarında bir miktar artış gözlemlendiği görülmüştür. Püskürtme avansının artışıyla egzoz gaz sıcaklıklarında yaşanan düşüş biraz daha belirgin bir hal almış, yer yer püskürtme avansının artışıyla karşımıza çıkan egzoz gaz sıcaklık artışları gözlemlenmiştir. Fakat bu artışlar hata payı sınırları içerisinde olan artışlardır. Her bir püskürtme basıncı veri setinde, püskürtme avansının artışıyla egzoz gaz sıcaklıklarında 20,6 K ile 29,5 K arasında düşüş ortaya çıkmıştır. Düşük püskürtme basınçlarında aradaki fark bir miktar daha yüksek seviyedeysen, püskürtme basıncı arttıkça iki sınır püskürtme avans değeri arasındaki egzoz gaz sıcaklığı farkı daha düşük seviyelerde kalmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 501,9 K egzoz gaz sıcaklığı ortaya koyarken, 40° KMA püskürtme avansında bu değer 472,4 K'ye gerilemiştir. Bu püskürtme basıncında 15° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avansı aralığında egzoz gaz sıcaklıklarında düzenli bir düşüş ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ÜÖN'ye en yakın yapılan püskürtmede 504,5 K egzoz gaz sıcaklığı, ÜÖN'ye en uzak yapılan püskürtmede ise 479 K egzoz gaz sıcaklığı gözlemlenmiştir. Burada ise 10° KMA püskürtme avansı sonrasında egzoz gaz sıcaklıkları düzenli düşüş sergilemiştir. 1000 bar püskürtme basıncında en küçük püskürtme avans değerinde 505,7 K, en büyük püskürtme avans değerinde ise 484,3 K egzoz gaz sıcaklığı gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değerler sırasıyla 503,9 K ve 483,3 K'dir. ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmede yanma çoğu zaman genişleme fazında başlamaktadır. Bu durumda ısı transferini ayrılan süre hem ms olarak hem de KMA olarak kısalmaktadır. Bunun sonucunda egzoz gaz sıcaklıkları diğer püskürtme avanslarına göre daha yüksek değerler almıştır. PCCI çalışma bölgesinde yani erken püskürtme şartlarında ısı transferine ayrılan süre artmaktadır. Böylelikle yanma odasından cidarlara olan ısı transferi artış göstermekte ve egzoz gaz sıcaklıkları düşüşe geçmektedir.



Şekil 4.83 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

Şekil 4.84’te 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklığı değerleri görülmektedir. Püskürtülen yakıt kütlelerinin 25 mg/strok değerine gelişi ve motor yükünün artışıyla beraber tahmin edileceği üzere egzoz gaz sıcaklıklarında artış yaşanması kaçınılmazdır. Bu veri setinde de püskürtme avansının artışıyla ilgili olarak düzenli şekilde egzoz gaz sıcaklıklarında azalma gözlemlenmiştir. Her bir püskürtme basıncı için püskürtme avansının artışıyla 30,5 K ile 48,2 K arasında egzoz gaz sıcaklığı düşüşü ortaya çıkmıştır. Bu çalışma aralığında, bir önceki veri setine göre silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı %25 oranında artış sergilemiştir. Fakat egzoz gaz sıcaklıklarında %5’i dahi bulmayan artış ortaya çıkmıştır. Yakıt kütlelerinin artışıyla sisteme giren enerji farkını kapatacak denli termik verim artışından da söz etmek mümkün değildir. Özellikle PCCI bölgesinde bu sıcaklık farkı oranı daha da düşük seviyededir. Bu eğilimlere göre PCCI bölgesinde motor yükü arttıkça indike işe çevrilemeyen enerjinin, egzoz ile sistem dışına atımından ziyade yanma odası dış yüzeylerine ısı transferi ile sistemden uzaklaştırıldığı çıkarımı yapılabilir. Bu veri setinde 600 bar püskürtme basıncında, 5° KMA püskürtme avansı 527,9 K ve 40° KMA püskürtme avansı da 487,1 K egzoz gaz sıcaklığına yol açmıştır. Bu püskürtme basıncında egzoz gaz sıcaklığında ortaya çıkan düşüş özellikle 30° KMA püskürtme avansı sonrasında artış sergilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında, püskürtme avansının artışıyla ilk anda 531,4 K olan egzoz gaz sıcaklığı değeri 483,2 K değerine kadar gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında gözlemlenen egzoz gaz sıcaklığındaki düşüş gradyanı artış anının gözlemlendiği aralık ise 35° KMA püskürtme avansından itibaren ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme avansında ise

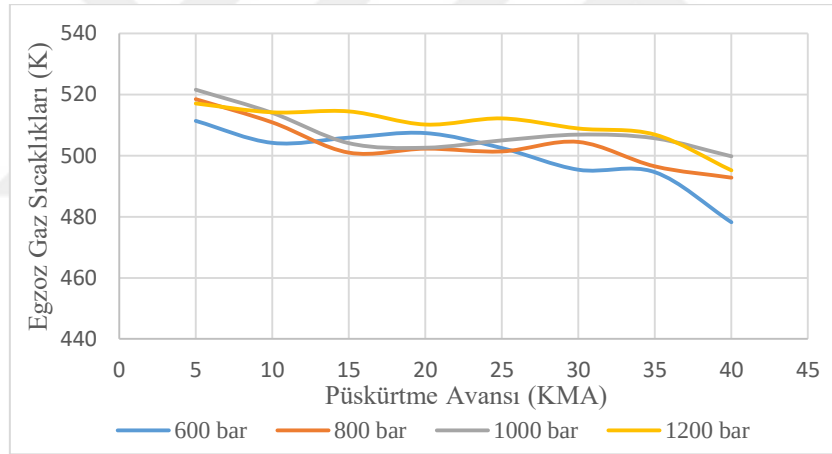
en küçük püskürtme avansında 528,2 K, en büyük püskürtme avansında da 497,7 K egzoz gaz sıcaklığı gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 526,8 K ve 484,4 K olarak görülmüştür.



Şekil 4.84 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

Şekil 4.85 üzerinde 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları görülmektedir. Şekil 4.82'ye kıyasla yani aynı yakıt püskürtme kütlelerinde motor hızının artışıyla egzoz gaz sıcaklıklarında artış görülmüştür. Motor hızı arttıkça yanma odası içerisinde hava hareketleri artış gösterecek, türbülans seviyesi artacak ve Reynolds sayısının artışıyla cidarlara olan ısı akısı artış gösterecektir. Fakat diğer yandan ısı transferine ayrılan süre ms olarak düşüş sergileyecektir. Bu ters ilişki arasında baskın olan unsur ısı transferine ayrılan sürenin kısalması olmuştur. Her ne kadar ısı akısı artsa da ısı transferi süresi kısaldığı için indike işe çevrilemeyen enerji girdisi daha büyük bir yüzdeyle atık ısı olarak sistemden atılmıştır. Bu iki veri seti arasında 1500 dev/dak motor hızında karşımıza çıkan indike verim değerleri de daha yüksek seviyededir. Yani motor hızının artışıyla hem indike verim artmış hem de egzoz gaz sıcaklıkları artmıştır. Bu şartta ısı transferiyle kaybedilen enerjinin düşüş göstermesi kaçınılmazdır. Konvansiyonel dizel yanmasının gerçekleştiği şartlarda ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklığı değerleri bir miktar kompleks ilişkiler barındırmıştır. Fakat DSY stratejisinin ortaya çıktığı hem geç püskürtme hem de erken püskürtme şartlarında düşük püskürtme basınçlarının daha düşük egzoz gaz sıcaklıkları ortaya koyduğu söylenebilir. Daha önceki veri setlerinde de görüldüğü üzere her bir püskürtme basıncında püskürtme avansının artışıyla egzoz gaz sıcaklığının düşüş eğilimi bu çalışma bölgesinde de gözlemlenmiştir. Farklı

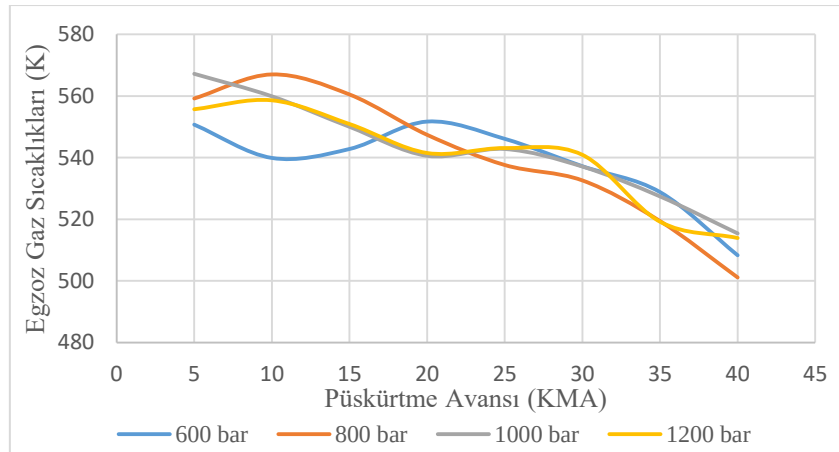
püskürtme basınçlarında püskürtme avansının artışıyla 21,8 K ile 33,2 K arasında egzoz gaz sıcaklığı düşüşleri gözlemlenmiştir. Düşük püskürtme basınçlarında ortaya çıkan düşüş daha büyük değerler almıştır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 511,4 K egzoz gaz sıcaklığına yol açmıştır. Bu değer 40° KMA püskürtme avansında 478,2 K'ye gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında, en küçük püskürtme avansında 518,5 K egzoz gaz sıcaklığı ortaya çıkarmış, devamında 15° KMA püskürtme avansına kadar egzoz gaz sıcaklıklarında düşüş ortaya çıkmış ve sonrasında konvansiyonel yanmaya ait püskürtme avans aralığında egzoz gaz sıcaklığı nispeten stabil kalmıştır. PCCI rejimine geçişte egzoz gaz sıcaklıkları tekrardan düşüş eğilimine geçmiş ve 40° KMA püskürtme avansında 492,8 K'ye gerilemiştir. 1000 bar püskürtme basıncı şartında da 800 bar püskürtme basıncına benzer eğilimler gözlemlenmiş ve egzoz gaz sıcaklıkları sırasıyla 521,6 K ile 499,8 K arasında değişmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler 517,1 K ve 495,2 K olarak modellenmiştir.



Şekil 4.85 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

Şekil 4.86 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıklarını göstermektedir. Bir önceki veri setine göre, motor yük artışıyla tahmin edileceği üzere, egzoz gaz sıcaklıklarında artış ortaya çıkmıştır. ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde, yani geç püskürtme şartında, egzoz gaz sıcaklıklarının 40 K dolaylarında artış gösterdiği görülmektedir. Konvansiyonel yanma bölgesinde de benzer sıcaklık farklarından söz etmek mümkündür. PCCI bölgesinde bu sıcaklık farklarının biraz daha düşük seviyelere hapsolmuş ve kabaca 20 K dolaylarında değerler almıştır. Bu veri setindeki işletme şartlarında küçük püskürtme avanslarında gerek püskürtme basıncına gerekse de püskürtme avansına

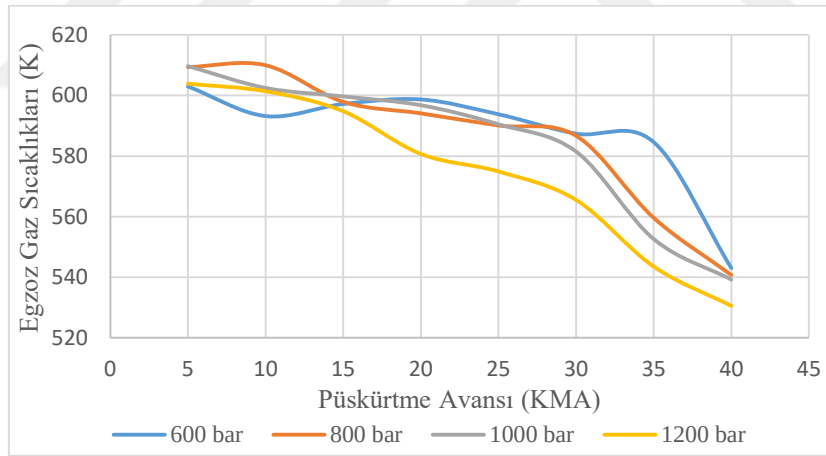
bağlı bir eğilim gözlemlenmemiştir. Fakat PCCI bölgesindeki tüm püskürtme basınçlarında düzenli bir düşüş ortaya çıkmıştır. Genel itibariyle 30° KMA püskürtme avansı sonrasında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklığı düşüşleri belirgin haldedir. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 550,7 K egzoz gaz sıcaklığına yol açmış, 10° KMA püskürtme avansında bu değer 540 K bandına gerilemiş ve sonrasında 20° KMA püskürtme avansına kadar artış göstermiş, 20 KMA püskürtme avansı sonrasında ise düzenli olarak egzoz gazı sıcaklıkları püskürtme avansının artışıyla düşüş sergilemiş ve 40° KMA püskürtme avansında da 508,3 K değerini almıştır. 800 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 559,2 K egzoz gazı sıcaklığına yol açmış, 10° KMA püskürtme avansında ise hata payı içerisinde bir artım ortaya çıkmış ve sonrasında, özellikle 30° KMA püskürtme avansı sonrasında daha hızlı olmak üzere, egzoz gaz sıcaklıkları düşüşe geçmiştir ve 40° KMA püskürtme avansında 501,1 K egzoz gaz sıcaklığı görülmüştür. 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler en küçük püskürtme avansında 567,2 K ve en büyük püskürtme avansında 515,4 K olarak ölçülmüştür. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 555,7 K ve 513,9 K'dir. Bu veri setinde her bir püskürtme basıncında, püskürtme avansının artışıyla egzoz gaz sıcaklıklarında 41,8 K ile 58,1 K arasında düşüşler gözlemlenmiştir.



Şekil 4.86 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

Şekil 4.87’de 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları görülmektedir. Motor yükünün artışıyla birlikte bir önceki veri setine göre küçük püskürtme avanslarında 50 K dolaylarında, 40° KMA püskürtme avansında ise 30 K bandında egzoz gaz sıcaklığı farkı gözlemlenmiştir. Bu sonuç daha önce değinilen, PCCI rejimi baskın geldikçe ısı

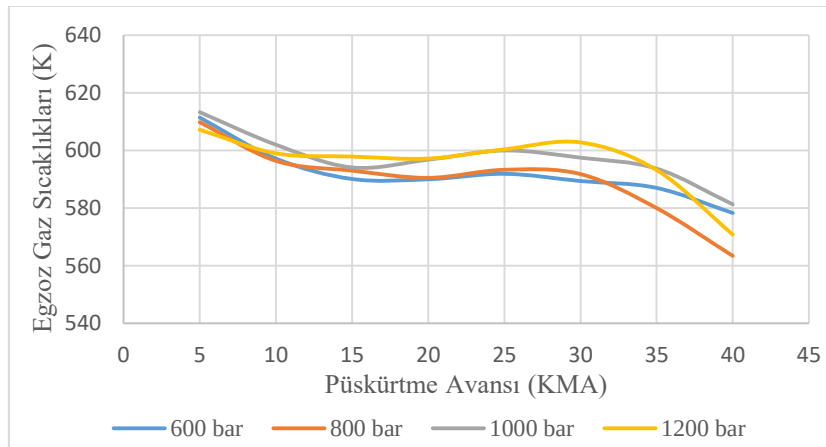
transferi kaynaklı termal kayıpların artış gösterdiği savını destekler niteliktedir. Veri seti içerisinde ortaya çıkan değişimlere bakıldığında farklı püskürtme basınçlarında 5° KMA püskürtme avansı 6,7 K, 40° KMA püskürtme avansı ise 12,5 K egzoz gaz sıcaklığı dalgalanması göstermiştir. PCCI bölgesindeki her bir püskürtme avans değeri için, püskürtme basıncı arttıkça egzoz gaz sıcaklıklarında düzenli düşüş ortaya çıkmıştır. İndike verim incelemesinden hatırlanacağı üzere, bu verilerde indike verim de düşüş sergilemektedir. Fakat her iki enerji miktarındaki azalışı da doğrudan ısı transferine aktarmak hatalı olacaktır. Çünkü bu bölgede püskürtme basıncı artımına bağlı olarak eksik yanma kaynaklı kayıplar da artış göstermektedir. Püskürtme avansının artışıyla 600 bar püskürtme basıncında 60 K, 800 bar püskürtme basıncında 69,4 K, 1000 bar püskürtme basıncında 70,5 K ve 1200 bar püskürtme basıncında 73,4 K egzoz gaz sıcaklığı düşüşü gözlemlenmiştir. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansında 603 K egzoz gaz sıcaklığı gözlemlenmiş, bu değer 40° KMA püskürtme avansında 543 K'ye gerilemiştir. Sırası ile bu değerler 800 bar için 609,4 K ve 540 K, 1000 bar için 609,7 K ve 539,2 K, 1200 bar için de 603,9 K ve 530,5 K değerlerini almıştır.



Şekil 4.87 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

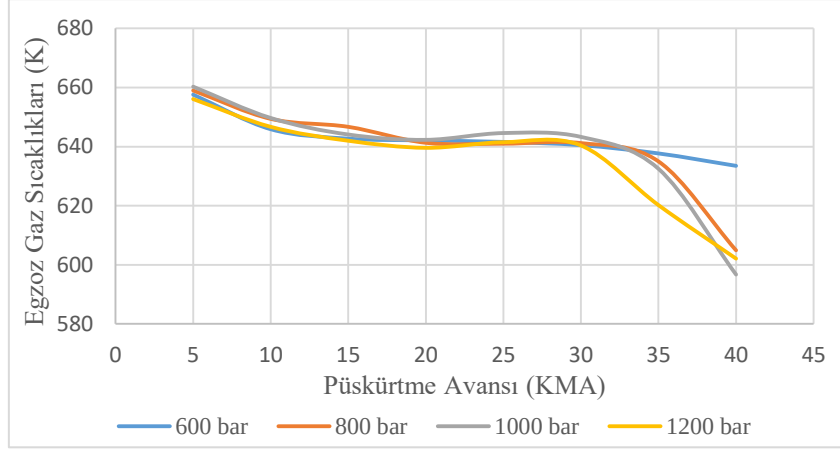
Şekil 4.88'de 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları sunulmuştur. Motor hızı arttıkça egzoz gazı sıcaklıklarında karşılaşılan artış bu veri setinde de gözlemlenmiştir. Aynı zamanda püskürtme avansının artışıyla konvansiyonel dizel yanmasını ortaya koyan püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığının ciddi bir değişiklik göstermediği görülmüştür. PCCI bölgesinde egzoz gaz sıcaklıkları daha önceki veri setlerinde de görüldüğü üzere düşüş eğilimi göstermiştir. Egzoz gaz sıcaklığındaki düşüş

eğilimine dair gerekçeler şu ana kadar birkaç sefer ortaya konmuştur. Bunlara ilaveten bu şartlarda elde edilen pik sıcaklık değerlerinin düşüş sergilemesi de egzoz gaz sıcaklıklarının daha düşük değerler almasına yol açan bir başka faktör olarak değerlendirilebilir. Bu veri setindeki motor hızı ve püskürtülen yakıt kütesine bağlı olarak her bir püskürtme basıncında püskürtme avansının değişimiyle gözlemlenen değişim eğilimleri ise şu şekildedir. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 611,4 K egzoz gaz sıcaklığına yol açmış, püskürtme avansının artışıyla 35° KMA püskürtme avansına kadar egzoz gaz sıcaklıklarında son derece sınırlı bir değişim gözlemlenmiş, 35° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avans arasında ise tekrardan gözle görülebilir bir düşüş yaşanmış ve egzoz gaz sıcaklığı 578,3 K'ye gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında ise 10° KMA püskürtme avansı ve 30° KMA püskürtme avans aralığında egzoz gaz sıcaklıklarının nispeten stabil değerler aldığı söylenebilir. Araştırma uzayının uç püskürtme avans değerleri olan 5° KMA püskürtme avansında egzoz gaz sıcaklığı 609,8 K olarak, 40° KMA püskürtme avansında ise 563,4 K olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansında 613,3 K olarak gözlemlenen egzoz gaz sıcaklığı 15° KMA püskürtme avansına kadar düşüş sergilemiş, sonrasında PCCI geçiş bölgesine kadar son derece küçük farklılıklar barındırmış ve 25° KMA püskürtme avansı sonrasında tekrardan düşüş eğilimine girmiştir. 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde ise modellenen egzoz gaz sıcaklığı 581,3 K'dir. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değerler sırasıyla 607,2 K ve 570,8 K değerini almıştır.



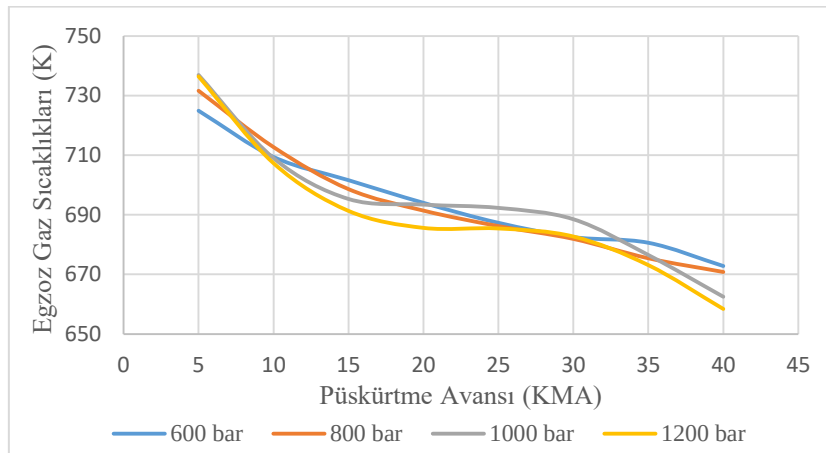
Şekil 4.88 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütesinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

Şekil 4.89 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıklarını sunmaktadır. Bu veri setinde PCCI bölgesinde yaşanan egzoz gaz sıcaklığı düşüleri daha belirgin olarak kendini var etmiştir. Motor yük artışıyla ortaya çıkan bu durum hali hazırda beklenen bir durumdur. ÜÖN'ye yakın yapılan püskürtmelerde ise püskürtme basıncının değişimiyle kayda değer değişimler ortaya çıkmamıştır. 5° KMA püskürtme avansında gerçekleştirilen enjeksiyonlarda püskürtme basıncının değişimiyle 4 K gibi hata payı içerisinde yer alan (<%1) egzoz gaz sıcaklıkları ortaya çıkmıştır. 40° KMA püskürtme avansında ise bu değerler 36,8 K olarak gözlemlenmiştir. Her bir püskürtme basıncında, püskürtme avansının artışına bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığı değerlerinde 24,1 K ile 63,6 K arasında düşüşler meydana gelmiştir. Bu veri setinde ortaya çıkan değişim eğilimleri daha stabil bir hal almıştır. Püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak geç püskürtme şartında egzoz gaz sıcaklıklarında düşüş ortaya çıkmış, konvansiyonel dizel yanmasını ortaya koyacak olan püskürtme avanslarında ise kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Farklı püskürtme basınçlarının ortaya koyduğu farklılık ise anca PCCI bölgesinde gözle görülebilir bir hal almıştır. Tüm püskürtme basınçlarında püskürtme avansının 15° KMA ile 20° KMA bandına geldiği aralığa kadar egzoz gaz sıcaklıklarında düşüş ortaya çıkmış, sonrasında ise 30° KMA ile 35° KMA püskürtme avansı aralığına kadar bu değerler neredeyse sabit seyretmiştir. Devamında ise tekrardan düşüş ortaya çıkmıştır. Daha doğrusu önceki veri setlerine dayanarak bir tahmin geliştirildiği üzere püskürtme basıncı arttıkça ortaya çıkan düşüş daha büyük seviyede seyretmiştir. 600 bar püskürtme basıncında en geç yapılan püskürtmede 657,6 K, en erken yapılan püskürtmede ise 633,5 K egzoz gaz sıcaklığı gözlemlenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında ise bu değerler sırası ile 659 K ve 604,9 K değerini almıştır. Benzer şekilde 1000 bar püskürtme basıncında söz konusu sıcaklıklar 660,3 K ve 596,7 K'dir. 1200 bar püskürtme basıncında da 656,1 K ve 602,1 K olarak modellenmiştir.



Şekil 4.89 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

Şekil 4.90 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki egzoz gaz sıcaklıklarını göstermektedir. Bu veri setinde motor yükünün artışıyla egzoz gaz sıcaklıklarındaki farklılıklar bir miktar daha belirgin olarak kendini var etmiştir. Harici bir eğilimi değişimi gözlemlenmemiştir. Egzoz gaz sıcaklıkları açısından en büyük farklılıklar yine PCCI bölgesinde oluşmuştur. Her bir püskürtme basıncında püskürtme avansının artışına bağlı olarak 52,1 K ile 78 K arasında değişen egzoz gaz sıcaklığı düşüşleri meydana gelmiştir. 600 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının artışıyla egzoz sıcaklığındaki değişimler 724,9 K ile 672,8 K arasında değerler almıştır. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 731,4 K ve 670,8 K, 1000 bar püskürtme basıncında 736,9 K ve 662,5 K, 1200 bar püskürtme basıncında ise 736,4 K ve 658,4 K olarak modellenmiştir.



Şekil 4.90 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan egzoz gaz sıcaklıkları

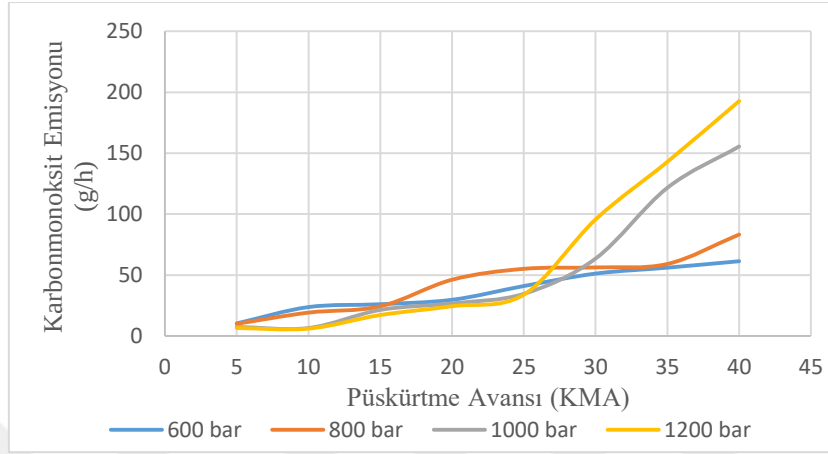
4.13 CO Emisyonlarının İncelenmesi

CO emisyonunun temel oluşum mekanizması yanma esnasında oksijen konsantrasyonunun yeterli seviyede olmaması ve zengin karışımın var olmasıdır. Bu sebeple temel itibarıyla konvansiyonel kıvılcım ateşlemeli motorlarda, belli işletme şartlarında sorun boyutunda olan bir emisyondur. Dizel motorları ise fakir karışımlı motorlar oldukları için CO emisyonu oldukça düşük seviyede ortaya çıkmaktadır. Dizel yanması esnasında lokal hava fazlalık katsayısına bağlı olarak zengin karışım bölgelerinde CO emisyonu oluşabilir. Bu esnada oluşan CO, yanmanın devam eden sürecinde çok büyük oranda okside olarak CO₂'ye dönüşür. Fakat yine de kimyasal reaksiyonların gerçekleşebileceği sıcaklık bantlarında çok az da olsa CO, oksijen ile buluşamayarak oksidasyonunu tamamlayamayabilir. Buna ilaveten yanma odası içerisinde ortaya çıkan anlık sıcaklık değerleri düşükse CO'nun CO₂'ye dönüşümü, ortamda yeterli oksijen bulursa dahi gerçekleşemeyebilir. Ayrıca disosiyasyon kaynaklı olarak bir miktar CO da egzoz gazları içerisinde görülecektir. DSY rejimlerinde lokal olarak oksijen yetersizliğinin bulunduğu bölgeler azalmaktadır. Bu durum da CO emisyonlarını azaltacak bir faktördür. Bölüm 4.5'te görüldüğü üzere DSY ve dolayısıyla PCCI rejiminde pik yanma sıcaklıkları da düşüş göstermektedir. Bu durum ise CO emisyonlarını arttırıcı etki sergilemektedir. Yanma sıcaklıklarının düşüşü bu karşıt ilişkide daha baskın bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatür verilerinde yanma odası içerisinde alevin zayıflamasına bağlı olarak, yani yanma sıcaklıklarının düşüşüyle CO emisyonlarının artış sergileyeceği belirtilmiştir. Çalışma dahilinde de bu eğilim gözlemlenmiştir. PCCI bölgesinde CO emisyonunun artışına dair grafikleri Şekil 4.91 - 99 üzerinde görülmektedir. Her bir veri setindeki değişim eğilimlerine dair yorumlar ise aşağıdaki paragraflarda sunulmuştur.

Şekil 4.91 üzerinde 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan CO emisyonları, püskürtme avansı ve püskürtme basıncını bağlı olarak görülmektedir. Püskürtme avansının küçük olduğu bölgede püskürtme basıncı arttıkça CO emisyonlarının düşüş sergilediği görülmektedir. Bu aralıkta yanma başlangıcının ÜÖN sonrasında veya ÜÖN'ye çok yakın konumlarda bulunduğu unutulmamalıdır. Püskürtme basıncının belirtilen bölgede artışıyla Bölüm 4.1'de de değinildiği üzere TG düşüş sergilemiş ve yanma daha erken başlamıştır. Böylelikle reaksiyonların önemli bir kısmı, düşük püskürtme basıncındaki örneklemelere

nazaran daha yüksek ortam sıcaklıklarında gerçekleşmiştir. Ayrıca artan püskürtme basıncı, karışım oluşumunu iyileştirmiş ve alev çekirdekleri bölgesindeki lokal oksijen yetersizlikleri azalmıştır. Böylelikle CO emisyonları düşüş sergilemiştir. Konvansiyonel dizel yanmasının ortaya çıktığı şartlarda da bu eğilim gözlemlenmiştir. Devamında püskürtme avansının daha da artarak PCCI bölgesine geçilmesi ile püskürtme basıncının artışı, CO emisyonlarını arttırıcı etki göstermiştir. Tahmin edileceği üzere bu bölgede püskürtme avansı artışıyla da CO emisyonları tırmanışa geçmiştir. PCCI bölgesinde püskürtme avansı arttıkça ortaya çıkan artış düşük püskürtme basınçlarında daha makul seviyedeysen, yüksek püskürtme basınçlarında dramatik boyutlara ulaşmıştır. ÜÖN'ye en yakın püskürtme avans değeri olan 5° KMA'da enjeksiyon gerçekleştirildiğinde 600 bar püskürtme basıncında 10,308 g/h CO emisyonu ortaya çıkmış, 1200 bar püskürtme basıncında bu değer 6,48 g/h'ye gerilemiştir. 40° KMA püskürtme avansında yani en erken püskürtme yapıldığı şartta 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan CO emisyonu 61,32 g/h iken 1200 bar püskürtme basıncında bu değer 192,76 g/h'ye çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının artışına bağlı olarak düzenli bir artış görülmüştür. Bu püskürtme basıncında görece daha kabul edilebilir artışlar ortaya çıkmıştır. 5° KMA püskürtme avansında 10,308 g/h olan CO emisyonu 40° KMA püskürtme avansında 61,32 g/h olarak gözlemlenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında 15° KMA püskürtme avansına kadar 600 bar verilerinden bir miktar düşük CO salımı ortaya çıkmış, bu püskürtme avans değerinden sonra ise CO emisyonları daha yüksek değerler almış, 35° KMA püskürtme avansı sonrasında ortaya çıkan CO değişim hızı artış sergilemiş ve en erken püskürtme şartı olan 40° KMA püskürtme avansında 83,24 g/h değerine ulaşılmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 7,432 g/h CO salımına yol açmış, 10° KMA püskürtme avansına gelindiğinde ise bu değer 6,504 g/h'ye gerilemiştir. Bu durum yanmanın konvansiyonel şartlara bir miktar daha yakınsaması ile ilişkilendirilebilir ve bu veri seti için ilgili püskürtme avanslarında, daha büyük püskürtme basıncı serilerinde de aynı eğilimin ortaya çıkması beklenmektedir. Sonrasında püskürtme avansının daha da artışıyla CO emisyonları tekrardan artışa geçmiş, 25° KMA püskürtme avansı aşıldığında ise CO emisyonunda ortaya çıkan değişim hızı daha önceki püskürtme basınçlarına kıyasla oldukça artmış ve 40° KMA püskürtme avansında 155,52 g/h CO emisyonu ortaya çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında CO emisyonunun değişimi açısından da aynı eğilimler aynı

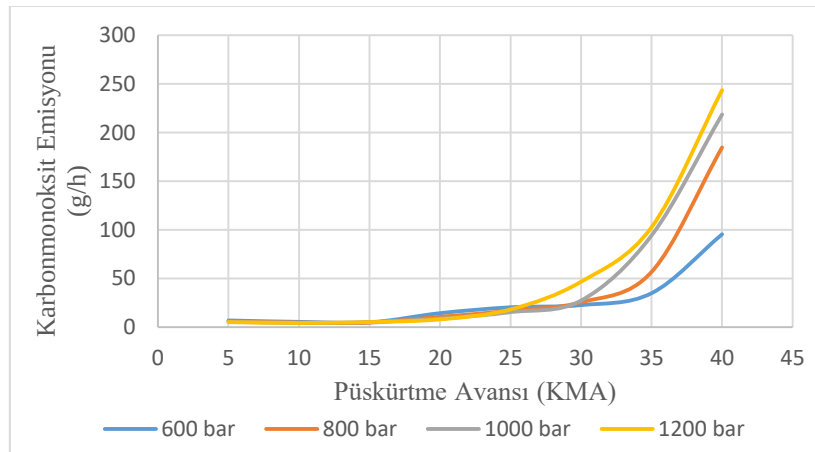
noktalarda oluşmuştur. Fakat daha önce de belirtildiği üzere PCCI bölgesinde bir miktarda daha fazla CO emisyonu ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme basıncında en küçük CO salımı 10° KMA püskürtme avansında 6,02 g/h olarak görülmüş ve 40° KMA püskürtme avansında 192,76 g/h'ye erişilmiştir.



Şekil 4.91 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

Şekil 4.92’de 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında ortaya çıkan CO emisyonları görülmektedir. Bu veri setinde 15° KMA püskürtme avansına kadar CO emisyonlarında kayda değer bir değişim ortaya çıkmamıştır. Püskürtme basıncının değişimiyle de 25° KMA püskürtme avansı sonrasında anlamlı farklılıklar oluşmaya başlamıştır. Motor yükü artışına bağlı olarak bir önceki veri seti ile karşılaştırma yaptığımızda, konvansiyonel yanma bölgesinde püskürtme basıncı değişimiyle son derece sınırlı farklılıkların ortaya çıktığı görülmektedir. Aynı zamanda yakıt enjeksiyon kütlesi arttıkça konvansiyonel dizel yanması şartlarında, ki burada takriben 10° KMA ve 25° KMA püskürtme avans aralığı kabul edilebilir, CO emisyonlarının düşüş sergilediği görülmektedir. Halihazırda bu beklenen bir durumdur. PCCI rejimi bölgesinde püskürtülen yakıt kütlelerinin 20 mg/strok’a çıkışıyla da bir miktar CO azalışı görülmektedir. Fakat konvansiyonel yanma bölgesinde ortaya çıkan düşüş oranı çok daha yüksek seviyededir. Bir önceki veri setinde 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında 5° KMA püskürtme avansından 10° KMA püskürtme avansına geçildiğinde CO emisyonunda bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Bu veri setinde ise her bir püskürtme basınç serisinde püskürtme avansının artışıyla ilk etapta düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında 15° KMA püskürtme avansına kadar devam etmiş, 1000 bar ve 1200 bar püskürtme

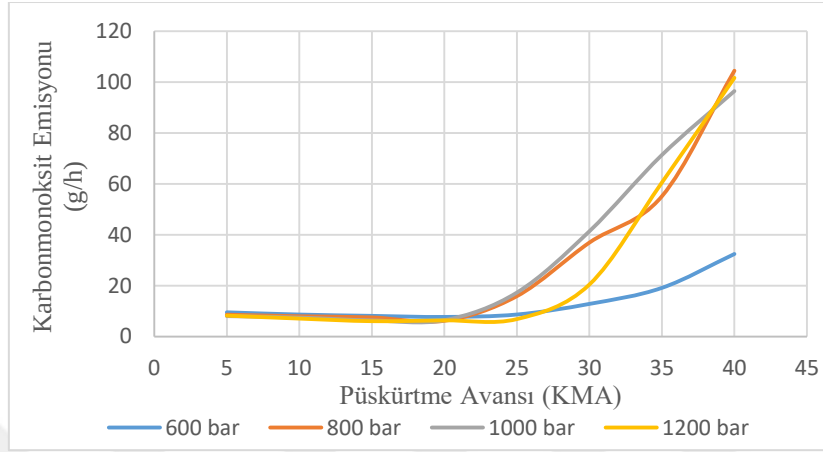
basınçlarında ise en düşük CO değeri 10° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 15° KMA püskürtme avansında elde edilmiş olan en küçük CO salımı 4,88 g/h olarak gözlemlenmiştir. Bu değer 5° KMA püskürtme avansında 6,9 g/h olarak, 40° KMA püskürtme avansında ise 95,84 g/h olarak modellenmiştir. Bu püskürtme basıncı serisinde 35° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avans aralığında keskin bir artış ortaya çıkmış ve CO emisyonu 2,73 kat artış sergilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında en küçük CO salımı 15° KMA püskürtme avansında 4,782 g/h olarak görülmüş, ÜÖN'ye en yakın püskürtme yapılması durumunda CO değeri 5,864'e, ÜÖN'ye en uzak püskürtme yapılması durumunda ise 184,72 g/h'ye erişmiştir. 800 bar püskürtme basıncında CO emisyonunda ortaya çıkan süratli artış 30° KMA püskürtme avansı sonrasında kendini var etmiştir. Püskürtme avansının 30° KMA'dan 35° KMA'ya çıkışıyla 2,2 kat dolaylarında, 35° KMA'dan 40° KMA'ya çıkışı ile birlikte de 3,25 kat artış görülmüştür. 1000 bar püskürtme basıncında da en küçük CO emisyonu 10° KMA püskürtme avansında 4,4 g/h olarak modellenmiş, 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde ise bu değer 218,6 g/h'ye yükseldiği görülmüştür. 1000 bar püskürtme basıncında CO emisyonunun dramatik artış sergilemeye başladığı püskürtme avansı 800 bar püskürtme basıncı ile aynıdır, fakat ortaya çıkan artış eğilimi daha yüksektir. 1200 bar püskürtme basıncında da benzer bir durum 25° KMA püskürtme avansından itibaren ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme basıncında en küçük CO değeri 10° KMA püskürtme avansında 4,364 g/h olarak gözlemlenirken 40° KMA püskürtme avansında 243,63 g/h'ye erişilmiştir.



Şekil 4.92 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

Şekil 4.93’de 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan CO emisyonları sunulmuştur. Püskürtülen yakıt kütlesinin 25 mg/strok değerine çıkışıyla birlikte geç püskürtme ve konvansiyonel dizel yanmasında ortaya çıkan CO emisyonlarında g/h cinsinden belli belirsiz bir artış ortaya çıkmıştır. Ancak belirtmek gerekir ki birim kütle yakıt başına oluşan CO emisyonu, yani emisyon faktörü hâlâ düşüş eğilimindedir. Buna mukabil PCCI çalışma bölgesinde ortaya çıkan CO emisyonu daha önceki yakıt püskürtme kütlelerine göre düşük çıkmıştır. Bu düşüş yakıt enjeksiyonunun 20 mg/strok’tan 25 mg/strok’a çıkışıyla yer yer %50 dolaylarında gözlemlenmiştir. Bunun altında yatan temel sebep tahmin edileceği üzere yanma sıcaklıklarının artışıdır. 5° KMA ve 20° KMA püskürtme avans aralığında gerek püskürtme basıncı gerekse de püskürtme avansı değişimiyle CO emisyon değerlerinde kayda değer bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Sonrasında ise püskürtme avansının artışıyla CO emisyonu artışı belirginleşmiştir. 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncında en düşük CO emisyonu 20° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme avansında ise 15° KMA püskürtme avansı en düşük CO emisyonunu ortaya koymuştur. Konvansiyonel çalışma bölgesinde püskürtme basıncı arttıkça yakıtın, yanmaya hazırlanma süresi kısalmakta ve performans açısından optimal şart ÜÖN’ye yaklaşmaktadır. Böylelikle püskürtme basıncı arttıkça en düşük CO’nun yakalandığı püskürtme avansı da ÜÖN’ye yaklaşmaktadır. 600 bar püskürtme basıncında en düşük CO salımı 20° KMA püskürtme avansında 7,736 g/h değerini almıştır. Bu değer 5° KMA püskürtme avansında 9,548 g/h olarak, 40° KMA püskürtme avansında ise 32,476 g/h olarak modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncına gelindiğinde bu değerler aynı püskürtme avansları için sırasıyla 6,224 g/h, 8,632 g/h ve 104,52 g/h olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında 6,38 g/h ile en küçük CO salımı 15° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. ÜÖN’ye en yakın yapılan püskürtmede 8,056 g/h, en uzak yapılan püskürtme de ise 96,52 g/h CO emisyonu modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında aynı püskürtme avansındaki değerler sırasıyla 6,068 g/h, 8,256 g/h ve 101,72 g/h değerindedir. Bu veri setinde 800 bar püskürtme basıncının geniş bir püskürtme avans aralığında en yüksek CO emisyonunu ortaya koyduğu görülmektedir. Bu durumu teorik çerçevede tutarlı bir izahı bulunmamaktadır. Deneysel verisi bilinen bir noktada CO emisyonu modellenirken son derece küçük katsayılarla (birçok durumda $<0,2$ ve çoğunlukla $<<0,1$) doğrulama işlemi yapılmıştır. Bu veriler YSA içerisinde eğitirken ortaya

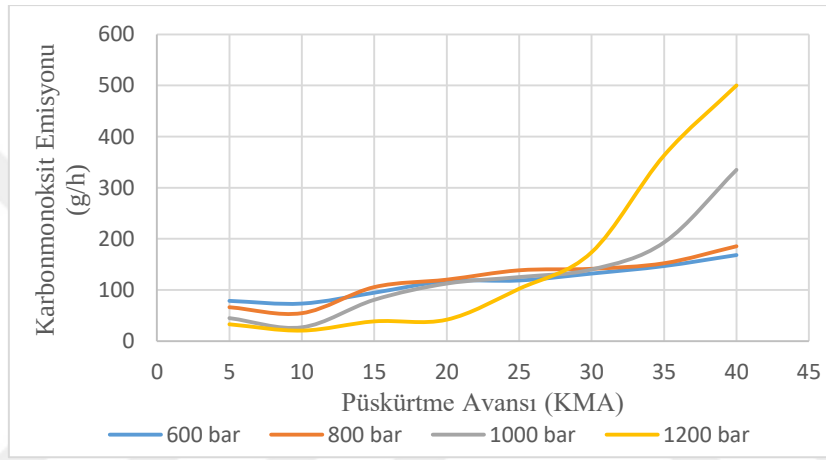
çıkacak düşük seviyeli sapmalar dahi ciddi çıktılarına yol açabilmektedir. Burada karşımıza çıkan durum da tam olarak bu şekilde meydana gelmiştir. Yani burada gerek termodinamik modellemede gerekse de YSA modellemesinde ortaya çıkan belirsizlikler kısmen de olsa izahı olmayan bir sonuca yol açmıştır.



Şekil 4.93 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında ortaya çıkan CO emisyonları Şekil 4.94'te görülmektedir. Bu veri seti Şekil 4.91 ile karşılaştırıldığında, motor hızının artışıyla bazı bölgelerde CO emisyonlarının artış gösterdiği görülmüştür. Esas itibariyle 1500 dev/dak motor hızında yanma veriminin iyileşmesi beklenmektedir. Çünkü motor maksimum moment devir bandı dolaylarındadır. Ancak reaksiyona ayrılan sürenin kısılması neticesinde CO emisyonları bazı bölgelerde artış göstermiştir. Konvansiyonel yanma bölgesinde daha yüksek püskürtme basınçlarının CO emisyonunu düşürücü etkisi açık bir şekilde görülmektedir. PCCI çalışma bölgesinde yani erken püskürtme şartlarında ise tam tersi bir durum geçerlidir. 25° KMA püskürtme avansından başlayarak 40° KMA püskürtme avansına doğru gidildikçe daha büyük püskürtme basınçları daha yüksek CO emisyonuna yol açmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 78,57 g/h CO emisyonuna yol açarken 40° KMA püskürtme avansında bu değer 168 g/h'ye ulaşmıştır. 800 bar püskürtme basıncında en düşük CO emisyonu değeri 10° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Bu konumda başlatılan püskürtmede 54,53 g/h olan CO emisyonu 40° KMA püskürtme avansında 185,44 g/h değerini almıştır. Şu ana kadar incelenen her iki püskürtme basınç serileri birbirinden çok farklı değerler ortaya koymamıştır. 1000 bar püskürtme basıncında en küçük CO salımı yine 10° KMA püskürtme avansında

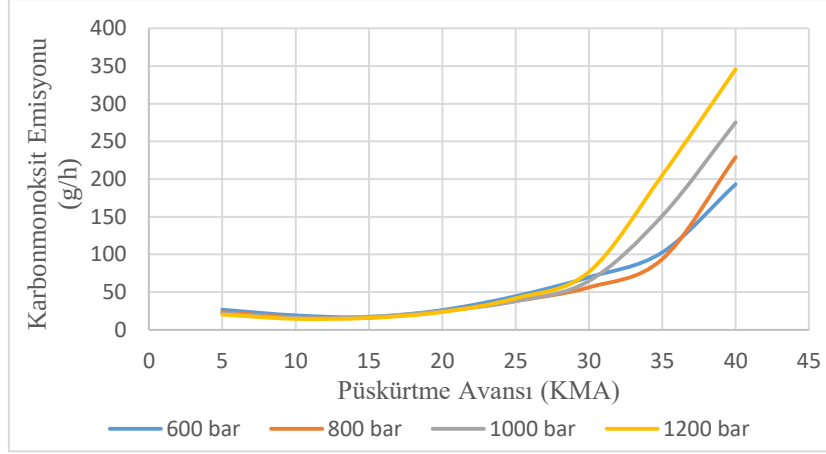
ortaya çıkmış ve 26,81 g/h değerini almıştır. Bu püskürtme basıncı serisinde 30° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra CO emisyon değerlerinde hızlı bir artış gözlemlenmiştir. 30° KMA püskürtme avansında 140 g/h olan CO emisyonu, 40° KMA püskürtme avansında 344,96 g/h değerine ulaşmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise en düşük CO emisyonu yine 10° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmış ve 20,42 g/h değerini almıştır. Bu püskürtme basıncında ortaya çıkan dramatik artışın başlangıcı 20° KMA püskürtme avansının aşıldığı an olarak düşünülebilir, 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde ise 500,16 g/h CO emisyonu ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.94 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

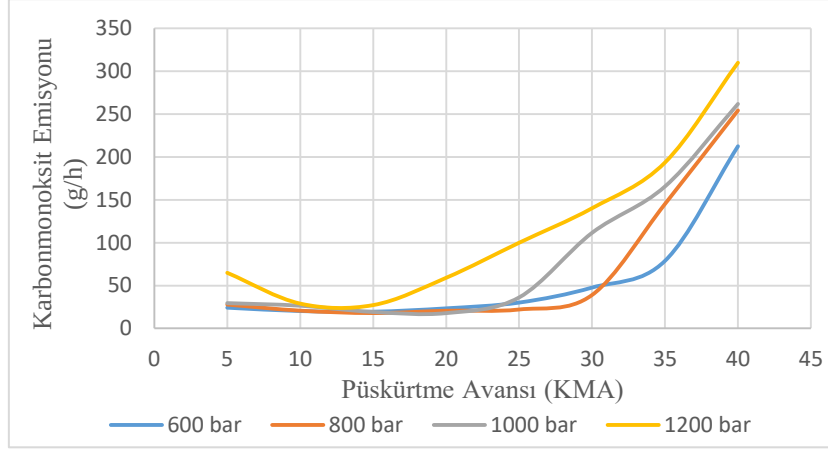
1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan CO emisyonları Şekil 4.95'te görülmektedir. Şekil 4.95 üzerinde görüldüğü üzere farklı püskürtme basınçlarının 30° KMA püskürtme avansına kadar grafiğe yansıyan bir etkisi ortaya çıkmamıştır. Fakat püskürtme avansının bu değerin üzerine çıkarak daha erken gerçekleştirilen yakıt enjeksiyonlarında püskürtme basıncının etkisi belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Erken püskürtme şartlarında ve uzun TG süreçlerinin gözlemlendiği durumda büyük püskürtme basınçları daha fakir karışım bölgelerinin oluşmasına meydan hazırladığı için CO emisyonu düşen yanma sıcaklıkları neticesinde artış göstermektedir. Veri seti içerisinde en düşük CO emisyonu 10° KMA ve 15° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkmıştır. Yanma başlangıcının genişleme fazına kaydığı geç püskürtme şartında ve konvansiyonel dizel yanmasının ortaya çıktığı püskürtme avanslarında, püskürtme basıncının artışı ile CO emisyonları düşüş sergilemiştir. Esas itibariyle grafik içerisinde ortaya çıkan değerlerin merteye bazında farklılıklar barındırması 30° KMA ve daha küçük

püskürtme avans değerlerinde püskürtme basıncına bağlı olarak ortaya çıkan değişimlerin görülebilir olmasının önüne geçmiştir. Aslında bu bölgede de püskürtme basıncı değişimiyle bir miktar farklılık bulunmaktadır. En düşük CO emisyonunun ortaya çıktığı bölgede püskürtme basıncının artışına bağlı olarak %10 dolaylarında, MK yanmayı ortaya koyan 5° KMA püskürtme avansında ise %30 dolaylarına kadar düşüş gözlemlenmiştir. Püskürtme avansının değişimiyle ise son derece düzenli değişim eğilimi ortaya çıkmıştır. Yakıtın ısı enerjisinden en iyi şekilde faydalanılan püskürtme avans değerinde yanma sıcaklıklarının da artış göstermesi sebebiyle CO emisyonları en düşük seviyeye gerilemiş ve bu değerden uzaklaştıkça yanmanın gerçekleştiği karışım cephelerinde ortaya çıkan fakirleşme sebebiyle alev sıcaklıkları düşerek CO emisyonu artış sergilemiştir. 600 bar püskürtme basıncında en düşük CO emisyonu değeri 16,788 g/h ile 15° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmış, 5° KMA püskürtme avansında 26,548 g/h CO salımı modellenmiş, 40° KMA püskürtme avansında ise bu değer 193,123 g/h olarak modellenmiştir. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avansları arasındaki artış %93 olarak hesaplanmıştır. 800 bar püskürtme basıncında en düşük CO emisyonu 600 bar püskürtme basınç serisi ile aynı noktada ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme basıncında ortaya çıkan en küçük CO emisyonu 16 g/h olarak modellenmiştir. Çalışma bölgesi içerisinde ÜÖN'ye en yakın konumda yapılan püskürtmede 23,364 g/h, en uzak konumda yapılan püskürtmede ise 229,04 g/h CO ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme basıncında da 35° KMA püskürtme avansı sonrasında CO salımında hızlı bir artış ortaya çıkmıştır. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında en küçük CO değeri 10° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Gözlemlenen en düşük CO'nun püskürtme basıncı arttıkça ÜÖN'ye daha yakın bir konumda ortaya çıkmasının gerekçesi bu başlık altındaki daha önceki veri setleri yorumlanırken açıklanmıştı, burada da aynı sebepler buna ortam sağlamıştır. 1000 bar püskürtme basıncında 5° KMA, 10° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan CO değerleri sırasıyla 21,82 g/h, 15,7 g/h ve 275,328 g/h olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan bu değerler sırasıyla 20,156 g/h, 14,404 g/h ve 345,912 g/h olarak modellenmiştir.



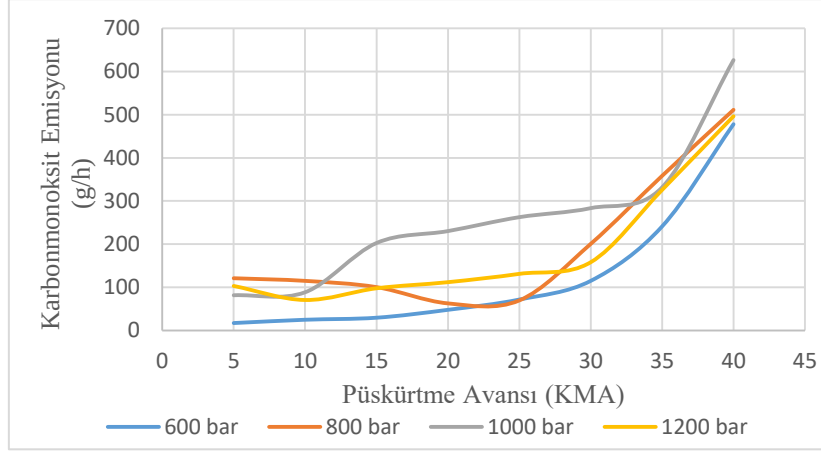
Şekil 4.95 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan CO emisyonları Şekil 4.96’te sunulmuştur. Motor yükünün artışıyla püskürtme basıncının CO emisyonları üzerinde oynadığı rol ciddi miktarda artış sergilemiştir. Bu veri setinde, daha geniş çalışma aralığında işletme şartının değişmesiyle ortaya çıkan farklılıklar gözle görülebilir bir hal almıştır. Püskürtme basıncının artışına bağlı olarak, CO emisyonunda ortaya çıkan dramatik artışların başladığı püskürtme avansı düzenli olarak daha küçük değerlere yönelmiştir. 600 bar püskürtme basıncında dramatik artışın başlangıcı 35° KMA olarak, 800 bar püskürtme basıncında 30° KMA olarak, 1000 bar püskürtme basıncında 25° KMA olarak ve 1200 bar püskürtme basıncında 15° KMA olarak gözlemlenmiştir. Aynı zamanda motor yükünün artışına bağlı olarak PCCI bölgesinde CO emisyonlarında yer yer düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş büyük püskürtme basınçlarında ortaya çıkmıştır. Fakat 600 bar ve 800 bar gibi çalışma alanı içerisinde düşük kalan püskürtme basınçlarında bu eğilim gözlemlenememiştir. Konvansiyonel dizel yanmasını gerçekleyen püskürtme avans aralıklarında ise böyle bir eğilim gözlemlenmemiştir. Aksine CO emisyonlarında çok düşük de olsa g/h cinsinden artış ortaya çıkmıştır. Fakat bu artış kayda değer bir nitelik taşımamaktadır. Buna mukabil bu bölgede CO emisyon faktörü yani birim kütle başına ortaya çıkan CO değeri yine düşüş sergilemiştir. Bu çalışma aralığında 1200 bar püskürtme basıncında CO’nun artışı çok erken başlamış ve diğer püskürtme basınçlarına göre henüz konvansiyonel yanma bölgesinden uzaklaşmamış olsa dahi hızlı bir artış ortaya çıkmıştır.



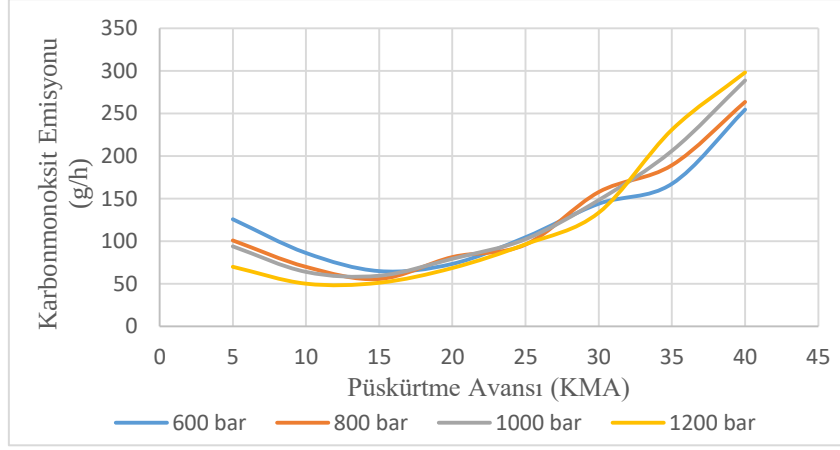
Şekil 4.96 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan CO emisyonları Şekil 4.97’te sunulmuştur. Bu inceleme bölgesinde yanma, performans ve diğer emisyonlara yönelik olarak sağlıklı ve tutarlı çıktılar elde edilmiştir. Fakat CO emisyonu değerleri tutarlı bir değişim eğilimi göstermemektedir. Şekil 4.97 üzerindeki verileri bilimsel bilgi ile tutarlı bir şekilde açıklamak mümkün değildir. Veri seti içerisinde deneysel verisi bulunan noktalarda püskürtme parametrelerinde ortaya çıkan yüzdesel hata değerleri de bu belirsizliği yaratacak seviyede değildir. Öte yandan bu veri seti içerisinde deneysel veriye sahip olunan nokta sayısı da azdır. Doğrulama esnasında bu noktaların CO kinetik çarpanı 0,0849, 0,0299 ve 0,1071 değerlerini almıştır. YSA çalışması esnasında bu değerlerde ortaya çıkan çok küçük farklılıklar bile CO emisyonlarını ciddi seviyede etkilemektedir. Çünkü CO kinetik çarpanı, emisyon değerini non-lineer olarak etkilemektedir. YSA modellemesi esnasında ortaya çıkacak küçük farklılıkların emisyon çıktısı üzerinde ciddi değişimlere yol açması bu veri setindeki belirsizliği doğurmuştur. Bu veri seti içerisinde deneysel verisi alınan bir noktada hatalı CO emisyonu ölçümü yapılmış olması da son derece olasıdır. Çünkü diğer inceleme başlıklarında böyle bir düzensizlikle karşılaşılmamıştır.



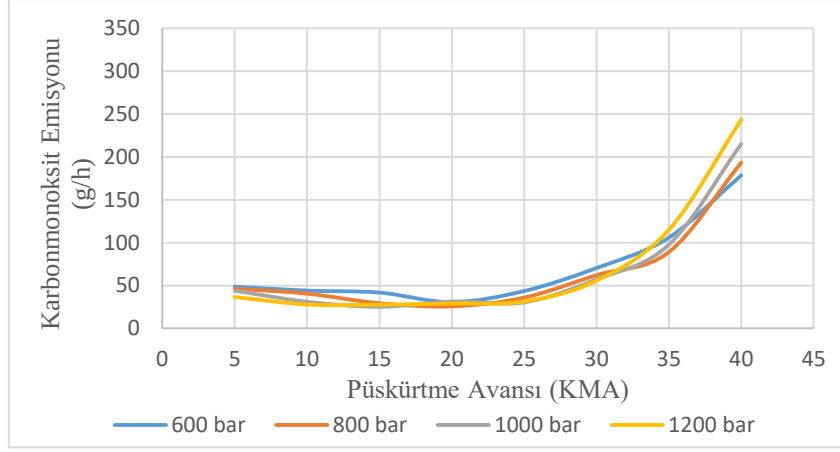
Şekil 4.97 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan CO emisyonları Şekil 4.98’de görülmektedir. Püskürtme avansının değişimiyle en düşük en düşk CO değerleri 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basıncında 15° KMA püskürtme avans değerinde ortaya çıkmış, 1200 bar püskürtme avansında ise 10° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 1000 dev/dak ve 1500 dev/dak motor hızlarında, özellikle konvansiyonel dizel yanması bölgesinde, CO emisyonlarının ciddi değişimler göstermediği geniş sayılabilecek püskürtme avans aralıkları gözlemlenmişti. Bu veri setinde ise motor hızının artışı neticesinde böyle bir aralık ortaya çıkmamıştır. Buna ilaveten ÜÖN’ye yakın yapılan ve MK yanmayı ortaya koyma eğiliminde olan bölgede de CO emisyonları artış sergilemiştir. Bu bölgede daha düşük püskürtme basınçları daha yüksek CO değerlerine yol açmaktadır. Çünkü TG, bu işletme şartlarında daha da artmakta ve yanma sıcaklıkları düşüş sergileyerek zayıf alev karakteristiği güçlenmektedir. Bu bölgede yüksek püskürtme basınçları TG’yi kısaltmış ve fazlaca fakir karışım bölgelerinin oluşumunun bir miktar önüne geçerek CO emisyonları arttırmamıştır. Yani daha önceki veri setlerinde PCCI bölgesinde yaşanan durumun tersi ortaya çıkmıştır. Bu veri seti içerisinde erken püskürtme şartında, daha önceki verilerde gözlemlendiği ve gerekçesi açıklandığı üzere CO emisyonu püskürtme basıncı arttıkça artış sergilemiştir. Yine daha önceki verilerde gözlemlendiği üzere püskürtme basıncı arttıkça CO emisyonundaki artış daha küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkma eğilimi göstermiştir.



Şekil 4.98 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan CO emisyonları Şekil 4.99 üzerinde görülmektedir. Püskürtülen yakıt kütlesinin artışıyla yani motor yükünün artışıyla konvansiyonel yanma bölgesinde farklı püskürtme basınçlarında ortaya çıkan CO değerleri tekrardan birbirine yaklaştırmaya başlamıştır. 600 bar ve 800 bar püskürtmeye basınçlarında ortaya çıkan en küçük CO emisyonu 20° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında ise bu nokta 15° KMA püskürtme avansına denk gelmektedir. Minimum CO salımının gözlemlendiği konuma göre daha düşük püskürtme avanslarında çalışıldığında düşük püskürtme basınçlarının, daha büyük püskürtme avanslarında çalışıldığında ise yüksek püskürtme basınçlarının daha fazla CO emisyonuna yol açtığı görülmektedir. Bu eğilim daha önceki veri setlerinde de görülmüştür. Ortaya çıkan sonuçlar, bir önceki veri setiyle kıyaslandığında, motor yükü arttıkça konvansiyonel yanma bölgesinde ve geç püskürtme şartında ortaya çıkan MK yanmada CO emisyonlarının düşüş sergilediğini göstermektedir. Bu düşüş kayda değer düzeyde ortaya çıkmıştır. Esas itibarıyla erken püskürtme şartında da 20 mg/strok şartında göre CO emisyonlarında düşüş ortaya çıkmıştır fakat aradaki değişim daha sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.99 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan karbonmonoksit emisyonları

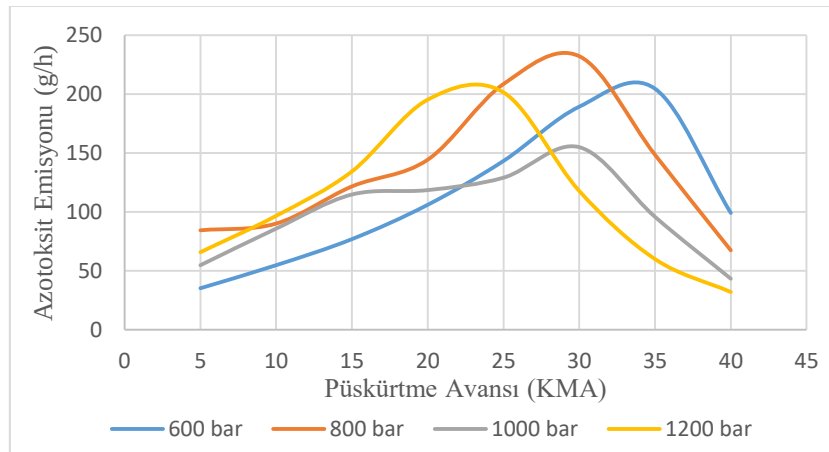
4.14 NO_x Emisyonlarının İncelenmesi

NO_x çıktıları, bu çalışmanın en önemli kısmı olarak nitelendirilebilir. Çünkü çalışmanın esas amacı NO_x ve PM emisyonlarını azaltmaktır. PM emisyonları, NO_x emisyonlarına göre daha kolay bertaraf edilebilmektedir. Fakat NO_x emisyonlarını indirmek oldukça güçtür. NO_x emisyonlarının oluşumunda en temel faktör sıcaklıktır. Sıcaklığın ardından hava fazlalık katsayısı da NO_x açısından büyük önem taşımaktadır. Konvansiyonel dizel yanmasında NO_x oluşumu ile DSY uygulamalarında NO_x oluşumu birbirinden farklılık barındırmaktadır. Çünkü yanma odası içerisindeki dolgu karakteri oldukça farklıdır. Konvansiyonel dizel yanmasında yanma odasının nispeten küçük bir kesiminde yanma ortaya çıkarken, DSY uygulamalarında daha büyük bir hacimde yanma ortaya çıkmaktadır. PCCI yanmada, püskürtme başlangıcından yanmanın başlangıcına kadar geçen sürenin artış sergilemesi yakıtın daha yüksek homojenlikte karışım oluşturmaya ve daha büyük hacimde tutuşabilir karışım ortaya çıkmasını olanak tanımaktadır. Yanmanın daha geniş bir hacimde ortaya çıkması aynı zamanda yanma odası içerisindeki soğuk cephelerin de azalmasını mümkün kılar. Bu şartlar dahilinde PCCI stratejisinde NO_x'un gerek oluşum hızı düşer gerekse de geri yönlü tepkime hızı ve geri yönlü tepkimeye ayrılan süre artış sergilemektedir. Yanma olayının konvansiyonel dizel yanmasından farklılık göstermesi neticesinde sadece silindir içi sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak NO_x emisyonları hakkında bir yorumda bulunmak PCCI stratejisinde hatalı sonuçlara yol açacaktır. Bu sebeple yanma odası içerisinde oluşan yakıt hava karışımını homojenliğinin bir ölçütü olarak

değerlendirebileceğimiz TG süreçleri, yanma odası içerisinde hava fazlalık katsayısı dağılımı neticesinde farklılık gösterecek olan yanma süreci değerleri ve pik yanma sıcaklığı verileri beraber değerlendirilerek NO_x emisyonunun değişim eğilimleri incelenmelidir.

Şekil 4.100 üzerinde 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi şartında ortaya çıkan NO_x emisyonlarını g/h biriminde göstermektedir. Çalışma dahilindeki püskürtme avans verileri göz önünde bulundurulduğunda 5° KMA püskürtme avansında yanma başlangıcı genişleme stroğunda ortaya çıkmaktadır. 10° KMA püskürtme avansında ise TG verileri incelendiğinde yanmanın ÜÖN öncesi 2,36° KMA ve 0,35° KMA arasında değişen konumlarda ortaya çıktığı görülmüştür. Bu konumda başlayan yanmanın devamında ortaya çıkan sıcaklıkların nispeten düşük olacağını söylemek mümkündür. Şu ana kadar bahsi geçen her iki püskürtme avansında yanma sırasında ortaya çıkan pik sıcaklık değeri 1500 K'nin altındadır. Devamında püskürtme avansının artışıyla yanma konvansiyonel dizel yanma stratejisine yakınsamaya başlamış ve yanma sıcaklıkları artış göstermiştir. Bunun neticesinde NO_x emisyonları artış sergilemiştir. Püskürtme avansının daha da artışı ve yanma odası içerisinde daha seyreltik fakat daha yüksek homojenlikte bir karışım oluşmasıyla yanma sıcaklıkları düşüş eğilimine girmiş, yanma odası içerisindeki soğuk bölgeler hacmen azalmış ve egzoz hattında gözlemlediğimiz NO_x miktarı düşüşe geçmiştir. NO_x emisyonunun pik değerine ulaştığı püskürtme avans değeri 600 bar püskürtme basıncında 35° KMA, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basıncında 30° KMA ve 1200 bar püskürtme basıncında 25° KMA'dır. Bu veri setinde, Bölüm 4.5 üzerinde de görüleceği üzere, en yüksek pik yanma sıcaklığının ortaya çıktığı püskürtme avans değeri ile pik NO_x emisyonunun ortaya çıktığı püskürtme avansı çakışık durumdadır. Yani sıcaklığın son derece belirleyici bir faktör oluşu kuralı devam etmektedir. Fakat veri seti içerisindeki tüm noktalarda bu eğilim ortaya çıkmamıştır. Örneğin 35° KMA püskürtme avansında en büyük pik yanma sıcaklığı 600 bar püskürtme basıncında elde edilmemiştir. Fakat en yüksek NO_x değeri bu konumda ortaya çıkmıştır. Bu durum bizlere PCCI stratejisinde, konvansiyonel dizel yanmasının aksine, yanma esnasında ortaya çıkan sıcaklık değerlerinin NO_x üzerinde birincil mutlak belirleyici faktör olmayabileceği gerçeğini göstermektedir. Dört farklı püskürtme basınç hattı da incelendiğinde pik NO_x değeri ortaya çıkana kadar kaydedilen NO_x

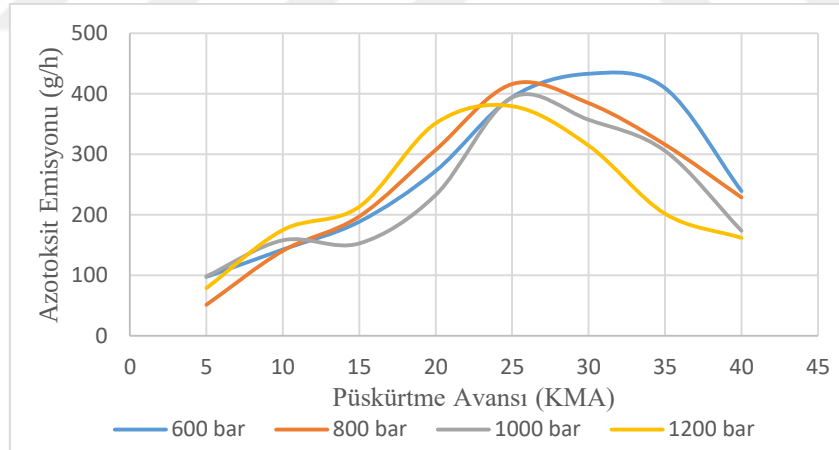
artış hızına göre bu nokta sonrasında ortaya çıkan düşüş hızı daha büyüktür. Her bir püskürtme basıncı serisinde püskürtme avansının değişimiyle ortaya çıkan en büyük NO_x değerlerinin, püskürtme basıncının artış veya azalışına bağlı olarak net bir trend eğilim ortaya koymadığı görülmüştür. Hem pik değer farklı püskürtme avanslarında elde edilmesi hem de yanma odası içerisinde oluşan karışım karakteristiğinin püskürtme basıncına bağlı olarak ciddi farklılıklar göstermesi böyle bir eğilimi gözlemenin her zaman mümkün olmadığını ortaya koymaktadır. Veri setindeki en büyük NO_x değeri 800 bar püskürtme basınç serisi içerisinde ortaya çıkmışken en düşük değer 1000 bar serisinde ortaya çıkmıştır. Fakat NO_x emisyonunda her bir basınç serisinde tepe noktası görüldükten sonra ortaya çıkan düşüş eğiliminin püskürtme basıncı arttıkça yükseliş gösterdiği ve büyük püskürtme basınçlarının daha düşük NO_x salımına yol açma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu veri seti içerisinde 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 35,32 g/h NO_x'a yol açmış, bu değer 35° KMA püskürtme avansında 204,6 g/h'ye kadar çıkmış ve sonrasında 40° KMA püskürtme avansında 99,2 g/h'ye gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında en küçük ve en büyük püskürtme avansında ortaya çıkan NO_x salımları 84,48 g/h ve 67,48 g/h'dir, 30° KMA püskürtme avansında ise 232,24 g/h ile pik NO_x ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 54,84 g/h, 43,40 g/h ve 155,04 g/h olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ÜÖN'ye en yakın konumda yapılan enjeksiyon 65,92 g/h NO_x'a yol açmış, pik değer 25° KMA püskürtme avansında 201,52 g/h olarak modellenmiş ve 40° KMA'da 32,10g/h'ye gerilemiştir.



Şekil 4.100 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

Şekil 4.101’de 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi şartında ortaya çıkan NO_x emisyonları görülmektedir. Bir önceki veri setine kıyasla, püskürtülen yakıt kütlesindeki artıştan dolayı yanma sıcaklıkları 200 K dolaylarında artış sergilemiştir. Buna ilaveten TG ve yanma sürecinin de kısaldığı görülmektedir. Bu şartlarda kaçınılmaz olarak NO_x değerleri yükselişe geçmiştir. Bu artış istisnasız olarak tüm püskürtme basıncı ve püskürtme avansı ikililerinde görülmektedir. TG sürecinin bir miktar kısalması ve her bir püskürtme avansında yanmanın bir önceki veri setine göre daha kısa sürede ortaya çıkması neticesinde, püskürtme basıncı serilerinde gözlemlenen pik NO_x salımı değeri daha küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan pik NO_x değeri 35° KMA püskürtme avansından 30° KMA püskürtme avansına gerilemiştir. 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında bu değer 30° KMA püskürtme avansından 25° KMA püskürtme avansına taşınmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise pik NO_x aynı püskürtme avansında yani 25° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. NO_x ’un pik değerinin elde edilişinden sonra püskürtme avansı arttıkça ortaya çıkan düşüş hızı, bu veri setinde de bu noktaya ulaşana kadar ortaya çıkan artış hızından daha yüksektir. Pik NO_x değeri elde edildikten sonra ortaya çıkan düşüş 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında daha yüksek değerler almıştır. Esas olarak bu bölgede ortaya çıkan TG süreci diğer püskürtme basınçlarına göre bir miktar daha düşüktür. Fakat yanma süreci çok daha uzun bir periyoda yayılmıştır. Yanma sürecinin uzamasıyla tepkimelerin gerçekleşebileceği süreç artış sergilemiştir. Fakat aynı zamanda yanma hızı yavaşlamış ve daha düşük pik yanma sıcaklıkları elde edilmiştir. Bu şartlarda bir yandan NO_x oluşumu yavaşlamış, diğer yandan da geri yönlü tepkimeye ayrılan süre artış göstermiştir. Böylelikle PCCI stratejisinin gerçekleştirebildiği bölgelerde egzoz gazları içerisinde bulunan NO_x düşüş göstermiştir. KYK50 konumları incelenirken, yanmanın toplam ısı girişinin ilk %50’lik kısmında dramatik değişimlerin ortaya çıkmadığına değinilmişti. Bu şartlarda yanma sürecinin uzaması büyük oranda ısı girişinin ikinci %50’lik periyoduyla ilişkilidir. Belirtilen koşul NO_x geri yönlü tepkimesini tetikleyen bir durum olarak değerlendirilebilir. Düşük püskürtme basınçlarında her bir eğrinin tepe noktası civarının daha geniş bir hatta yayılı olduğu, püskürtme basınca arttıkça ise bu konumun bir miktar daha kesinleştiği göze çarpmaktadır. Bunun altında yatan sebep ise düşük püskürtme basınçlarında karışım oluşumu ve atomizasyon hızının daha yavaş ortaya çıkması,

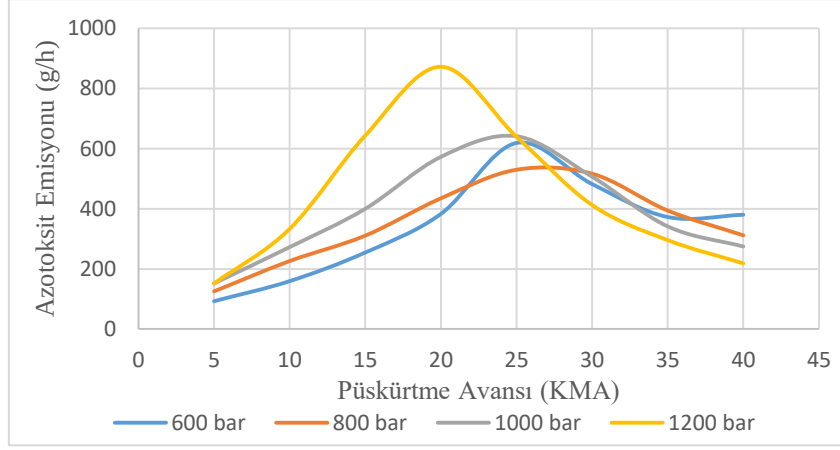
yüksek püskürtme basınçlarında ise karışım oluşumunun daha yüksek bir hızda seyretmesi ve makro karışım üzerinde oluşan değişimlerin daha kısa bir periyotta kendini göstermesidir. Bu veri setinde 600 bar püskürtme basıncında püskürtme avansı 5° KMA iken 97,36 g/h NO_x ortaya çıkmış, bu değer 30° KMA püskürtme avansında 432,92 g/h'ye kadar yükselmiş ve sonrasında 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde 239,08 g/h'ye gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansındaki NO_x değeri 51,16 g/h olarak modellenmiş, 25° KMA püskürtme avansında bu değer 415,88 g/h'ye çıkmış ve sonrasında püskürtme avansının artışıyla beraber 228,6 g/h'ye gerilemiştir. 1000 bar püskürtme basıncında aynı püskürtme avanslarında ortaya çıkan NO_x sırasıyla 98,2 g/h, 393,72 g/h ve 173,48 g/h olarak modellenmiştir. Bu değerler 1200 bar püskürtme basıncında karşımıza 78,72 g/h, 379,36 g/h ve 161,68 g/h olarak çıkmıştır. Her bir püskürtme basıncında pik NO_x emisyonunun elde edildiği püskürtme avansı baz alınarak, püskürtme 10° KMA erken yapıldığında 600 bar püskürtme basıncında NO_x salımları ilk duruma göre %55'ine gerilemiş, 800 bar püskürtme basıncında bu değer %54,9'una, 1000 bar püskürtme basıncında %44,1'ine ve 1200 bar püskürtmeye basıncında ise %42,6'sına gerilemiştir.



Şekil 4.101 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

Şekil 4.102'de 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan NO_x emisyonları görülmektedir. Silindir içerisine giren enerji içeriğinin artışıyla bağlı olarak tahmin edileceği üzere NO_x emisyonları artış sergilemiştir. Konvansiyonel dizel yanması bölgesinde 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan NO_x değeri tahmin edileceği üzere daha fazla artış göstermiştir. Bunun altında yatan sebep konvansiyonel dizel yanmasında

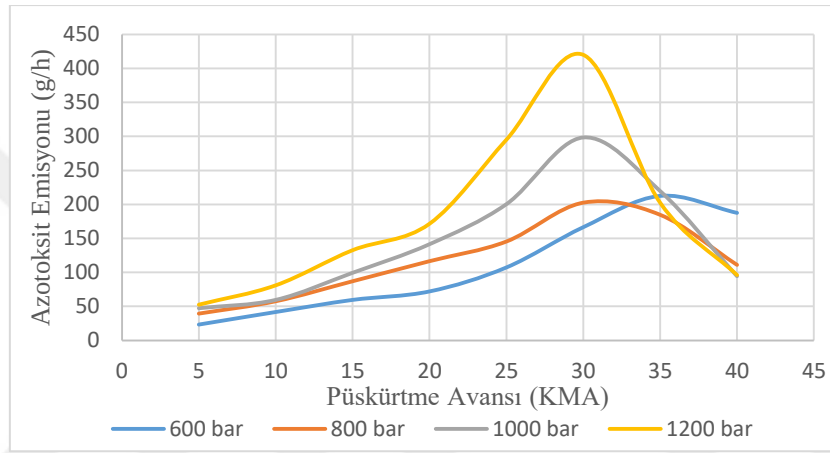
püskürtme basıncı artışının yanmayı iyileştirici etki göstermesidir. Erken püskürtme bölgesinde ise yüksek püskürtme basınçlarının daha düşük NO_x ortaya koyma eğilimi devam etmiştir. 35° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak 1,06° KMA ve 1,71° KMA TG farkı gözlemlenmiştir. Yanmanın başlangıç noktasında ortaya çıkan bu küçük farklılık bu seviyede emisyon farkını ortaya koyabilir nitelikte değildir. Bu bölgedeki emisyon düşüşünün esas sebebi yanma süreci uzunluğunun püskürtme basıncının artışıyla %60 ve %100 dolaylarına kadar artış sergilemesi olarak değerlendirilmiştir. Yanmanın yavaşlamasına paralel olarak 100 K üzerinde pik sıcaklık farklılıkları yaşanmış ve bu durum da kuvvetli bir etki olarak bu farklılığı doğuran bir diğer önemli faktör olmuştur. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 92,68 g/h NO_x'a yol açarken, 25° KMA püskürtme avansında bu değer 619,16 g/h değerine çıkmış ve sonrasında düşüş eğilimi başlayarak 40° KMA püskürtme avansında 360,24 g/h'ye gerilemiştir. 800 bar ve 1000 bar püskürtme basıncında da pik NO_x emisyonu 25° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansında 125,48 g/h, 25° KMA püskürtme avansında 530,04 g/h ve 40° KMA püskürtme avansında da 311,72 g/h NO_x emisyonu modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 151,88 g/h, 641,56 g/h ve 274,52 g/h değerlerini almıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 151,52 g/h olan NO_x, 20° KMA püskürtme avansında 872,6 g/h'ye yükselerek pik değerine ulaşmış, sonrasında düşüşe geçerek 40° KMA püskürtme avansında 218,44 g/h değerine gerilemiştir. NO_x emisyonunu pik yaptığı püskürtme avansı baz alınarak, püskürtme avansının 10° KMA arttırıldı durumunda ortaya çıkan NO_x değeri 600 bar püskürtme basıncında %60'ına gerilerken, püskürtme basıncının artışıyla birlikte 1200 bar püskürtme basıncında %47'sine gerilemiştir.



Şekil 4.102 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

Şekil 4.103 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan NO_x emisyonlarını göstermektedir. Motor hızındaki artışla beraber NO_x emisyonlarının genel olarak tırmanışa geçmiş olduğu söylenebilir. Fakat çalışma aralığı içerisindeki 5° KMA ve 10° KMA gibi düşük püskürtme avanslarında NO_x emisyonunun artış eğiliminin düşük çıktığı görülmüştür. Hatta 15° KMA püskürtme avansında da büyük oranda bu eğilim göze çarpmaktadır. 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında TG değerleri incelendiğinde yanmanın genişleme stoğunda başladığı görülmektedir. Böylelikle pik yanma sıcaklığı değerleri daha düşük seviyede kalmış ve aynı zamanda genişleme etkisiyle yüksek sıcaklık bandında geçirilen süre düşüş göstermiştir. MK yanma stratejisini gerçekleyen bu bölgede NO_x emisyonları düşük çıkmıştır. Grafik üzerindeki eğrilerin sol tarafında görülen düşük artış eğiliminin sebebi budur. Konvansiyonel dizel yanması ve PCCI bölgesinde ise 1000 dev/dak motor hızına göre aynı yakıt püskürtme kütlelerinde artış ortaya çıkmıştır. Bunun haricinde genel eğilimler açısından bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Düşük püskürtme basınçlarında püskürtme avansının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan değişim daha düşük seviyelerdedir. Püskürtme basıncı arttıkça ortaya çıkan değişimler karışım iç yapısındaki farklılaşmaya bağlı olarak daha büyük değişimlere yol açmıştır. Buna ilaveten püskürtme basıncı arttıkça pik NO_x değerinin daha küçük püskürtme avanslarında ortaya çıkma eğilimi burada da gözlemlenmiştir. Aynı zamanda pik NO_x salımının elde edildiği püskürtme avansı sonrasında, püskürtme avansı arttıkça öncesindeki artış gradyanına göre daha büyük azalma gradyanı gözlemlenmeye devam etmiştir. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 23,24 g/h NO_x ortaya koymuş, bu değer 35°

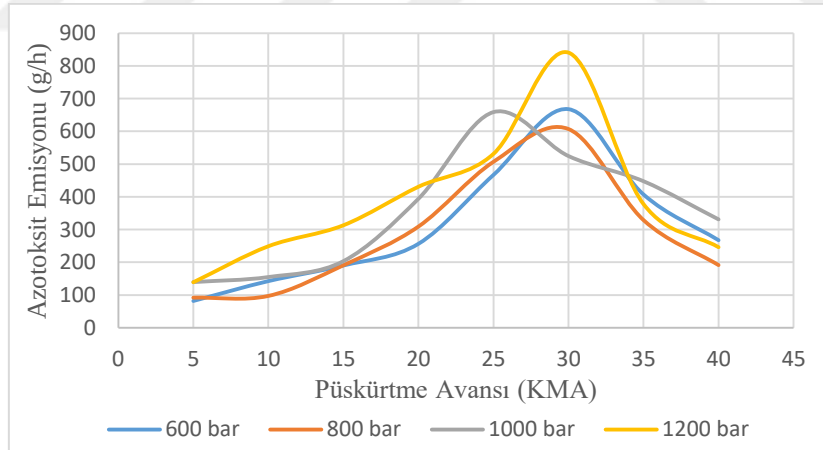
KMA püskürtme avansında 212,52 g/h'ye çıkmış, püskürtme avansının daha da artışıyla NO_x emisyonları tekrardan düşüşe geçmiş ve 187,52 g/h'ye gerilemiştir. Diğer püskürtme basınçlarında en büyük NO_x emisyonu 30° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 39,36 g/h, 30° KMA püskürtme avansı 202,52 g/h ve 40° KMA püskürtme avansı 111 g/h NO_x emisyonu ortaya koymuştur. 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 47,24 g/h, 298,44 g/h ve 94,28 g/h değerini almıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değerler 52,52 g/h, 420 g/h ve 96,12 g/h olarak modellenmiştir.



Şekil 4.103 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

Şekil 4.104 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan NO_x emisyonlarını göstermektedir. Bir önceki veri setine göre püskürtülen yakıt kütlelerinin artışıyla küçük püskürtme avanslarında görülen yavaş artım aralığı belli ölçülerde baskılanmıştır. Yanma odasına giren yakıt miktarındaki artış hem TG'yi hem de yanma sürecini kısaltmış ve bu bölgede özellikle 1200 bar püskürtme basıncında NO_x artış eğilimi hız kazanmıştır. Her bir püskürtme basıncında ortaya çıkan pik NO_x değeri 25° KMA ve 30° KMA püskürtme avans aralığında gözlemlenmiştir. NO_x açısından eğrilerin tepe noktası aşıldıktan sonra daha hızlı düşüş trendinin ortaya çıkma eğilimi devam etmektedir. Bu veri setinde 25° KMA püskürtme avansı sonrasında, püskürtme basıncı düştükçe ortaya çıkan pik yanma sıcaklıklarının artmış olduğu görülmüştü. Ancak 25° KMA ve daha büyük püskürtme avanslarında, yani PCCI bölgesinde püskürtme basıncı değişimine bağlı olarak NO_x emisyonları açısından sabit bir eğilim ortaya çıkmamıştır. Yani pik sıcaklık bu bölgelerdeki NO_x emisyonunu etkileyen birinci faktör olarak

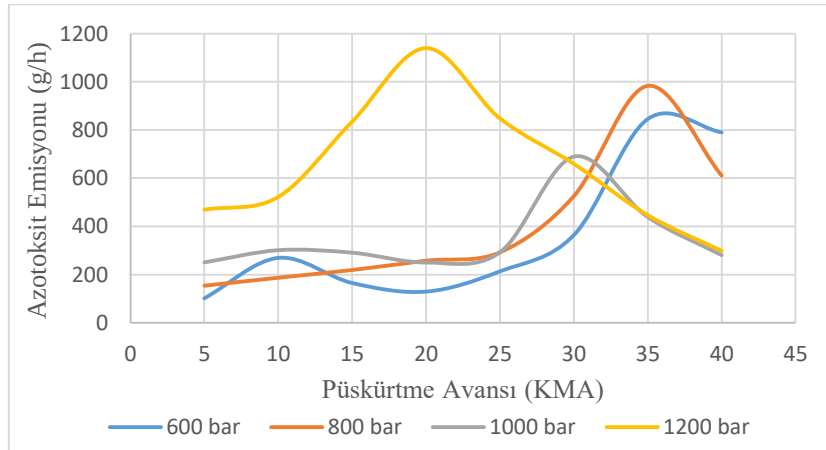
değerlendirilmeyecektir. Bu bölgede yanma süreci itibariyle de püskürtme basıncı artışına bağlı olarak yanma sürecinin uzadığı görülmüştür. Ancak yüksek sıcaklık bölgesinde geçirilen süre ve yanma odası içerisinde ortaya çıkan lokal hava fazlalık katsayısı dağılımına bağlı olarak böyle bir sonuç ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 81,88 g/h NO_x emisyonuna yol açarken, 30° KMA püskürtme avansı 667,8 g/h ve 40° KMA püskürtme avansı da 267,48 g/h NO_x emisyonuna yol açmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan NO_x değerleri ise sırasıyla 91,96 g/h, 607,08 g/h ve 191,44 g/h olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 139,48 g/h NO_x ortaya koymuş, bu değer 25° KMA püskürtme avansında 658,84 g/h'ye çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansında 331,12 g/h'ye gerilemiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise en küçük püskürtme avansı 139 g/h NO_x ortaya koyarken, 25° KMA püskürtme avansında 840,56 g/h ile pik değer ortaya çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansında bu değer 246,12 g/h'ye gerilemiştir. Her bir püskürtme basınç serisinde en yüksek NO_x değeri elde edilen noktaya göre püskürtme avansı 10° KMA arttırıldığında NO_x değerleri ilk durumun %30 ile %68 arasına kadar gerileme göstermiştir.



Şekil 4.104 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

Şekil 4.105'te 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan NO_x değerleri sunulmuştur. Bu veri setinde de püskürtme basıncı arttıkça ortaya çıkan pik NO_x değerinin yakalandığı püskürtme avans değeri ÜÖN'ye bir miktar daha yaklaşmıştır. Özellikle 1200 bar püskürtme basıncında bu durum oldukça belirgin olarak kendini var etmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan pik NO_x değeri 20° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. 5°

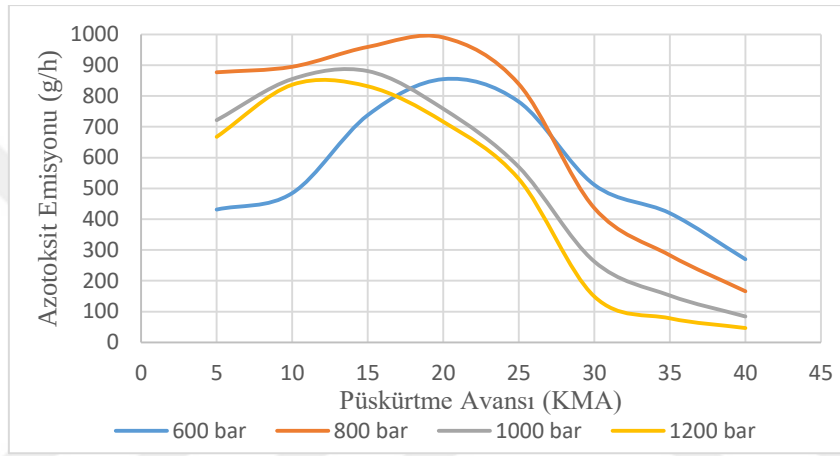
KMA ile 30° KMA aralığında en yüksek NO_x bu püskürtme basıncında ortaya çıkmıştır. Pik noktası aşıldıktan sonra, püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan hızlı düşüş eğilimi neticesinde 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde ise en düşük NO_x değeri ortaya çıkmıştır. Bu veri setinde şu ana kadar gözlemlenmeyen harici bir eğilim ortaya çıkmamıştır. Fakat püskürtme basıncı artışının bu motor yükünde oldukça belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan NO_x emisyonları 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı için 101,84 g/h olarak, 35° KMA püskürtme avansında 845,63 g/h olarak ve 40° KMA püskürtme avansında ise 790,28 g/h olarak modellenmiştir. Bu püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı pik NO_x değerinin elde edildiği püskürtme avans değeridir. 800 bar püskürtme basıncında dönüm noktası 35° KMA püskürtme avansıdır ve 5° KMA püskürtme avansında 154,08 g/h olan NO_x emisyonu, dönüm noktasında 983,26 g/h'ye erişmiş ve 40° KMA püskürtme avansı değerinde 610,84 g/h'ye gerilemiştir. 1000 bar püskürtme basıncında en küçük püskürtme avansında 250,84 g/h NO_x modellenmiş, 30° KMA püskürtme avansında gözlemlenen dönüm noktasında 689,72 g/h NO_x ortaya çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansında ise bu değer 281 g/h'ye gerilemiştir. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 469,52 g/h, 20° KMA püskürtme avansında gözlemlenen dönüm noktasında 1139,84 g/h ve 298,4 g/h olarak karşımıza çıkmıştır.



Şekil 4.105 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

Şekil 4.106'da 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan NO_x değerleri sunulmuştur. Bu verisi setinde ortaya çıkan değişim eğilimleri NO_x için PCCI bölgesinde anlamlı sonuçlar ortaya koymaktadır. Fakat geç püskürtme ve konvansiyonel yanma şartlarında ortaya çıkan NO_x ilişkilerini

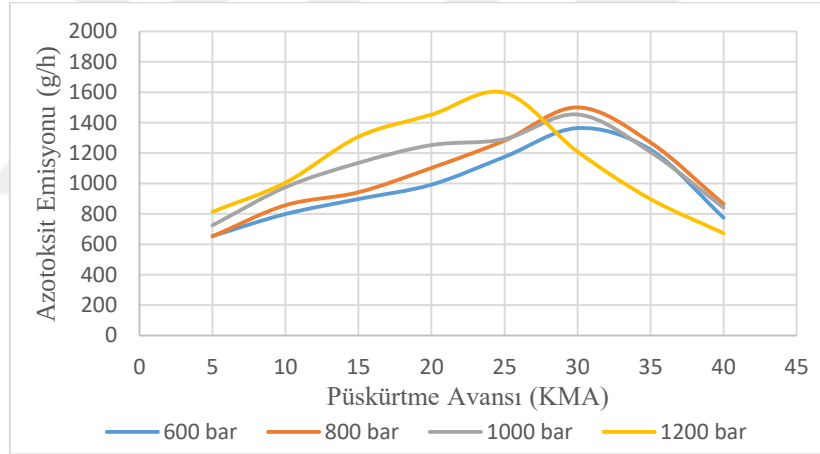
tutarlı bir şekilde açıklamak pek mümkün değildir. Bölüm 4.13 dahilinde CO emisyonları incelenirken de bu veri setinde benzer düzensizlikler ve bilimsel bilgi ile izahı pek mümkün olmayan eğilimler gözlemlenmişti. Burada da benzer sonuçların ortaya çıkması deneysel ölçümler esnasında bu veri seti içerisinde yer alan noktaların bir kısmından sağlıklı veri elde edilemediği, numune olarak değerlendirilen egzoz gazının umulanın dışında bir kompozisyona sahip olduğu şüphesini güçlendirmektedir. Nihayetinde bu veri seti sağlıklı bir şekilde NO_x emisyonu açısından modellenememiştir. Bu gerekçelerle Şekil 4.106 içerisindeki veriler detaylı bir şekilde yorumlanmamıştır.



Şekil 4.106 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

Şekil 4.107 üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme kütleğinde ortaya çıkan NO_x emisyonları görülmektedir. Bu veri setinde konvansiyonel dizel yanması bölgesinde daha büyük püskürtme basınçlarının daha fazla NO_x emisyonuna yol açması net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, PCCI bölgesinde yüksek püskürtme basınçlarında NO_x düşüş hızı daha yüksek seviyede seyretmiştir. Aynı zamanda motor hızının artışına bağlı olarak kayda değer seviyede NO_x artışı gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında 25° KMA ve 35° KMA püskürtme avansları arasında ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerleri oldukça küçük farklılıklar barındırmaktadır. Fakat yanma süreci değerleri arasında ciddi farklılıklar ortaya çıkmıştır. Yani burada bu düşüşü sağlayan temel faktörün yanma hızından yola çıkarak karışımın lokal hava fazlalık katsayısı değerleri yani karışımın homojenliği olduğu rahatlıkla söylenebilir. 600 bar püskürtme basıncında ÜÖN'ye en yakın konumda gerçekleştirilen yakıt enjeksiyonunda 654,4 g/h NO_x modellenmiş, püskürtme avansının artışıyla beraber

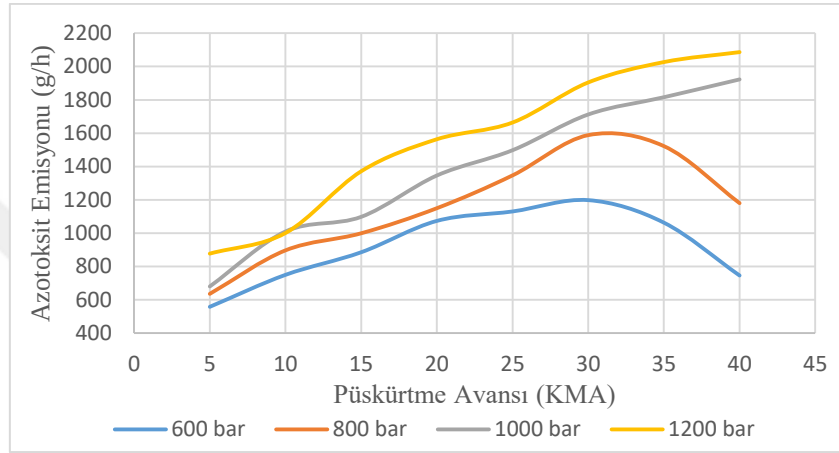
30° KMA püskürtme avansında 1364,36 g/h ile ilgili püskürtme basıncı eğrisinin tepe noktasına erişilmiş ve 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde de 774,92 g/h NO_x emisyonu modellenmiştir. 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında ortaya çıkan eğrilerin dönüm noktası da 30° KMA püskürtme avansında konumlanmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan karakteristik noktalarındaki NO_x değerleri sırasıyla 651,92 g/h, 1500,48 g/h ve 864,92 g/h olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ise bu değerler 724,28 g/h, 1452,92 g/h ve 840,72 g/h olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 813,92 g/h NO_x emisyonuna yol açmış, 25° KMA püskürtme avansında bu değer 1597,16 g/h'ye ilgili püskürtme basıncındaki en yüksek değerine erişmiş ve sonrasında 40° KMA püskürtme avansında da 672,68 g/h'ye gerilemiştir. Her bir püskürtme basıncında en büyük NO_x emisyonunun elde edildiği püskürtme avansına kıyasla, 10° KMA erken püskürtme yapıldığında NO_x emisyonları ilk durumun %57'si ile %47'si bandına kadar düşüş sergilemiştir.



Şekil 4.107 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

Şekil 4.108’de 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme kütlelerinde ortaya çıkan NO_x emisyonları görülmektedir. Bu veri setinde 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçlarında daha önceki veri setlerinde de ortaya çıkan eğilimler gözlemlenmiştir. Yani püskürtme avansının artışıyla beraber NO_x emisyonları belli bir artış sergilemiş, devamında ise düşüşe geçmiştir. Fakat 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında böyle bir eğilimden söz edilememektedir. Bu iki püskürtme basıncı serisinde püskürtme avansının artışıyla NO_x emisyonlarının düzenli bir şekilde artış sergilediği görülmüştür. Bu durum mevcut motor hızı ve motor yükünde PCCI stratejisinin gerçekleştirilemediği ve erken süreçte yapılan

püskürtmenin motoru dizel vuruntusu eğilimine sokarak hızlı bir yanma gerçekleştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu şartlar neticesinde NO_x emisyonlarında düşüş ortaya çıkmamıştır. Daha önceki inceleme başlıklarında da bu bölgede PCCI stratejisinin uygulanabilir olmadığına yönelik performans çıktıları elde edilmişti. Bu iki püskürtme basıncında erken püskürtme şartlarında NO_x düşüşü elde edilememesi daha önceki inceleme başlıklarında bu bölgede PCCI şartlarının sağlanamadığına dair oluşturulan tespit ve yorumları doğrular niteliktedir.



Şekil 4.108 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan azot oksit emisyonları

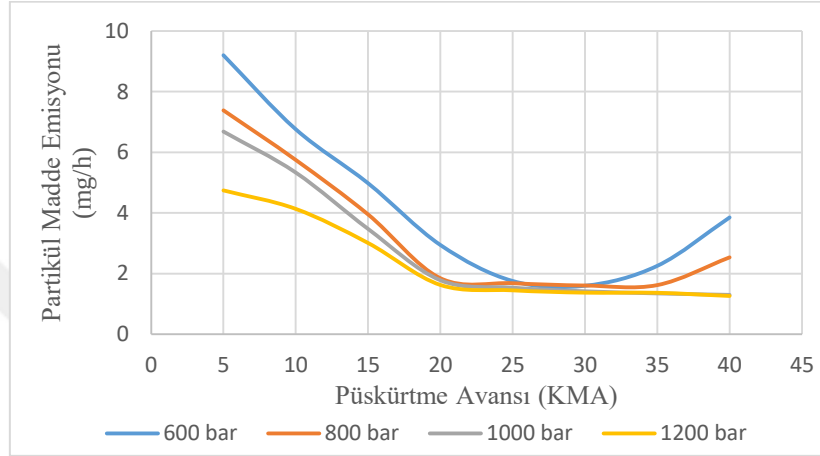
4.15 PM Emisyonlarının İncelenmesi

PM ve NO_x emisyonları PCCI stratejisinde kontrol altına alınması hedeflenen iki emisyonudur. Konvansiyonel dizel yanmasında NO_x ile PM arasında oluşum mekanizması açısından bir açmaz bulunmaktadır. Bu iki emisyonda yanma stratejilerine müdahale edilerek eşzamanlı düşüş yaratmak konvansiyonel dizel yanmasında mümkün değildir. Fakat daha önce de değinildiği üzere PCCI stratejisinde bu mümkündür. PM emisyonlarını değerlendirirken en temel dayanak noktası yanma odası içerisindeki lokal hava fazlalık katsayısıdır, aynı zamanda yanma esnasında ortaya çıkan sıcaklık değerleri de büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla PM emisyonlarının incelenmesinde TG süreçleri, yanma süreci uzunluğu ve silindir içi pik sıcaklık değerlerine atıfta bulunarak inceleme yapmak gerekmektedir.

1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan PM emisyon değerleri Şekil 4.109’da görülmektedir. Fark edileceği üzere püskürtme

avansının 5° KMA'dan 30° KMA'ya artışı kadar PM emisyonlarında düşüş gözlemlenmiştir. Sonrasında ise 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında bu düşüş son derece küçük değişimlerle kendini var etmeye devam etmiştir. 800 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı, 600 bar püskürtme basıncında ise 30° KMA püskürtme avansı sonrasında PM değerleri artışa geçmiştir. Veri seti içerisinde karşımıza çıkan bu eğilim, diğer veri setlerinde gözlemlenmemiştir ve daha farklı eğilimler ortaya çıkmıştır. Yine de bu veri setinde ortaya çıkan sonuçlar tutarlı bir şekilde yorumlanabilir durumdadır. Bu verilerin elde edildiği motor hızı, motorun genel çalışma aralığı itibarıyla düşük hız bölgesindedir. Bu şartlarda silindir içerisindeki hava hareketleri istenilen düzeye ulaşamamaktadır. Hava hareketlerinin yetersizliği yakıt ile havanın yeteri düzeyde karışmasına olanak tanımamakta ve mikro karışım dengesizliklerini yeterli düzeyde bertaraf edememektedir. Bir diğer yandan püskürtülen yakıt kütesinin düşüklüğü de yanma başladıktan sonra, yanma odası içerisinde ulaşılacak türbülans seviyelerini aşağıya çekmektedir. Genel bir eğilim olarak püskürtme avansının belli bir değere artışı kadar PM emisyonlarının artması ve sonrasında da düşüşe geçmesi beklenmektedir. Ancak burada tam tersi bir durum ortaya çıkmıştır. Bu durumun gerekçeleri ise şu şekilde açıklanabilir. 5° KMA püskürtme avansında yanma başlangıcı genişleme fazına kaymaktadır. Aynı zamanda püskürtmenin sona ermesi de genişleme fazında gerçekleşmektedir. Bu şartlarda enjeksiyonun sonlarına doğru yanma odasına giren yakıt zerrecikleri hava ile yeterli süre karışmamakta ve PM oluşumu bu şartlarda tetiklemektedir. Püskürtme basıncı düştükçe bu eğilimin daha da şiddetlenmesi beklenmektedir. Nitekim bu durum sonuçlara yansımıştır. Püskürtme avansının artarak yanmanın termodinamik olarak daha makul bir zaman dilimine çekilmeye başlamasıyla PM emisyonları düşüş eğilimine girmiştir. Bu veri setinde 15° KMA ve 20° KMA püskürtme avanslarında TG sürecinin artmaya başladığı Bölüm 4.1 içerisinde belirtilmiştir. Böylelikle karışım homojenliği artmaya başlamış ve PM değerleri daha makul bir banda gerilemiştir. Bu şartlarda püskürtme basıncı arttıkça daha düşük PM değerleriyle karşılaşmamız bu değerlendirmeyi destekler niteliktedir. 20° KMA püskürtme avansı sonrasında 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçları, püskürtme avansı arttıkça çok sınırlı da olsa PM düşüş eğilimi görülmüştür. Bu şartlarda hala daha karışım homojenliğinin artış sergilediği söylenebilir. Fakat 800 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı ve 600 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansı sonrasında PM değerleri

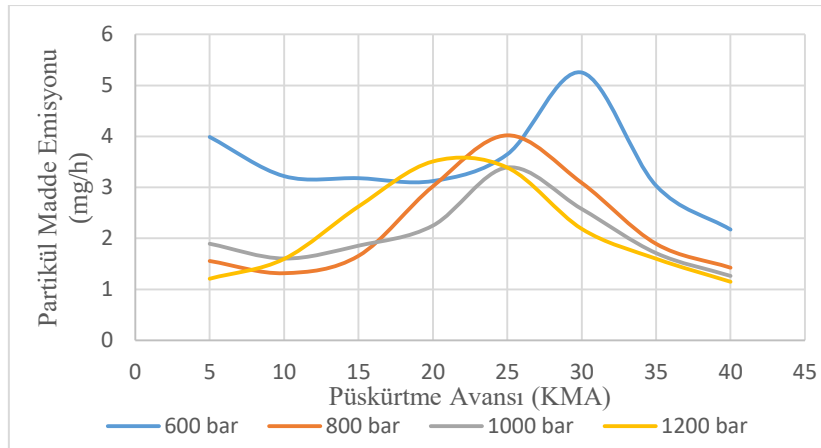
tekrar artışa geçmiştir. Bunun altında yatan sebep ise püskürtme basıncının düşüşüne bağlı olarak ortalama damlacık çaplarının artış göstermesidir. Ortalama çapı artış gösteren bu yakıt zerrecikleri, yetersiz türbülans seviyesindeki ortamda daha düşük zorlanmış ısı taşınım katsayısı ile ısı çekmekte ve damlacık sıcaklığı daha yavaş artmaktadır. Bu şartlarda damlacık merkezinde yeteri kadar buharlaşma olmaksızın yanma ortaya çıkacaktır. Bu da partikül madde emisyonlarını arttırıcı bir etkinlik göstermiştir.



Şekil 4.109 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan PM emisyon değerleri Şekil 4.110 üzerinde görülmektedir. Grafik üzerindeki veriler incelendiğinde püskürtme basıncı azaldıkça ortaya çıkan pik PM değerlerinin artış eğiliminde olduğu görülmüştür. Aynı zamanda daha büyük püskürtme basınçlarında pik değere daha küçük püskürtme avanslarında ulaşılmıştır. PCCI rejimini gerçekleyen büyük püskürtme avanslarında daha yüksek püskürtme basınçları ile çalışmak daha kabul edilebilir seviyede PM emisyonuna yol açmaktadır. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansından başlayarak, 10° KMA püskürtme avansında belirgin bir şekilde görülmek üzere, 15° KMA püskürtme avansına kadar PM emisyonlarında düşüş ortaya çıkmıştır. 800 ve 1000 bar püskürtme basınçlarında ise 10° KMA püskürtme avansına kadar PM değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Buradaki düşüşün sebebi bir önceki veri setinde yaşanan düşüslere yönelik yapılan açıklamalar ile birebir örtüşmektedir. Püskürtme basıncı arttıkça buradaki değişim eğiliminin azalması ve hatta 1200 bar püskürtme basıncında bu durumun ortaya çıkışı yapılan yorumu doğrular

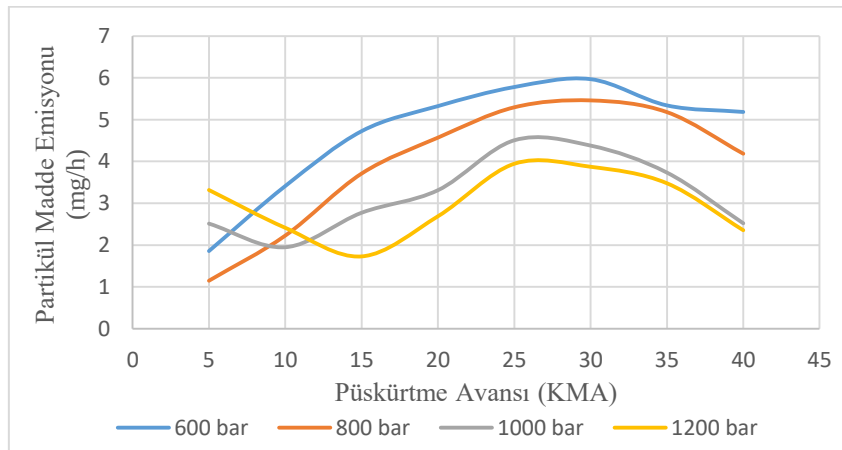
niteliktedir. 600 bar püskürtme basıncı 30° KMA püskürtme avansında, 800 ve 1000 bar püskürtme basıncı 25° KMA püskürtme avansında ve 1200 bar püskürtme basıncı 20° KMA püskürtme avansında her bir püskürtme basınç serisindeki en büyük PM değerlerini ortaya koymuştur. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 3,988 mg/h PM emisyonu ortaya çıkarken 15° KMA püskürtme avansında bu değer 3,18 mg/h'ye gerilemiştir. Sonrasında 30° KMA püskürtme avansında 5,252 mg/h ile tepe noktası gözlemlenmiş, sonrasında ortaya çıkan hızlı düşüş eğilimiyle 40° KMA püskürtme avansında da 2,172 mg/h PM emisyonu ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncı serisinde 5° KMA püskürtme avansında 1,556 mg/h PM modellenmiş, 10° KMA püskürtme avansında bu değer 1,316 mg/h'ye gerilemiş, 25° KMA püskürtme avansında 4,02 mg/h değerine erişmiş ve sonrasında düşüş eğilimine girerek 40° KMA püskürtme avansında 1,424 mg/h değerini almıştır. 1000 bar püskürtme serisinde bu değerler sırasıyla 1,894 mg/h, 1,604 mg/h, 3,39 mg/h ve 1,263 mg/h olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncı serisinde 5° KMA püskürtme avansında 1,208 mg/h olarak modellenen PM, püskürtme avansının artışıyla beraber 20° KMA püskürtme avansında 3,508 mg/h değerine ulaşmış ve 40° KMA püskürtme avansında 1,148 mg/h değerine gerilemiştir.



Şekil 4.110 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

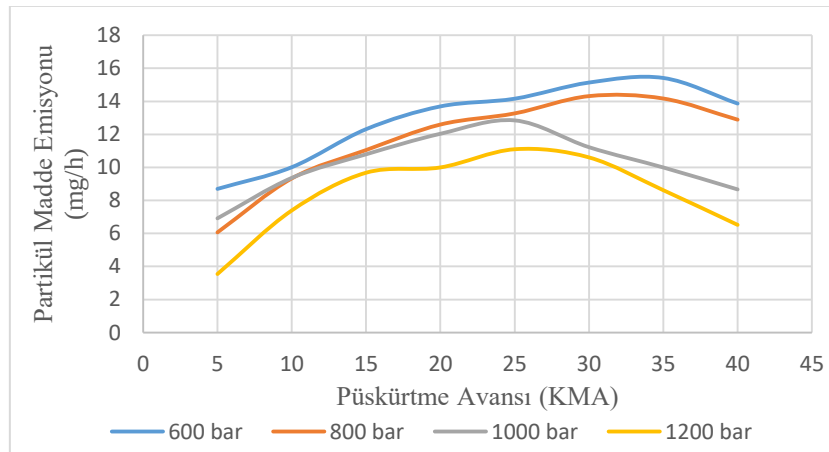
1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt püskürtme şartında PM emisyon değerleri Şekil 4.111 üzerinde görülmektedir. Püskürtülen yakıt kütlelerinin artışıyla konvansiyonel yanma bölgesi ve PCCI rejiminde düşük püskürtme basınçlarının daha yüksek PM emisyonuna yol açtığı daha belirgin ayrımlara gözlemlenmiştir. Aynı zamanda motor yükü artışına bağlı olarak da PM emisyonlarında umulduğu

üzere artış görülmüştür. Fakat 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında MK yanma bölgesinde sınırlı da olsa PM artışı karşımıza çıkmıştır. Bunun sebebi ise artan motor yükü neticesinde ilgili bölgede diğer püskürtme basınçlarına nazaran daha düşük TG süreçlerinin gözlemlenmesi ve yanma başladıktan sonra devam eden enjeksiyon neticesinde difüzyon alevinin bir miktar daha baskın olmasıdır. Bu şartlarda enjektör nozul çıkış bölgesindeki yakıt kısa sürede yanmaya katılmış fakat ilgili bölgeye yeterince oksijen taşınamamıştır. Bunun haricinde son derece beklentiye uygun sonuçlar gözlemlenmiştir. 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansı, 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında ise 25° KMA püskürtme avansı en yüksek PM değerlerini ortaya koymuştur. Püskürtme basınca arttıkça PCCI bölgesinde karşılaşılan PM düşüş oranı da daha yüksek seviyede karşımıza çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,856 mg/h PM modellenmiş, püskürtme avansının 30° KMA'ya ulaşmasıyla bu değer 5,968 mg/h'ye çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansında 5,184 mg/h'ye gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 1,146 mg/h, 5,46 mg/h ve 4,385 mg/h olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında en düşük PM değeri 10° KMA püskürtme avansında karşımıza çıkmaktadır. 10° KMA püskürtme avansında 1,984 mg/h PM emisyonu modellenmiş, bu değer 25° KMA püskürtme avansında 4,506 mg/h değerine çıkmış ve sonrasında 2,52 mg/h'ye kadar gerilemiştir. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 2,412 mg/h, 3,944 mg/h ve 2,354 mg/h olarak modellenmiştir.



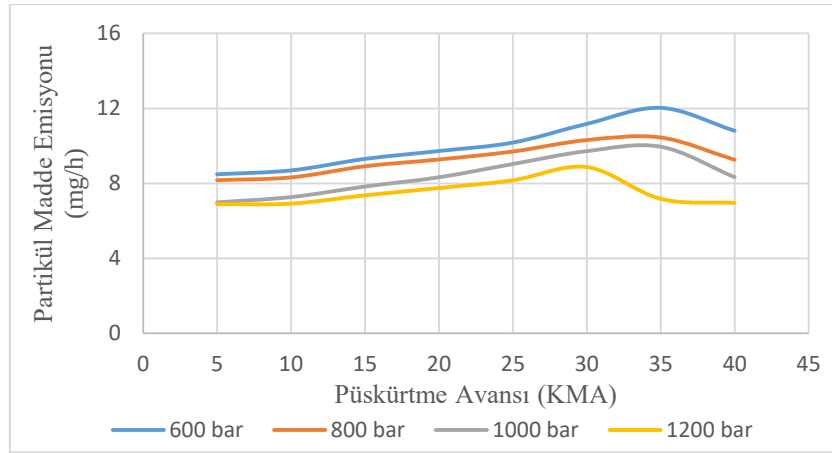
Şekil 4.111 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme şartında PM emisyonları Şekil 4.112’de sunulmuştur. Bu veri setinde eşit yakıt püskürtülmesi şartında motor hızının değişimiyle yani Şekil 4.109’a göre, daha öngörülebilir sonuçlar karşımıza çıkmıştır. Konvansiyonel yanma bölgesi veya PCCI rejiminde her bir püskürtme avansında püskürtme basıncı arttıkça PM düşüşü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda püskürtme basıncı arttıkça ilgili basınç serisinde elde edilen pik PM daha makul değerlere gerilemiştir. PCCI bölgesinde yüksek püskürtme basınçları ile çalışmanın yaratacağı PM düşüşü belirgin olarak karşımıza çıkmaktadır. Konvansiyonel yanma bölgesinde farklı püskürtme basınçları arasında %40’ın altında PM farklılıkları ortaya çıkarken PCCI bölgesinde ortaya çıkan bu fark %100 dolaylarına kadar çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında 8,697 mg/h PM modellenmiş, püskürtme avansının 35° KMA değerine artışıyla bu değer 15,414 mg/h’ye ulaşmış ve ardından 40° KMA püskürtme avansında 13,864 mg/h’ye gerilemiştir. 800 bar püskürtme basıncında en yüksek PM değeri 30° KMA püskürtme avansında görülmüştür. 800 bar püskürtme basıncında karşımıza çıkan değerler sırasıyla 6,062 mg/h, 14,316 mg/h ve 12,889 mg/h’dir. 1000 bar püskürtme basıncında 5° KMA’da 6,914 mg/h PM modellenmiş, bu püskürtme basınç serisinde en yüksek PM emisyonu 12,845 mg/h ile 25° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmış, 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde ise bu değer 8,664 mg/h’ye gerilemiştir. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 3,543 mg/h, 11,097 mg/h ve 6,517 mg/h değerlerini almıştır. Bu püskürtme basıncında da 1000 bar püskürtme basıncına benzer şekilde en büyük PM değerine 25° KMA püskürtme avansında görülmüştür.



Şekil 4.112 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

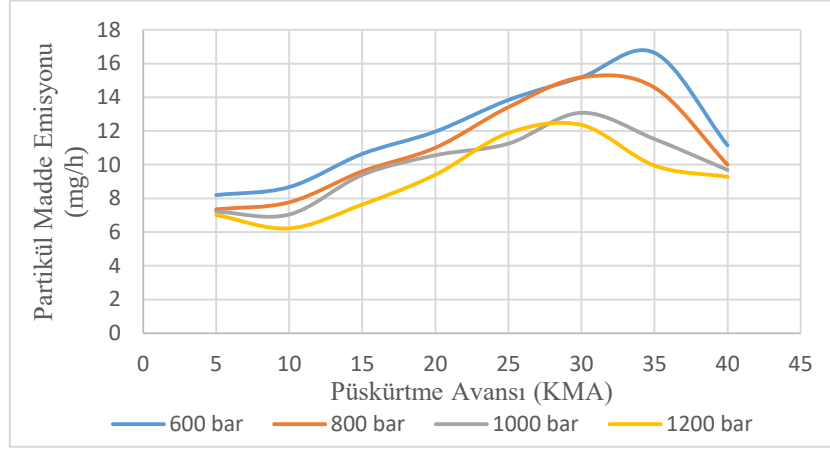
1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan PM emisyon değerleri Şekil 4.113'te sunulmuştur. Bu veri seti içerisinde gerek püskürtme avansı gerekse de püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak son derece net değişim eğilimleri ortaya çıkmıştır. Her bir püskürtme avansında püskürtme basıncı arttıkça PM değerlerinin düşüş sergilediği net bir şekilde görülmektedir. Özellikle PCCI bölgesinde yani çalışma aralığındaki büyük püskürtme avanslarında ortaya daha büyük farklılıklar çıkmıştır. Bir önceki veri setinde PCCI bölgesine geçişle beraber PM düşüşünde son derece ciddi oranlar ortaya çıkmıştı. Bu veri setinde ise motor yükünün bir miktar artmış olmasına rağmen bu denli büyük düşüş oranları ortaya çıkmamıştır. Püskürtme avansının 5° KMA'dan başlayarak en yüksek PM değerinin yakalandığı noktaya kadar artışıyla PM emisyonlarında ortaya çıkan artış hızı, bu noktanın sonrasında ortaya çıkan düşüş hızından daha küçük değerler almıştır. 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı en büyük PM emisyonunu ortaya koymuştur. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında ise 30° KMA püskürtme avansında bu değer ortaya çıkmıştır. Gerek bu veri setinde gerekse de daha önceki veri setlerinde ortaya çıkan en büyük PM değerinin elde edildiği püskürtme avansı, Bölüm 4.14 üzerinden de görüleceği üzere, en büyük NO_x emisyonunun elde edildiği püskürtme avansından biraz daha gecikmeli olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha basit bir ifadeyle PM emisyonları NO_x'a göre daha büyük püskürtme avanslarında düşüş eğilimine girmektedir. 600 bar püskürtme basıncında ÜÖN'ye en yakın şart olan 5° KMA püskürtme avansında 8,488 mg/h PM gözlemlenmiş, ÜÖN'ye en uzakta yapılan püskürtmede ise 10,81 mg/h PM ortaya çıkmıştır. Bu değerler sırasıyla 800 bar püskürtme basıncında 8,172 mg/h ve 9,264 mg/h olarak, 1000 bar püskürtme basıncında 6,992 mg/h ve 8,33 mg/h olarak ve 1200 bar püskürtme basıncında ise 6,891 mg/h ve 6,961 mg/h olarak modellenmiştir. Her bir püskürtme basıncı serisinde elde edilen pik değerler ve konumlar ise şu şekilde karşımıza çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan pik PM değeri 35° KMA püskürtme avansında 12,031 mg/h olarak, 800 bar püskürtme basıncında aynı konumda ve 10,315 mg/h olarak, 1200 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansında 9,724 mg/h olarak ve 1200 bar püskürtme basıncında 8,874 mg/h olarak modellenmiştir.



Şekil 4.113 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

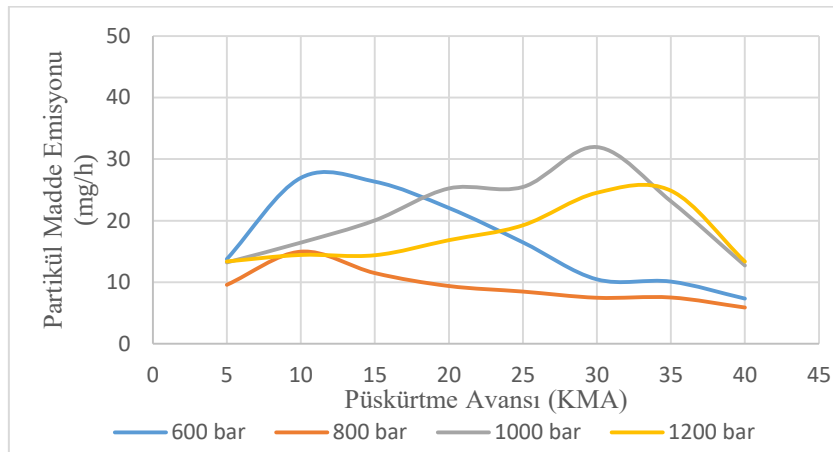
1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan PM emisyon değerleri Şekil 4.114’te sunulmuştur. Bul veri seti içinde püskürtülen yakıt kütlelerinin artışına bağlı olarak, yani motor yükü artışına bağlı olarak PM değerlerinde bir miktar artış gözlemlenmiştir. Fakat bu artış geç püskürtme şartlarında ortaya çıkan MK yanma bölgesinde karşımıza çıkmamaktadır. Ancak konvansiyonel yanma bölgesi ve PCCI rejiminde bu artış gözle görülebilir durumdadır. Püskürtme basıncının artışına bağlı olarak daha düşük seviyede PM emisyonlarının ortaya çıkışı genel bir eğilim olarak yine karşımıza çıkmıştır. Araştırma uzayı içerisindeki düşük motor yüklerinde püskürtme basıncı arttıkça PCCI bölgesindeki PM azalış eğiliminin hızlanmakta olduğu gözlemlenmiştir. Fakat burada görüldüğü gibi motor yükündeki artış neticesinde, yüksek püskürtme basınçlarında karşılaşılan PM emisyonu düşüşü daha küçük birinci türevlerle gerçekleşmiştir. Her bir püskürtme basıncı serisinde ortaya çıkan pik PM değeri püskürtme basıncı arttıkça daha küçük püskürtme avanslarına hapsolmuştur. 600 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı en büyük PM değerini ortaya koymuştur. 800 bar ve 1000 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansında pik değer elde edilmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise 25° KMA püskürtme avansında en büyük PM değeri ortaya çıkmıştır. En küçük püskürtme avansı, elde edilen en büyük PM değeri ve en büyük püskürtme avansı şartlarında ortaya çıkan PM değerleri sırasıyla şu şekildedir. 600 bar püskürtme basıncında karşımıza çıkan değerler 8,197 mg/h, 16,642 mg/h ve 11,154 mg/h’dir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler 7,353 mg/h, 15,187 mg/h ve 10,001 mg/h olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ise 7,214 mg/h, 13,082 mg/h ve

9,689 mg/h değerlerini almıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değerler 7,013 mg/h, 12,358 mg/h ve 9,278 mg/h olarak modellenmiştir.



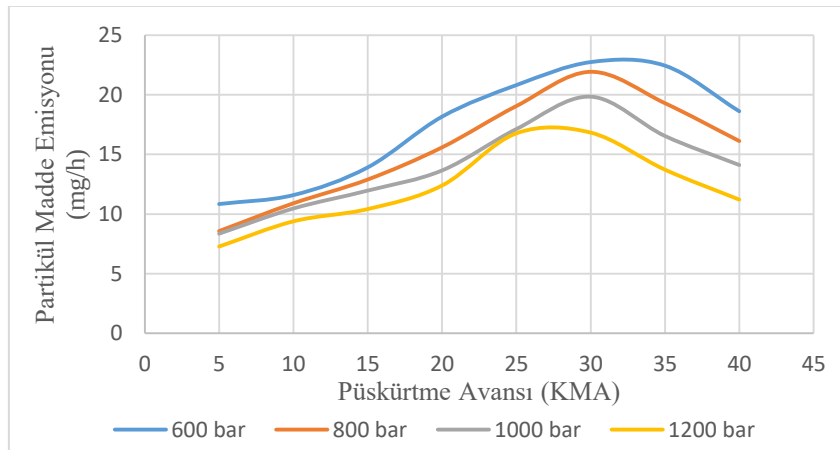
Şekil 4.114 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan PM emisyon değerleri Şekil 4.115'te sunulmuştur. Grafik üzerindeki eğrilerin genel değişim eğilimlerine bakıldığında açıklanabilir sonuçların ortaya çıkmadığı görülmektedir. Bu işletme şartlarında yani 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi altında elde edilen diğer emisyon verilerinde de benzer düzensizlikler ortaya çıktığı ve bu veri setinin sağlıklı bir şekilde modellenemediği görülmüştü. Deneyisel verilerin elde edilmesi esnasında emisyon ölçümü esnasında ortaya çıkan sorunlardan kaynaklandığı düşünülen bu durum sebebiyle bu veri seti içerisindeki eğriler yorumlanmamıştır.



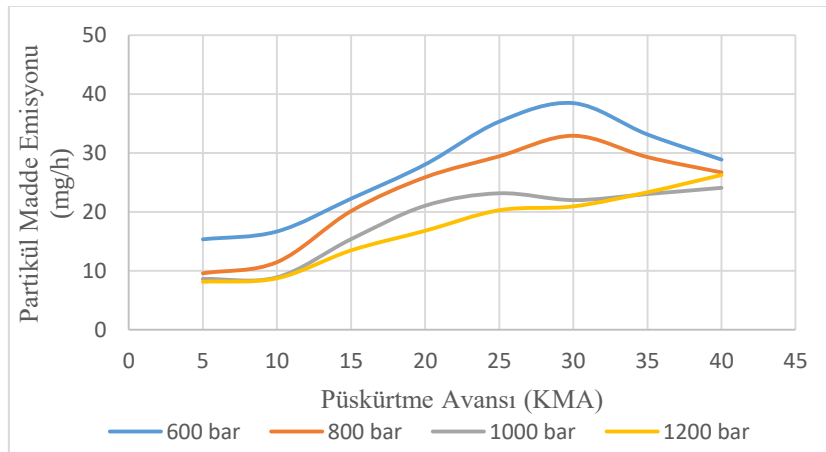
Şekil 4.115 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki PM emisyonları Şekil 4.116'da görülmektedir. Bu veri setinde net yorumlamalar yapmaya oldukça uygun sonuçlar ortaya çıkmıştır. Her bir püskürtme avansında püskürtme basıncının artırılmasıyla PM'nin düşüş sergilediği net olarak görülmektedir. Ayrıca püskürtme basıncı arttıkça, PM'nin eğilim itibariyle daha küçük püskürtme avansında düşüşe geçtiği de açıkça görülmektedir. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansında PM en yüksek değerine erişmiş ve sonrasında düşüşe geçmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değer 25° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. Motor hızının artışıyla da PM emisyonlarında bir miktar artış ortaya çıkmıştır. Motor hızının, maksimum moment devrini aştıktan sonraki belli bir hız değerinden itibaren böyle bir davranış sergilemesi de beklenen bir durumdur. 600 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 10,836 mg/h PM ortaya koymuş, devamında püskürtme avansının artışıyla 30° KMA püskürtme avansında bu değer 22,748 mg/h'ye ve en yüksek değerine erişmiş, sonrasında püskürtme avansının 40° KMA değerine ulaşması ile de PM değeri 18,62 mg/h değerine gerilememiştir. 800 püskürtme basıncında bu değerler sırası ile 8,568 mg/h, 21,933 mg/h ve 16,123 mg/h olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ise bu değerler 8,352 mg/h, 19,846 mg/h ve 14,112 mg/h olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 7,274 mg/h olarak modellenen PM emisyonu, 25° KMA püskürtme avansında en büyük değerine erişmiş ve 16,772 mg/h değerini almış, 40° KMA püskürtme avansında ise 11,208 mg/h olarak modellenmiştir.



Şekil 4.116 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan PM emisyon değerleri Şekil 4.117’de sunulmuştur. Motor yükünün artışıyla ortaya çıkan PM artış eğilimi burada da görülmüştür. 600 bar ve 800 bar püskürtme basınçları için daha önceki veri setlerinde yaşanan değişim eğilimi aynı şekilde görülmüştür. Her iki püskürtme basınç serisinde de püskürtme avansının artışıyla PM emisyonları ilk etapta artış sergilemiş, sonrasında ise düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. Her iki püskürtme basıncında da püskürtme avansının 30° KMA değerine artışı kadar PM emisyonu artış sergilemiştir. Sonrasında ise püskürtme avansının daha da artmasıyla düşüş yaşanmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 15,36 mg/h PM emisyonu ortaya çıkarken, 30° KMA püskürtme avansında bu değer 38,476 mg/h olarak modellenmiş ve 40° KMA püskürtme avansında 28,892 mg/h PM modellenmiştir. Benzer şekilde 800 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 9,594 mg/h, 32,942 mg/h ve 26,715 mg/h olarak karşımıza çıkmıştır. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında ise şu ana kadar karşılaşılmayan bir eğilim ortaya çıkmıştır. Bu iki püskürtme basıncında püskürtme avansı arttıkça düzenli olarak PM emisyonunda artış gözlemlenmiş ve erken püskürtme şartında da bir düşüş ortaya çıkmamıştır. Aynı verilerde Bölüm 4.14’te de görüldüğü üzere NO_x düşüşü gözlemlenmemiş ve artış meydana gelmişti. Bu durum dizel vuruntusunun oluşmaya başladığına ve bu sebeple erken bir zamanda yanmanın başlaması neticesinde difüzyonlu alev fazının yeterince baskılanamamasına işaret etmektedir. Dolayısıyla bu aralıkta PCCI stratejisini uygulamanın mümkün olmadığı görülmektedir.



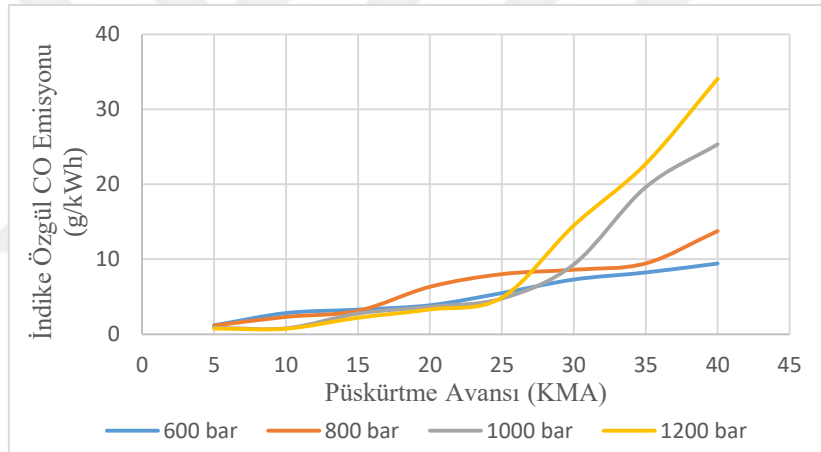
Şekil 4.117 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan partikül madde emisyonları

4.16 İndike Özgöl CO Emisyonlarının İncelenmesi

Bölüm 4.13'te g/h cinsinden CO emisyonları incelenmiştir. g/h veya ppm cinsinden ortaya çıkan emisyonlar egzoz gaz kompozisyonuna dair bilgi verse de taşıt kaynaklı emisyonların incelenmesinde yetersiz kalmaktadır. Çünkü esas olan belli bir güç arzı esnasında ortaya çıkan emisyon değerleridir. Bu sebeple özgül emisyon incelemeleri de çalışmaya dahil edilmiştir. Özgül emisyon değerlerinin artış veya azalış göstermesi g/h cinsinden emisyonu ve o andaki motor gücüne bağlıdır. OEB değerleri AVL-Boost programında arzu edilen düzeyde modellenemediği için OİB değerleri üzerinden indike güç hesaplanmış, efektif güce termodinamik model sonuçları içerisinde değinilmemiştir. Motor performansı üzerinde yapılan incelemeler indike parametrelere bağlı yapıldığı için özgül emisyon değerleri de indike özgül emisyon olarak sunulmuştur. Ortaya çıkan g/h cinsinden emisyonların değişim eğilimlerinin gerekçeleri ve OİB değişim trendlerinin gerekçeleri ilgili bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. OİB değerlerinden faydalanarak da indike güce geçmek mümkündür. Bu sebeple, bu alt başlık altında sayısal değerler üzerinden ortaya çıkan özgül emisyon seviyeleri hakkında bilgi verilmekle yetinilecektir.

1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında ortaya çıkan özgül CO emisyonu değerleri Şekil 4.118 üzerinde görülmektedir. ÜÖN'ye yakın yapılan enjeksiyonlarda daha düşük özgül CO emisyonu gözlemlenmiştir. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının 5° KMA'dan 10° KMA'ya çıkışıyla neredeyse stabil seyreden değerler karşımıza çıkmış, hatta bu aralıkta çok küçük de olsa özgül CO düşüşü ortaya çıkmıştır. Bu iki püskürtme basıncında, püskürtme avansının artışıyla özgül CO değerlerinde artış görülmüştür. 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının artışıyla özgül CO değerleri düzenli artış içerisindedir. Geç püskürtme şartlarında karşımıza çıkan MK stratejisi ve konvansiyonel dizel yanması bölgesinde özgül CO emisyonları gerek püskürtme basıncının gerekse de püskürtme avansının değişimine bağlı olarak çok büyük farklılıklar göstermemiştir. Fakat PCCI bölgesinde özgül CO farklılıkları daha belirgin durumdadır. Erken püskürtme şartında, püskürtme avansı arttıkça özgül CO değerinde ortaya çıkan değişim hızlanmaktadır. Aynı zamanda bu aralıkta püskürtme basıncının artışı özgül CO emisyonunu arttırmıştır. Grafiğin genel eğilimine bakıldığında g/h cinsinden CO emisyonları ile büyük benzerlik göze

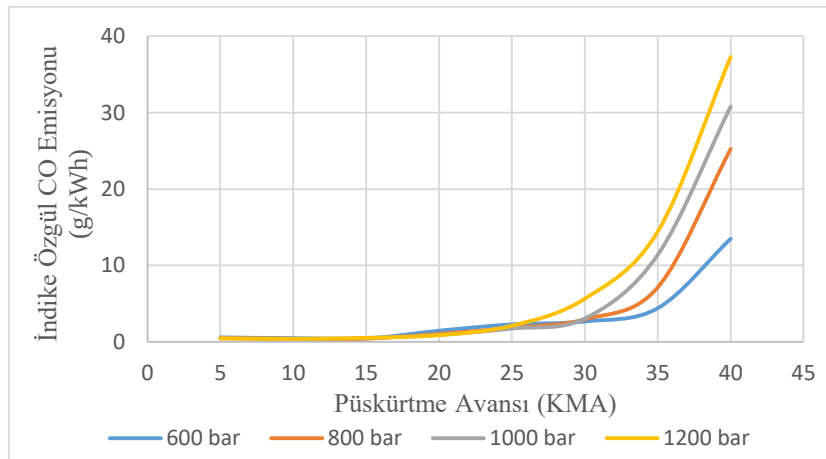
çarpmaktadır. 600 bar püskürtme basıncı ve 5° KMA püskürtme avansında 1,189 g/kWh özgül CO emisyonu modellenirken, 40° KMA püskürtme avansında bu değer 9,424 g/h'ye çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında benzer bir değişim eğilimi görülmüş ve bu değerler sırasıyla 1,146 g/kWh ve 13,762 g/kWh değerlerini almıştır. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,871 g/kWh özgül CO emisyonu görülürken, 10° KMA püskürtme avansında bu değer 0,739 g/kWh'ye gerilemiş, ardından püskürtme avansının artışıyla beraber 40° KMA püskürtme avansında 25,332 g/kWh özgül CO emisyonu ortaya çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ve az önce belirtilen püskürtme avanslarında bu değerler sırasıyla 0,758 g/kWh, 0,738 g/kWh ve 34,067 g/kWh değerlerini almıştır. 1000 bar ve 1200 bar püskürme basıncında, püskürtme avansının 5° KMA'dan 10° KMA'ya artışıyla ortaya çıkan düşüşün temel sebebi bu aralıkta g/h cinsinden CO emisyonunun gerileme sergilemesidir.



Şekil 4.118 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

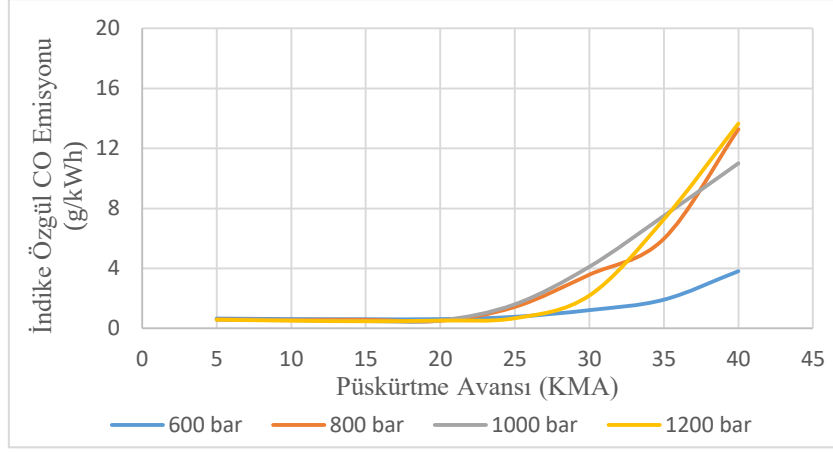
1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında ortaya çıkan indike özgül CO emisyonu değerleri Şekil 4.119'de görülmektedir. 5° KMA ile 15° KMA püskürtme avansı aralığında püskürtme avansının değişimine bağlı olarak gözle görülür indike özgül CO değişimi bu veri seti dahilinde gözlemlenmemiştir. Aynı zamanda bu püskürtme avanslarında püskürtme basıncının değişimiyle de kayda değer fark ortaya çıkmamıştır. 15° KMA püskürtme avansı aşıp 25° KMA püskürtme avansına gelinene kadar indike özgül CO emisyonlarında az da olsa artış gözlemlenmiştir. Fakat bu aralıkta püskürtme basıncının artışıyla belirgin bir değişim göze çarpmamaktadır. Bu püskürtme avansı aşıldıktan sonra ise gerek püskürtme basıncına gerekse de püskürtme avansına bağlı farklılıklar kendini net

bir şekilde ortaya koymaya başlamıştır. Özellikle 30° KMA püskürtme avansını aşan püskürtme avanslarında bu durum daha da belirgindir. Bu bölgede hem g/h cinsinden CO emisyonları artış sergilemiş hem de indike güç değeri düşmüştür. Neticede 30° KMA değerinden büyük püskürtme avanslarında g/h cinsinden CO emisyonlarına göre daha büyük oransal artışlar ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,597 g/kWh indike özgül CO emisyonu modellenmiş, 35° KMA püskürtme avansında bu değer 4,418 g/kWh'ye taşınmış, püskürtme avansının 40° KMA'ya çıkışında dramatik artış gözlemlenmiş ve 13,50 g/kWh indike özgül CO emisyonu görülmüştür. 800 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,51 g/kWh indike özgül CO emisyonu modellenmiş, bu değer 30° KMA püskürtme avansında 2,965 g/kWh'ye çıkmış ve sonrasında artış eğilimi hız kazanarak 40° KMA püskürtme avansında 25,238 g/kWh değerini ulaşmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,49 g/kWh indike özgül CO modellenmiş, 30° KMA püskürtme avansında bu değer 3,07 g/kWh değerini erişmiş ve püskürtme avansının daha da artarak 40° KMA'ya gelişle 30,797 g/kWh indike özgül CO oluştuğu modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise 5 KMA püskürtme avansı 0,466 g/kWh, 25° KMA püskürtme avansı 2,123 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansı 37,26 g/kWh indike özgül CO emisyonuna yol açmıştır. Bu püskürtme basıncında ortaya çıkan keskin artışın başlangıcının 25° KMA püskürtme avansı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.119 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

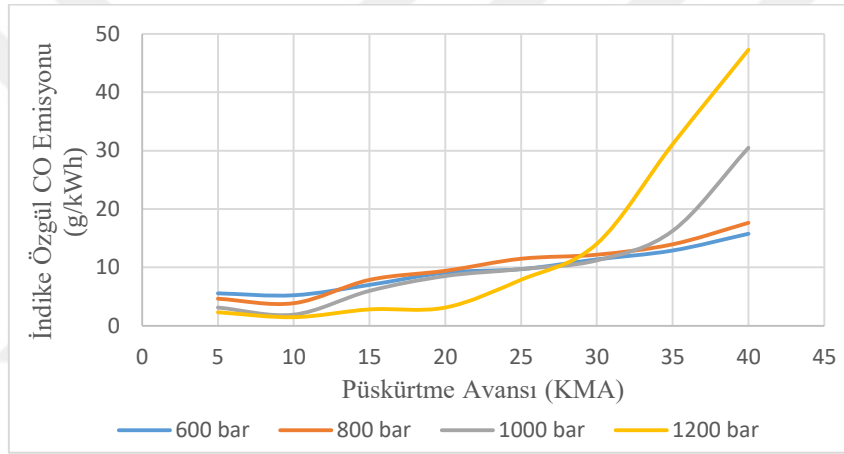
1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında ortaya çıkan indike özgül CO emisyonu değerleri Şekil 4.120’de sunulmuştur. Püskürtülen yakıt kütlelerinin bir önceki şarta göre artışı neticesinde konvansiyonel dizel yanması bölgesinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları düşüş göstermiştir. Bunun altında yatan sebep bir yandan indike gücün artış göstermesi bir diğer yandan da g/h cinsinden CO emisyonlarının azalmasıdır. Grafik üzerinde 20° KMA püskürtme avansının aşılmasına kadar geçen süreçte gerek püskürtme avansı gerekse de püskürtme basıncının değişimiyle kayda değer indike özgül CO artışı gözlemlenmemiştir. Püskürtme avansının daha da artmasıyla indike özgül CO emisyonlarında beklenen artışlar belirginleşmeye başlamıştır. Bu artış hem püskürtme avansı hem de püskürtme basıncının artışıyla net şekilde karşımıza çıkmaktadır. Bir önceki veri setine göre püskürtülen yakıt kütlelerindeki artışla PCCI çalışma bölgesinde de indike özgül CO emisyonu düşüş sergilemiştir. Püskürtme avansının artışıyla gözle görülebilir değişimlerin başladığı püskürtme avansı 25° KMA olarak göze çarpmaktadır. Bu sebeple her bir püskürtme basınç serisi için 5° KMA, 25° KMA ve 40° KMA püskürtme avanslarında modellenen özgül CO değerleri devam eden cümlelerde sunulmuştur. 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan indike özgül CO emisyonu yukarıda belirtilen püskürtme avanslarında sırasıyla 0,657 g/kWh, 0,772 g/kWh, 3,815 g/kWh olarak modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler 0,597 g/kWh, 1,431 g/kWh ve 13,284 g/kWh olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ise 0,57 g/kWh, 1,606 g/kWh ve 11,008 g/kWh değerleri elde edilmiştir. 1200 bar püskürtme basıncına gelindiğinde ise bu değerler 0,58 g/kWh, 0,677 g/kWh ve 13,656 g/kWh olarak modellenmiştir. Püskürtülen yakıt kütlelerinin 25 mg/strok oluşuyla erken püskürtme şartında ortaya çıkan OİB düşüşü ve dolayısıyla da indike güç düşüşü oransal olarak daha yüksek değerler almıştır. Bu oransal düşüşün fazlalığı ilgili bölgede indike özgül CO emisyonlarının daha büyük artışlar sergilemesini yol açmıştır.



Şekil 4.120 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül CO emisyonu değerleri Şekil 4.121’de görülmektedir. Bu veri seti içerisinde en küçük püskürtme avans değerinden itibaren gerek püskürtme avansı gerekse püskürtme basıncının değişimiyle indike özgül CO emisyonu değerlerinin farklılık gösterdiği göze çarpmaktadır. 5° KMA olan püskürtme avansı, 10° KMA püskürtme avansına artırıldığında 600 bar püskürtme basıncında hemen hemen aynı değer ortaya çıkmış, diğer püskürtme basınçlarında ise indike özgül CO emisyonlarında bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüşün sebebi 5° KMA püskürtme avansında yanmanın, MK stratejisinde gerçekleşmesi ve püskürtme avansının 10° KMA’ya artışıyla yanma konvansiyonel dizel yanmasına yakınsamaktadır. Püskürtme avansının bir miktar daha artışıyla konvansiyonel dizel yanması sınırları içerisinde kalınmış ve püskürtme avansının belli bir değere artışına kadar sınırlı miktarda indike özgül CO değişimi gözlemlenmiştir. Püskürtme avansının daha da artarak erken püskürtme rejimine geçildiğinde indike özgül CO emisyonlarında, gerek g/h cinsinden CO emisyonlarının artışı gerekse de indike güç değerindeki düşüşe bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. Bu aralıkta yüksek püskürtme basınçlarında Bölüm 4.13’te görüldüğü üzere, g/h cinsinden CO emisyonlarında hızlı artış eğilimi görülmüştür. Bu bölgede aynı zamanda indike gücün de düşüşüyle tahmin edileceği üzere daha büyük artış oranı ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 5,561 g/kWh olan indike özgül CO emisyonu 40° KMA püskürtme avansında 15,78 g/kWh değerine yükselmiştir. Bu püskürtme basıncı serisinde püskürtme avansının artışıyla indike özgül CO emisyonunda düzenli artış ortaya çıkmakla beraber yüksek püskürtme basınçlarında görüldüğü gibi dramatik

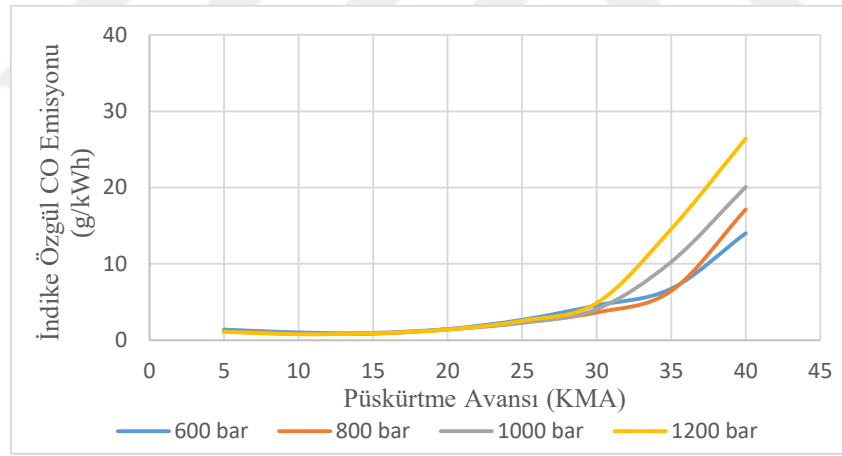
artışların yaşandığı bir kırınım ortaya çıkmamıştır. 800 bar püskürtme basıncında da bu durum geçerlidir. 800 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 3,123 g/kWh indike özgül CO ortaya çıkmış, 10° KMA püskürtme avansına gelindiğinde yanma konvansiyonel şartlara bir miktar yakın seyrederek indike özgül CO değeri 3,87 g/kWh'ye gerilemiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 3,123 g/kWh olarak modellenen indike özgül CO değeri 10° KMA püskürtme avansında 1,91 g/kWh'ye gerilemiş, sonrasında 30° KMA püskürtme avansında 11,209 g/kWh'ye çıkmış ve ardından artış eğilimi hızlanarak 40° KMA püskürtme avansında 30,484 g/kWh olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında aynı püskürtme avanslarındaki değerler sırasıyla 2,313 g/kWh, 1,473 g/kWh, 14,048 g/kWh ve 47,28 g/kWh olarak modellenmiştir.



Şekil 4.121 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül CO emisyonu değerleri Şekil 4.122'de görülmektedir. Bu veri seti içerisinde de g/h cinsinden ortaya çıkan eğilimlere paralel sonuçlar ortaya çıkmış ve indike güç değerindeki değişimler herhangi eğilim değişimine yol açmamıştır. Tahmin edileceği üzere PCCI bölgesinde indike güçte ortaya çıkacak düşüşler bu bölgedeki indike özgül CO değişim gradyanını arttırmıştır. Fakat püskürtme avansının artışıyla püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan değişimler biraz daha geç ortaya çıkmıştır. g/h cinsinden CO emisyonlarında 30° KMA püskürtme avansında farklılıklar belirgin hale gelmeye başlamışken, indike özgül emisyonlarda 30° KMA püskürtme avansında önemli farklılıklar henüz net olarak ortaya çıkmamıştır. Fakat farklılık yavaş yavaş kendini var etmeye başlamıştır. Püskürtme avansının en küçük değeri olan 5° KMA püskürtme avansından

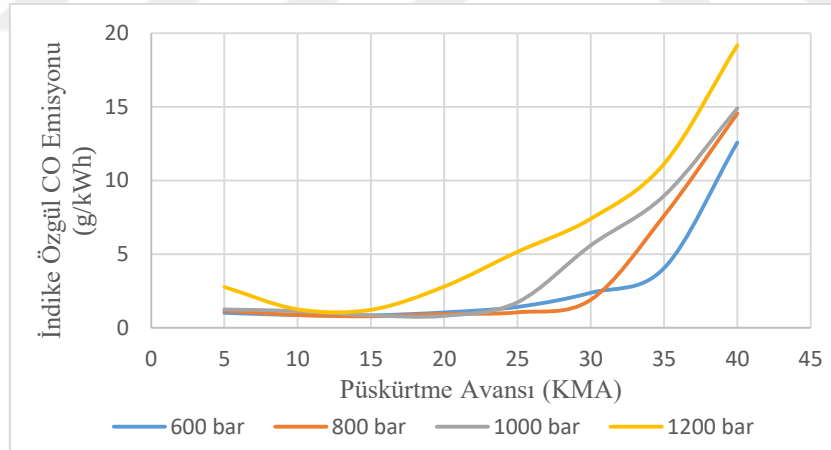
başlayarak püskürtme avansı arttıkça ilk etapta indike özgül CO emisyonlarında bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş kabaca 15° KMA püskürtme avansına kadar gözlemlenmiştir. Yanmanın konvansiyonel şartlara denk geldiği bu püskürtme avansından sonra püskürtme basıncı arttıkça 30° KMA püskürtme avansına kadar makul derecede artış ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansının daha da arttırıldığı durumda ise son derece belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. 5° KMA püskürtme avansında, kabaca en düşük indike özgül CO emisyonunun elde edildiği 15° KMA püskürtme avansında ve 40° KMA püskürtme avansında elde edilen değerleri sunmak değişim miktarı hakkında yararlı olacaktır. Bu püskürtme avanslarında elde edilen indike özgül CO değerleri 600 bar püskürtme basıncında sırasıyla 1,395 g/kWh, 0,915 g/kWh ve 14,018 g/kWh olarak modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu veriler sırasıyla 1,221 g/kWh, 0,854 g/kWh ve 17,134 g/kWh şeklinde modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 1,144 g/kWh, 0,96 g/kWh ve 20,077 g/kWh'dir. 1200 bar püskürtme basıncında da sırasıyla 1,081 g/kWh, 0,89 g/kWh ve 26,427 g/kWh olarak modellenmiştir.



Şekil 4.122 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlesinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

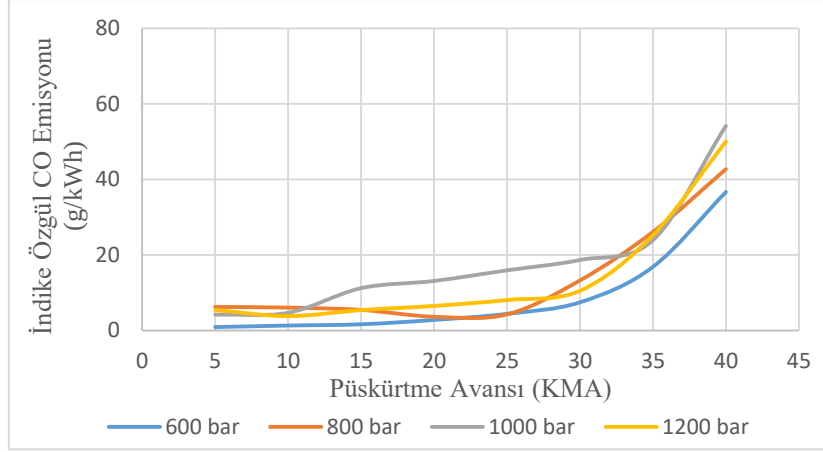
1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları Şekil 4.123'te görülmektedir. Püskürtülen yakıt kütlesinin artışıyla indike güçte ortaya çıkan artış sonucunda özellikle PCCI bölgesinde indike özgül CO emisyonlarının daha düşük motor yüküne kıyasla düşüş sergilediği görülmüştür. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında 25° KMA püskürtme avansına kadar indike özgül CO emisyonlarında hem püskürtme avansının artışına hem de püskürtme basıncının değişimine bağlı olarak kayda

değer bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu değer aşıldıktan sonra düşük püskürtme basınçlarında daha geç ortaya çıkmak üzere dramatik artışlar gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise genel olarak farklı düzeylerde indike özgül CO emisyonu ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme basıncında her bir püskürtme avans değişimi indike özgül CO emisyonlarını fazlasıyla etkilemiştir. Bu durum, motor yükü arttıkça püskürtme basıncının yanma üzerinde belirleyici rolünü göstermektedir. Bu veri seti dahilindeki tüm basınç serilerinde ortaya çıkan en düşük indike özgül CO değeri 15° KMA püskürtme avansında gözlemlenmiştir. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,018 g/kWh indike özgül CO modellenmiş, ilgili basınç serisinde en düşük indike özgül CO emisyonunun elde edildiği 15° KMA püskürtme avansında 0,84 g/kWh indike özgül CO modellenmiş ve bu değer 40° KMA püskürtme avansında 12,573 g/kWh değerine ulaşmıştır. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler 1,159 g/kWh, 0,744 g/kWh ve 14,549 g/kWh olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler 1,245 g/kWh, 0,841 g/kWh ve 14,896 g/kWh olarak karşımıza çıkmıştır. 1200 bar püskürtmek basıncında modellenen değerler ise sırasıyla 2,768 g/kWh, 1,219 g/kWh ve 19,182 g/kWh'dir.



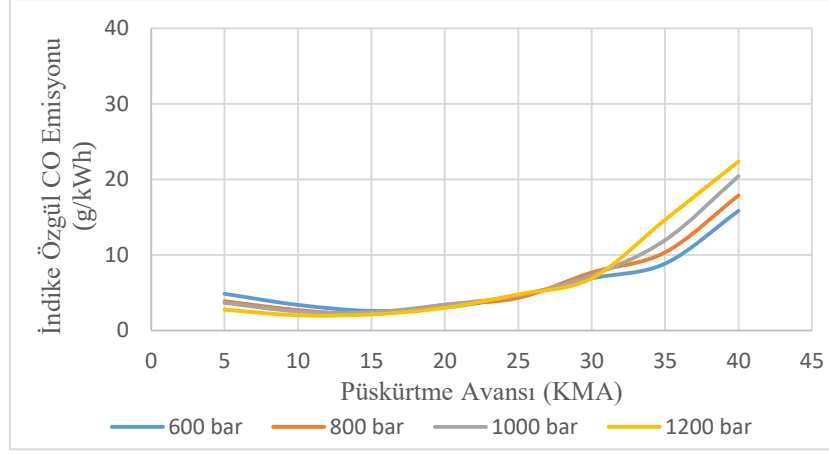
Şekil 4.123 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında ortaya çıkan indike özgül CO değerleri Şekil 4.124'te görülmektedir. Bu veri setinde CO değerlerinin ve hatta tüm emisyon değerlerinin muhtemel bir ölçüm hatasına bağlı olarak sağlıklı bir şekilde modellenemediği belirtilmişti. Bu sebeple hesaplanan indike özgül CO değerlerinin de güvenilir olamayacağı açıktır ve bu veri irdeleme dışı bırakılmıştır.



Şekil 4.124 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

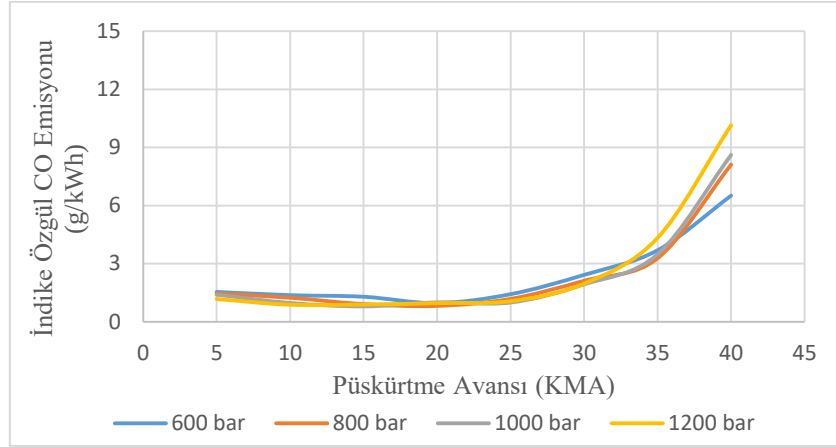
2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül CO değerleri Şekil 4.125'te sunulmuştur. Motor hızının artışıyla 5° KMA ve 10° KMA püskürtme avanslarında belirgin indike özgül CO farklılıkları ortaya çıkmıştır. MK yanma stratejisinin baskın olduğu bu aralıkta püskürtme basıncı azaldıkça indike özgül CO değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Konvansiyonel yanma bölgesinde ise önceki veri setlerinin aksine püskürtme avansının artışıyla gözle görülür bir artış ortaya çıkmıştır. Püskürtme avansının 15° KMA'dan 25° KMA'ya gelişiyle indike özgül CO emisyonları 2 kat dolaylarında artış göstermiştir. Fakat püskürtme basıncının değişimiyle ortaya çıkan farklılıklar 30° KMA püskürtme avansından sonra ortaya çıkmıştır. Tahmin edileceği üzere düşük püskürtme basınçlarında PCCI bölgesinde ortaya çıkan indike özgül CO artış miktarı daha makul seviyededir. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basıncında en küçük indike özgül CO değeri 15° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu püskürtme avans değeri 10° KMA'da elde edilmiştir. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında, en küçük indike özgül CO'nun elde edildiği püskürtme avansındaki değer ve en büyük püskürtme avansında ortaya çıkan indike özgül CO değerleri sırasıyla 4,85 g/kWh, 2,587 g/kWh ve 15,831 g/kWh olarak modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler 3,865 g/kWh, 2,167 g/kWh ve 15,831 g/kWh'dir. 1000 bar püskürtme basıncında ise bu değerler 3,645 g/kWh, 2,406 g/kWh ve 20,419 g/kWh olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler 2,742 g/kWh, 2,002 g/kWh ve 22,379 g/kWh değerini almıştır.



Şekil 4.125 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül CO değerleri Şekil 4.126’da sunulmuştur. Bu veri seti içerisinde daha önce ortaya çıkan eğilimlere aykırı bir değişim gözlemlenmemiştir. Püskürtülen yakıt kütlelerinin yani motor yükünün artışıyla yanma odası içerisindeki sıcaklık değerleri daha üst seviyelere çıkmış, TG süreci kısalmış ve sonuç olarak gerek düşük yanma sıcaklıkları gerekse de fazlaca fakir karışım bölgelerinin oluşumu baskılanmıştır. Bunun neticesinde tüm püskürtme avanslarında bir önceki veri setine göre indike özgül CO emisyonu düşüş sergilemiştir. Bu veri setinde erken püskürtme bölgesinde ortaya çıkan artış nispeten daha sınırlı kalmıştır. Çünkü indike güç düşüşü daha kabul edilebilir seviyelerde karşımıza çıkmıştır. Öte yandan bu veri seti içerisinde 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında PCCI stratejisi sağlıklı bir şekilde ortaya konamamış ve dizel vuruntusu emareleri ortaya çıkmıştır. İndike özgül CO emisyonlarının bu veri seti içerisinde daha düşük seviyede değişimler göstermesinin bir başka sebebi de budur. 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncında en küçük indike özgül CO değeri 20° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değer 15° KMA püskürtme avansına denk gelmektedir. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,538 g/kWh indike özgül CO emisyonu modellenirken, 20° KMA püskürtme avansında bu değer 0,963 g/kWh’ye gerilemiş ve 40° KMA püskürtme avansında ise 6,508 g/kWh indike özgül CO emisyonu modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 1,458 g/kWh, 0,817 g/kWh ve 8,11 g/kWh olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,394 g/kWh indike özgül CO ortaya çıkarken, 15° KMA

püskürtme avansında bu değer 0,791 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansında ise 8,609 g/kWh olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise karşımıza çıkan değerler sırasıyla 1,172 g/kWh, 0,89 g/kWh ve 10,143 g/kWh değerindedir.



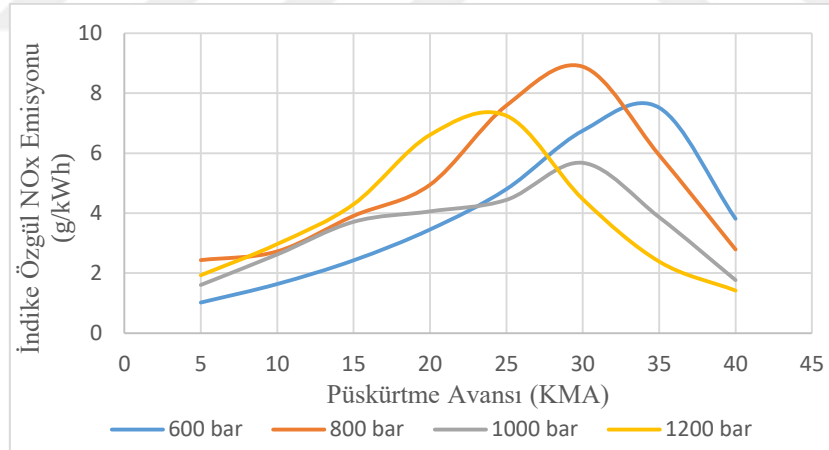
Şekil 4.126 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül CO emisyonları

4.17 İndike Özgül NO_x Emisyonlarının İncelenmesi

Bu başlık esas itibariyle çalışmanın en kritik kısmını oluşturmaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere bu çalışmanın temel hedefi NO_x ve PM emisyonlarının düşürülmesidir. Oluşan NO_x emisyonunun indirgenmesinin oldukça güç olduğundan daha önceki kısımlarda bahsedilmiştir. Bu sebeple bu çalışmadaki temel hedef NO_x oluşumunun kontrol altına alınması ve belirli oranlarda oluşumu baskılanan NO_x emisyonunun birim güç başına olan çıktı değerinin düşürülmesidir.

Şekil 4.127 üzerinde 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları görülmektedir. Her bir püskürtme basınç serisinde ortaya çıkan değişim eğilimlerinin büyük oranda g/h cinsinden ortaya çıkan NO_x ile paralellik gösterdiği görülmektedir. Bu veri seti içerisinde püskürtme basıncı ve püskürtme avansının değişimiyle ortaya çıkan indike güç değişimi nispeten makul düzeyde kalmıştır. Bu sebeple de g/h cinsinden NO_x değişim ilişkileri, grafiğin ana hatlarına daha hâkim olmuştur. Bu veri seti içerisinde g/h cinsinden NO_x değeri ve indike özgül NO_x değeri aynı püskürtme avanslarında kendi basınç serilerinin pik değerine ulaşmıştır. En büyük indike özgül NO_x değeri elde edildikten sonra püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan indike özgül NO_x düşüşü bu püskürtme avansı öncesindeki artıştan, tıpkı g/h cinsinden elde edilen sonuçlar gibi, daha büyük değişim oranlarına sahip olmuştur. Ancak bu bölgede

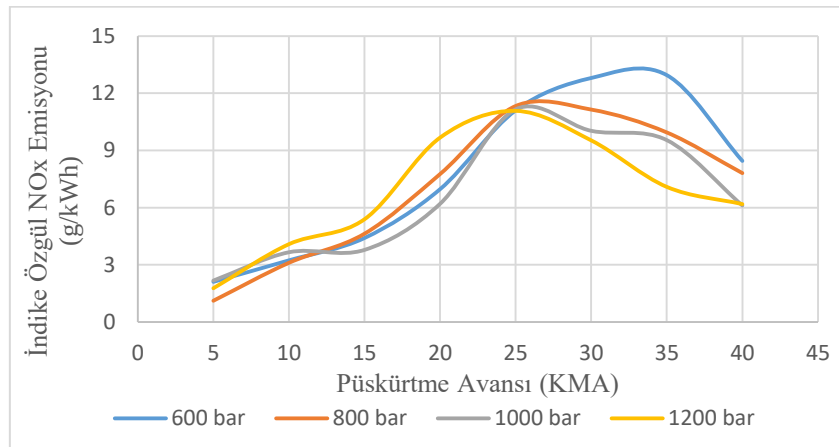
indike güç değerinin de düşüş göstermesi neticesinde g/h cinsinden emisyonu göre daha küçük sayısal düşüş oranları elde edilmiştir. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,019 g/kWh indike özgül NO_x emisyonu modellenmiş, 35° KMA püskürtme avansına gelindiğinde bu basınç serisi içerisindeki en büyük indike özgül NO_x emisyonu 7,516 g/kWh olarak karşımıza çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde bu değer 3,812 g/kWh olarak modellenmiştir. 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında en yüksek indike özgül NO_x salımı 30° KMA püskürtme avansında karşımıza çıkmaktadır. 800 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 2,433 g/kWh indike özgül NO_x emisyonuna yol açmış, 30° KMA püskürtme avansında bu değer 8,883 g/kWh'ye kadar artmış ve 40° KMA püskürtme avansında 2,789 g/kWh değerine gerilemiştir. 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 1,606 g/kWh, 5,676 g/kWh ve 1,767 g/kWh olarak karşımıza çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,929 g/kWh indike özgül NO_x modellenmiş, 25° KMA püskürtme avansına kadar bu değer artarak 7,247 g/kWh'ye ulaşmış ve sonrasında püskürtme avansının daha da artarak 40° KMA değerine ulaştığında 1,418 g/kWh'ye gerilemiştir.



Şekil 4.127 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

Şekil 4.128 üzerinde 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları görülmektedir. İncelenen veri setinde grafik üzerindeki temel eğilimlerde, g/h birimindeki NO_x emisyonlarının son derece belirleyici olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Ancak PCCI çalışma rejimi bölgesinde özellikle 1200 bar püskürtme basıncında ve 35° KMA ile 40° KMA püskürtme avanslarında ortaya çıkan nispeten yüksek seviyedeki indike güç

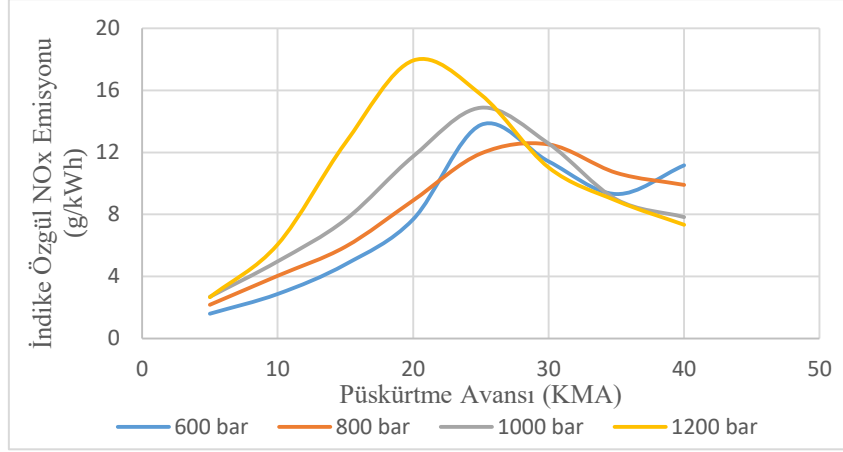
düşüşünden kaynaklı olarak 1000 bar püskürtme basıncı ile aradaki farkın kapandığı görülmektedir. Bir önceki veri setine kıyasla püskürtülen yakıt kütlelerinin artışı neticesinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonu artışı açık bir şekilde görülebilmektedir. Yine bir önceki veri setine kıyasla, PCCI bölgesinde ortaya çıkan oransal artış, geç püskürtme şartında ve konvansiyonel dizel yanmasının hâkim olduğu aralıkta gözlemlenen artışa göre daha yüksek seviyede karşımıza çıkmıştır. Buradan hareketle motor yükü arttıkça indike özgül NO_x emisyonu düşüş miktarının azalma eğilimi gösterdiği söylenebilir. 600 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı, 800 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansı, 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında ise 25° KMA püskürtme avansı ilgili püskürtme basınç serileri için en yüksek indike özgül NO_x emisyonunun elde edildiği püskürtme avansı olarak gözlemlenmiştir. Her bir püskürtme basıncı serisi ve 5° KMA püskürtme avansında, en büyük indike özgül emisyonun ortaya çıktığı püskürtme avansında ve 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları sırasıyla müteakip cümlelerde belirtilen değerleri almıştır. 600 bar püskürtme basıncında modellenen bu değerler 2,105 g/kWh, 12,948 g/kWh ve 8,448 g/kWh olarak hesaplanmıştır. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler 1,112 g/kWh, 11,142 g/kWh ve 7,808 g/kWh olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ise 2,169 g/kWh, 11,155 g/kWh ve 6,11 g/kWh değerleri karşımıza çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncına gelindiğinde 1,767 g/kWh, 11,075 g/kWh ve 6,181 g/kWh indike özgül NO_x emisyonları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.128 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

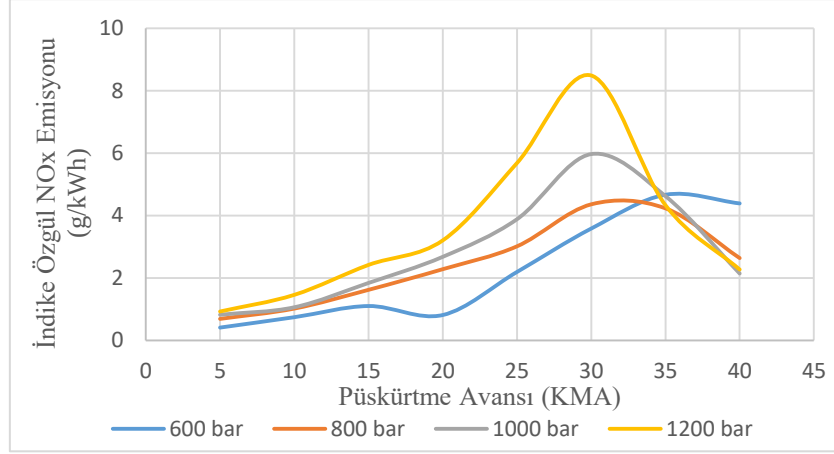
Şekil 4.129 üzerinde 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları görülmektedir. Grafik üzerinde g/h

cinsinden ortaya çıkan emisyonların genel hatlar üzerinde hakimiyet kurduğu bu veri seti üzerinde de görülmektedir. Geç püskürtme ve konvansiyonel dizel yanması bölgesinin büyük bir kısmında hiçbir eğilim farklılığı gözlemlenmemiştir. Fakat PCCI bölgesinde 1200 bar püskürtme basıncında çalışmanın anlamlı olmadığı görülmüştür. Bu püskürtme avanslarında püskürtme basıncının 1000 bar'dan 1200 bar'a çıkışıyla hem g/h cinsinden NO_x emisyonu düşüş göstermekte hem de indike güç düşüş sergilemektedir. Fakat indike güçte karşımıza çıkan düşüş daha yüksek seviyededir. Bunun neticesinde püskürtme basıncının artışı sonucunda indike özgül NO_x emisyonundan kazanç sağlanamamıştır. Bir önceki veri setinde de bu eğilimin öncülleri görülmeye başlamıştır. Motor yükünün artışıyla beraber bu gözlem daha net bir şekilde karşımıza çıkmıştır. Bunun yanı sıra 600 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansından 40° KMA püskürtme avansına geçildiğinde indike özgül NO_x emisyonlarında artış ortaya çıkmıştır. Bu püskürtme basıncında da püskürtme avans artışının her zaman indike özgül NO_x açısından avantaj sağlamayacağı açıkça görülmektedir. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan en yüksek indike özgül NO_x değeri 25° KMA püskürtme avansında karşımıza çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değere 20° KMA püskürtme avansında ulaşılmıştır. Her bir püskürtme basınç serisinde 5° KMA püskürtme avansında, en büyük indike özgül NO_x emisyonunun ortaya çıktığı püskürtme avansında ve 40° KMA püskürtme avansında ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları sırasıyla şu değerleri almıştır. 600 bar püskürtme basıncında modellenen değerler 1,594 g/kWh, 13,778 g/kWh ve 11,168 g/kWh'dir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler 2,17 g/kWh, 12,519 g/kWh ve 9,904 g/kWh olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ise 2,685 g/kWh, 14,887 g/kWh ve 7,827 g/kWh değerleri karşımıza çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncına gelindiğinde 2,66 g/kWh, 17,933 g/kWh ve 7,331 g/kWh indike özgül NO_x emisyonu gözlemlenmiştir.



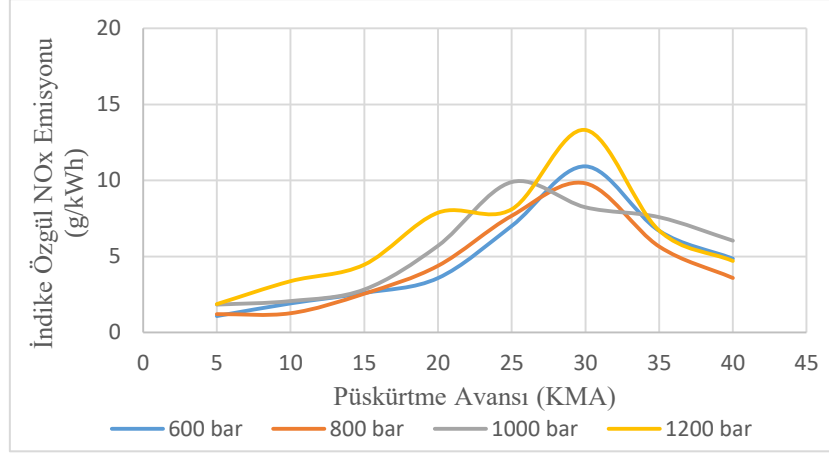
Şekil 4.129 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

Şekil 4.130 üzerinde 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda indike özgül NO_x emisyonları görülmektedir. Grafik üzerinde de görüldüğü üzere konvansiyonel yanma bölgesi ve PCCI bölgesinde hem en yüksek hem de en düşük indike özgül NO_x emisyonu en büyük püskürtme basıncı olan 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkmıştır. PCCI bölgesindeki düşüş eğilimi de püskürtme basıncı arttıkça artış göstermektedir. Düşük püskürtme basınçlarında, püskürtme avansının değişimiyle ortaya çıkan farklılıklar daha sakin bir değişim gösterirken, püskürtme basıncı arttıkça bu değişim agresifleşmektedir. 600 bar püskürme basıncında, püskürtme avansının 15° KMA'dan 20° KMA'ya geçişinde indike özgül NO_x emisyonunda bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. Bu şartlarda g/h cinsinden NO_x emisyonu çok az artış sergilemekte, indike güç ise daha büyük artış sergilemektedir. Bu sebeple böyle istisnai bir değer ortaya çıkmıştır. Fakat veri seti içerisinde başka bir yerde böyle bir artış ortaya çıkmamıştır. 600 bar püskürtme basıncında elde edilen en büyük indike özgül NO_x değeri 35° KMA püskürtme avansında, diğer püskürtme basınçlarında ise 30° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,44 g/kWh, 35° KMA püskürtme avansında 4,669 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansında 4,391 g/kWh indike özgül NO_x emisyonu ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,68 g/kWh, 30° KMA püskürtme avansında 4,361 g/kWh, 40° KMA püskürtme avansında ise 2,639 g/kWh indike özgül NO_x modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler 0,823 g/kWh, 5,974 g/kWh ve 2,145 g/kWh olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değerler 0,927 g/kWh, 8,493 g/kWh ve 2,271 g/kWh olarak modellenmiştir.



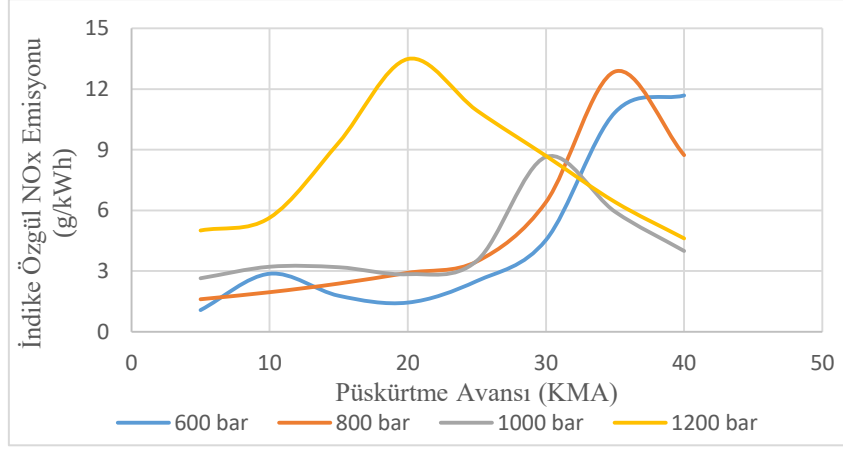
Şekil 4.130 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

Şekil 4.131 üzerinde 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki indike özgül NO_x emisyonları görülmektedir. Bu veri seti içerisinde de PCCI bölgesinde indike özgül NO_x emisyonlarında tatmin edici boyutta düşüşler gözlemlenmiştir. Bu genel eğilimin dışında harici bir bulgu göze çarpmamaktadır. PCCI bölgesinde püskürtme avansının fazlaca arttırıldığı 40° KMA püskürtme avansında indike güç değerinde düşüşün hızlanması ve püskürtme basıncı arttıkça bu düşüşte yaşanan artış, ilgili çalışma noktalarında indike özgül NO_x düşüşünü bir miktar frenlemiş durumdadır. 600 bar, 800 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında en yüksek indike özgül NO_x değeri 30° KMA püskürtme avansında, 1000 bar püskürtme basıncında ise 25° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,075 g/kWh, 30° KMA püskürtme avansında 10,927 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansında da 4,854 g/kWh indike özgül NO_x değeri modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 1,12 g/kWh, 9,809 g/kWh ve 3,58 g/kWh olarak modellenmiştir. 100 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 1,828 g/kWh olan indike özgül NO_x değeri, 25° KMA püskürtme avansında 9,893 g/kWh'ye çıkmış, sonrasında ise 40° KMA püskürtme avansında 6,036 g/kWh değerine gerilemiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,863 g/kWh indike özgül NO_x modellenirken, 30° KMA püskürtme avansında bu değer 13,321 g/kWh değerine çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansında ise 4,701 g/kWh olarak modellenmiştir.



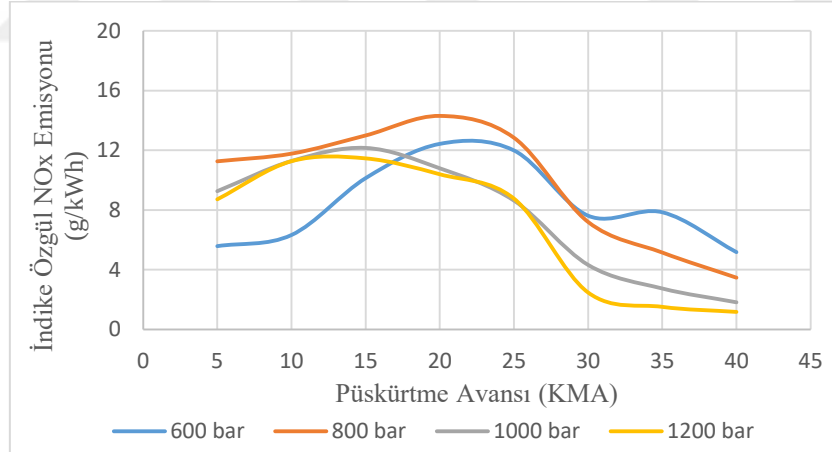
Şekil 4.131 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

Şekil 4.132’de 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki indike özgül NO_x emisyonları sunulmuştur. Bu veri setindeki değişim eğilimlerinde de g/h cinsinden emisyon değerleri belirleyici olmuş, indike güç değerlerindeki değişimler güçlü bir ağırlıklandırmayla eğilimleri değiştirmemiştir. Şu ana kadar ortaya konan saptamaların haricinde yeni bir duruma bu veri seti içerisinde rastlanamamıştır. Bu veri setinde dikkat çeken nokta ise 600 bar püskürtme basıncında püskürtme avansının 35° KMA değerinden 40° KMA’ya artışıyla indike özgül NO_x emisyonunda düşüş görülmemiş ve bu püskürtme basıncında erken püskürtme şartlarında herhangi bir düşüş yaşanmamıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,071 g/kWh olan indike özgül NO_x emisyonu 40° KMA püskürtme avansında 11,686 g/kWh’ye çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,606 g/kWh, en büyük indike özgül NO_x değerinin elde edildiği 35° KMA püskürtme avansında 12,87 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansında da 8,735 g/kWh indike özgül NO_x emisyonu modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 2,645 g/kWh olan indike özgül NO_x emisyonu 30° KMA püskürtme avansında 8,648 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansında 3,995 g/kWh değerini almıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 5,009 g/kWh olarak modellenen indike özgül NO_x değeri 25° KMA püskürtme avansında 10,942 g/kWh’ye çıkmış ve sonrasında da 40° KMA püskürtme avansında 4,616 g/kWh’ye gerilemiştir.



Şekil 4.132 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

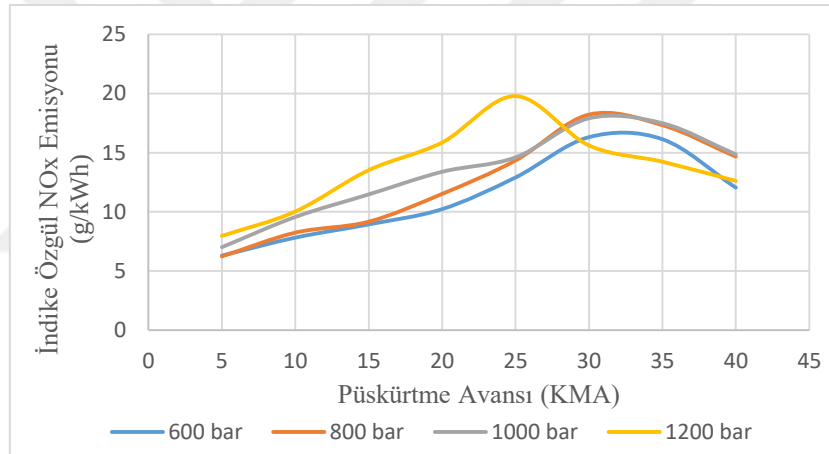
Şekil 4.133’de üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki indike özgül NO_x emisyonları sunulmuştur. Bu çalışma aralığında deneysel ölçümler esnasında veri seri içerisinde bulunan noktaların bir kısmından sağlıklı emisyon verilerinin alınamaması nedeniyle özgül NO_x emisyonları da güvenilir sonuçlar ortaya koymamıştır. Bu sebeple bu veri seti değerlendirme ve irdeleme dışı tutulmuştur.



Şekil 4.133 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

Şekil 4.134’te üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları görülmektedir. Motor hızının 2000 dev/dak’a çıkmasıyla indike özgül NO_x emisyonlarında genel olarak artış görülmüştür. Veri seti içerisindeki her bir püskürtme basıncında elde edilen eğrilerin tutarlı ve beklenti dahilinde değişim sergilediği görülmüştür. 5° KMA püskürtme avansından başlayarak 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme

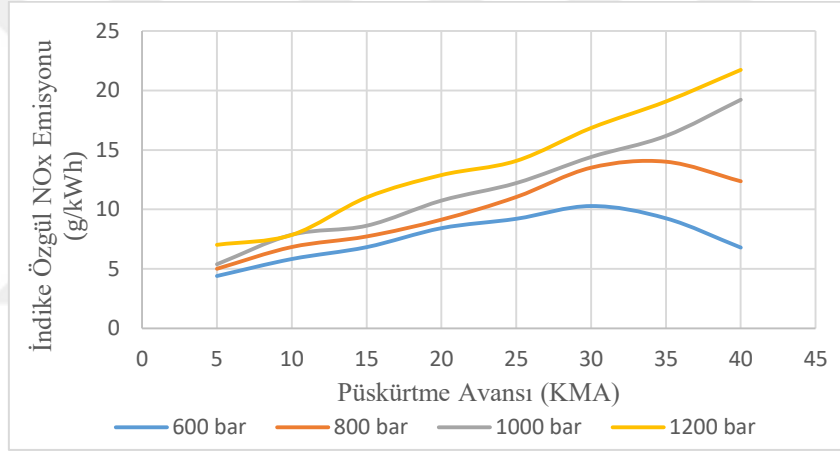
basıncında 30° KMA püskürtme avansına kadar, 1200 bar püskürtme basıncında ise 25° KMA püskürtme avansına kadar indike özgül NO_x değerlerinde artış yaşanmış, sonrasında düşüş eğilimi görülmüştür. Bu veri seti içerisinde PCCI bölgesinde ortaya çıkan indike özgül NO_x azalışı nispeten düşük seviyede kalmıştır. Yani motor hızı arttıkça stratejinin yarattığı fayda azalmaktadır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 6,303 g/kWh, 30° KMA püskürtme avansında 16,312 g/kWh, 40° KMA püskürtme avansında da 12,042 g/kWh indike özgül NO_x emisyonu modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 6,237 g/kWh, 18,217 g/kWh ve 14,662 g/kWh'dir. 1000 bar püskürtme basıncında ise 7,017 g/kWh, 17,906 g/kWh ve 14,853 g/kWh değerleri karşımıza çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise modellenen değerler 5° KMA püskürtme avansında 7,966 g/kWh, 25° KMA püskürtme avansında 19,778 g/kWh, 40° KMA püskürtme avansında da 12,615 g/kWh'dir.



Şekil 4.134 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

Şekil 4.135'te üzerinde 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları görülmektedir. Bu veri seti içerisinde 600 bar püskürtme basıncındayken 30° KMA püskürtme avansında, 800 bar püskürtme basıncındayken de 35° KMA püskürtme avansında en yüksek indike özgül NO_x emisyonu elde edilmiştir. Bu veri seti öncesinde püskürtme basıncı arttıkça pik indike özgül NO_x değerine ÜÖN'ye görece daha yakın püskürtme avanslarında ulaşılmıştır. Fakat burada tersi bir durum karşımıza çıkmıştır. Dahası 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında herhangi bir indike özgül NO_x düşüşü de ortaya çıkmamış ve püskürtme avansının artışıyla indike özgül NO_x emisyonu sürekli olarak artış sergilemiştir. Bu durumun dizel vuruntusu

emarelerinin ortaya çıkışından kaynaklandığı Bölüm 4.14 içerisinde belirtilmişti. Veri seti içerisinde 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 4,404 g/kWh indike özgül NO_x modellenmiş, 30° KMA püskürtme avansında 10,287 g/kWh değerine kadar artış yaşanmış, 40° KMA püskürtme avansında da 6,794 g/kWh indike özgül NO_x modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 5,009 g/kWh indike özgül NO_x modellenmiş, 35° KMA püskürtme avansında 14,015 g/kWh değerine kadar artış yaşanmış, 40° KMA püskürtme avansında da 12,371 g/kWh indike özgül NO_x modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 5,389 g/kWh olan indike özgül NO_x emisyonu 40° KMA püskürtme avansında 19,224 g/kWh'ye ulaşmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 7,024 g/kWh ve 21,737 g/kWh değerini almıştır.

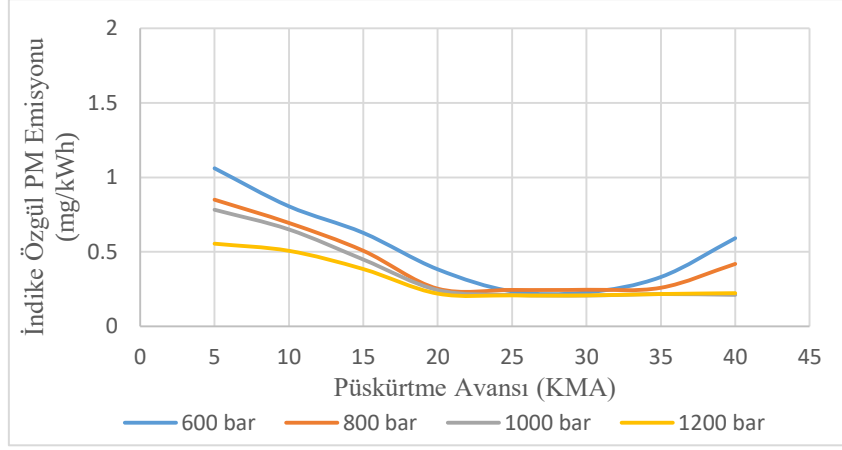


Şekil 4.135 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül NO_x emisyonları

4.18 İndike Özgül Partikül Madde Emisyonlarının İncelenmesi

Özgül PM emisyonlarının düşürülmesi, daha önce de bahsedildiği üzere çalışmanın iki temel hedefinden biridir. Daha önceki kısımlarda gerekçesine değinildiği üzere bu alt bölümdeki inceleme de indike güce bağlı olarak ortaya konmuştur. 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları Şekil 4.136 üzerinde sunulmuştur. Bu veri setinde mg/h cinsinden PM emisyonunun indike özgül PM emisyonu üzerinde daha belirleyici rol oynadığı ve indike gücün eğilim değiştirici bir etkisinin gözlemlenemediği görülmüştür. Veri setinde hem motor hızının hem de yakıt enjeksiyon kütlelerinin düşük olması sebebiyle ortaya çıkan değişimin diğer veri setlerinden farklılık barındırdığı

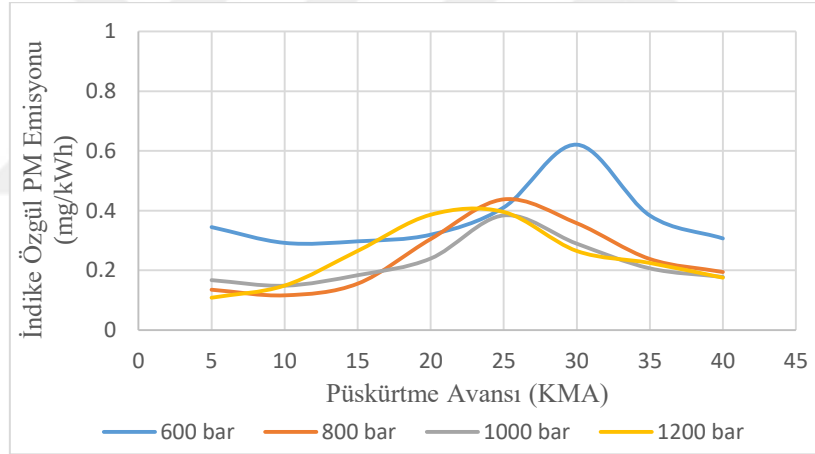
görülmektedir. Bunun gerekçesi ise Bölüm 4.15 içerisinde açıklanmıştır. Bu sebeple aynı irdelemeler tekrarlanmamıştır. Tahmin edileceği üzere püskürtme basıncı arttıkça yakıt zerreciklerinin ortalama çapı düşüş göstermiş ve yakıtın yanma odası içerisinde hava ile daha iyi karışmasını sağlanmıştır. Böylelikle hem mg/h cinsinden PM emisyonları hem de indike özgül PM emisyonu düşüş sergilemiştir. 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansı sonrasında indike özgül PM emisyonları artış göstermektedir. Bu artışın gerekçesi Bölüm 4.15'te belirtilmiştir. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 1,061 mg/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, püskürtme avansının 30° KMA değerine arttırılmasına kadar indike özgül PM emisyonu düzenli düşüş sergilemiş ve indike özgül PM emisyonu 0,228 mg/kWh değerine kadar gerilemiştir. Sonrasında ise hem motor hızının hem de yakıt kütlesinin düşüklüğü sebebiyle yanma odasında arzu edilen türbülans seviyesine ulaşamamış ve 40° KMA püskürtme avansında 0,592 mg/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında ve aynı püskürtme avanslarında bu değerler sırasıyla 0,851 mg/kWh, 0,224 mg/kWh ve 0,419 mg/kWh olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,783 mg/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, bu değer 25° KMA püskürtme avansında 0,211 mg/kWh'ye gerilemiş, püskürtme avansının daha arttırılması ile neredeyse sabit seyirli bir eğilim gözlemlenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 0,555 mg/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş ve 20° KMA püskürtme avansında bu değer 0,208 mg/kWh değerine gerilemiş, püskürtme avansının 20° KMA ile 40° KMA arasındaki değişiminde ise 0,2 mg/kWh ile 0,22 mg/kWh arasında indike özgül PM emisyonu modellenmiştir. Bu aralıkta indike güçte yaşanan düşüş ile mg/h cinsinden ortaya çıkan düşüş yaklaşık olarak birbirini karşılamıştır.



Şekil 4.136 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları Şekil 4.137’de sunulmuştur. Bir önceki veri setine kıyasla, bu veri setinde beklentilere daha yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır. Motor hızı hala daha düşük olsa da püskürtülen yakıt kütlelerindeki artışın yanma esnasında oluşacak türbülans seviyesini bir miktar arttırdığı ve öngörülebilir değişim eğilimlerine daha yakın indike özgül PM emisyonlarının ortaya çıktığı söylenebilir. Fakat silindir içerisine giren yakıt miktarının artışıyla, özellikle düşük püskürtme basınçlarında yer yer indike özgül PM emisyonunun artış sergileyebildiği saptanmıştır. Bu durum özellikle 600 bar püskürtme basıncında belirgin olarak karşımıza çıkmıştır. 600 bar, 800 bar ve 1000 bar püskürtme basınçlarında 5° KMA püskürtme avansından 10° KMA püskürtme avansına geçildiğinde indike özgül PM emisyonunda bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüşün gerekçesi daha önce aktarıldığı üzere yanmanın ortaya çıktığı bölgedeki silindir içi hava hareketi seviyesidir. Daha sonra yanmanın gerçekleştiği hacimde meydana gelen küçülmeyle başlarda bir miktar iyileşme gözlemlenmiştir. Sonrasında ise konvansiyonel yanma rejimi sürece hâkim olmaya başlamış ve indike özgül PM emisyonu artışa geçmiştir. Daha sonra 600 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansı, diğer püskürtme basınçlarında da 25° KMA püskürtme avansı sonrası indike özgül PM emisyonu düşmeye başlamıştır. Diğer püskürtme basınçlarında ise bu düşüş 25° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra görülmeye başlamıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,344 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, 10° KMA püskürtme avansında bu değer 0,292 g/kWh’ye gerilemiş, devamında konvansiyonel yanma sürece hâkim olmuş ve 30° KMA püskürtme avansında 0,621

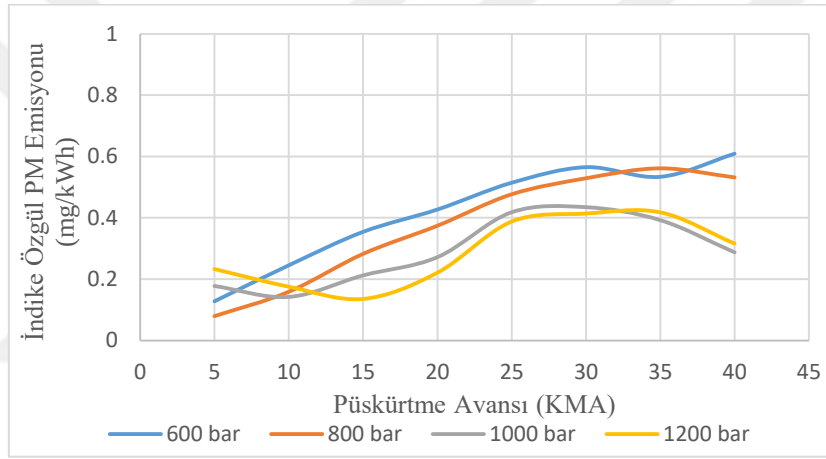
g/kWh'ye erişilmiş, 40° KMA püskürtme avansında ise 0,307 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 0,135 g/kWh, 0,116 g/kWh, 0,4038 g/kWh ve 0,195 g/kWh olarak modellenmiştir. Fakat 800 bar püskürtme basıncında en büyük indike özgül PM emisyonu 25° KMA püskürtme avansında elde edilmiştir. Benzer şekilde 1000 bar püskürtme basıncında bu değerler 0,167 g/kWh, 0,149 g/kWh, 0,384 g/kWh ve 0,178 g/kWh olarak modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ve geç püskürtme şartında püskürtme avansının artışıyla görülen kısmi düşüş bu püskürtme basıncında yaşanmamıştır. Çünkü püskürtme basıncındaki artış karışım oluşumunu iyileştirmiş ve lokal zengin karışım bölgeleri daha iyi bir şekilde elemine edilmiştir. Bu püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,108 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, 25° KMA püskürtme avansında bu değer 0,396 g/kWh değerine tırmanmış ve sonrasında 40° KMA püskürtme avansında 0,176 g/kWh'ye gerilemiştir.



Şekil 4.137 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütleğinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül PM değerleri Şekil 4.138'de sunulmuştur. Bu veri setinde püskürtülen yakıt kütlelerinin artışıyla indike özgül PM emisyonlarında bir miktar artış görülmüştür. Bu, esas itibariyle beklenen bir durumdur. Aynı zamanda PCCI bölgesinde, pik indike özgül PM emisyonuna göre ortaya çıkan düşüş eğilimi daha düşük seviyede kalmıştır. Hatta 600 bar püskürtme avansında bir düşüş de yaşanmamıştır. Bu basınç serisinde mg/h cinsinden emisyonlar 30° KMA püskürtme avansı sonrasında düşüşe geçmiştir. Fakat indike güçte yaşanan düşüş indike özgül emisyonda ortaya çıkacak gerilemenin önüne geçmiş durumdadır. 600 bar püskürtme basıncında ve

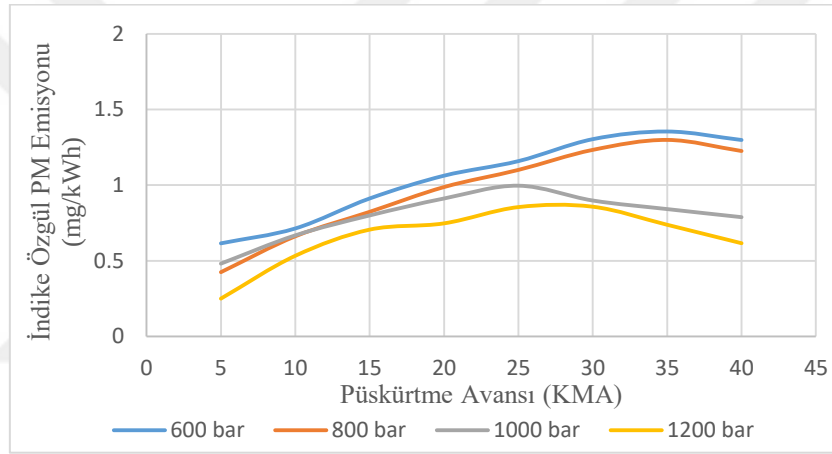
5° KMA püskürtme avansında 0,128 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiştir, 30° KMA püskürtme avansında bu değer 0,565 g/kWh'ye çıkmış, sonrasında ise dalgalı bir değişim yaşayarak 40° KMA püskürtme avansında 0,609 g/kWh'ye çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında 0,079 g/kWh indike özgül PM modellenmiş, 35° KMA püskürtme avansında 0,561 g/kWh ile pik değer görülmüş ve 40° KMA püskürtme avansında 0,532 g/kWh değerine düşüş yaşanmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,117 g/kWh olarak modellenen indike özgül PM emisyonu, 30° KMA püskürtme avansına kadar artış sergilemiş ve 0,435 g/kWh değerine erişmiş, sonrasında ise 40° KMA püskürtme avansında 0,287 g/kWh'ye gerilemiştir. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 0,203 g/kWh, 0,417 g/kWh ve 0,316 g/kWh olarak modellenmiştir.



Şekil 4.138 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül PM değerleri Şekil 4.139'da görülmektedir. Bu veri setinde son derece belirgin hatlarla tarif edilebilen sonuçlar ortaya çıkmıştır. Püskürtme basıncının artışıyla indike özgül PM değerinde düşüş yaşanması ve belli bir püskürtme avansı sonrasında PCCI bölgesinde indike özgül PM emisyonlarında ortaya çıkan düşüş son derece net bir şekilde görülmektedir. Bazı püskürtme basıncı serilerinde gözlemlenen indike özgül PM düşüşü, g/h cinsinden emisyonlara göre bir miktar daha geç ortaya çıkmıştır. Bu da indike gücün belirleyici etkisinin artmaya başladığını göstermektedir. 800 bar ve 1200 bar verileri buna örnektir ve indike özgül PM emisyonundaki düşüş 5° KMA daha büyük püskürtme avansında başlamıştır. 600 bar ve 800 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı, 1000 bar püskürtme basıncında 25° KMA püskürtme avansı ve 1200 bar püskürtme

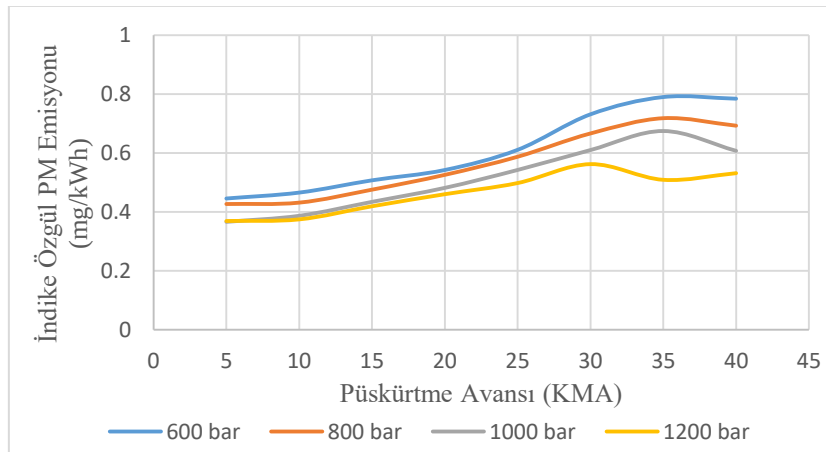
basıncında 30 KMA püskürtme avansı kendi serilerinde en büyük indike özgül NO_x değerini ortaya koymuştur. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,616 g/kWh, 35° KMA püskürtme avansında 1,355 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansında 1,299 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiştir. 800 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 0,424 g/kWh, 1,299 g/kWh ve 1,226 g/kWh olarak modellenmiştir. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,482 g/kWh, 25° KMA püskürtme avansında 0,996 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansında da 0,788 g/kWh indike özgül PM modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansı 0,25 g/kWh, 30° KMA püskürtme avansı 0,857 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansı da 0,616 g/kWh indike özgül PM ortaya koymuştur.



Şekil 4.139 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

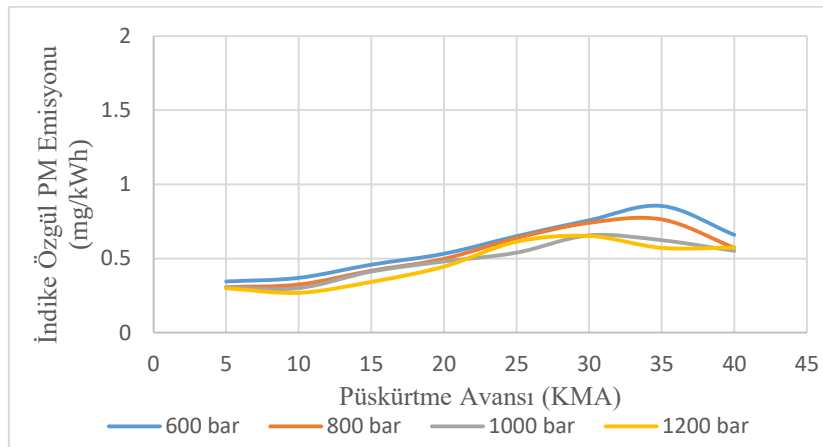
1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt püskürtme kütlelerindeki özgül PM Şekil 4.140'ta görülmektedir. Veri setinde püskürme avansının artışıyla beklenen eğilimlerde değişimler gözlemlenmiştir. Fakat değişim oranları nispeten düşüktür. Erken püskürtme bölgesinde indike güçteki düşüşün de ilgili püskürtme avanslarındaki düşüşü azımsanmayacak seviyede geriletmediği görülmektedir. Konvansiyonel dizel yanmasında ortaya çıkan indike özgül PM emisyonu ve PCCI bölgesinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları karşılaştırıldığında, PCCI bölgesinde durumun kötüleştiği ve indike özgül PM emisyonu değerlerinin arttığı görülmektedir. Özet olarak veri setinde erken püskürtmede mg/h cinsinden PM emisyonlarında düşüş sağlansa da indike özgül PM emisyonlarında arzu edilen hedefe ulaşılammıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,455 mg/kWh olan indike özgül PM emisyonu 35° KMA püskürtme

avansında 0,790 g/kWh değerine erişmiş, sonrasında ise püskürtme avansının 40° KMA'ya gelişine kadar yaklaşık yatayda seyretmiştir. 800 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,471 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, 35° KMA püskürtme avansında bu değer 0,718 g/kWh ile en büyük değerine ulaşmış ve sonrasında 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde 0,693 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiştir. Burada karşılaşılan düşüş de tatmin edici düzeyde olmayıp pratik olarak sabite yakın bir seyir ortaya çıkmıştır. Daha büyük püskürtme basınçlarında ise PCCI bölgesindeki düşüş biraz daha yüksek seviyededir. Ancak yine de arzu edilen seviyelerden uzaktır. 1000 bar püskürtme basıncında 5° KMA püskürtme avansı 0,367 g/kWh indike özgül PM emisyonuna yol açmış, 35° KMA püskürtme avansında 0,674 g/kWh ile en büyük indike özgül PM emisyonu ortaya çıkmış ve 40° KMA püskürtme avansına gelindiğinde 0,608 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 0,369 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, 30° KMA püskürtme avansında bu değer 0,562 g/kWh'ye kadar artmış, sonrasında bir miktar düşüş yaşanmıştır. 35° KMA püskürtme avansında karşımıza çıkan değer 0,509 g/kWh'dir ve 5° KMA püskürtme avans artışıyla %10 dolaylarında düşüş ortaya çıkmıştır. Fakat sonrasında indike güçteki düşüşün hızlanmasıyla 40° KMA püskürtme avansında 0,531 g/kWh indike özgül PM emisyonu elde edilmiştir. Bu sayısal değerlere göre püskürtme basıncı arttıkça ortaya çıkan değişim gradyanlarının daha küçük değerler aldığı yorumu yapılabilir.



Şekil 4.140 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

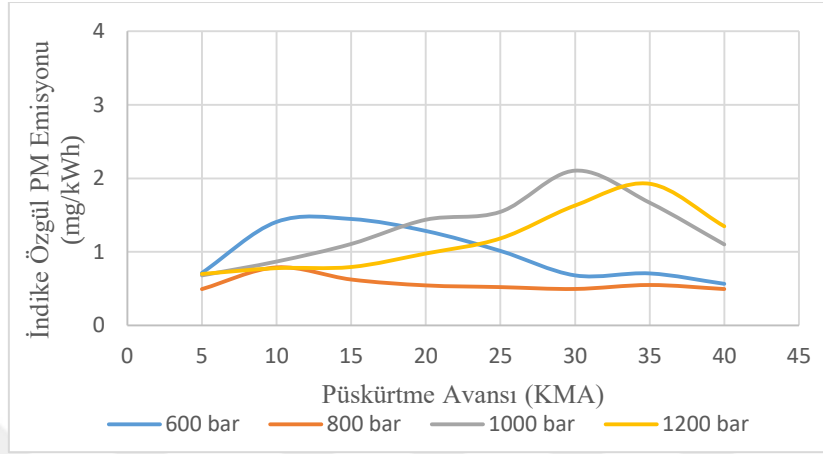
1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonundaki indike özgül PM Şekil 4.141’de görülmektedir. Veri setinde her ne kadar g/h cinsinden PM emisyonunda düşüş yaşansa da özgül emisyonlarda bir kazanç ortaya çıkmamıştır. Esas itibariyle her bir püskürtme basıncı serisinde pik değer elde edildikten sonra düşüş yaşanmıştır. Fakat pik değerlerin elde edildiği bölge indike gücün düşüş yaşadığı aralıktadır. Dolayısıyla bu düşüş ciddiye alınır nitelikte değildir. Konvansiyonel dizel yanmasında ortaya çıkan indike özgül PM daha düşüktür ve PCCI bölgesinde hedeflere ulaşamamıştır. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,345 g/kWh indike özgül PM modellenmiştir, bu değer 35° KMA püskürtme avansında en büyük değere ulaşarak 0,854 g/kWh’ye erişmiş, 40° KMA püskürtme avansında ise 0,659 g/kWh değerine gerilemiştir. Burada 35° KMA ile 40° KMA püskürtme avansı arasında düşüş azımsanabilir seviyede değildir. Fakat pik nokta öncesinde ortaya çıkan artış da yüksek olduğu ve indike güçte düşüş yaşandığı için bu düşüşe çok anlam yüklenmemelidir. 800 bar püskürtme basıncında da bu değerler 0,307 g/kWh, 0,763 g/kWh ve 0,572 g/kWh olarak modellenmiştir. 1000 bar ve 1200 bar püskürtme basınçlarında en yüksek indike özgül PM 30° KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. 1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,304 g/kWh, 30° KMA püskürtme avansında 0,656 g/kWh ve 40° KMA püskürtme avansında 0,551 g/kWh indike özgül PM modellenmiştir. 1200 bar püskürtme basıncında bu değerler sırasıyla 0,299 g/kWh, 0,652 g/kWh ve 0,574 g/kWh olarak modellenmiştir.



Şekil 4.141 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 1500 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok yakıt enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül PM değerleri Şekil 4.142’de sunulmuştur. Daha önce de belirtildiği

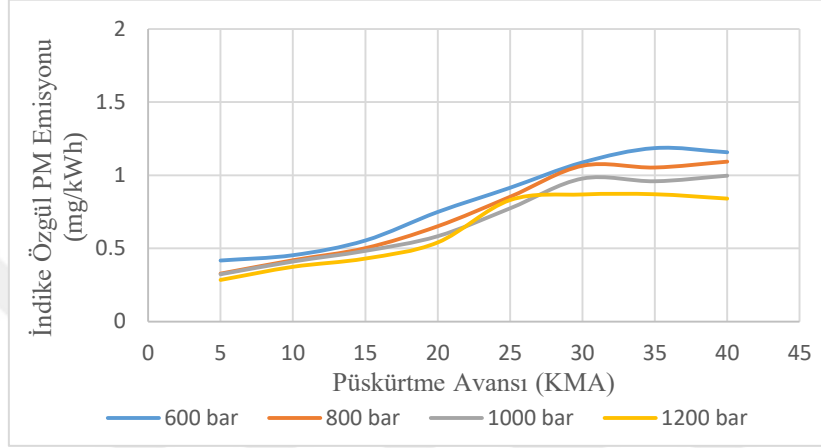
üzere deneysel çalışma esnasında bu bölgede ortaya çıkan emisyon ölçümü hatasına bağlı olarak emisyonlar sağlıklı bir şekilde modellenememiştir. Bu şartlar altında indike özgül PM emisyonlarını irdelemek sağlıklı olmayacaktır ve bu veri seti değerlendirme dışı bırakılmıştır.



Şekil 4.142 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 15 mg/strok enjeksiyon kütleinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok yakıt enjeksiyon kütleinde ortaya çıkan indike özgül PM değerleri Şekil 4.143'te sunulmuştur. Bu veri seti içerisinde püskürtme avansının artışıyla ilk etapta düzenli olarak indike özgül PM emisyonu artışı gözlemlenmiş ve sonrasında erken püskürtme şartında da gözle görülebilir bir düşüş ortaya çıkmamıştır. Hatta konvansiyonel yanmanın ortaya çıktığı püskürtme avanslarına göre durumun daha kötü olduğu söylenebilir. Erken püskürtme şartında ise sadece 600 bar püskürtme basıncında 35° KMA püskürtme avansı ile 40° KMA püskürtme avansı arasında püskürtme avansının artışına bağlı olarak sınırlı bir düşüş gözlemlenebilmiştir. Veri seti içerisinde erken püskürtme şartlarında esas olarak mg/h cinsinden PM emisyonlarında düşüş elde edilmiştir. Fakat bu bölgede yaşanan indike güç düşüşü daha büyük oranda karşımıza çıktığı için indike özgül PM emisyonlarında bir iyileşme görülebilmiştir. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,484 g/kWh indike özgül PM emisyonu ortaya çıkmış, sonrasında 35° KMA püskürtme avansında 1,186 g/kWh değerine kadar yükselen indike özgül PM emisyonu gözlemlenmiş ve sonrasında da 40° KMA püskürtme avansında %2 dolaylarında bir düşüş ortaya çıkmıştır. 800 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,328 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, sonrasında 30° KMA püskürtme avansında 1,065 g/kWh değerine ulaşılmış ve püskürtme avansının daha da artmasıyla yaklaşık

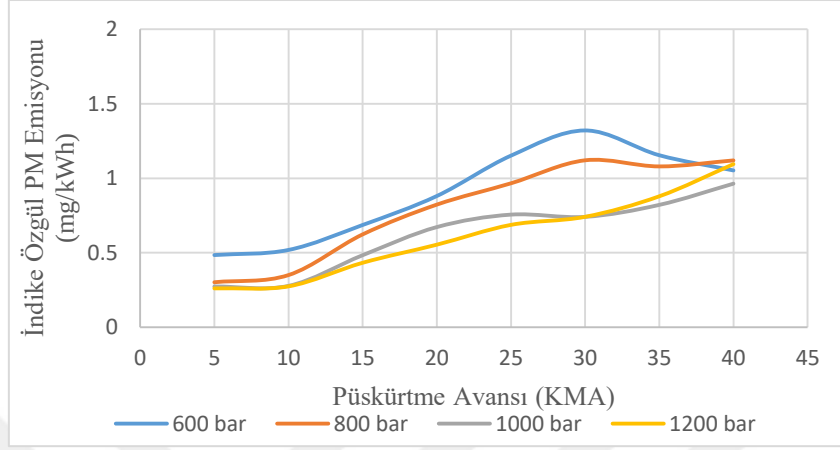
olarak yatay seyir gözlemlenmiştir. 1000 bar püskürtme avansında da benzer şekilde aynı püskürtme avanslarında 0,324 g/kWh ve 0,997 g/kWh indike özgül PM emisyonu gözlemlenmiş ve püskürtme avansının bu değeri aşmasından sonra da yaklaşık olarak sabit indike özgül PM emisyonu ortaya çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında da 1000 bar ile benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında da bu değerler 0,284 g/kWh ve 0,87 g/kWh olarak modellenmiştir.



Şekil 4.143 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 20 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan indike özgül PM değerleri Şekil 4.144'te sunulmuştur. Bu veri setinde püskürtme avansının artışıyla sadece 600 bar püskürtme basıncında 30° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra düşüş yaşanmıştır. 800 bar püskürme basıncında 30° KMA püskürtme avansı aşıldıktan sonra yaklaşık sabit değerler karşımıza çıkmıştır. 100 bar ve 1200 bar püskürtme basıncında ise püskürtme avansının artışıyla sürekli olarak artış ortaya çıkmıştır. Bu iki püskürtme basıncında mg/h cinsinden PM emisyonları da püskürtme basıncı arttıkça artış sergilemiş ve dizel vuruntusu emareleri ortaya çıkmıştır. Bu sebeple, söz konusu iki püskürtme basıncında herhangi bir düşüş beklenmemektedir. 600 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,484 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, 30° KMA püskürtme avansında 1,321 g/kWh indike özgül PM ortaya çıkmış ve bu değer 40° KMA püskürtme avansında 1,053 g/kWh değerini almıştır. 800 bar püskürtme basıncında ise 5° KMA püskürtme avansında 0,302 g/kWh indike özgül PM emisyonu modellenmiş, bu değer 30° KMA püskürtme avansında 1,121 g/kWh olarak ortaya çıkmış ve sonrasında son derece küçük değişimler ortaya çıkmıştır.

1000 bar püskürtme basıncında ve 5° KMA püskürtme avansında 0,274 g/kWh indike özgül PM emisyonu gözlemlenmiş ve 40° KMA püskürtme avansında bu değer 0,964 g/kWh'ye çıkmıştır. 1200 bar püskürtme basıncında ise bu değerler sırasıyla 0,261 g/kWh ve 1,095 g/kWh olarak modellenmiştir.



Şekil 4.144 Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok enjeksiyon kütlelerinde ortaya çıkan indike özgül PM emisyonları

5

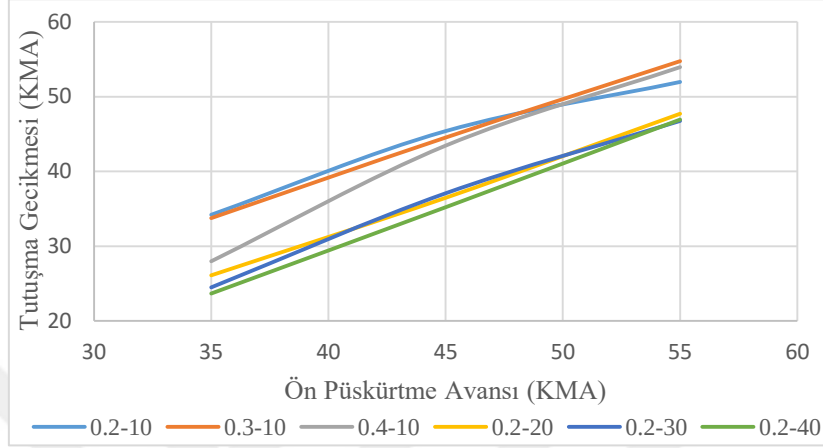
ÇİFT FAZDA ELDE EDİLEN SİMÜLASYON SONUÇLARI

Çalışmanın çift fazda yakıt enjeksiyonunu inceleyen kısmı 18 inceleme noktasından oluşmaktadır. Bu kısımda termodinamik modellemesi yapılan deneysel veriler 1500 dev/dak motor hızında, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlelerinde ve 800 bar püskürtme basıncında elde edilmiştir. Değişken işletme parametreleri ise ön karışım oranı, ana püskürtme avansı ve pilot püskürtme avansıdır. Ana püskürtme avansı 10° KMA ve 20° KMA olarak iki farklı değer almakta, ön püskürtme oranı %20, %30 ve %40 olarak üç farklı değer almakta, ön püskürtme avansı ise 35° KMA, 45° KMA ve 55° KMA olarak üç farklı değer almaktadır. Çift fazda deneysel verisi alınan noktaların tamamında deneysel doğrulama yapılmıştır. Dolayısıyla bu kısımda deneysel veri kısmında incelenen parametrelere tekrardan yer verilmeyecek, deneysel verilerin yorumlanmasında değinilmeyen başlıklara yer verilecektir.

5.1 Tutuşma Gecikmesi Sürelerinin Yorumlanması

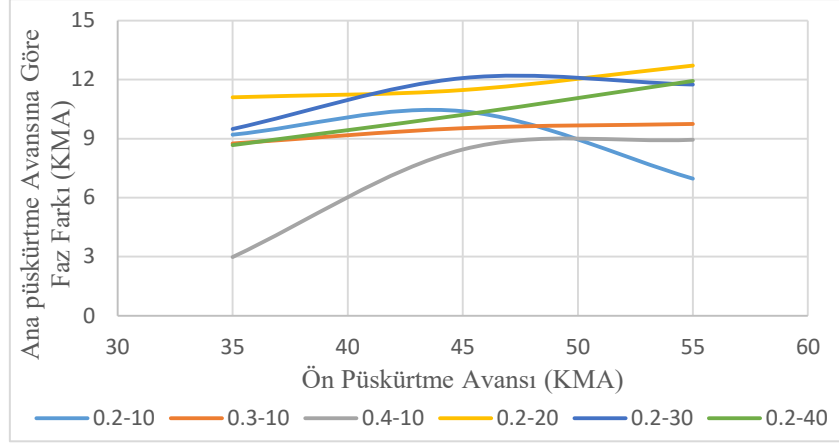
Şekil 5.1 üzerinde çift fazda gerçekleştirilen çalışmalara ait TG süreçleri görülmektedir. Elde edilen grafik yanma odasına ilk yakıt zerreciğinin giriş anı yani pilot püskürtmenin başlangıç anına göre çizilmiştir. Ana püskürtme avansının grafik içerisindeki üç veri seri için 10° KMA, diğer üç veri seti için de 20° KMA olduğu göz önünde bulundurulduğunda incelenen 18 noktada da yanma başlangıcının ana püskürtme fazı sonrasında ortaya çıktığı görülmektedir. Ön püskürtme avansı 10° KMA'lık adımlar halinde artım gösterdiği için TG süreçleri de buna paralel artış sergilemiştir. %40 ön püskürtme avansı yer yer bu eğilimin dışında kalmıştır. Özellikle ana püskürtme avansının ÜÖN'ye daha yakın olduğu şartlarda bu durum biraz daha belirgindir. Bu durum ön püskürtme fazında silindir içerisine giren yakıtın yanma başlatmaya yetecek düzeyde olmadığı ve tamamen ön karışım yaratmaya odaklandığı söylenebilir. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ana püskürtme avansında daha farklı sonuçların elde edilmesinin sebebi ise ön karışımın yarattığı hava fazlalık katsayısının hala çok fakir olmakla birlikte

nispeten daha büyük değer alması ve yanmanın ana püskürtme fazı sonrasında tutuşabilir karışım oluşturma sürtesini kısılmasıdır. Benzer şekilde 20 ° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme avansında da bu eğilim net bir şekilde görülmektedir. Fakat ön püskürtme avansının artışıyla beraber bu eğilim yavaş yavaş etkisini yitirmiştir.



Şekil 5.1 1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre tutuşma gecikmesi verileri

Şekil 5.1 üzerindeki veriler ön püskürtme başlangıcı baz alınarak yaratılmıştır. Yanma başlangıcının ana püskürtme fazı tarafından tayin edildiği de bu grafik üzerinde net olarak görülmektedir. Bu şartlarda yanma başlangıcına dair net bir yorum yapmak grafik okuması yaparken matematiksel işlem yapmayı gerektirdiği için güçleşmektedir. Bu sebeple Şekil 5.2 sunulmuştur. Şekil 5.2 ana püskürtme avansı ile yanma başlangıcı arasındaki faz açısı farkını göstermektedir. Tahmin edileceği üzere 20° KMA ana püskürtme avansında yanma başlangıcı ile ana püskürtme avansı arasında geçen süre daha büyüktür. Ön püskürtme avansının artışıyla da yanma başlangıcı ile ana püskürtme başlangıcı arasındaki faz açısının 2° KMA ile 3° KMA dolaylarında artış gösterdiği görülmektedir. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında, ön püskürtme avansının artışıyla yanma başlangıcı ile ana püskürtme arasındaki faz açısının başlangıçta yaklaşık sabit seyrettiği sonrasında ise kısaldığı görülmektedir. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında ise ön püskürtme avansı arttıkça yanma başlangıcı ile ana püskürtme avansı arasındaki faz açısının yavaşça artış gösterdiği görülmüştür.

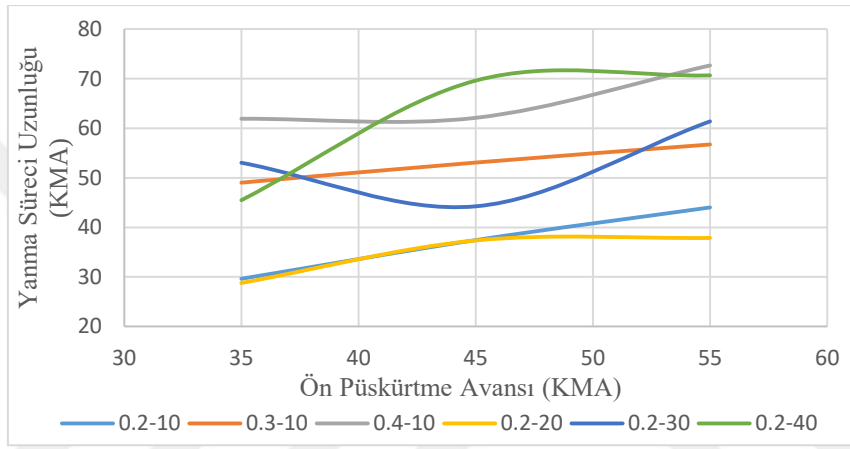


Şekil 5.2 1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre yanma başlangıcı ile ana püskürtme avansı arasındaki süre

5.2 Çift Fazda Elde Edilen Yanma Süreci Değerleri

Şekil 5.3 çift fazda yakıt püskürtülmesi şartında ortaya çıkan yanma süreci uzunluklarını göstermektedir. Grafik üzerinde açıkça görülmektedir ki ön karışım oranı yanma sürecini doğrudan etkilemiştir. Her iki ana püskürtme avansında da aynı ön karışım oranları kendi içlerinde adeta gruplaşmış eğriler ortaya koymuştur. %20 ön karışım oranı en kısa yanma sürecini ortaya koyarken, ön karışım oranı arttıkça yanma sürecinin uzadığı görülmektedir. Ön püskürtme fazında silindir içerisine giren yakıtın, yanma başlayana kadar yanma odası içerisinde geçirdiği süre daha uzun olduğu için hava ile karışım oluşturmak için nispeten yeterli süreye sahip olduğu söylenebilir. Karışıma ayrılan süre arttıkça ön karışımın homojenliği artmaktadır. Böylece yanma odası içerisinde geniş bir hacimde fakir karışım yaratılmış olur. Ön karışım oranı arttıkça bu karışım daha büyük hava fazlalık katsayıları ile fakir karışım yaratır. Ancak bu durumda ana püskürtme fazında yanma odasına giren yakıt miktarı düşüş sergiler. Bu şartta yanmanın ilk periyodunda açığa çıkan ısı düşüş gösterecektir. Sonrasında ise fakir karışimli yanma devam edecektir. Ana püskürtme fazının yol açtığı yanmada ilk esnada fazla ısı açığa çıkamaması ve yakıtın daha büyük bir oranda yanma odası içerisinde geniş bir yayılım göstermesi ortalama yanma hızını düşürerek yanma sürecini arttırmıştır. Ön püskürtme avansı arttıkça yanma sürecinin genel olarak artış sergilediği görülmektedir. Bu da yaratılan ön karışımın, ön püskürtme avansı arttıkça yanma başlayana kadar yanma odası içerisinde daha fazla zaman geçirmesine ve böylelikle daha seyreltik bir ön karışım yaratmasına bağlıdır. Ön karışımın daha yüksek

homojenliğe sahip ve daha seyreltik oluşu da o bölgedeki alev hızını düşürmekte ve yanma sürecini uzatmaktadır. Bu bahsedilen eğilimler tek bir istisnai durum ile araştırma uzayında geçerlidir. Ancak 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında 35° KMA ön püskürtme avansından 45° KMA ön püskürtme avansına geçişte yanma sürecinin 10° KMA'ya yakın düşüş sergilediği görülmektedir. Fakat burada güç değerinin de düşüş sergilediği ve Bölüm 3.8 dahilinde de açıklandığı üzere yanmanın enjeksiyon prosesi gereğince sağlıklı bir şekilde tamamlanamadı bilinmektedir. Bu sebeple bu işletme şartında ön karışımın sağlıklı bir şekilde yaratılamadığını belirtmek gerekmektedir.



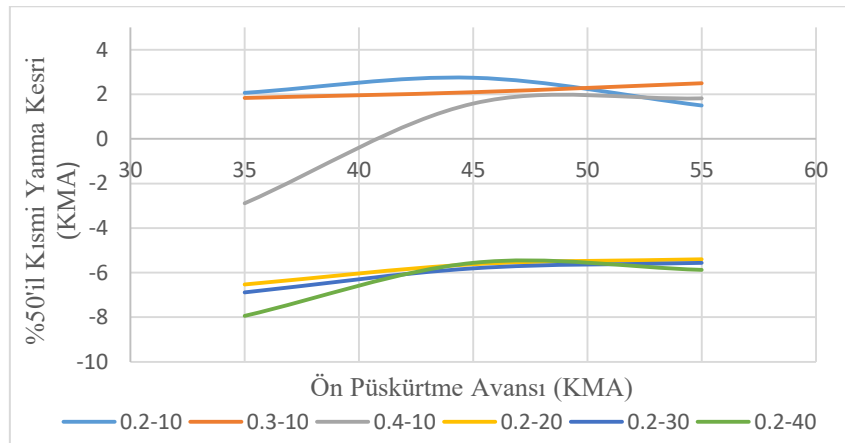
Şekil 5.3 1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre yanma süreci uzunlukları

5.3 Çift Fazda Elde Edilen KYK50 Konumları

Şekil 5.4 üzerinde çift fazda yakıt püskürtme şartında ortaya çıkan KYK50 noktaları görülmektedir. Grafik üzerindeki veriler bir süreci değil de belli bir ısı girişinin yakalandığı anı temsil ettiği için belirli bir konumu göstermektedir. Bu nedenle negatif değerler de ortaya çıkmıştır. Değerler ÜÖN sonrası pozitif olacak şekilde sunulmuştur. Negatif değerler ilgili noktanın ÜÖN öncesinde elde edildiğini göstermektedir. Ana püskürme avansının 20° KMA olduğunda gerek ön karışım oranının artışı gerekse de ön püskürtme avansının artışıyla kayda değer KYK50 noktası farklılıkları ortaya çıkmamıştır. Sadece %40 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında diğer ön karışım oranlarına göre KYK50 noktasına yanma başladıktan daha kısa bir süre sonra ulaşılmıştır. Fakat burada ön püskürtme fazının sonuyla ana püskürtme fazı başlangıcı arasındaki sürecin veri seti içerisindeki en

kısa değeri aldığını belirtmek gerekir. Bu şartta enjeksiyon diğer enjeksiyon senaryolarına göre nispeten tek faza yakınsayan bir karakter sergilemektedir. Bu sebeple yanmanın enerji girişi açısından ilk %50'lik kısmının daha kısa sürede tamamlanması beklenen bir durumdur. Sonrasında ise 20° KMA ana püskürtme avansında KYK50 noktalarının ön püskürtme avansından pek etkilenmediği, oldukça küçük değişimler ile KYK50 noktasının ÜÖN'ye biraz yaklaştığı belli belirsiz bir şekilde görülmektedir. Bu da ön püskürtme fazında yanma odasına giren yakıtın yaratmış olduğu dolu karakteristiğinin yanma üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğunu ve temel belirleyici faktörün ana püskürtme fazı olduğu sonucunu doğurmaktadır.

10° KMA ana püskürtme avansında ise yanma başlangıcının daha geç ortaya çıkması ve yanmanın daha büyük oranda genişlemeye kayması neticesinde KYK50 noktaları bir miktar farklılık göstermektedir. 10° KMA ana püskürtme avansında %20 ve %30 ön püskürtme oranlarında KYK50 noktası kabaca ÜÖN sonrası 2° KMA'da ortaya çıkmıştır. Ön püskürtme avansının artışında ise belirgin bir değişimin varlığından söz etmek pek mümkün değildir. Fakat burada %40 ön karışım oranının yarattığı etki daha gözle görülebilir bir hal almıştır. Burada yine ön püskürtmenin bitişi ile ana püskürtmenin başlangıcı arasındaki faz açısının daha kısa oluşu belirleyici rol oynamıştır.

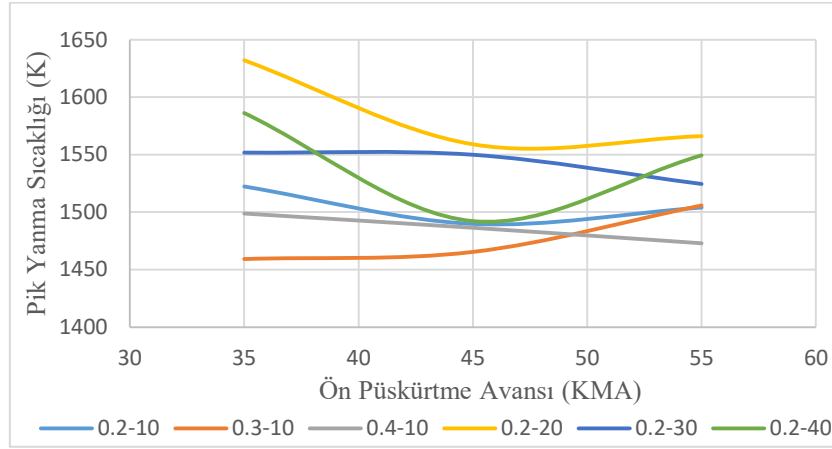


Şekil 5.4 1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre KYK50 konumları

5.4 Pik Yanma Sıcaklığı Değerlerinin İncelenmesi

Yanma odası içerisinde oluşan anlık yanma sıcaklıkları NO_x emisyonlarını en güçlü şekilde etkileyen parametredir. Benzer şekilde pik sıcaklık değerleri de NO_x emisyonları üzerinde ciddi rol oynamaktadır. Bu sebeple pik yanma sıcaklıklarının incelenmesi ve NO_x emisyonları ile arada ilişki kurulması faydalı olacaktır. Şekil 5.5 çift fazda yakıt püskürtülmesi koşulunda ortaya çıkan pik yanma sıcaklığı değerlerini göstermektedir. 20° KMA ana püskürtme avansında elde edilen sonuçlarda pik yanma sıcaklığının 10° KMA ana püskürtme avansında elde edilen pik yanma sıcaklıklarına göre daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. 10° KMA ana püskürtme avansında yanmanın daha büyük kısmının genişlemeye kaydığı Bölüm 5.3 dahilinde görülmektedir. Bu sebeple 20° KMA ana püskürtme avansında ortaya çıkacak pik yanma sıcaklıklarının daha yüksek olduğu tahmin edilebilir bir durumdur. Ana püskürtme avansının değişimi neticesinde ortaya çıkan değişimlerin NO_x emisyonları üzerindeki etkisi Bölüm 3.8.8'de de açıkça görülmektedir. Ana püskürtme avansının değişimiyle 10° KMA ana püskürtme avansında NO_x emisyonları yarı yarıya düşüş sergilemiş, hatta bu düşüş bazen daha yüksek oranlara da ulaşmıştır. Ön karışım oranının etkisi ise tam olarak net bir değişim eğilimi ortaya koymamıştır. Fakat burada Bölüm 3.8 içerisinde defalarca belirtildiği üzere yakıt demetinin yanma odası içerisindeki yayılımı ve yanma odası geometrisi arasında zaman zaman ortaya çıkan geometrik uyumsuzluklar da rol oynamıştır. Bu sebeptendir ki ön püskürtme avansının değişimiyle net bir değişim eğilimi gözlemlenememiştir. Elde edilen 18 noktadaki farklı ana püskürtme avansı ve ön karışım oranında 6 farklı inceleme grubundaki NO_x değerleri ve pik yanma sıcaklığı değerlerine bakıldığında, pik sıcaklığın her daim temel davranışı belirleyen faktör olmadığı görülmüştür. Tek fazda yakıt püskürtülmesi şartında yapılan çalışmalarda ise pik yanma sıcaklığının değişim eğilimlerinin doğrudan belirlediği görülmüştü. Fakat bu çalışma aralığında ön püskürtme ile yaratılan ön karışımın ve bu bölgelerde oluşan oksidasyon ve sonrasındaki soğuma hızlarının daha belirleyici bir faktör olarak pik yanma sıcaklıkları ile mücadeleye girdiği söylenebilir. Bunda yakıtın bir kısmının yanma odasına erken girmesi sonucunda ana püskürtme fazı sonrasında oluşan kontrolsüz yanma fazında daha az yakıtın yanmaya katılması ve ulaşılan bu sıcaklık değerlerinin kontrolsüz yanma sonrasında oluşan difüzyon alevi esnasında korunamamasının da önemli bir payı vardır. Sonuç olarak pik sıcaklığın

yanında soğuk bölgeleri azaltmanın NO_x çıktıları üzerindeki azaltıcı etkisi çift fazda yakıt püskürtülmesi şartında daha belirgin olarak karşımıza çıkmıştır.



Şekil 5.5 1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre pik yanma sıcaklıkları

5.5 Silindir İçi Anlık Basınç Değerlerinin İncelenmesi

Silindir içi anlık basınç datalarının daha önceki verilerde olduğu gibi tek bir grafik üzerinde yorumlanması oldukça güçtür. Bu sebeple her bir ana püskürtme avansı ve ön karışım oranında ön püskürtme avansının değişimine bağlı olarak grafikler çizilmiş ve Ek-E içerisinde sunulmuştur.

20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında pik basıncın elde edildiği bölgede ve genişleme fazı boyunca $P-\alpha$ verileri kayda değer farklılıklar barındırmamış ve büyük oranda benzerlik göstermiştir. Fakat ön püskürtme avansının değişimiyle TG'nin dolayısıyla da yanmanın başlangıcının farklılık göstermesi sebebiyle ÜÖN öncesi anlık basınç datalarında bir miktar farklılık göze çarpmaktadır. 35° KMA ön püskürtme avansında kontrolsüz yanma fazında elde edilen $dP/d\alpha$ değeri, 45° KMA ön püskürtme avansına göre daha büyük değer almıştır, 55° KMA ön püskürtme avansında ise yanmanın başlangıcı ÜÖN'ye daha yakın bir noktada yer aldığı için $dP/d\alpha$ tekrardan artış eğilimine girmiştir. Bu artışta artan TG sonucu yanmanın ÜÖN'ye daha yakın noktada başlamasının ve piston kinematiği gereğince yanma odasındaki anlık küçülme oranının artış göstermesi neticesinde basınç artışı yaşanmasının da payı olduğu söylenebilir. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında da ÜÖN sonrası ortaya çıkan eğri büyük oranda örtüşmektedir. Fakat ÜÖN öncesi karakter büyük oranda değişmiş

durumdadır. Tahmin edileceği üzere 35° KMA ön püskürtme avansında yanma daha erken başlamış ve motoring eğrisinden ayrılma daha erken ortaya çıkmıştır. 45° KMA ve 55° KMA ön püskürtme avanslarında ise ortaya çıkan $P-\alpha$ değerleri ÜÖN öncesinde de birbirine oldukça yakın seyretmiştir. 20° KMA ana püskürtme avansında ve %40 ön karışım oranında ise ön püskürtme fazında silindir içerisine sevk edilen yakıtın yanmanın geneli üzerindeki belirleyici etkisi daha açık bir şekilde görülmeye başlamıştır. Ön püskürtme avansının artmasıyla yanma yavaşlama eğilimine girmiş ve 45° KMA ön püskürtme avansında kontrolsüz yanma fazında ortaya çıkan $dP/d\alpha$ değeri düşmeye başlamıştır. Aynı zamanda bu işletme şartında yakıtın tamamı yanma odası içerisinde karışım oluşturamadığı için basınç artış gradyanı azalmıştır. Ön püskürtme avansının 55° KMA olduğu şartta da TG artış sergilemiş ve yanma başlangıcında yanma odası hacmi küçülmüştür. Bunun neticesinde kontrolsüz yanma fazındaki $dP/d\alpha$ değeri tekrardan artışa geçmiştir.

Ana püskürtme avansının 10° KMA olduğu şartlarda genişleme eğrisi için az önce söz edilen yorumları yapmak yine mümkündür. Fakat bu şartta yanma başlangıcının genişlemeye kaydığı görülmektedir. Bu sebeple yanmanın ilk safhalarında yani kontrolsüz yanma fazında ortaya çıkan basınç değerleri daha belirgin hatlar ile birbirinden ayrılmış durumdadır. Daha küçük ön karışım oranlarında yanmanın başlangıcı daha kuvvetli bir şekilde ana püskürtme tarafından kontrol edildiği için kontrolsüz yanma fazında daha ayrık karakterler daha farklı krank konumlarında ortaya çıkmıştır. Ön karışım oranının artışına bağlı olarak ise bu etki git gide belirginliğini yitirmiştir.

5.6 Isı Açığa Çıkış Hızlarının İncelenmesi

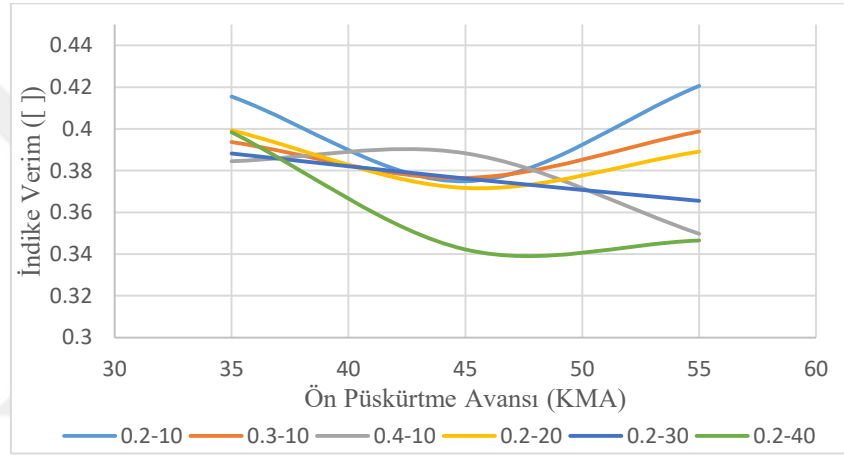
Çift fazda yakıt püskürtme şartında elde edilen verilerde ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı grafikleri $J/^{\circ}KMA$ olarak çizilmiş ve Ek-F içerisinde çalışmaya dahil edilmiştir. Çift fazda yakıt püskürtmede yapılan çalışmaların gerek deneysel verilere gerekse de simülasyon sonuçlarına yönelik yapılan yorumlarında ısı açığa çıkış hızı verilerinin genel hatlarına yönelik tahminlerde bulunmak mümkündür. Fakat çalışma içerisinde bazı noktalarda yakıtın bir kısmının yanmaya katılamadığı üzerine hipotez ortaya atılmış ve yorumlamalar büyük oranda bu hipotez üzerinde inşa edilmiştir. Bu sebeple ısı açığa çıkış hızı verileri çift fazda püskürtme şartında

ayrı bir önem taşımaktadır. Çalışma içerisindeki 6 veri seti içerisindeki 18 noktadan 3 tanesinde 45° KMA ön püskürtme avansında performans parametrelerinde ciddi düşüşler ortaya çıkmış, ön püskürtme avansının 55° KMA değerine gelişiyle performans değerlerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Bu durum sağlıklı yanma koşullarında beklenen bir durum değildir. Karşılaşılan bu durumun 45° KMA ön püskürtme avansında, ön püskürtme fazı süresince silindir içerisine enjekte edilen yakıtın durağanlaşma mesafesi ve piston üst yüzeyi konumunun uyumsuzluk barındırdığı ve cidar ısıtmasına neden olduğu öne sürülmüştür. 35° KMA ön püskürtme avansında bu durumun yaşanmaması karışım oluşumu başladığı anda yanma odası içerisindeki sıcaklık, türbülans ve karşı basınç sebebiyle yakıtın daha erken durağanlaşmasına (stagnasyona uğramasına), 55° KMA ön püskürtme avansında ise yakıt jetinin kat ettiği mesafenin daha yüksek oluşu sonucunda durağan hale gelebilmesine bağlanmıştır. Bu şartlarda 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında, 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön karışım oranında, 10° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön karışım oranında ön püskürtme avansının 45° KMA değerindeyken ısı açığa çıkış hızı eğrisinin altında kalan alan integralinin daha küçük değerler alması gerekmektedir. Gerçekten de her üç noktada da bu durumun ortaya çıktığı görülmüştür. Böylelikle belirtilen şartlarda ortaya çıkan anomaliler açıklığa kavuşturulabilmiş ve ortaya atılan hipotez doğrulanmıştır.

5.7 İndike Verim Değerlerinin İncelenmesi

Araştırma uzayı içerisinde ortaya çıkan indike verim değerlerinin değişim eğilimleri ve bu değişimlerin altında yatan sebepler Bölüm 3.8.1 ve Bölüm 3.8.4 içerisinde sunulan gerekçeler ile aynıdır. Çalışmanın bu kısmı sabit motor hızı ve sabit yakıt püskürtme kütlesi altında yapıldığı için indike verim ve OİB çıktıları bire bir aynı değişim eğilimlerini aynı değişim oranlarıyla verecektir. Bu sebeple bu alt başlık dahilinde ortaya çıkan değişim eğilimlerinin gerekçeleri yinelenmeyecektir. Fakat OİB değerleri yakıt enerjisinin ne kadarlık kısmının işe çevrilebildiği hakkında net bilgi vermediği için indike verim değerlerinin de gözler önüne serilmesi yararlı görülmüştür. Şekil 5.6 üzerinde çift fazda yakıt enjeksiyonunda ortaya çıkan OİB değerleri görülmektedir. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında 35° KMA ön püskürtme avansı %39,93, 45° KMA ön püskürtme avansı

%37,17, 55° KMA ön püskürtme avansı %38,91 indike verim ortaya koymuştur. Bu değerler 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında sırasıyla %38,87, %37,62 ve %36,55 olarak hesaplanmıştır. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ise %39,84, %34,22 ve %34,65 değerini almıştır. 10° KMA ana püskürtme avansı ve %20 ön karışım oranında 35° KMA ön püskürtme avansı %41,55, 45° KMA ön püskürtme avansı %37,49, 55° KMA ön püskürtme avansı %42,06 indike verim ortaya koymuştur. Bu değerler 20° KMA ana püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında sırasıyla %39,37, %37,65 ve %39,88 olarak hesaplanmıştır. 20° KMA ana püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ise %38,45, %38,83 ve %34,97 değerini almıştır.

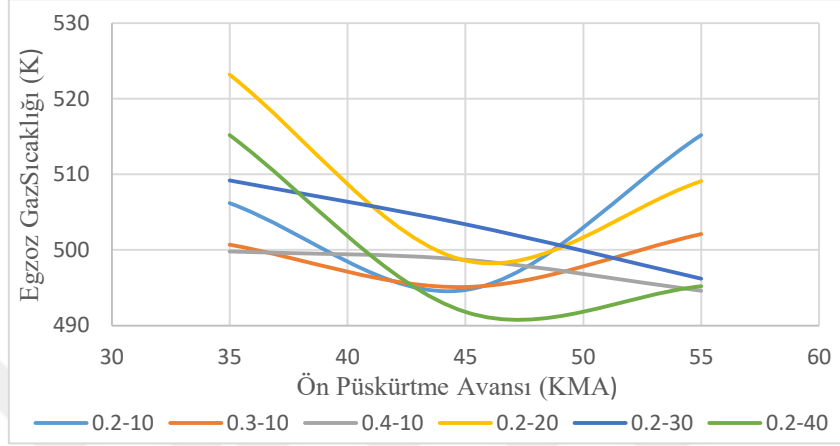


Şekil 5.6 1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre indike termik verim değerleri

5.8 Egzoz Gaz Sıcaklıklarının İncelenmesi

Çift fazda yakıt enjeksiyonu şartlarında elde edilen tüm verilerde yakıt püskürtme kütlesi 15 mg/strok değerindedir. Yani sisteme sokula ısı enerjisi eşittir. Fakat işletme şartlarının değişimine bağlı olarak farklı OİB değerleri ortaya çıkmaktadır. Isıl enerjinin geri kalan kısmı ise cidarlara olan ısı transferi ve egzoz gazları ile termodinamik sistemden uzaklaştırılmaktadır. Çalışmada indike işe dönüştürülemeyen enerjinin ne boyutta ısı transferine ve atık ısıya dönüştüğünü ortaya koymak adına bu bölüm çalışmaya dahil edilmiştir. Şekil 5.7 üzerinde görülen egzoz gaz sıcaklıkları ile OİB değerlerinin benzer değişim eğilimlerine sahip olduğu görülmektedir. Fakat PCCI rejimi etkinleştikçe egzoz gaz sıcaklıklarındaki artış oranının biraz daha düşük seviyede kaldığı görülmektedir.

Bu durumda indike işe çevrilemeyen ısı, DSY şartlarında ısı kayıplara daha fazla yönelmektedir. Yanma sürecinin uzaması da ısı kayıpların artacağı konusunda ön görüş sahibi olmamıza imkan tanımaktadır. Burada elde edilen eğrilerin karakteristik değişim miktarları ve OİB değişim oranları karşılaştırıldığında da bu durum netliğe kavuşmaktadır.



Şekil 5.7 1500 dev/dak motor hızı ve 800 bar püskürtme basıncında farklı ana püskürtme avansı, ön karışım oranı ve ön püskürtme avansına göre egzoz gaz sıcaklıkları

6.1 Tek Fazda Yakıt Püskürtme Şartında Elde Edilen Sonuçlar

Tek fazdaki araştırma uzayında yakıt püskürtme kütlesi 15 mg/strok, 20 mg/strok ve 25 mg/srtrok olarak üç farklı değer almaktadır. Motor hızı 1000 dev/dak, 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak olarak üç farklı seviyede seçilmiştir. Yakıt püskürtme basıncı 600 bar ile 1200 bar arasında 200 bar adımlar ile değiştirilmiştir. Püskürtme avansı ise 5° KMA ile 40° KMA arasında 5° KMA'lık adımlarla değiştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki paragraflarda sunulmuştur.

PCCI rejiminde püskürtme avansı arttıkça TG'nin artış gösterdiği ve belli yerlerde iki ardışık püskürtme avansı arasındaki faz açısından daha büyük TG artışlarının yaşandığı görülmüştür. Konvansiyonel çalışma bölgesinde motor yükü arttıkça TG'nin düşüş sergilediği bilinmektedir. Fakat PCCI stratejinde uygulanan büyük püskürme avanslarında TG'nin motor yükü artışlarından daha az etkilendiği görülmüştür. Belli bir püskürtme avansında, püskürtme basıncı arttıkça konvansiyonel dizel yanmasında TG kısılırken, PCCI bölgesinde püskürtme basıncı arttıkça TG süreci artış sergilemiştir.

PCCI çalışma bölgesinde, püskürtme avansı arttıkça yanma süreci istisnasız olarak artış göstermiştir. Konvansiyonel dizel yanmasında düşük püskürtme basınçları, PCCI rejiminin yanmaya hakim olduğu püskürtme avanslarında ise büyük püskürtme basınçları daha uzun yanma süreçleri ortaya koymuştur. Motor yükü arttıkça PCCI bölgesinde gözlemlenen yanma süreci farklılıkları, konvansiyonel dizel yanmasına göre daha küçük değişimler sergilemiştir.

KYK50 noktaları incelendiğinde, motor hızı arttıkça püskürtme basıncına hassasiyetin azaldığı görülmüştür. Bun ilaveten, motor yükü artışıyla konvansiyonel dizel yanması bölgesinde püskürtme basıncı arttıkça KYK50 konumunun belli düzeyde farklılıklar ortaya çıkmıştır. Fakat PCCI bölgesinde motor yükü arttıkça, farklı püskürtme basınçlarının yarattığı KYK50 noktaları arasındaki farklılık belli oranda perdelenmiştir. Püskürtme avansının değişimiyle

ortaya çıkan eğilimler TG ile birlikte değerlendirildiğinde, PCCI bölgesinde KYK50 noktaları ile yanma başlangıç noktaları arasındaki faz açısının püskürtme avansının değişiminden ciddi düzeyde etkilenmediği görülmüştür. Fakat yanma süreci PCCI bölgesinde uzamıştır. Bu şartlarda PCCI stratejisinde yanmanın ısı girişi açısından ilk %50'lik kısmının yanma hızı itibariyle pek farklılık göstermediği, ikinci %50'lik ısı girişinin ise daha düşük yanma hızlarında gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Konvansiyonel dizel yanmasında büyük püskürtme basınçları daha yüksek maksimum yanma sıcaklıkları ortaya koymuştur. PCCI bölgesinde ise püskürtme basıncı arttıkça karışım homojenliği artışına ve daha fakir bir karışım oluşumuna bağlı olarak pik yanma sıcaklıkları düşüş göstermektedir. Konvansiyonel yanma bölgesinde püskürtme avansı ve basıncının değişimiyle daha küçük maksimum silindir içi sıcaklık farklılıkları gözlemlenirken PCCI bölgesinde ortaya çıkan farklılık daha yüksek seviyededir. Esas itibariyle PCCI bölgesinde maksimum silindir içi sıcaklık değerlerinin tahmin edildiği kadar düşüş göstermediği görülmektedir. Burada yanma başlangıcı ile KYK50 değerinin elde edildiği nokta arasındaki faz açısının pek değişim göstermemesinin payı büyüktür. Fakat PCCI bölgesinde NO_x emisyonlarının düşüş sergilemesi bu yüksek sıcaklık bölgesinde konvansiyonel yanma stratejisine göre daha kısa süre geçirildiğine işaret etmektedir. Motor yükü arttıkça, püskürtme avansının maksimum yanma sıcaklığı üzerinde oynadığı rol artmıştır. Motor hızı ve yükünün en yüksek olduğu 2000 dev/dak motor hızı ve 25 mg/strok yakıt enjeksiyonu şartında püskürtme avansının artışı arzu edilen pik yanma sıcaklığı düşüşünü yaratmamış ve yanma hızları artış göstererek bazı çalışma noktalarında en yüksek pik yanma sıcaklıkları ortaya çıkmıştır.

Silindir içi maksimum basınç değerlerinin konvansiyonel çalışma bölgesinde püskürtme basıncı arttıkça tahmin edileceği üzere daha yüksek değerler aldığı, PCCI bölgesinde ise daha düşük püskürtme basınçlarında daha yüksek silindir içi pik basınç değerlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. PCCI bölgesinde düşük püskürtme basınçlarında elde edilen silindir içi pik basınç değerinin, zaman zaman konvansiyonel çalışma bölgesinde ve yüksek püskürtme basınçlarında elde edilen silindir içi pik basınç değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. PCCI çalışma bölgesinde konvansiyonel yanma bölgesine kıyasla maksimum silindir içi basınç

değerlerinde bir düşüş gözlemlenememiştir. Bu değerlerin güç çıkışına doğrudan etki etmemesi ise bu pik basıncın elde edildiği konumun, her zaman termodinamik olarak ideale en yakın şartta ortaya çıkmamasıyla açıklanabilir. PCCI çalışma rejiminde motor yükü arttıkça püskürtme avansı ve basıncının değişimiyle ortaya çıkan maksimum silindir içi basınç farklılıkları daha yüksek değerlere tırmanmıştır.

Silindir içi anlık basınç ve krank açısı diyagramlarında PCCI bölgesinde kontrolsüz yanma fazında ortaya çıkan $dP/d\alpha$ değerlerinin düşüş sergilediği net bir şekilde görülmüştür. 35° KMA ve 40° KMA gibi araştırma uzayandaki sınır değer yakınlarında püskürtme yapılması durumunda yanmanın başlangıç noktasının, TG verileri içerisinde de bahsedildiği üzere, pek değişim sergilemediği görülmüştür. Ancak pik basınç değeri ve genişleme eğrisi boyunca ortaya bir miktar farklılık çıkmıştır.

Püskürtme avansının artışıyla ilk etapta yanma termodinamik olarak ideal şarta yakınsamış ve efektif motor gücü artış sergilememiştir. Devamında püskürtme avansı arttıkça efektif güç değerlerinde düşüş gözlemlenmeye başlamıştır. Yüksek püskürtme basınçlarında maksimum gücün elde edildiği püskürtme avansı tahmin edileceği üzere daha küçük püskürtme avanslarında yakalanmıştır. Bu bölgelerde yanma, konvansiyonel dizel yanması karakterinde olduğu için yüksek püskürtme basınçları daha büyük efektif güç değerleri ortaya koymuştur. PCCI bölgesinde ise daha düşük püskürtme basınçları daha iyi efektif güç değerlerini ortaya çıkartmıştır. Aynı zamanda püskürtme basıncı düştükçe, püskürtme avansının artışıyla PCCI bölgesinde yaşanan güç düşüşünün hızlandığı aralık da daha büyük püskürtme avanslarında ortaya çıkmıştır. PCCI bölgesinde püskürtme basıncı düştükçe efektif güç çıkışının artış göstermesi, yanma odasına giren birim kütlenin momentumunun düşüklüğüne ve yakıtın daha erken stagne oluşu sonucunda cidar ıslatma eğiliminin azalarak daha yüksek miktarda yakıtın yanmaya katılmasıyla açıklanabilir. Aynı zamanda bu şartlarda lokal hava fazlalık katsayısı dengesizlikleri de konvansiyonel dizel yanmasına bir miktar daha yakındır. Bu sebeple yanma daha yüksek hızlarla gerçekleşmektedir.

PCCI bölgesine geçildiğinde püskürtme avansının artışıyla özgül yakıt sarfiyatında, konvansiyonel dizel yanmasına göre daha büyük artışlar gözlemlenmiştir. Bilindiği üzere efektif güç ve özgül yakıt sarfiyatı değerleri karşıt ilişki içerisinde davranış sergilemektedir. Burada da özellikle 40° KMA püskürtme avansında özgül yakıt

sarfiyatı değerlerinin ciddi derecede tırmanışa geçtiği ve püskürme basıncı arttıkça da özgül yakıt sarfiyatı davranışının oldukça kötüleştiği görülmektedir.

PCCI bölgesinde OİB değerlerinde gözlemlenen düşüş bir yandan yanmanın bozulmaya başlamasına diğer yandan da yanmanın daha yavaş ve daha büyük etkin hacimde gerçekleşmesine bağlıdır. Böylelikle ısı transferinin artması sonucu OİB değerlerinde düşüş görülmüştür. Ancak efektif performans parametrelerine göre püskürme avansı değişimiyle OİB değerlerinin bir miktar daha stabil davranış sergilediğini söylemek mümkündür. Düşük püskürtme basınçlarında bu durum biraz daha belirgin olup püskürtme avansı değişimiyle daha küçük OİB farklılıkları ortaya çıkmıştır. Mekanik verim açısından da yapılan irdelemelerde düşük püskürtme basınçlarında püskürtme avansı değişimiyle mekanik verimin daha küçük değişimler yaşadığı görülmüştür. Genel itibariyle PCCI bölgesinde mekanik verimin bir miktar düşüş sergilediği gözlemlenmiştir. Fakat bu durum mutlak düzen içerisinde olan bir değişim eğilimi olarak karışımıza çıkmamıştır.

İndike verim değerlerinin OİB çıktıları ile paralellik göstereceği açıktır. Konvansiyonel dizel yanmasında motor yükü arttıkça bilindiği üzere indike verim artış sergilemektedir. Fakat PCCI bölgesinde motor yükü arttıkça indike verimde düşüş yaşandığı görülmüştür.

PCCI çalışma rejimi baskın hale geldikçe egzoz gaz sıcaklıkları düşüş sergilemiştir. Püskürtme avansı arttıkça egzoz gaz sıcaklıklarında yaşanan düşüş eğiliminin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda konvansiyonel çalışma rejimine kıyasla PCCI rejiminde püskürtme basıncının değişimi sonucunda da egzoz gaz sıcaklıklarında yaşanan değişim artış göstermektedir. Hem OİB hem de egzoz gaz sıcaklıklarının düşüş göstermesi yanma veriminin düştüğü ve ısı transferinin artış sergilediği sonucunu doğurmaktadır.

CO emisyonlarında, konvansiyonel çalışma bölgesinde püskürtme avansı ve püskürtme basıncının değişimiyle ciddi değişimler gözlemlenememiştir. Ancak PCCI bölgesinde daha fakir mikro karışım oluşumuyla düşük oksidasyon sıcaklıkları görülmeye başlamış ve CO emisyonu artış sergilemiştir. PCCI bölgesinde püskürtme avansı ve püskürtme basıncına hassasiyetin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. PCCI bölgesindeki farklı çalışma noktaları arasında CO salımlarında yer yer merteye bazında farklılıklar ortaya çıkmıştır. Motor hızı

arttıkça ortaya çıkan CO salımları artış göstermiş, PCCI bölgesinde motor hızı artışıyla ortaya çıkan artış miktarı konvansiyonel yanma bölgesindeki artış oranına göre belirgin bir farklılık yaratmamıştır. Motor yükü arttıkça, PCCI bölgesindeki farklı püskürtme avanslarında ortaya çıkan değişim oranları artmaya başlamıştır. Özgül CO emisyonlarında ise motor gücünün PCCI bölgesinde düşüş sergilemesi sebebiyle daha büyük özgül CO salımı artış oranları ortaya çıkmıştır.

THC emisyonlarında da CO değişim eğilimleri ile oldukça benzer sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür. Püskürtme avansının değişimiyle THC emisyonlarında değişim CO emisyonlarında değişimle hemen hemen aynı eğilimlere sahipken püskürtme basıncının yarattığı net ayrım biraz daha büyük püskürtme avans değerlerinde ortaya çıkmıştır. Özgül THC emisyonlarının değişim eğilimleri, özgül CO emisyonları için ortaya çıkan sonuçlara benzerlik göstermektedir. Fakat püskürtme avansı ve püskürtme basıncının değişimiyle belirgin farklılıkların ortaya çıkması özgül CO emisyonlarına göre biraz büyük püskürtme avansı ve püskürtme basınçlarında ortaya çıkmıştır.

PCCI rejiminde, püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan NO_x düşüşünün daha büyük püskürtme basınçlarında daha erken bir noktada başladığı görülmüştür. Buna ilaveten yüksek püskürtme basınçlarında, püskürtme avansının artışıyla ortaya çıkan NO_x düşüş eğilimi daha hızlı seyretmiştir. Genel olarak PCCI bölgesinde yüksek püskürtme basınçlarıyla çalışmak NO_x emisyonlarında daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durumun altında yatan sebep ise yanma sıcaklıklarının düşmesi ve karışımın homojenliğinin artmasıdır. Özgül NO_x emisyonlarında, PCCI bölgesinde tahmin edileceği üzere g/h cinsinden elde edilen düzeyde düşüş yaşanmamıştır. Ancak motor gücü düşüş sergilese de özgül NO_x emisyonlarında genellikle düşüş görülmüştür. Fakat motor hızı ve motor yükü arttıkça ortaya çıkan kazanç azalmış ve dizel vuruntusu emarelerinin gözlemlendiği çalışma noktalarında özgül NO_x emisyonları artış sergilemiştir.

PCCI bölgesinde püskürtme basıncının değişimiyle net bir eğilim görülemese de püskürtme avansı arttıkça NO/NO_x oranının düşüş sergilediği ve NO₂/NO_x oranının artış sergilediği görülmüştür. NO₂'nin daha düşük yanma sıcaklıklarında oluşması ve reaksiyonlara ayrılan sürenin artışıyla NO₂/NO_x oranlarının artış sergilediği görülmüştür. Konvansiyonel yanma bölgesinde kabaca %3 ile %7 arasında değer alan NO₂/NO_x oranı, PCCI bölgesinde %6 ile %16 bandında değerler almıştır.

PM emisyonlarının, NO_x emisyonlarına göre düşüşe geçişi biraz daha büyük püskürtme avanslarında ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca oransal olarak NO_x emisyonlarında ortaya çıkan seviyede PM düşüşü yaşanmamış ve daha küçük oranlarda PM düşüşü gözlemlenmiştir. Tıpkı konvansiyonel dizel yanmasında olduğu gibi PCCI stratejisinde de püskürtme basıncının artışıyla PM düşüşü sergilemiştir. Özgül PM emisyonlarında ise hedeflenen düşüş sağlanamamıştır. Her ne kadar mg/h cinsinden PM emisyonlarında PCCI bölgesinde düşüş yaşansa da ortaya çıkan düşüş sınırlı kalmıştır. Özgül PM emisyonlarında ise söz konusu düşüş iyice azalmış ve son derece sınırlı bir banda hapsolmuştur.

6.2 Çift Fazda Yakıt Püskürtme Şartında Elde Edilen Sonuçlar

Çift fazda yakıt püskürtülmesi şartında yürütülen çalışmalar 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi ve 800 bar püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir. Ön püskürtme oranı %20, %30 ve %40 olarak belirlenmiştir. Ön püskürtme avansı ise 35° KMA, 45° KMA ve 55° KMA olarak üç farklı değer almıştır. Ana püskürtme avansı 10° KMA ve 20° KMA olarak belirlenmiştir. Çift fazda yakıt püskürtme şartında elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Ön karışım oranı arttıkça TG'nin kısaldığı görülmüştür. Ön püskürtme ile yaratılan ön karışım sayesinde ana püskürtmenin başladığı anda silindir içerisinde yanma başlatamamış fakir karışım mevcuttur. Ana püskürtmenin bu ortamda başlamasıyla tutuşabilir mikro karışım bölgelerine daha erken ulaşılmış ve TG kısalmıştır.

Ön püskürtme avansı ve ön karışım oranı arttıkça yanma sürecinin uzadığı görülmüştür. Özellikle ön karışım oranının artışıyla yanma süreci daha belirgin artışlar göstermiştir. Fakat KYK50 noktalarında ciddi bir değişim görülememiştir. Çift faz verilerinde de tek faza benzer şekilde ısı girişinin ilk yarısı değişen işletme şartlarından pek etkilenmemiş ikinci yarısında daha yavaş bir yanma ortaya çıkmıştır. Bu durum ön karışım oranının artmasıyla fakir karışım cephelerinin artışına ve bu bölgelerde yanma hızının düşüş göstermesine bağlanabilir.

Ön püskürtme avansı arttıkça maksimum silindir içi sıcaklık değerlerinin düşüşü sergilediği görülmüştür. Fakat ön karışım oranının artışıyla belirgin bir değişim eğilimi yakalanamamıştır. Silindir içi pik basınç değerlerinin ise ön püskürtme avansı artışından sınırlı düzeyde etkilendiği ve ön püskürtme avansı arttıkça silindir

içi pik basınç değerlerinde hafif bir gerileme yaşandığı görülmüştür. Çift fazda elde edilen silindir içi pik basınç değerleri, tek fazda yakıt enjeksiyonunda elde edilen değerlere göre daha düşük seyretmiştir. Bu da yanma odasında daha homojen bir karışımın ortaya çıkması ve daha fakir karakterde olan karışımın, daha düşük yanma hızlarına yol açmasıyla açıklanabilir.

Ön karışım oranının artışıyla efektif güç değerinde düzenli bir artış veya azalış eğilimi ortaya çıkmamıştır. Ancak ön karışım oranındaki artışın bir miktar efektif güç düşüşüne yol açtığından genel eğilim olarak söz etmek mümkündür. Özellikle ön püskürtme avansının büyük değerler aldığı çalışma noktalarında bu durum nispeten daha belirgin olarak karşımıza çıkmıştır. Ön püskürtme avansının artışıyla veri setlerinin çoğunda önce bir miktar düşüş ardından da belli bir miktar artış göze çarpmaktadır. 35° KMA ön püskürtme avansından 45° KMA ön püskürtme avansına geçildiğinde 6 veri seti içerisinde 4 tanesinde efektif güç değerlerinde düşüş, ardından 55° KMA püskürtme avansında tekrar artış göze çarpmıştır. Bu durum sağlıklı yanma şartlarıyla açıklanabilir bir durum değildir. İlgili durum ön püskürtme fazında yanma odasına giren yakıt jeti ile yanma odası termodinamik şartları, akış koşulları ve piston konumu arasındaki ilişkide uygun bir karışım prosesi yaratılamamasından kaynaklanmaktadır. Ön püskürtme avansı arttıkça yanma odası içerisinde daha düşük basınç ve sıcaklık şartları oluşmakta ve yakıtın bir kısmı durağan hale geçmeden (stagne olamadan) piston üst yüzeyine çarpmaktadır. Sıvı halde gerçekleşen bu etkileşim sonucunda yakıtın bir kısmı yanmaya katılamamıştır. Böylelikle efektif güç değeri düşüş sergilemiştir. 55° KMA ön püskürtme avansında ise püskürtme başladığı anda yanma odasındaki basınç, sıcaklık ve türbülans seviyesi daha da düşüktür. Fakat bu şartta yanma odası anlık hacminin yüksekliği de piston yolu hesaba katıldığında daha fazladır ve yakıt bu mesafeyi kat ederken daha büyük oranda stagne olmuş durumdadır. Birçok parametre incelenirken bu hipotez doğrulanmıştır. Özellikle ısı açığa çıkış hızı eğrilerinin altında kalan alanın integraline bakıldığında söz konusu durum net bir şekilde görülmektedir. Benzer sonuçlara Jung vd. [157]'de de rastlanmıştır.

Çift fazda yakıt enjeksiyonunda işletme parametrelerinin değişimiyle OİB değişimi efektif performans parametrelerinin değişimine göre daha küçük farklılıklar barındırmıştır. Bu durumda mekanik verim değerleri de bir miktar bu etkiye göre

şekillenmiştir. Fakat değişim miktarı farklılaşmış olsa da efektif çıktılar mekanik verim değişim eğilimi üzerinde daha baskın bir etki göstermiştir.

Çift fazda yapılan yakıt enjeksiyonunda ön püskürtme oranı arttıkça düzenli olarak CO emisyonlarının artış gösterdiği görülmüş ve ön püskürtme oranı inceleme bölgesinde en belirleyici faktör olarak ortaya çıkmıştır. Ön püskürtme avansı arttıkça daha büyük ön karışım oranlarında daha belirgin olmak üzere, düzenli CO emisyonu artışı ortaya çıkmıştır.

THC emisyonlarında, CO emisyon değişim eğilimlerine benzer bir durumun gözlemlendiği söylenebilir. Fakat THC emisyonlarında, ön püskürtme avansı arttıkça ortaya çıkan değişim oranları bir miktar daha yüksek değerler almıştır. Özgül CO ve özgül THC emisyonlarında ise efektif motor gücünün yarattığı etki yer yer değişim eğilimlerini değiştirmiştir. Fakat genel olarak ön püskürtme avansı arttıkça özgül CO ve özgül THC emisyonlarının artış sergilediği görülmektedir. Ön karışım oranı açısından da benzer bir durumdan söz etmek mümkündür.

NO_x emisyonları açısından en belirleyici faktör ana püskürtme avansıdır. Ön püskürtme avansının çıktılara etkisi ise nispeten sınırlıdır. Daha yüksek ön püskürtme oranlarında ise genel eğilim olarak bir miktar NO_x düşüşü gözlemlenmiştir. Özgül NO_x emisyonlarında ön püskürtme avansının artışıyla genel olarak ciddi bir değişim eğilimi ortaya çıkmamakla beraber, efektif motor gücünün de hesaba katılması değişim oranlarını bir miktar farklılaştırmıştır. Daha büyük ön karışım oranlarında değişim oranı farklılığı biraz daha gözle görülebilir düzeydedir. Genel bir eğilim olarak ön püskürtme avansının arttırılmasının bu veri setlerinde özgül NO_x emisyonu açısından tatmin edici seviyede yarar sağlamadığı görülmüştür.

Ana püskürtme avansı NO/NO_x oranlarını belirgin olarak etkilemiştir. 10° KMA ana püskürtme avansında elde edilen tüm verilerde 20° KMA ana püskürtme avansına göre daha düşük NO/NO_x oranları yani daha yüksek NO₂/NO_x oranları ortaya çıkmıştır. Ön karışım oranının artışı da belirgin bir şekilde NO/NO_x oranını düşürüp NO₂/NO_x oranını arttırmıştır. Ön püskürtme avansının artışı da NO₂/NO_x oranını arttırıcı etkiye sahiptir. Tek fazda gerçekleştirilen püskürtme şartlarında NO₂/NO_x açısından belirli eğilimler ortaya çıksa da yer yer girift ilişkiler de ortaya

çıkıştır. Fakat çift fazda yakıt enjeksiyonunda bu tarz giriftliklere rastlanmamış ve daha düzenli çıktılar elde edilmiştir.

Genel bir eğilim olarak ön püskürtme avansı arttıkça PM emisyonlarının düşüş sergilediği görülmüştür. Fakat yakıtın yanmaya tam olarak katılamadığı bazı noktalarda bu eğilimin yer yer bozulduğu veya daha küçük değişim eğilimleriyle kendini var ettiği söylenebilir. Ön püskürtme oranının artışı da büyük ön püskürtme avanslarında daha belirgin olmak üzere PM emisyonlarını düşürücü etki göstermiştir. Özgül PM emisyonlarını büyük oranda efektif güç değerleri şekillendirmiştir. Ön püskürtme avansı ve ön karışım oranı değişimine bağlı olarak ortaya büyük oranda beklenene yakın sonuçlar çıksa da bu sonuçlar birbirine nispeten yakın değerler almış ve efektif güç değeri, özgül PM emisyonlarını domine etmiştir. Nihayetinde özgül PM değerlerinde hedeflenen iyileşme görülememiştir.

6.3 Gelecek Çalışma Önerileri

Bu çalışma dahilinde PCCI stratejisinin yanma, performans ve emisyonları ne yönde etkilediğine dair detaylı incelemelerde bulunulmuştur. Emisyon çıktıları ham motor çıkış emisyonu olarak değerlendirilmiş olup emisyon indirgeme ünitelerinin çıkışındaki emisyon değerleri üzerine herhangi bir incelemede bulunulmamıştır. PCCI stratejisinde egzoz gaz kompozisyonu ve egzoz gaz sıcaklıkları konvansiyonel dizel yanmasına göre farklılıklar barındırmaktadır. Yanma sonrası emisyon indirgeme ünitelerinin dönüşüm verimleri de bu iki faktöre sıkı sıkıya bağlıdır. İleriki dönem çalışmalarında PCCI stratejisinde selektif katalitik konvertör ve fakir karışım NO_x kapanı (lean-NO_x trap) sistemlerinin performansları üzerine çalışılarak dış ortama salınan NO_x emisyonlarının belirlenmesi fayda sağlayacaktır. PCCI stratejisinde PM miktarı azalmakla beraber oluşan partiküllerin ortalama çapı da düşüş sergilemektedir. Dizel partikül filtrelerinin verimlerinin bu durumdan ne denli etkileneceği, PM_{2,5} ve PM₁₀ salımlarında konvansiyonel şarta göre dizel partikül filtresi çıkışındaki değerlerin incelenmesi önem taşımaktadır.

Belli bir seyir veya performans çevriminde PCCI stratejisinde çalışmanın yakıt sarfiyatı ve emisyonlar açısından sağlayacağı avantaj ve dezavantajlar hakkında literatürde yeterli veri bulunmamaktadır. Belli önceliklerin (motor gücü, düşük NO_x salınımının gibi) ağırlıklarının belirlenerek ve optimizasyona tabi tutularak,

PCCI stratejisinin seyir çevrimlerinde ortaya koyacağı çıktının belirlenmesi gelecek projeksiyonda stratejinin kullanılabilirliği hakkında önemli fikirler sunacaktır.



- [1] S. V. Khandal, N. R. Banapurmath, V. N. Gaitonde, and S. S. Hiremath, "Paradigm shift from mechanical direct injection diesel engines to advanced injection strategies of diesel homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines- A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. November 2016, pp. 369–384, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.058.
- [2] A. K. Azad, A. T. Doppalapudi, M. M. K. Khan, N. M. S. Hassan, and P. Gudimetla, "A landscape review on biodiesel combustion strategies to reduce emission," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 4413–4436, 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.03.104.
- [3] S. Manigandan, P. Gunasekar, J. Devipriya, and S. Nithya, "Emission and injection characteristics of corn biodiesel blends in diesel engine," *Fuel*, vol. 235, no. March 2018, pp. 723–735, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.071.
- [4] L. Liu, Y. Peng, D. Liu, C. Han, N. Zhao, and X. Ma, "A review of phenomenological spray penetration modeling for diesel engines with advanced injection strategy," *Int. J. Spray Combust. Dyn.*, vol. 12, no. 145, 2020, doi: 10.1177/1756827720934067.
- [5] H. K. Noh and S. Y. No, "Effect of bioethanol on combustion and emissions in advanced CI engines: HCCI, PPC and GCI mode – A review," *Appl. Energy*, vol. 208, no. April, pp. 782–802, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.071.
- [6] X. Su *et al.*, "Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with diesel/cyclohexanol blend fuels under different exhaust gas recirculation ratios and injection timings," *Fuel*, vol. 332, no. P1, p. 125986, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125986.
- [7] S. Leblanc, L. Wang, N. S. Sandhu, X. Yu, and M. Zheng, "Investigation of Fuel Injection Pressure Impact on Dimethyl Ether Combustion," *SAE Tech. Pap.*, pp. 1–9, 2023, doi: 10.4271/2023-01-1644.
- [8] T. Pachianan, W. Zhong, S. Rajkumar, Z. He, X. Leng, and Q. Wang, "A literature review of fuel effects on performance and emission characteristics of low-temperature combustion strategies," *Appl. Energy*, vol. 251, no. 301, p. 113380, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113380.
- [9] V. Patil and S. Thirumalini, "Effect of cooled EGR on performance and emission characteristics of diesel engine with diesel and diesel-karanja blend," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 4720–4727, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.303.
- [10] A. Schirru, T. Lucchini, G. D'Errico, M. Mehl, T. Hilfiker, and P. Soltic, "Numerical investigation on the use of Dimethyl Ether (DME) as an alternative

- fuel for compression-ignition engines,” *Fuel*, vol. 354, no. August, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129434.
- [11] X. Liang *et al.*, “Impact of multi-injection strategies on morphology, nanostructure and oxidation reactivity of diesel soot particles,” *Combust. Flame*, vol. 237, 2022, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111854.
- [12] T. Tang, J. Zhang, S. J. Shuai, and D. Cao, “Urea Decomposition at Low Temperature in SCR Systems for Diesel Engines,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2014-October, 2014, doi: 10.4271/2014-01-2808.
- [13] C. S. Sluder and S. J. Curran, “Diesel-Range Fuel Property Effects on Medium-Duty Advanced Compression Ignition for Low-Load NO_x Reduction 1,” *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 16, no. 1, pp. 4–16, 2022, doi: 10.4271/04-16-01-0006.
- [14] J. Song, Z. Lee, J. Song, and S. Park, “Effects of injection strategy and coolant temperature on hydrocarbon and particulate emissions from a gasoline direct injection engine with high pressure injection up to 50 MPa,” *Energy*, vol. 164, pp. 512–522, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.011.
- [15] M. Ghiji, L. Goldsworthy, P. A. Brandner, V. Garaniya, and P. Hield, “Numerical and experimental investigation of early stage diesel sprays,” *Fuel*, vol. 175, pp. 274–286, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.02.040.
- [16] D. S. Kim, K. H. Lee, and C. S. Lee, “Experimental and numerical study on the combustion characteristics of a premixed charge compression ignition engine,” *Am. Soc. Mech. Eng. Intern. Combust. Engine Div. ICE*, vol. 39, pp. 89–96, 2002, doi: 10.1115/ICEF2002-487.
- [17] S. Han and C. Bae, “The influence of fuel injection pressure and intake pressure on conventional and low temperature diesel combustion,” *SAE Tech. Pap.*, 2012, doi: 10.4271/2012-01-1721.
- [18] S. D’Ambrosio and A. Ferrari, “Effects of exhaust gas recirculation in diesel engines featuring late PCCI type combustion strategies,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, no. x, pp. 1269–1280, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.08.001.
- [19] H. Zhu, S. V. Bohac, K. Nakashima, L. M. Hagen, Z. Huang, and D. N. Assanis, “Effect of fuel oxygen on the trade-offs between soot, NO_x and combustion efficiency in premixed low-temperature diesel engine combustion,” *Fuel*, vol. 112, no. x, pp. 459–465, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2013.05.023.
- [20] L. Qiu, X. Cheng, B. Liu, S. Dong, and Z. Bao, “Partially premixed combustion based on different injection strategies in a light-duty diesel engine,” *Energy*, vol. 96, no. x, pp. 155–165, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.052.
- [21] H. Duan, M. Jia, Y. Chang, and H. Liu, “Experimental study on the influence of low-temperature combustion (LTC) mode and fuel properties on cyclic variations in a compression-ignition engine,” *Fuel*, vol. 256, no. July, p. 115907, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115907.
- [22] Y. Cai, K. Wang, S. Kong, and Zhishang Bian, “Yujie Cai, Ke Wang, Shiru Kong, and Zhishang Bian Tianjin University,” *Sae*, pp. 1–15, 2020, doi: 10.4271/2020-01-0298.Abstract.

- [23] J. M. Desantes, J. J. López, P. Redón, and J. Arrégle, "Evaluation of the thermal NO formation mechanism under lowtemperature diesel combustion conditions," *Int. J. Engine Res.*, vol. 13, no. 6, pp. 531–539, 2012, doi: 10.1177/1468087411429638.
- [24] R. Mobasher, "Influence of narrow fuel spray angle and split injection strategies on combustion efficiency and engine performance in a common rail direct injection diesel engine," *Int. J. Spray Combust. Dyn.*, vol. 9, no. 1, pp. 71–81, 2017, doi: 10.1177/1756827716651514.
- [25] K. Kim, Z. Wang, B. Wang, S. Shuai, H. Yang, and C. Bae, "Load expansion of naphtha multiple premixed compression ignition (MPCI) and comparison with partially premixed compression ignition (PPCI) and conventional diesel combustion (CDC)," *Fuel*, vol. 136, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.07.030.
- [26] L. Liu, N. Horibe, T. Komizo, I. Tamura, and T. Ishiyama, "An experimental study on smoke reduction effect of post injection in combination with pilot injection for a diesel engine," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 136, no. 4, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1115/1.4025929.
- [27] Y. Murata *et al.*, "Miller-PCCI combustion in an HSDI diesel engine with VVT," *SAE Int. J. Engines*, vol. 1, no. 1, pp. 444–456, 2009, doi: 10.4271/2008-01-0644.
- [28] X. Li, Z. Xu, C. Guan, and Z. Huang, "Effect of injection timing on particle size distribution from a diesel engine," *Fuel*, vol. 134, pp. 189–195, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.05.073.
- [29] T. Kaya, O. A. Kutlar, and O. O. Taskiran, "Evaluation of the partially premixed compression ignition combustion with diesel and biodiesel blended diesel at part load condition," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 24, no. 2, pp. 458–468, 2021, doi: 10.1016/j.jestch.2020.07.011.
- [30] V. Pradeep and A. Krishnasamy, "Numerical Investigations on Split Injection Strategies to Reduce CO and Soot Emissions of a Light-Duty Small-Bore Diesel Engine Operated in NADI-PCCI Mode," *SAE Tech. Pap.*, no. 2022, pp. 1–14, 2022, doi: 10.4271/2022-01-0458.
- [31] H. Huang, Q. Wang, C. Shi, Q. Liu, and C. Zhou, "Comparative study of effects of pilot injection and fuel properties on low temperature combustion in diesel engine under a medium EGR rate," *Appl. Energy*, vol. 179, no. x, pp. 1194–1208, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.093.
- [32] M. P. B. Musculus, P. C. Miles, and L. M. Pickett, *Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion*, vol. 39, no. 2–3. Elsevier Ltd, 2013. doi: 10.1016/j.pecs.2012.09.001.
- [33] M. Jia, M. Xie, and T. Wang, "Numerical investigation of the influence of intake valve lift profile on a diesel premixed charge compression ignition engine with a variable valve actuation system at moderate loads and speeds," *Int. J. Engine Res.*, vol. 14, no. 2, pp. 151–179, 2013, doi: 10.1177/1468087412450650.

- [34] J. A. Caton, "Thermodynamic advantages of low temperature combustion (LTC) engines using low heat rejection (LHR) concepts," *SAE 2011 World Congr. Exhib.*, 2011, doi: 10.4271/2011-01-0312.
- [35] L. Pidol, B. Lecointe, L. Starck, and N. Jeuland, "Ethanol-biodiesel-Diesel fuel blends: Performances and emissions in conventional Diesel and advanced Low Temperature Combustions," *Fuel*, vol. 93, no. x, pp. 329–338, 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.09.008.
- [36] P. R. Jha, S. Wijeyakulasuriya, S. R. Krishnan, and K. K. Srinivasan, "Numerical investigations of low load diesel-methane dual fuel combustion at early diesel injection timings," *Fuel*, vol. 315, no. October 2021, p. 123077, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.123077.
- [37] H. Zhu, S. V. Bohac, K. Nakashima, L. M. Hagen, Z. Huang, and D. N. Assanis, "Effect of biodiesel and ethanol on load limits of high-efficiency premixed low-temperature combustion in a diesel engine," *Fuel*, vol. 106, no. x, pp. 773–778, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.10.073.
- [38] L. Xu, X. S. Bai, C. Li, P. Tunestål, M. Tunér, and X. Lu, "Emission characteristics and engine performance of gasoline DICI engine in the transition from HCCI to PPC," *Fuel*, vol. 254, no. March, p. 115619, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115619.
- [39] S. Shuai, N. Abani, T. Yoshikawa, R. D. Reitz, and S. W. Park, "Evaluation of the effects of injection timing and rate-shape on diesel low temperature combustion using advanced CFD modeling," *Fuel*, vol. 88, no. 7, pp. 1235–1244, 2009, doi: 10.1016/j.fuel.2009.01.012.
- [40] J. Benajes, J. M. García-Oliver, R. Novella, and C. Kolodziej, "Increased particle emissions from early fuel injection timing Diesel low temperature combustion," *Fuel*, vol. 94, pp. 184–190, 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.09.014.
- [41] R. Kumar and M. Zheng, "Fuel efficiency improvements of low temperature combustion diesel engines," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2008, no. 724, pp. 776–790, 2008, doi: 10.4271/2008-01-0841.
- [42] T. Li, M. Suzuki, and H. Ogawa, "Effect of two-stage injection on unburned hydrocarbon and carbon monoxide emissions in smokeless low-temperature diesel combustion with ultra-high exhaust gas recirculation," *Int. J. Engine Res.*, vol. 11, no. 5, pp. 345–354, 2010, doi: 10.1243/14680874JER585.
- [43] M. Krishnamoorthi, R. Malayalamurthi, Z. He, and S. Kandasamy, "A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 116, no. September, p. 109404, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109404.
- [44] T. Yang, L. Yin, X. Meng, H. Tian, W. Long, and P. Tunestål, "Partially premixed combustion optimization using double injection strategy in transient operation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 169, no. July 2019, p. 114963, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.114963.
- [45] T. Yang, L. Yin, W. Long, P. Tunestål, and H. Tian, "Modeling and control of gasoline PPC engine approaching high efficiency with constraints," *IFAC-*

PapersOnLine, vol. 51, no. 31, pp. 442–447, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.10.099.

- [46] M. Alabbad *et al.*, “Ignition delay time measurements of diesel and gasoline blends,” *Combust. Flame*, vol. 222, pp. 460–475, 2020, doi: 10.1016/j.combustflame.2020.09.008.
- [47] H. Yang, S. Shuai, Z. Wang, and J. Wang, “Fuel octane effects on gasoline multiple premixed compression ignition (MPCI) mode,” *Fuel*, vol. 103, pp. 373–379, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.05.016.
- [48] Z. Yan *et al.*, “A comprehensive experimental investigation of low-temperature combustion with thick thermal barrier coatings,” *Energy*, vol. 222, p. 119954, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.119954.
- [49] G. Huang *et al.*, “Effects of fuel injection strategies on combustion and emissions of intelligent charge compression ignition (ICCI) mode fueled with methanol and biodiesel,” *Fuel*, vol. 274, no. February, p. 117851, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117851.
- [50] A. Schirru *et al.*, “CFD Modeling of a DME CI Engine in Late-PCCI Operating Conditions,” *SAE Tech. Pap.*, pp. 1–11, 2023, doi: 10.4271/2023-01-0203.
- [51] S. Kawauchi, D. T. Hiroshi, and T. R. Ishibashi, “Investigation of mixture formation and ignition process of merged spray for PCCI combustion,” *SAE Tech. Pap.*, 2011, doi: 10.4271/2011-01-1770.
- [52] G. Xu, M. Jia, Y. Li, M. Xie, and W. Su, “Multi-objective optimization of the combustion of a heavy-duty diesel engine with low temperature combustion under a wide load range: (I) Computational method and optimization results,” *Energy*, vol. 126, no. x, pp. 707–719, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.126.
- [53] A. K. Agarwal, A. P. Singh, and R. K. Maurya, “Evolution, challenges and path forward for low temperature combustion engines,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 61, pp. 1–56, 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2017.02.001.
- [54] Z. Chang *et al.*, “Experimental Investigation of Homogeneous Charge Induced Ignition (HCII) with Low-Pressure Injection to Reduce PM Emissions in a Heavy-Duty Engine,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 9, no. 3, pp. 1559–1570, 2016, doi: 10.4271/2016-01-0775.
- [55] E. J. Shim, H. Park, and C. Bae, “Effects of Hot and Cooled EGR for HC Reduction in a Dual-Fuel Premixed Charge Compression Ignition Engine,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2018-September, pp. 1–9, 2018, doi: 10.4271/2018-01-1730.
- [56] B. Ma *et al.*, “Multiple combustion modes existing in the engine operating in diesel methanol dual fuel,” *Energy*, vol. 234, p. 121285, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121285.
- [57] X. Han, M. Zheng, J. S. Tjong, and T. Li, “Suitability Study of n-Butanol for Enabling PCCI and HCCI and RCCI Combustion on a High Compression-ratio Diesel Engine,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2015-September, no. September, 2015, doi: 10.4271/2015-01-1816.
- [58] P. Moulali, H. Tarigonda, and B. Durga Prasad, “Comparison of performance and emission characteristics of homogeneous charge compression ignition with

- conventional compression ignition engine,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.412.
- [59] X. Meng, H. Tian, J. Tian, W. Long, and M. Bi, “Study of jet pressure and timing on emission formation for high-pressure air jet controlled premixed combustion,” *Fuel*, vol. 283, no. October 2020, p. 119323, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119323.
- [60] N. Dimitrakopoulos and M. Tunér, “Evaluation of engine efficiency, emissions and load range of a PPC concept engine, with higher octane and alkylate gasoline,” *Fuel*, vol. 275, no. December 2019, p. 117955, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117955.
- [61] B. Zhao *et al.*, “Effects of biohydrogen on premixed charge compression ignition engine operating at various inlet air temperatures,” *Fuel*, vol. 332, no. P1, p. 125907, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125907.
- [62] D. Gordon *et al.*, “Support vector machine based emissions modeling using particle swarm optimization for homogeneous charge compression ignition engine,” *Int. J. Engine Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 536–551, 2023, doi: 10.1177/14680874211055546.
- [63] Y. Jung, S. S. Park, and C. Bae, “Effect of oxygen concentration on highly diluted charge compression ignition combustion in an optical engine,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 90, pp. 538–550, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.07.049.
- [64] V. Pradeep and A. Krishnasamy, “Parametric Investigations on Premixed Charged Compression Ignition in a Small-Bore Light Duty Diesel Engine,” *SAE Tech. Pap.*, no. 2020, 2020, doi: 10.4271/2020-32-2300.
- [65] T. Pachianan, W. Zhong, S. Rajkumar, Z. He, X. Leng, and Q. Wang, “A literature review of fuel effects on performance and emission characteristics of low-temperature combustion strategies,” *Appl. Energy*, vol. 251, no. 301, p. 113380, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113380.
- [66] G. T. Kalghatgi, L. Hildingsson, A. J. Harrison, and B. Johansson, “Autoignition quality of gasoline fuels in partially premixed combustion in diesel engines,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, no. 2, pp. 3015–3021, 2011, doi: 10.1016/j.proci.2010.07.007.
- [67] G. Y. Zulian, L. M. Do Prado F., R. A. Garlet, M. E. S. Martins, T. D. M. Lanza Nova, and G. D. Telli, “Exploring the use of water injection to control the combustion and expand the operation load of an ethanol HCCI engine,” *SAE Tech. Pap.*, no. 2021, 2021, doi: 10.4271/2021-36-0053.
- [68] S. Park, H. J. Kim, D. H. Shin, and J. T. Lee, “Effects of various split injection strategies on combustion and emissions characteristics in a single-cylinder diesel engine,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 140, no. February, pp. 422–431, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.025.
- [69] U. Doll, C. Barro, M. Todino, and K. Boulouchos, “Impact of a split injection strategy on mixing, ignition and combustion behavior in Premixed charge compression ignition combustion,” *Fuel*, vol. 294, no. March, p. 120511, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120511.

- [70] S. K. Pandey, S. R. Sarma Akella, and R. V. Ravikrishna, "Novel fuel injection strategies for PCCI operation of a heavy-duty turbocharged diesel engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 143, no. January, pp. 883–898, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.001.
- [71] M. D. Boot, C. C. M. Luijten, E. P. Rijk, B. A. Albrecht, and R. S. G. Baert, "Optimization of operating conditions in the early direct injection premixed charge compression ignition regime," *SAE Tech. Pap.*, vol. 4970, 2009, doi: 10.4271/2009-24-0048.
- [72] N. Naser, M. Jaasim, N. Atef, S. H. Chung, H. G. Im, and S. M. Sarathy, "On the effects of fuel properties and injection timing in partially premixed compression ignition of low octane fuels," *Fuel*, vol. 207, pp. 373–388, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.06.048.
- [73] O. Laguitton, C. Crua, T. Cowell, M. R. Heikal, and M. R. Gold, "The effect of compression ratio on exhaust emissions from a PCCI diesel engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 11, pp. 2918–2924, 2007, doi: 10.1016/j.enconman.2007.07.016.
- [74] A. J. Torregrosa, A. Broatch, R. Novella, J. Gomez-Soriano, and L. F. Mónico, "Impact of gasoline and Diesel blends on combustion noise and pollutant emissions in Premixed Charge Compression Ignition engines," *Energy*, vol. 137, pp. 58–68, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.010.
- [75] M. T. Chaichan, "Combustion and emission characteristics of E85 and diesel blend in conventional diesel engine operating in PPCI mode," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 7, no. January, pp. 45–53, 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.013.
- [76] M. Jia, Y. Li, M. Xie, and T. Wang, "Numerical evaluation of the potential of late intake valve closing strategy for diesel PCCI (premixed charge compression ignition) engine in a wide speed and load range," *Energy*, vol. 51, no. x, pp. 203–215, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2012.12.041.
- [77] A. Solouk *et al.*, "Fuel Economy Benefits of Integrating a Multi-Mode Low Temperature Combustion (LTC) Engine in a Series Extended Range Electric Powertrain," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2016-October, no. i, 2016, doi: 10.4271/2016-01-2361.
- [78] S. Keum and T. W. Kuo, "Damköhler number analysis on the effect of ozone on autoignition and flame propagation in internal combustion engines," *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 141, no. 11, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1115/1.4043639.
- [79] A. Jain, A. P. Singh, and A. K. Agarwal, "Effect of split fuel injection and EGR on NO_x and PM emission reduction in a low temperature combustion (LTC) mode diesel engine," *Energy*, vol. 122, pp. 249–264, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.01.050.
- [80] B. Jochim, M. Korkmaz, and H. Pitsch, "Scalar dissipation rate based multi-zone model for early-injected and conventional diesel engine combustion," *Combust. Flame*, vol. 175, pp. 138–154, 2017, doi: 10.1016/j.combustflame.2016.08.003.

- [81] J. Drallmeier, M. Wissink, S. Curran, and R. Wagner, "Ignition Delay in Low Temperature Combustion," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2018-April, pp. 1–9, 2018, doi: 10.4271/2018-01-1125.
- [82] K. Ju, J. Kim, and J. Park, "Numerical prediction of the performance and emission of downsized two-cylinder diesel engine for range extender considering high boosting, heavy exhaust gas recirculation, and advanced injection timing," *Fuel*, vol. 302, no. February, p. 121216, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121216.
- [83] C. Sun, D. Kang, S. V. Bohac, and A. L. Boehman, "Impact of Fuel and Injection Timing on Partially Premixed Charge Compression Ignition Combustion," *Energy and Fuels*, vol. 30, no. 5, pp. 4331–4345, 2016, doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b00257.
- [84] Y. Park and C. Bae, "Effects of single and double post injections on diesel PCCI combustion," *SAE Tech. Pap.*, vol. 1, 2013, doi: 10.4271/2013-01-0010.
- [85] S. Imtenan *et al.*, "Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, no. x, pp. 329–356, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.020.
- [86] R. Kiplimo, E. Tomita, N. Kawahara, and S. Yokobe, "Effects of spray impingement, injection parameters, and EGR on the combustion and emission characteristics of a PCCI diesel engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 37, pp. 165–175, 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.011.
- [87] V. Esfahanian, M. M. Salahi, A. Gharehghani, and M. Mirsalim, "Extending the lean operating range of a premixed charged compression ignition natural gas engine using a pre-chamber," *Energy*, vol. 119, pp. 1181–1194, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.11.071.
- [88] M. Murugesu Pandian and K. Anand, "Comparison of different low temperature combustion strategies in a light duty air cooled diesel engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 142, no. July, pp. 380–390, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.047.
- [89] R. Chaurasiya and A. Krishnasamy, "Parametric Investigation of Various Factors Affecting Engine Performance and Emissions in a Homogeneous Charge with Direct Injection Strategy at High Load: A CFD Approach," *SAE Tech. Pap.*, no. x, pp. 1–20, 2022, doi: 10.4271/2022-01-1048.
- [90] M. Zheng, Y. Tan, M. C. Mulenga, and M. Wang, "Thermal efficiency analyses of diesel low temperature combustion cycles," *SAE Tech. Pap.*, no. 724, 2007, doi: 10.4271/2007-01-4019.
- [91] E. Öztürk, Ö. Can, N. Usta, and H. S. Yücesu, "Effects of retarded fuel injection timing on combustion and emissions of a diesel engine fueled with canola biodiesel," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, no. 6, pp. 1466–1475, 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2020.06.008.
- [92] K. Kitano, R. Nishiumi, Y. Tsukasaki, T. Tanaka, and M. Morinaga, "Effects of fuel properties on premixed charge compression ignition combustion in a direct injection diesel engine," *SAE Tech. Pap.*, 2003.

- [93] A. P. Carlucci, D. Laforgia, S. Motz, R. Saracino, and S. P. Wenzel, “Advanced closed loop combustion control of a LTC diesel engine based on in-cylinder pressure signals,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 193–207, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.054.
- [94] E. Plamondon and P. Seers, “Parametric study of pilot–main injection strategies on the performance of a light-duty diesel engine fueled with diesel or a WCO biodiesel–diesel blend,” *Fuel*, vol. 236, no. September 2018, pp. 1273–1281, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.09.111.
- [95] Z. Shi, H. Wu, H. Li, L. Zhang, X. Li, and C. fon Lee, “Effect of injection pressure and fuel mass on wall-impinging ignition and combustion characteristics of heavy-duty diesel engine at low temperatures,” *Fuel*, vol. 299, no. October 2020, p. 120904, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120904.
- [96] S. Tonini, M. Gavaises, and G. E. Cossali, “Prediction of liquid and vapour penetration of early-injection Diesel sprays,” *SAE Tech. Pap.*, 2010, doi: 10.4271/2010-01-1129.
- [97] S. Zirngibl and G. Wachtmeister, “Extensive Investigation of a Common Rail Diesel Injector Regarding Injection Characteristics and the Resulting Influences on the Dual Fuel Pilot Injection Combustion Process,” *SAE Tech. Pap.*, 2016, doi: 10.4271/2016-01-0780.
- [98] H. Chen, Z. Shi, Y. Wu, Y. Li, and D. Wang, “Investigation of the injection pressure impact on non-monotonic two-stage ignition delay of diesel engines under cold-start,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 235, no. August, p. 121408, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121408.
- [99] O. A. Kuti, S. M. Sarathy, and K. Nishida, “Spray combustion simulation study of waste cooking oil biodiesel and diesel under direct injection diesel engine conditions,” *Fuel*, vol. 267, no. July 2019, p. 117240, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117240.
- [100] Z. Shi *et al.*, “Effect of injection pressure on the impinging spray and ignition characteristics of the heavy-duty diesel engine under low-temperature conditions,” *Appl. Energy*, vol. 262, no. December 2019, p. 114552, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114552.
- [101] L. Zhao, J. Tian, F. Li, D. Qian, and Q. Lin, “Experimental and Theoretical Analysis of Spray Characteristics of Biodiesel Blends with Diethyl Carbonate in a Common-Rail Injection System,” *J. Energy Eng.*, vol. 149, no. 1, pp. 1–15, 2023, doi: 10.1061/jleed9.eyeng-4616.
- [102] H. Solaka, M. Tuner, and B. Johansson, “Analysis of surrogate fuels effect on ignition delay and low temperature reaction during partially premixed combustion,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2, no. x, 2013, doi: 10.4271/2013-01-0903.
- [103] J. Benajes, A. Broatch, A. Garcia, and L. Monico Muñoz, “An experimental investigation of diesel-gasoline blends effects in a direct-injection compression-ignition engine operating in PCCI conditions,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2, 2013, doi: 10.4271/2013-01-1676.
- [104] H. Feng, X. Wang, and J. Zhang, “Study on the effects of intake conditions on the exergy destruction of low temperature combustion engine for a toluene

- reference fuel,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 188, no. March, pp. 241–249, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.090.
- [105] X. Duan, M. C. Lai, M. Jansons, G. Guo, and J. Liu, “A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine,” *Fuel*, vol. 285, no. May 2020, p. 119142, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119142.
- [106] L. Yin, G. Ingesson, R. Johansson, P. Tunestål, and B. Johansson, “Model-Based Partially Premixed Combustion (PPC) Timing Control,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 11, pp. 340–346, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.08.051.
- [107] M. Prabhahar *et al.*, “Trade-off characteristic between soot and oxides of nitrogen emission with pre-injected diesel and biodiesel in a SICI-CIDI engine,” *Fuel*, vol. 331, no. August 2022, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125624.
- [108] Q. Ma, Q. Zhang, and Z. Zheng, “An experimental assessment on low temperature combustion using diesel/biodiesel/C2, C5 alcohol blends in a diesel engine,” *Fuel*, vol. 288, no. October 2020, p. 119832, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119832.
- [109] Y. Lu, W. Yu, and W. Su, “Using multiple injection strategies in diesel PCCI combustion: Potential to extend engine load, improve trade-off of emissions and efficiency,” *SAE 2011 World Congr. Exhib.*, 2011, doi: 10.4271/2011-01-1396.
- [110] P. G. Szymkowicz and J. Benajes, “Single-cylinder engine evaluation of a multi-component Diesel surrogate fuel at partially-premixed and low-temperature combustion modes,” *Fuel*, vol. 241, no. July 2018, pp. 506–518, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.12.073.
- [111] H. Feng, Z. Zheng, M. Yao, G. Cheng, M. Wang, and X. Wang, “Effects of exhaust gas recirculation on low temperature combustion using wide distillation range diesel,” *Energy*, vol. 51, pp. 291–296, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2012.12.023.
- [112] P. G. Szymkowicz and J. Benajes, “Single-cylinder engine evaluation of a multi-component Diesel surrogate fuel at partially-premixed and low-temperature combustion modes,” *Fuel*, vol. 241, no. July 2018, pp. 506–518, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.12.073.
- [113] J. E. Parks *et al.*, “Emissions from premixed charge compression ignition (PCCI) combustion and affect on emission control devices,” *Catal. Today*, vol. 151, no. 3–4, pp. 278–284, 2010, doi: 10.1016/j.cattod.2010.02.053.
- [114] J. Su, H. Zhu, and S. V. Bohac, “Particulate matter emission comparison from conventional and premixed low temperature combustion with diesel, biodiesel and biodiesel-ethanol fuels,” *Fuel*, vol. 113, pp. 221–227, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2013.05.068.
- [115] Y. Ren *et al.*, “Combustion characteristics of a compression-ignition engine fuelled with diesel-dimethoxy methane blends under various fuel injection advance angles,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 327–337, 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.07.009.

- [116] V. Pradeep and K. Anand, "Novel strategies to extend the operating load range of a premixed charge compression ignited light-duty diesel engine," *Fuel*, vol. 317, no. January, p. 123520, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123520.
- [117] S. Jo, S. Park, and C. S. Lee, "Calculation of Combustion Phases in a Diesel Engine Based on the Difference between Motoring and Combustion Pressures," *J. Energy Eng.*, vol. 147, no. 2, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000746.
- [118] R. Kiplimo, E. Tomita, N. Kawahara, S. Zhou, and S. Yokobe, "Effects of injection pressure, timing and EGR on combustion and emissions characteristics of diesel PCCI engine," *SAE Tech. Pap.*, 2011, doi: 10.4271/2011-01-1769.
- [119] R. Diwakar and S. Singh, "Importance of spray-bowl interaction in a di diesel engine operating under PCCI combustion mode," *SAE Tech. Pap.*, 2009, doi: 10.4271/2009-01-0711.
- [120] A. Deep, S. S. Sandhu, and S. Chander, "Experimental investigations on the influence of fuel injection timing and pressure on single cylinder C.I. engine fueled with 20% blend of castor biodiesel in diesel," *Fuel*, vol. 210, no. November 2016, pp. 15–22, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.08.023.
- [121] D. Babu, R. Karvembu, and R. Anand, "Impact of split injection strategy on combustion, performance and emissions characteristics of biodiesel fuelled common rail direct injection assisted diesel engine," *Energy*, vol. 165, pp. 577–592, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.193.
- [122] N. K. Kumar, T. K. Chandrashekar, and N. R. Banapurmath, "Impact of injection timing on simarouba seed oil-fueled CI engine," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, no. xxxx, pp. 4878–4883, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.329.
- [123] S. H. Yoon, H. J. Kim, and S. Park, "Study on optimal combustion strategy to improve combustion performance in a single-cylinder PCCI diesel engine with different combustion chamber geometry," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 144, no. September, pp. 1081–1090, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.003.
- [124] M. Wei, S. Li, J. Liu, G. Guo, Z. Sun, and H. Xiao, "Effects of injection timing on combustion and emissions in a diesel engine fueled with 2,5-dimethylfuran-diesel blends," *Fuel*, vol. 192, pp. 208–217, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2016.11.084.
- [125] S. Ramalingam and N. V. Mahalakshmi, "Influence of high pressure fuel injection system on engine performance and combustion characteristics of Moringa Oleifera biodiesel and its blends," *Fuel*, vol. 279, no. May, p. 118461, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118461.
- [126] B. Rajesh Kumar and S. Saravanan, "Partially premixed low temperature combustion using dimethyl carbonate (DMC) in a di diesel engine for favorable smoke/NO_x emissions," *Fuel*, vol. 180, pp. 396–406, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.04.060.
- [127] H. J. Kim, S. H. Park, and C. S. Lee, "Impact of fuel spray angles and injection timing on the combustion and emission characteristics of a high-speed diesel

- engine,” *Energy*, vol. 107, pp. 572–579, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.04.035.
- [128] L. Geng, S. Li, Y. Xiao, Y. Xie, H. Chen, and X. Chen, “Effects of injection timing and rail pressure on combustion characteristics and cyclic variations of a common rail DI engine fuelled with F-T diesel synthesized from coal,” *J. Energy Inst.*, vol. 93, no. 6, pp. 2148–2162, 2020, doi: 10.1016/j.joei.2020.05.009.
- [129] C. E. Dumitrescu, W. Stuart Neill, H. Guo, V. Hosseini, and W. L. Chippior, “Fuel property effects on PCCI combustion in a heavy-duty diesel engine,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 134, no. 5, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1115/1.4005213.
- [130] J. Lee, S. Chu, D. Lim, H. Jung, Y. Chi, and K. Min, “Comparison of combustion and emission characteristics under single-fueled and dual-fueled conditions with premixed compression ignition,” *Energy*, vol. 241, p. 122855, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122855.
- [131] H. Liu, S. Ma, Z. Zhang, Z. Zheng, and M. Yao, “Study of the control strategies on soot reduction under early-injection conditions on a diesel engine,” *Fuel*, vol. 139, no. x, pp. 472–481, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.011.
- [132] Y. Wang, H. Liu, Z. Huang, and X. Ke, “Particulate Size Distribution from Diesel–Dimethyl Ether Dual Fuel Premixed Compression Ignition Combustion Engine,” *J. Energy Eng.*, vol. 142, no. 4, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000351.
- [133] G. Valentino, F. E. Corcione, S. E. Iannuzzi, and S. Serra, “Experimental study on performance and emissions of a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blends under premixed low temperature combustion,” *Fuel*, vol. 92, no. 1, pp. 295–307, 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.07.035.
- [134] A. Jain, A. P. Singh, and A. K. Agarwal, “Effect of fuel injection parameters on combustion stability and emissions of a mineral diesel fueled partially premixed charge compression ignition (PCCI) engine,” *Appl. Energy*, vol. 190, pp. 658–669, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.164.
- [135] A. K. Agarwal, A. P. Singh, and V. Kumar, “Particulate characteristics of low-temperature combustion (PCCI and RCCI) strategies in single cylinder research engine for developing sustainable and cleaner transportation solution,” *Environ. Pollut.*, vol. 284, no. November 2020, p. 117375, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117375.
- [136] M. P. B. Musculus, “On the correlation between NO_x emissions and the diesel premixed burn,” *SAE Tech. Pap.*, no. 724, 2004, doi: 10.4271/2004-01-1401.
- [137] H. J. Kim, S. Jo, J. T. Lee, and S. Park, “Biodiesel fueled combustion performance and emission characteristics under various intake air temperature and injection timing conditions,” *Energy*, vol. 206, p. 118154, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118154.
- [138] M. Choi, K. Mohiuddin, N. Kim, and S. Park, “Investigation of the effects of EGR rate, injection strategy and nozzle specification on engine performances and emissions of a single cylinder heavy duty diesel engine using the two color

- method,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 193, no. March, p. 117036, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117036.
- [139] X. Liang *et al.*, “Impact of early injection on physicochemical characteristics of diesel soot particles,” *Fuel*, vol. 292, no. January, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120262.
- [140] K. Kim, S. Han, and C. Bae, *Control strategy of mode transition between low-temperature combustion and conventional combustion in a light-duty diesel engine*, vol. 7, no. PART 1. IFAC, 2013. doi: 10.3182/20130904-4-JP-2042.00079.
- [141] J. Weber, H. W. Won, and N. Peters, “Experimental validation of a surrogate fuel for diesel,” *SAE Tech. Pap.*, pp. 734–743, 2007, doi: 10.4271/2007-01-1842.
- [142] N. Horibe, H. Tanaka, and T. Ishiyama, “Selection of injection parameters for various engine speeds in PCCI-based diesel combustion with multiple injection,” *SAE Tech. Pap.*, 2011, doi: 10.4271/2011-01-1822.
- [143] Y. Wang, Y. Zhuang, M. Yao, Y. Qin, and Z. Zheng, “An experimental investigation into the soot particle emissions at early injection timings in a single-cylinder research diesel engine,” *Fuel*, vol. 316, no. January, p. 123288, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123288.
- [144] B. Rohani, S. S. Park, and C. Bae, “Effect of injection strategy on smoothness, emissions and soot characteristics of PCCI-conventional diesel mode transition,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 93, pp. 1033–1042, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.075.
- [145] X. Cheng, S. Li, J. Yang, and B. Liu, “Investigation into partially premixed combustion fueled with N-butanol-diesel blends,” *Renew. Energy*, vol. 86, no. X, pp. 723–732, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.08.067.
- [146] S. Li *et al.*, “Effects of gasoline and iso-butanol addition on combustion and pollutant emissions of a common-rail diesel engine at different injection timing,” *Fuel*, vol. 256, no. July, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115853.
- [147] N. Horibe and T. Ishiyama, “Relations among NO_x, pressure rise rate, HC and CO in LTC operation of a diesel engine,” *SAE Tech. Pap.*, 2009, doi: 10.4271/2009-01-1443.
- [148] A. Vanegas, H. Won, and N. Peters, “Influence of the nozzle spray angle on pollutant formation and combustion efficiency for a PCCI diesel engine,” *SAE Tech. Pap.*, 2009, doi: 10.4271/2009-01-1445.
- [149] Z. Zheng, F. Dong, Y. Guo, X. Liu, Y. Yang, and H. Liu, “Effect of Fuels with Different Distillation Temperatures on Performance and Emissions of a Diesel Engine Run at Various Injection Pressures and Timings,” *J. Energy Eng.*, vol. 143, no. 3, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000413.
- [150] A. Minato, T. Tanaka, and T. Nishimura, “Investigation of premixed lean diesel combustion with ultra high pressure injection,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2005, no. 724, 2005, doi: 10.4271/2005-01-0914.

- [151] C. Srivatsa, J. Mattson, and C. Depcik, "Investigating Pre-Mixed Charge Compression Ignition Combustion in a High Compression Ratio Engine," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2018-April, pp. 1–12, 2018, doi: 10.4271/2018-01-0900.
- [152] M. Jia, M. Xie, T. Wang, and Z. Peng, "The effect of injection timing and intake valve close timing on performance and emissions of diesel PCCI engine with a full engine cycle CFD simulation," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 9, pp. 2967–2975, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.03.024.
- [153] W. Su and W. Yu, "Effects of mixing and chemical parameters on thermal efficiency in a partly premixed combustion diesel engine with near-zero emissions," *Int. J. Engine Res.*, vol. 13, no. 3, pp. 188–198, 2012, doi: 10.1177/1468087412438177.
- [154] Y. Jung, J. Hwang, and C. Bae, "Assessment of particulate matter in exhaust gas for biodiesel and diesel under conventional and low temperature combustion in a compression ignition engine," *Fuel*, vol. 165, pp. 413–424, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.076.
- [155] C. V. Srivatsa, J. Mattson, and C. Depcik, "Performance and emission analysis of partially premixed charge compression ignition combustion," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 141, no. 6, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1115/1.4042334.
- [156] V. Pradeep and A. Krishnasamy, "Effect of Injection Parameters on the Premixed Charge Compression Ignition Combustion in a Small-Bore Light Duty Diesel Engine - A CFD Study," *SAE Tech. Pap.*, no. 2021, pp. 1–18, 2021, doi: 10.4271/2021-01-1174.
- [157] Y. Jung, C. Bae, J. Jang, and D. Kim, "Improvement of premixed compression ignition combustion using various injector configurations," *SAE 2011 World Congr. Exhib.*, 2011, doi: 10.4271/2011-01-1357.
- [158] X. Su, H. Chen, J. He, Z. Chen, and H. Liu, "Combustion and Emission in a Common Rail Diesel Engine Fueled by Diesel, Palm Oil, Gasoline, and Ethanol Blends under Double-Injection Strategy," *J. Energy Eng.*, vol. 147, no. 6, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000793.
- [159] B. Liu, X. Cheng, J. Liu, and H. Pu, "Investigation into particle emission characteristics of partially premixed combustion fueled with high n-butanol-diesel ratio blends," *Fuel*, vol. 223, no. February, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.02.196.
- [160] B. Liu, X. Cheng, J. Liu, and H. Pu, "Experimental investigation of injection strategies on particle emission characteristics of Partially-premixed low temperature combustion mode," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 141, no. August 2017, pp. 90–100, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.066.
- [161] D. Mei, S. Yue, X. Zhao, K. Hielscher, and R. Baar, "Effects of center of heat release on combustion and emissions in a PCCI diesel engine fuelled by DMC-diesel blend," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, no. x, pp. 969–976, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.064.
- [162] D. Mei, L. Tu, S. Yue, D. Adu-Mensah, and S. Jiang, "Simulation of Combustion Process and Pollutant Generation in a PCCI Diesel Engine with

- Adaptable Multiple Injection,” *J. Energy Eng.*, vol. 144, no. 5, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000568.
- [163] R. Susanth Kishna, K. Nanthagopal, B. Ashok, R. Srinath, M. Pranava Kumar, and P. Bhowmick, “Investigation on pilot injection with low temperature combustion of Calophyllum inophyllum biodiesel fuel in common rail direct injection diesel engine,” *Fuel*, vol. 258, no. September 2018, p. 116144, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116144.
- [164] Á. Díez and H. Zhao, “Effect of the dwell angle of split injection in a single-cylinder optical diesel engine,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 224, no. 6, pp. 815–828, 2010, doi: 10.1243/09544070JAUTO1394.
- [165] S. L. Kokjohn and R. D. Reitz, “Investigation of charge preparation strategies for controlled premixed charge compression ignition combustion using a variable pressure injection system,” *Int. J. Engine Res.*, vol. 11, no. 4, pp. 257–282, 2010, doi: 10.1243/14680874JER06409.
- [166] Y. Nishijima, Y. Asaumi, and Y. Aoyagi, “Impingement spray system with direct water injection for premixed lean diesel combustion control,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2002, no. 724, 2002, doi: 10.4271/2002-01-0109.
- [167] B. Liu, M. Jia, and Z. Peng, “An investigation of multiple-injection strategy in a diesel PCCI combustion engine,” *SAE Tech. Pap.*, no. x, 2010, doi: 10.4271/2010-01-1134.
- [168] J. Li *et al.*, “Effects of pilot injection strategy on in-cylinder combustion and emission characteristics of PODE/methanol blends,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 228, no. January, p. 107168, 2022, doi: 10.1016/j.fuproc.2022.107168.
- [169] J. C. Ge, H. Y. Kim, S. K. Yoon, and N. J. Choi, “Optimization of palm oil biodiesel blends and engine operating parameters to improve performance and PM morphology in a common rail direct injection diesel engine,” *Fuel*, vol. 260, no. October 2019, p. 116326, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116326.
- [170] S. K. Pandey, S. Vandana, S. R. Sarma Akella, and R. V. Ravikrishna, “Potential of Early Direct Injection (EDI) for simultaneous NO_x and soot emission reduction in a heavy duty turbocharged diesel engine,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 158, no. January, p. 113762, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113762.
- [171] S. Lee, S. Yoon, H. Kwon, J. Lee, and S. Park, “Effects of engine operating conditions on flame propagation processes in a compression ignition optical engine,” *Appl. Energy*, vol. 254, no. August, p. 113642, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113642.
- [172] Y. Jung, C. Bae, S. B. Choi, and H. D. Shin, “Premixed compression ignition combustion with various injector configurations in a heavy duty diesel engine,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 227, no. 3, pp. 422–432, 2013, doi: 10.1177/0954407012457628.
- [173] H. Yu, X. Liang, G. Shu, Y. Wang, X. Sun, and H. Zhang, “Numerical investigation of the effect of two-stage injection strategy on combustion and emission characteristics of a diesel engine,” *Appl. Energy*, vol. 227, no. August 2017, pp. 634–642, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.014.

- [174] S. H. Yoon, J. P. Cha, and C. S. Lee, "An investigation of the effects of spray angle and injection strategy on dimethyl ether (DME) combustion and exhaust emission characteristics in a common-rail diesel engine," *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, no. 11, pp. 1364–1372, 2010, doi: 10.1016/j.fuproc.2010.04.017.
- [175] G. A. Lechner, T. J. Jacobs, C. A. Chryssakis, D. N. Assanis, and R. M. Siewert, "Evaluation of a narrow spray cone angle, advanced injection timing strategy to achieve partially premixed compression ignition combustion in a diesel engine," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2005, no. 724, 2005, doi: 10.4271/2005-01-0167.
- [176] X. Feng, M. Huo, C. F. Lee, and H. Liu, "The Effects of EGR and Injection Timing on the Engine Combustion and Emission Performances Fueled by Butanol-Diesel Blends," *SAE Int. J. Engines*, vol. 5, no. 3, pp. 794–811, 2011, doi: 10.4271/2011-01-2473.
- [177] D. Kakati, S. Roy, and R. Banerjee, "Development and validation of an artificial intelligence platform for characterization of the exergy-emission-stability profiles of the PPCI-RCCI regimes in a diesel-methanol operation under varying injection phasing strategies: A Gene Expression Programming approach," *Fuel*, vol. 299, no. March 2020, p. 120864, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120864.
- [178] Y. Lu, C. Fan, Y. Chen, Y. Liu, and Y. Pei, "Effect of injection strategy optimization on PCCI combustion and emissions under engine speed extension in a heavy-duty diesel engine," *Fuel*, vol. 332, no. P1, p. 126053, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126053.
- [179] L. Shi, W. Xiao, M. Li, L. Lou, and K. yao Deng, "Research on the effects of injection strategy on LTC combustion based on two-stage fuel injection," *Energy*, vol. 121, pp. 21–31, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.128.
- [180] E. A. El Shenawy, M. Elkelawy, H. A. E. Bastawissi, H. Panchal, and M. M. Shams, "Comparative study of the combustion, performance, and emission characteristics of a direct injection diesel engine with a partially premixed lean charge compression ignition diesel engines," *Fuel*, vol. 249, no. January, pp. 277–285, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.073.
- [181] A. J. Torregrosa, A. Broatch, A. García, and L. F. Mónico, "Sensitivity of combustion noise and NO_x and soot emissions to pilot injection in PCCI Diesel engines," *Appl. Energy*, vol. 104, no. x, pp. 149–157, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.040.
- [182] H. Huang *et al.*, "Experimental and numerical study of pre-injection effects on diesel-n-butanol blends combustion," *Appl. Energy*, vol. 249, no. May 2018, pp. 377–391, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.163.
- [183] Y. Park and C. Bae, "Influence of EGR and pilot injection on PCCI combustion in a single-cylinder diesel engine," *SAE Tech. Pap.*, 2011, doi: 10.4271/2011-01-1823.
- [184] Y. Qian, Z. Wu, J. Guo, Z. Li, C. Jiang, and X. Lu, "Experimental studies on the key parameters controlling the combustion and emission in premixed charge compression ignition concept based on diesel surrogates," *Appl.*

- Energy*, vol. 235, no. November 2018, pp. 233–246, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.104.
- [185] X. Cheng, L. Chen, F. Yan, G. Hong, Y. Yin, and H. Liu, “Investigations of split injection strategies for the improvement of combustion and soot emissions characteristics based on the two-color method in a heavy-duty diesel engine,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 11, no. X, 2013, doi: 10.4271/2013-01-2523.
- [186] A. Zehni, N. Balazadeh, M. Hajibabaei, and K. Poorghasemi, “Numerical study of the effects of split injection strategy and swirl ratio for biodiesel PCCI combustion and emissions,” *Propuls. Power Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 355–371, 2020, doi: 10.1016/j.jppr.2020.11.004.
- [187] H. Wang, B. Feng, L. Zhang, Y. Li, Z. Zheng, and M. Yao, “Experimental investigation on the effects of octane sensitivity on partially premixed low-temperature combustion,” *Fuel*, vol. 287, no. x, p. 119488, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119488.
- [188] W.W. Pulkrabek, *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*, Prentice Hall, New Jersey, 2004.
- [189] L. Xu, X. S. Bai, M. Jia, Y. Qian, X. Qiao, and X. Lu, “Experimental and modeling study of liquid fuel injection and combustion in diesel engines with a common rail injection system,” *Appl. Energy*, vol. 230, no. March, pp. 287–304, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.104.
- [190] I. Shahridzuan Abdullah, A. Khalid, N. Jaat, R. Saputra Nursal, H. Koten, and Y. Karagoz, “A study of ignition delay, combustion process and emissions in a high ambient temperature of diesel combustion,” *Fuel*, vol. 297, no. March, p. 120706, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120706.
- [191] A. Viggiano and V. Magi, “Optimization of multi stage direct injection-PSCCI engines,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.4271/2019-24-0029.
- [192] X. Zhang, W. Su, and Y. Pei, “Mixing-enhanced combustion in the circumstances of diluted combustion in direct-injection diesel engines,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2008, no. 724, pp. 776–790, 2008, doi: 10.4271/2008-01-0009.
- [193] M. P. B. Musculus, P. C. Miles, and L. M. Pickett, *Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion*, vol. 39, no. 2–3. Elsevier Ltd, 2013. doi: 10.1016/j.pecs.2012.09.001.
- [194] Y. An *et al.*, “Combustion stability study of partially premixed combustion by high-pressure multiple injections with low-octane fuel,” *Appl. Energy*, vol. 248, no. January, pp. 626–639, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.048.
- [195] R. J. Amorim, R. Novella, A. Garcia, and S. Molina, “Study on LTC for light duty engines – Part 2 – Spray enhancements,” *Fuel*, vol. 193, pp. 206–219, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2016.12.050.
- [196] D. Golc, S. Esposito, H. Pitsch, and J. Beeckmann, “Development of a Fast-Running Injector Model with Artificial Neural Network (ANN) for the Prediction of Injection Rate with Multiple Injections,” *SAE Tech. Pap.*, no. 2021, 2021, doi: 10.4271/2021-24-0027.
- [197] J. Du *et al.*, “Experimental study on fuel economies and emissions of direct-injection premixed combustion engine fueled with gasoline/diesel blends,”

- Energy Convers. Manag.*, vol. 100, no. x, pp. 300–309, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.04.076.
- [198] Y. Hardalupas, C. Hong, C. Keramiotis, A. M. K. P. Taylor, D. Touloupis, and G. Vourliotakis, “Optical Diagnostics Investigation into the Effect of Pilot Injection Dwell Time and Injection Pressure on Combustion Characteristics and Soot Emissions in a Single-Cylinder Optical Diesel Engine,” *J. Energy Eng.*, vol. 144, no. 5, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000571.
- [199] T. Tsurushima, A. Harada, Y. Iwashiro, Y. Enomoto, Y. Asaumi, and Y. Aoyagi, “Thermodynamic characteristics of premixed compression ignition combustions,” *SAE Tech. Pap.*, no. 724, 2001, doi: 10.4271/2001-01-1891.
- [200] A. P. Carlucci, A. Ficarella, and D. Laforgia, “Control of the combustion behaviour in a diesel engine using early injection and gas addition,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 17–18, pp. 2279–2286, 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.03.016.
- [201] G. Silvagni *et al.*, “Development of a Predictive Pressure Waves Model for High-Pressure Common Rail Injection Systems,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 15, no. 5, pp. 3–15, 2021, doi: 10.4271/03-15-05-0039.
- [202] P. Degobert, *Automobiles and Pollution*, Society of Automotive Engineeris Inc, Warrendale, 1995.
- [203] A. Kozina, G. Radica, and S. Nižetić, “Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines,” *J. Clean. Prod.*, vol. 262, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121105.
- [204] O. Özener, “Diesel Motorlarında Pilot Püskürtmenin Performans ve Emisyon Açısından Optimizasyonu”, *Doktora Tezi*, 2013
- [205] S. M. A. Rahman, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. Sanjid, and M. J. Abedin, “Assessment of emission and performance of compression ignition engine with varying injection timing,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 35, pp. 221–230, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.03.049.
- [206] O. Gezer, C. Buyuk O. Ozener, and M. Ozkan, “Analysis of Emissions of Low Temperature Combustion in a Diesel Engine According to the Combustion Process and Modeling of N₂O Emissions” in *Proceedings of the 17th International Combustion Symposium*, 2024, pp. 287–93. ISBN:978-625-6443-27-3
- [207] D. Bakhchin, R. Ravi, M. Faqir, and E. Essadiqi, “A technical review on low temperature combustion alternatives for ultra-low emission vehicles,” *J. Energy Inst.*, vol. 111, no. September, p. 101410, 2023, doi: 10.1016/j.joei.2023.101410.
- [208] G. G. Naik and H. M. Dharmadhikari, “Methods for reducing NO_x and PM emissions in compression ignition engine: A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 72, no. 2, pp. 1406–1412, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.339.
- [209] D. Vallero, *Fundamentals of Air Pollution*, Elsevier Inc., 2014.
- [210] A. Albayrak, O. Gezer, O. Özener, C. Büyük, and M. Özkan, “The effect of multiple injection on CI engine pollutant emissions and green house gases,” *Fuel*, vol. 349, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128667.

- [211] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1988.
- [212] S. Biswas, M. Bakshi, G. Shankar, and A. Mukhopadhyay, "Optimization of Multiple Injection Strategies to Improve BSFC Performance of a Common Rail Direct Injection Diesel Engine," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2016-February, no. February, 2016, doi: 10.4271/2016-28-0002.
- [213] S. Imtenan *et al.*, "Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, no. x, pp. 329–356, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.020.
- [214] F. Xing, L. Yang, "Robust nucleus/cell detection and segmentation in digital pathology and microscopy images: A comprehensive review," *IEEE reviews in biomedical engineering*, vol. 9, pp. 234–263, 2016.
- [215] W. F. Northrop, S. V. Bohac, J. Y. Chin, and D. N. Assanis, "Comparison of filter smoke number and elemental carbon mass from partially premixed low temperature combustion in a direct-injection diesel engine," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 133, no. 10, 2011, doi: 10.1115/1.4002918.
- [216] H. Seong, K. O. Lee, S. Choi, C. Adams, and D. Foster, "Characterization of particulate morphology, nanostructures, and sizes in low-temperature combustion with biofuels," *SAE Tech. Pap.*, no. x, 2012, doi: 10.4271/2012-01-0441.
- [217] S. Rana, M. R. Saxena, R. K. Maurya, and P. C. Shukla, "Numerical Investigation on the Effect of Fuel Injection Timing on Soot Particle Size and Number Characteristics of Diesel Engine," *SAE Tech. Pap.*, pp. 1–20, 2022, doi: 10.4271/2022-01-1053.
- [218] J. Benajes, R. Novella, S. Arthozoul, and C. Kolodziej, "Particle size distribution measurements from early to late injection timing low temperature combustion in a heavy duty diesel engine," *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 3, no. 1, pp. 567–581, 2010, doi: 10.4271/2010-01-1121.
- [219] A. K. Agarwal, A. P. Singh, A. García, and J. Monsalve-Serrano, "Challenges and Opportunities for Application of Reactivity-Controlled Compression Ignition Combustion in Commercially Viable Transport Engines," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 93, no. August, p. 101028, 2022, doi: 10.1016/j.peccs.2022.101028.
- [220] H. Solaka, U. Aronsson, M. Tuner, and B. Johansson, "Investigation of partially premixed combustion characteristics in low load range with regards to fuel octane number in a light-duty diesel engine," *SAE Tech. Pap.*, no. x, 2012, doi: 10.4271/2012-01-0684.
- [221] R. Chaurasiya and A. Krishnasamy, "A single fuel port and direct injected low temperature combustion strategy to reduce regulated pollutants from a light-duty diesel engine," *Fuel*, vol. 335, no. December 2022, p. 127114, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.127114.
- [222] Y. Jung and C. Bae, "Immaturity of soot particles in exhaust gas for low temperature diesel combustion in a direct injection compression ignition engine," *Fuel*, vol. 161, pp. 312–322, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.08.068.

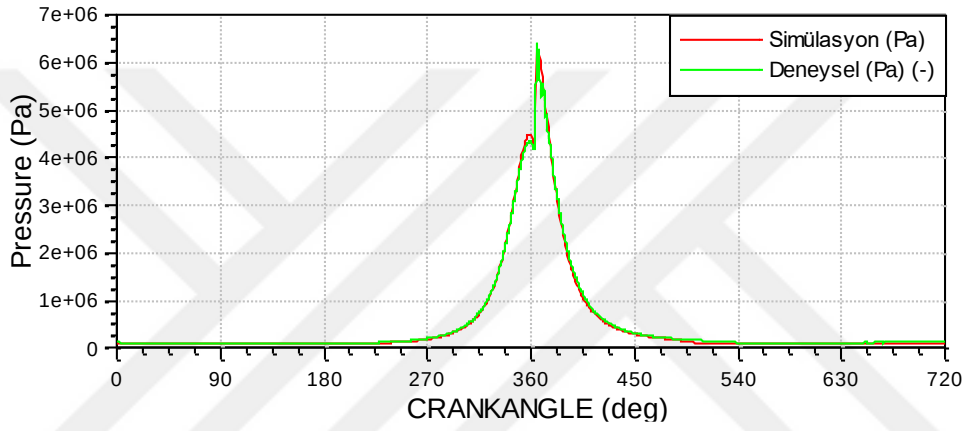
- [223] K. P. Nandha and J. Abraham, "Dependence of fuel-air mixing characteristics on injection timing in an early-injection diesel engine," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2002, no. 724, 2002, doi: 10.4271/2002-01-0944.
- [224] J. Liu *et al.*, "Experimental study on in-cylinder combustion and exhaust emissions characteristics of natural gas/diesel dual-fuel engine with single injection and split injection strategies," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 172, no. February, pp. 225–240, 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.02.013.
- [225] M. Martínez, C. Altantzis, Y. M. Wright, P. Martí-Aldaraví, and K. Boulouchos, "Computational study of the Premixed Charge Compression Ignition combustion in a Rapid Compression Expansion Machine: Impact of multiple injection strategy on mixing, ignition and combustion processes," *Fuel*, vol. 318, no. January, p. 123388, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123388.
- [226] M. Murugesu Pandian and K. Anand, "Comparison of different low temperature combustion strategies in a light duty air cooled diesel engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 142, pp. 380–390, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.047.
- [227] S. Gowrishankar and A. Krishnasamy, "Experimental investigations on biodiesel-water emulsion as a potential fuel for early and late injection based premixed lean combustion," *Energy Convers. Manag.*, vol. 273, no. x, p. 116386, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116386.
- [228] V. Vellandi, A. Krishnasamy, and A. Ramesh, "Fuel Injection Strategies for Improving Performance and Reducing Emissions of a Low Compression Ratio Diesel Engine," *SAE Tech. Pap.*, no. 2021, pp. 1–17, 2021, doi: 10.4271/2021-01-1166.
- [229] D. Golc, S. Esposito, F. Loffredo, H. Pitsch, and J. Beeckmann, "A Numerical Investigation of Potential Ion Current Sensor Applications in Premixed Charge Compression Ignition Engine," *SAE Tech. Pap.*, 2022, doi: 10.4271/2022-24-0041.
- [230] D-Optimal Design, [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section5/pri521.htm>
- [231] F. Erdoğan, "Yükseltilmiş D-Optimal Dizayn Yöntemi Kullanarak Mühendislik Dizaynlarında Etkinliğin Geliştirilmesi: Sentetik Jet Dizayn Optimizasyon Çalışması", *Havacılık ve Uay Teknolojileri Dergisi*, cilt. 3, sayı. 1, pp 51-61, 2007.
- [232] Ö. Demir, B. Aksu, and Y. Özsoy, "İlaç formülasyonu geliştirilmesinde deney tasarımı (DoE) seçimi ve kullanımı," *Marmara Pharm. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 211–222, 2017, doi: 10.12991/marupj.277719.
- [233] M. Savran, "Belirlenmiş Mühendislik Problemlerinin Tasarımı, Modellenmesi ve Optimizasyonu İçin Çoklu-Stokastik Nonlineer Nöro-Regresyon Analizi ve Geleneksel Olmayan Arama Algoritmaları Tabanlı Yeni Bir Sistematik Yaklaşım", *Doktora Tezi*, Haziran 2023.
- [234] D. Murat, "Kalite karakteristiğinin Modellenmesinde Tepki Yüzeyi Metodolojisi: Bir Uygulama Denemesi," *Doktora Tezi*, 2013.
- [235] AVL List GmbH, AVL Boost Theory, [Online]. Available: <https://www.avl.com/web/ast/boost>, 2011.

- [236] E. Öztemel, Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [237] B. G. Liptak, Expert System-Neural Networks, Taylor Francis Group, London, 1995.
- [238] Recurrent Neural Networks cheatsheet, [Online]. Available: <https://stanford.edu/~shervine/teaching/cs-230/cheatsheet-recurrent-neural-networks>

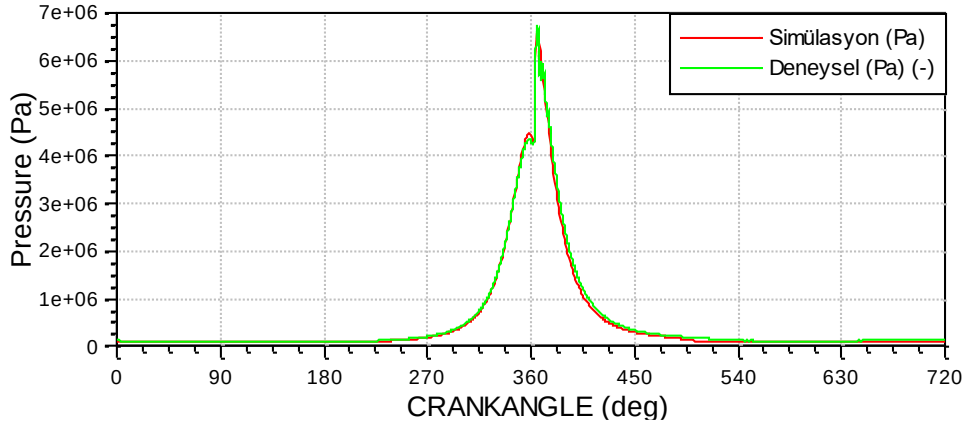


A

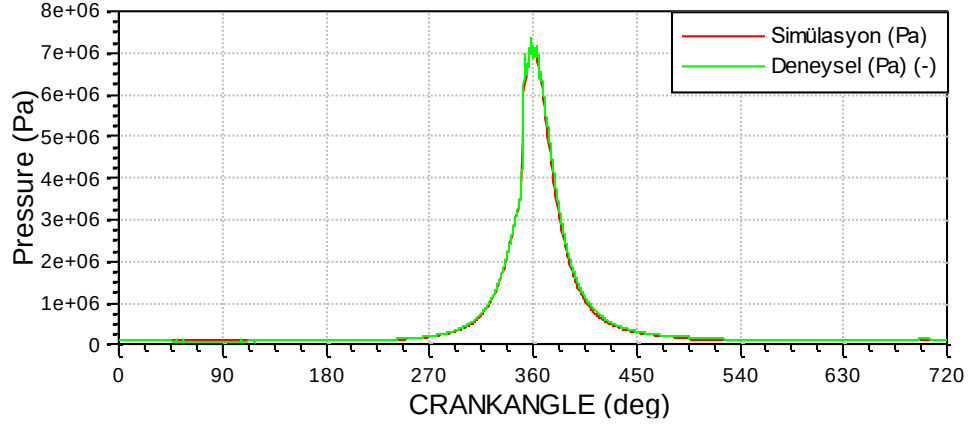
TEK FAZDA TERMODİNAMİK MODEL DOĞRULAMASINDA OLUŞAN P- α DİYAGRAMLARININ KARŞILAŞTIRMASI



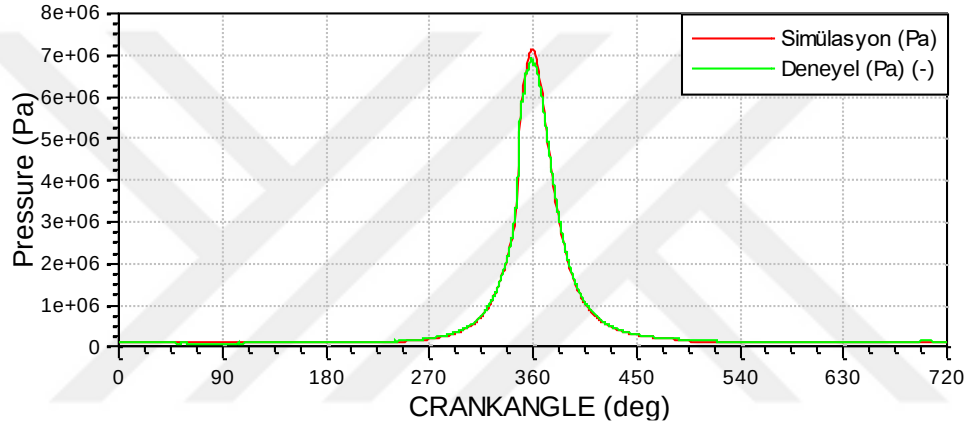
Şekil A.1 T1 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



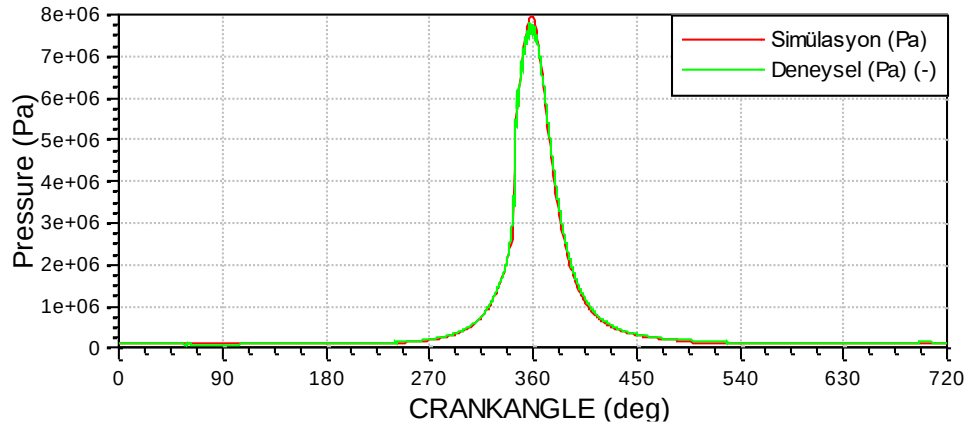
Şekil A.2 T2 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



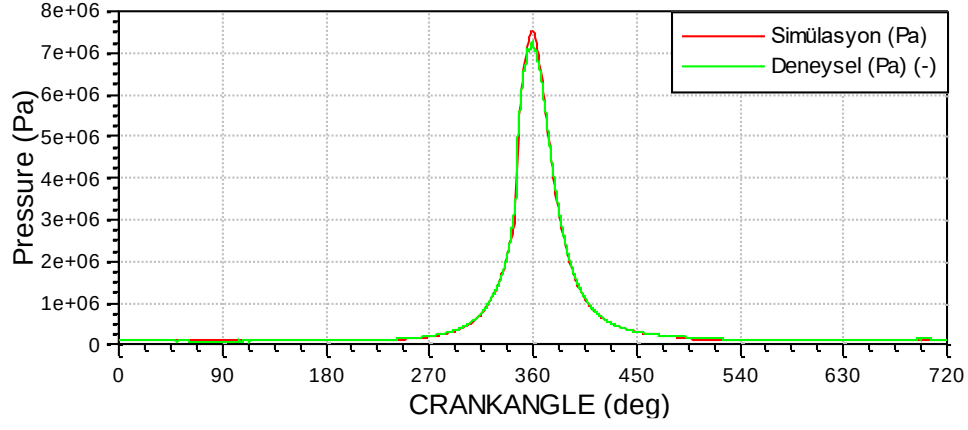
Şekil A.3 T3 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



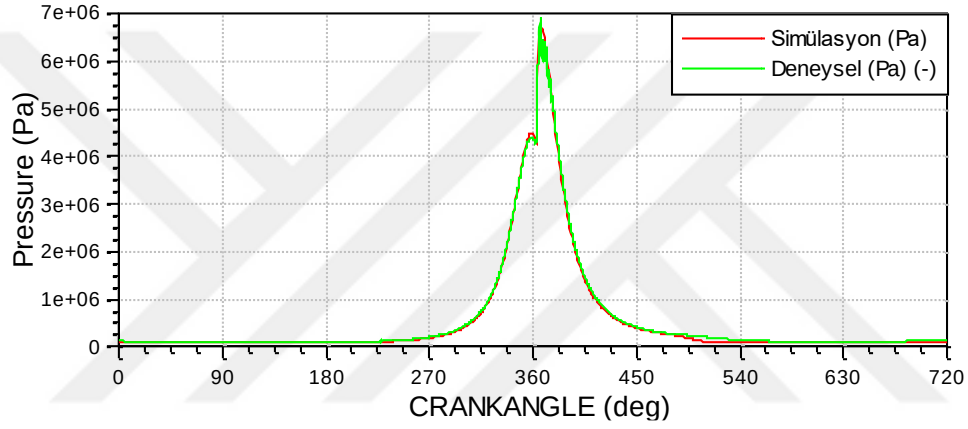
Şekil A.4 T4 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



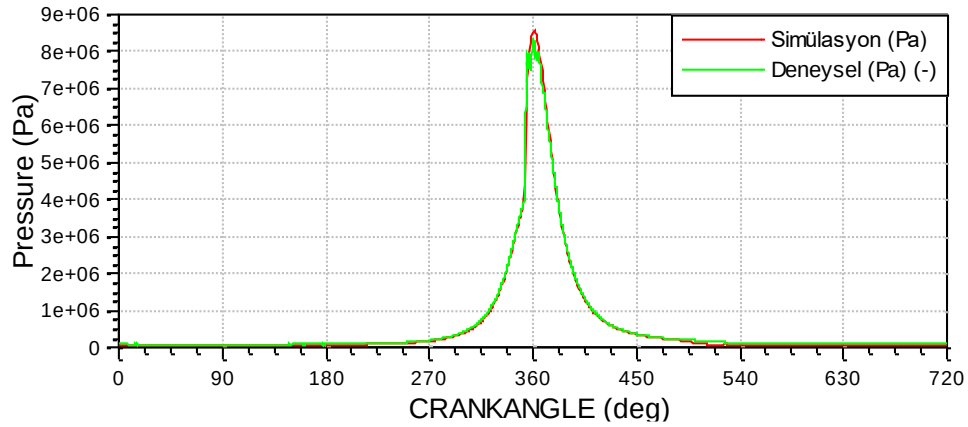
Şekil A.5 T5 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



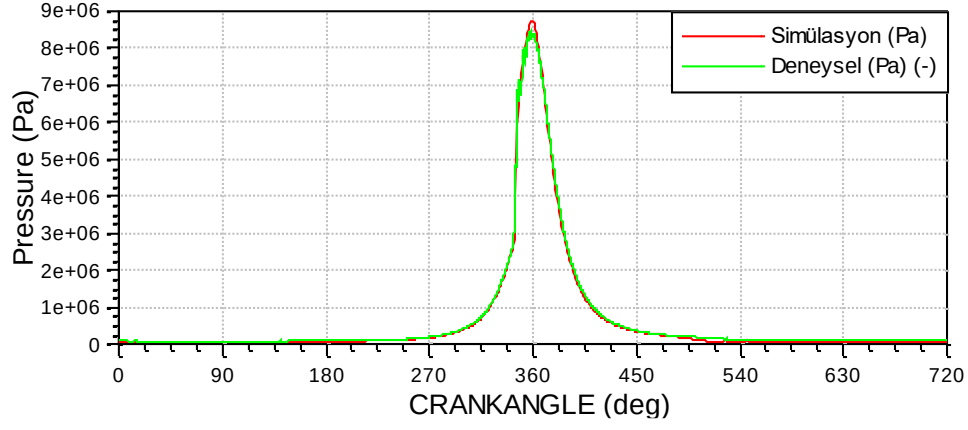
Şekil A.6 T6 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



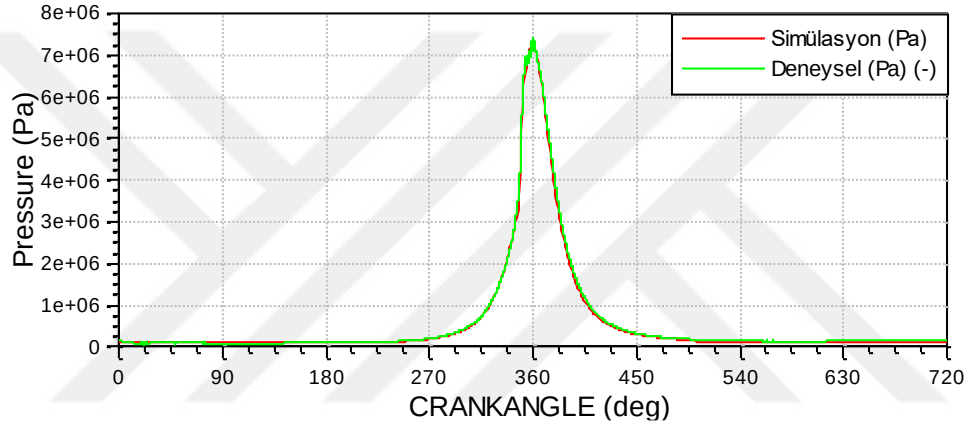
Şekil A.7 T7 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



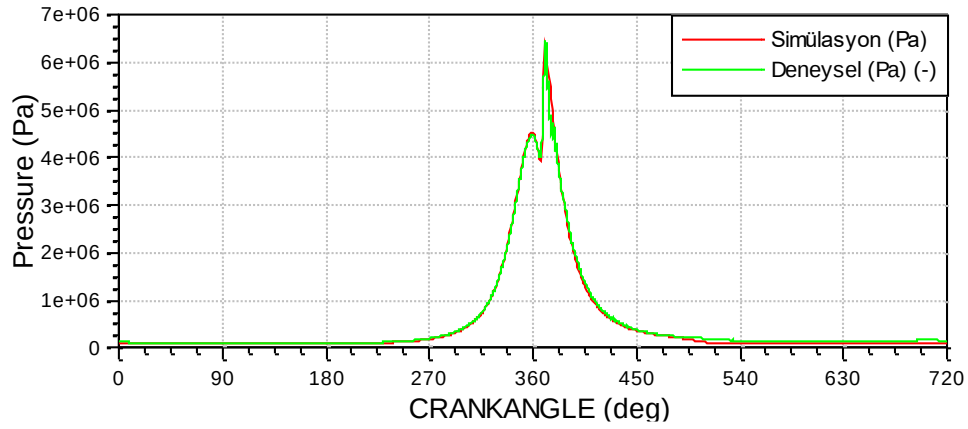
Şekil A.8 T8 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



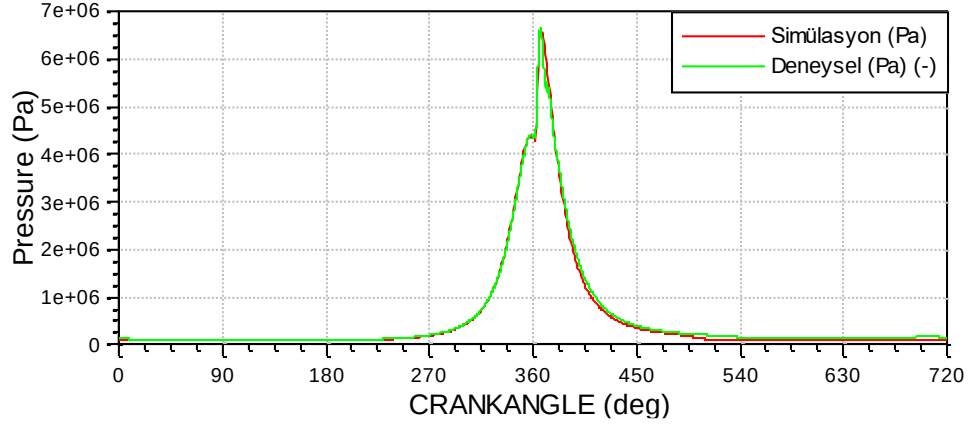
Şekil A.9 T9 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



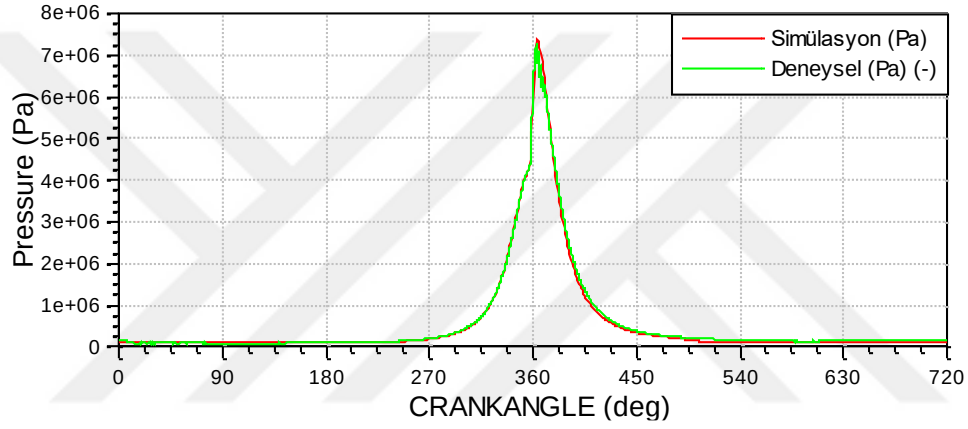
Şekil A.10 T10 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



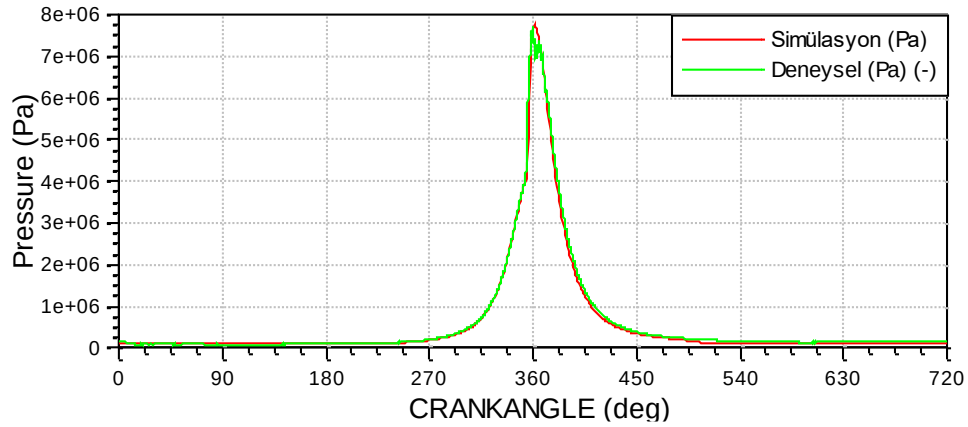
Şekil A.11 T11 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



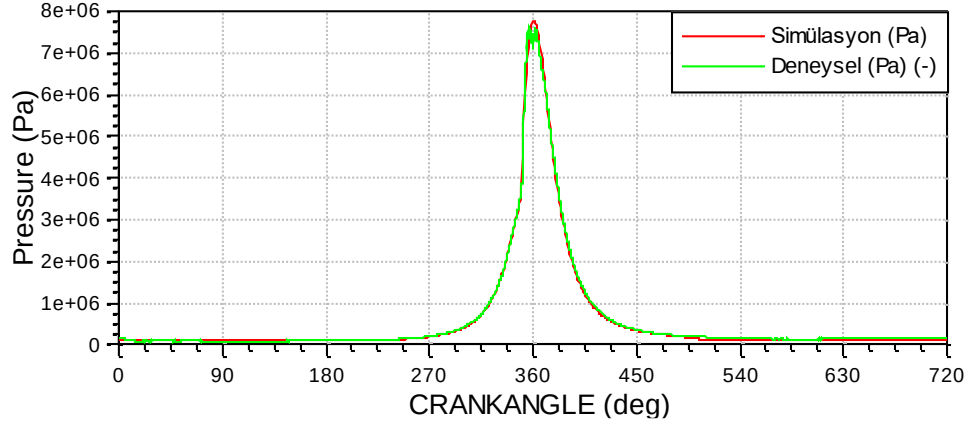
Şekil A.12 T16 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



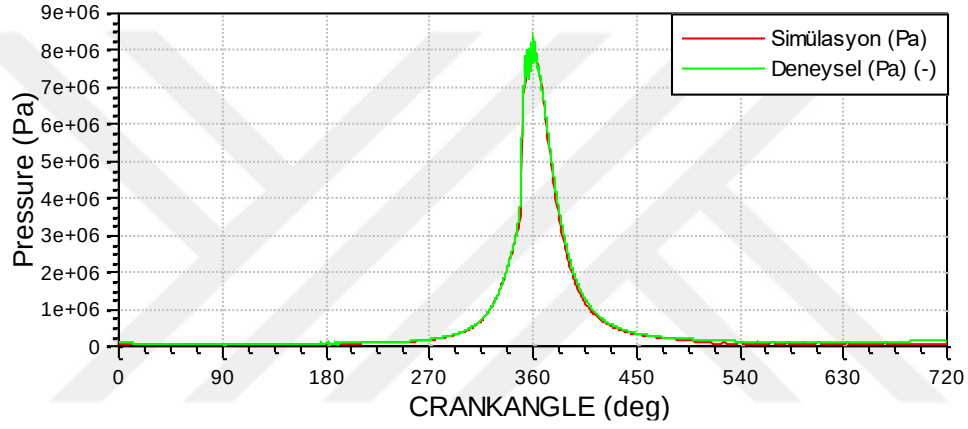
Şekil A.13 T21 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



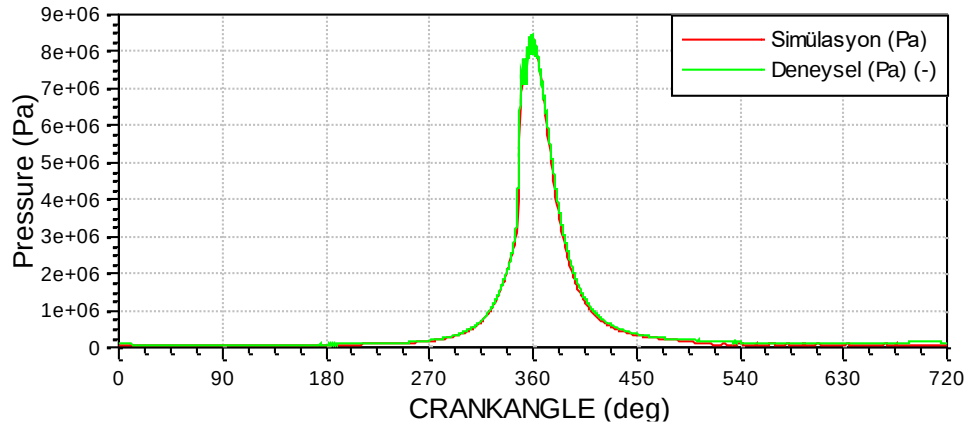
Şekil A.14 T26 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



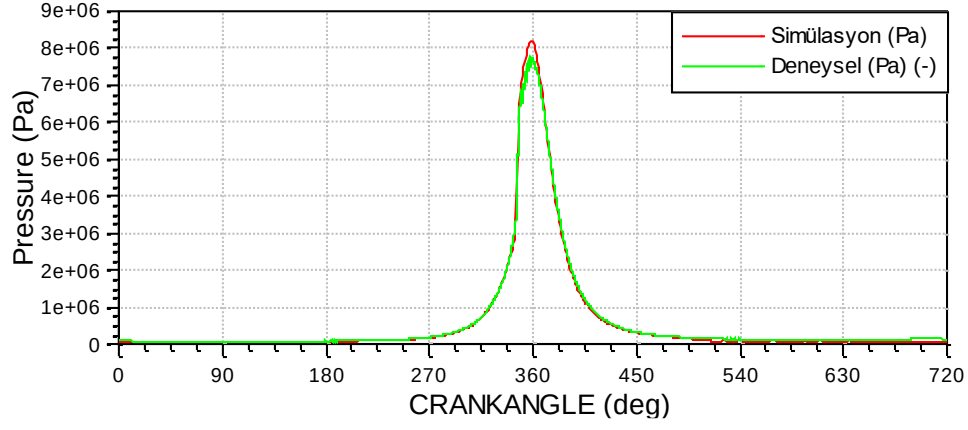
Şekil A.15 T31 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



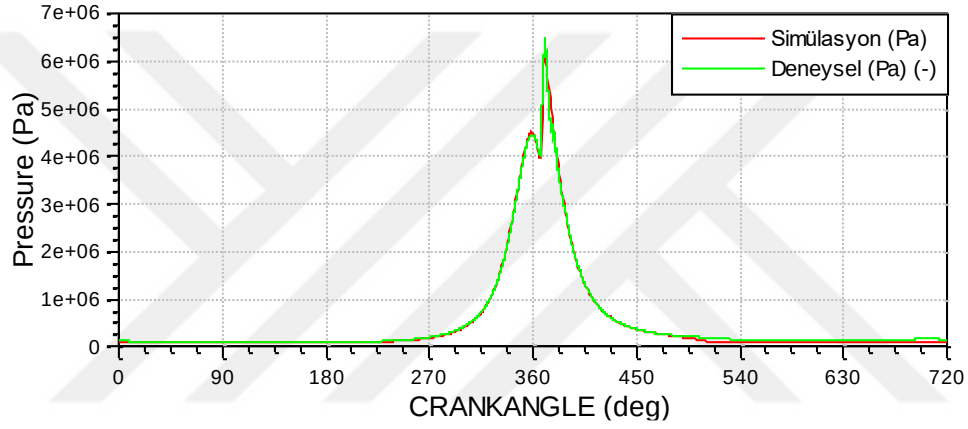
Şekil A.16 T36 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



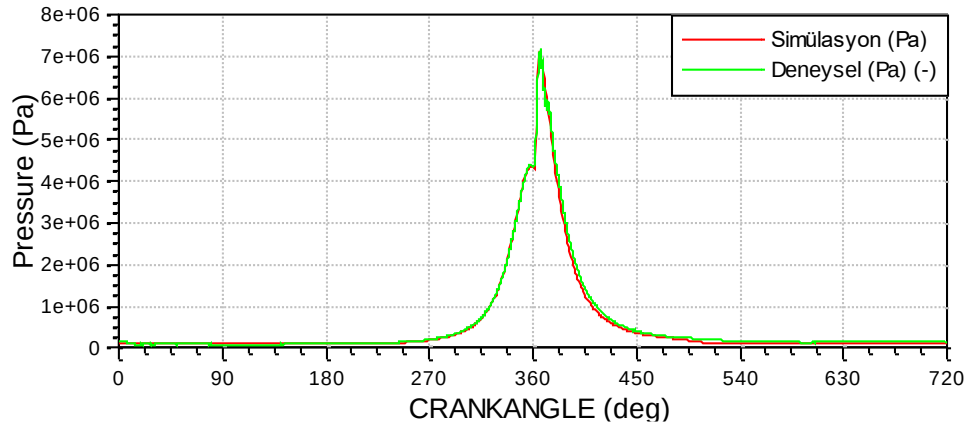
Şekil A.17 T41 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



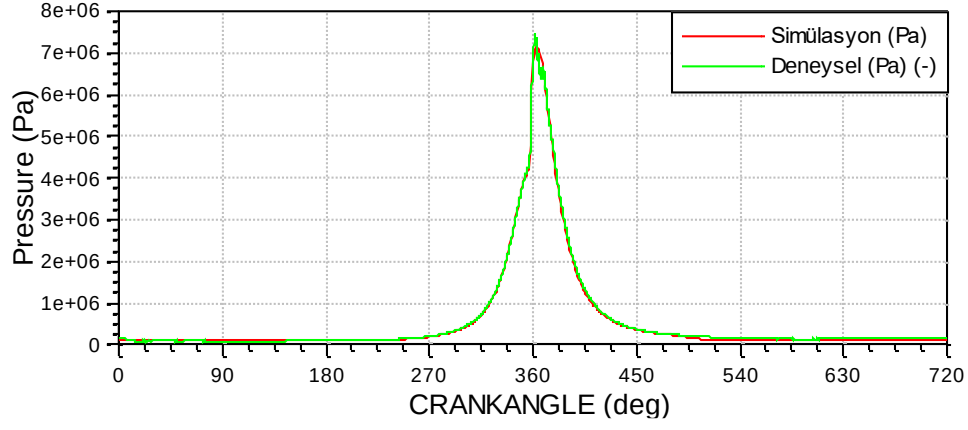
Şekil A.18 T46 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



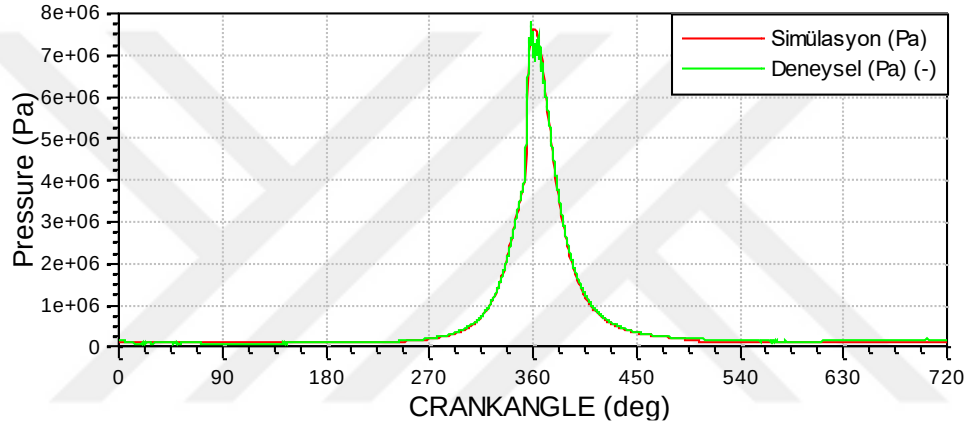
Şekil A.19 T12 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



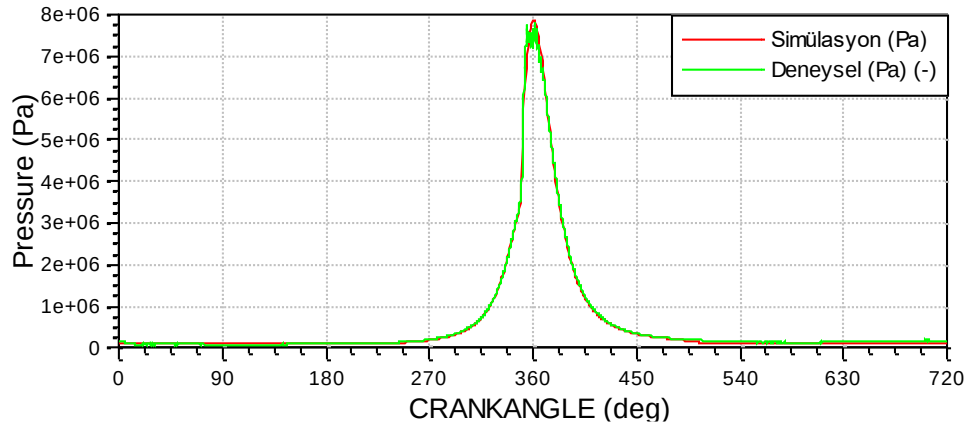
Şekil A.20 T17 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



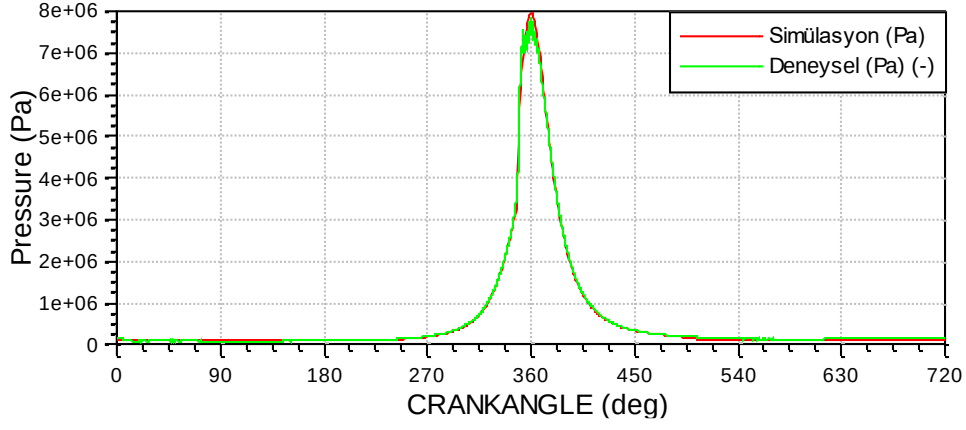
Şekil A.21 T22 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



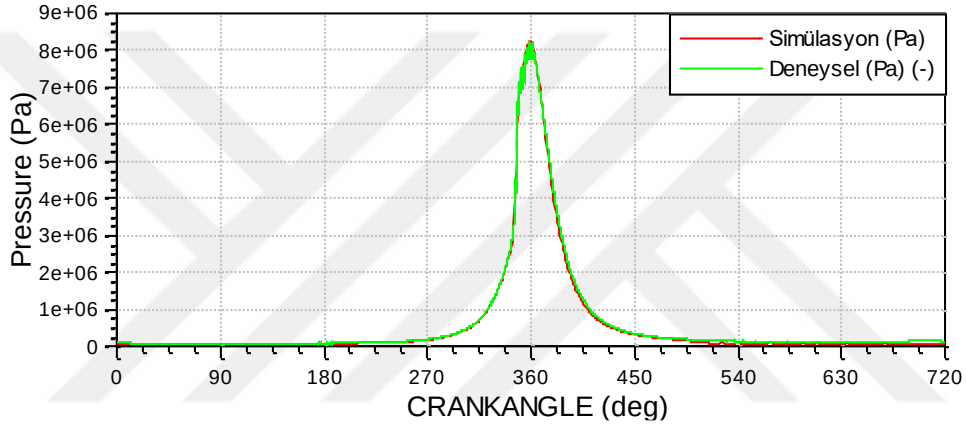
Şekil A.22 T27 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



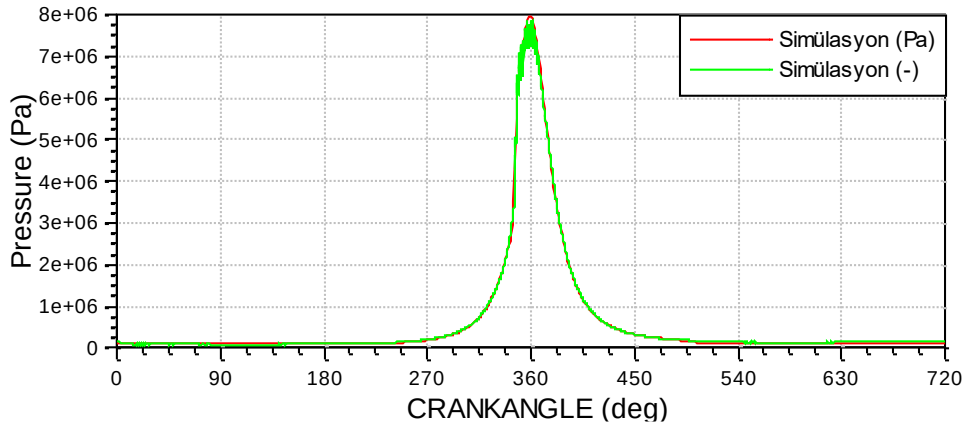
Şekil A.23 T32 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



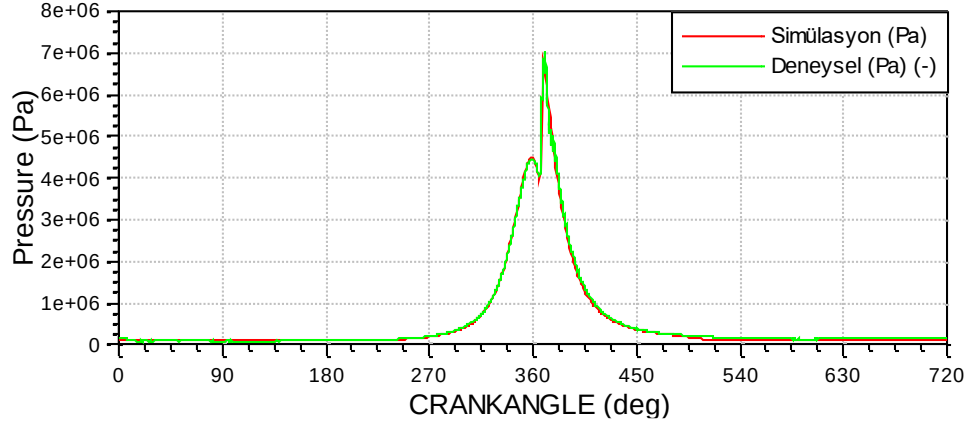
Şekil A.24 T37 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



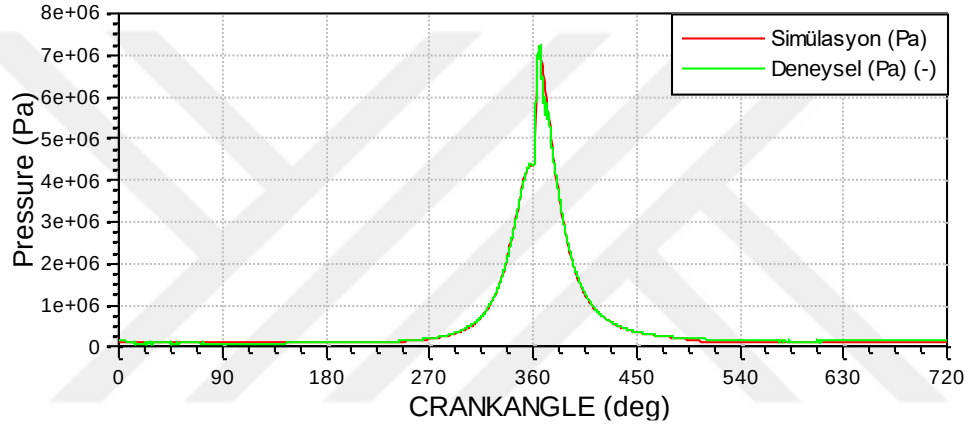
Şekil A.25 T42 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



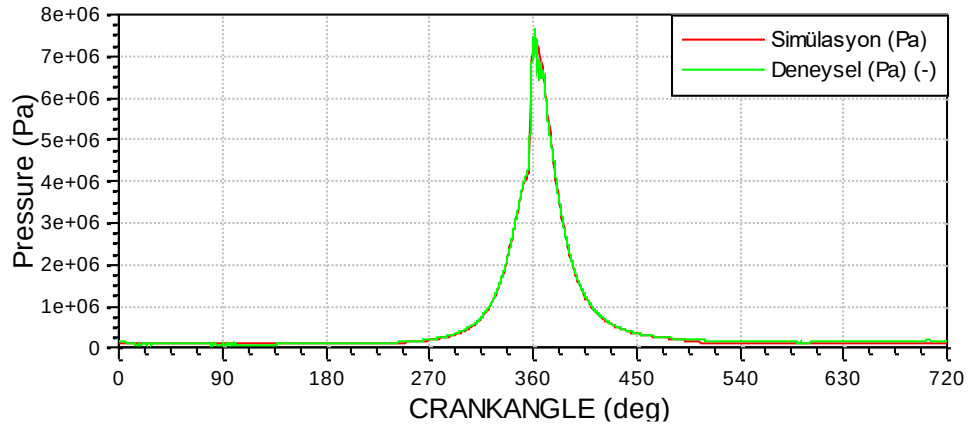
Şekil A.26 T47 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



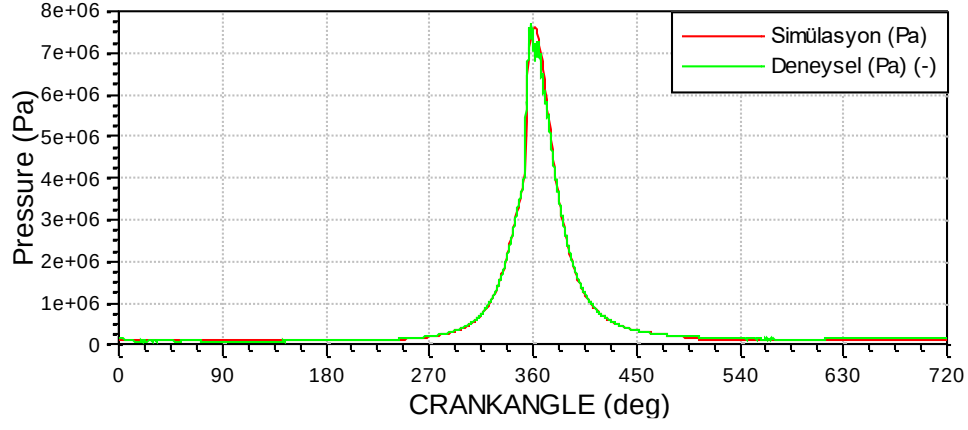
Şekil A.27 T13 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



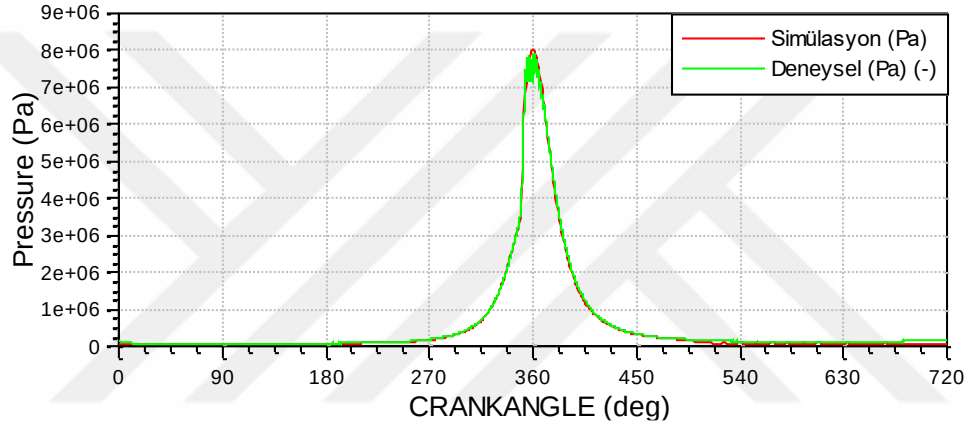
Şekil A.28 T18 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



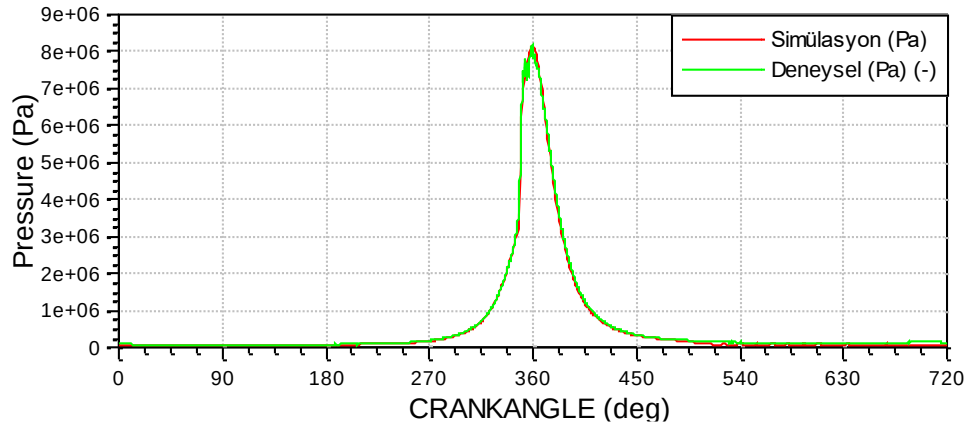
Şekil A.29 T23 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



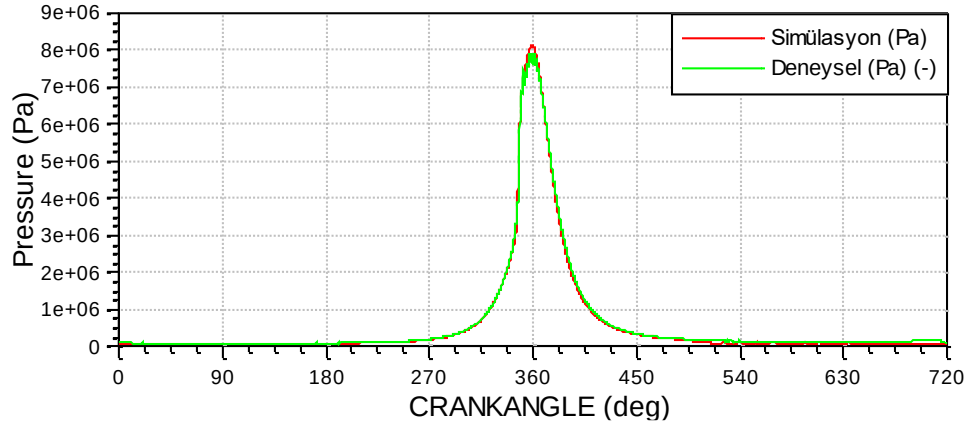
Şekil A.30 T28 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



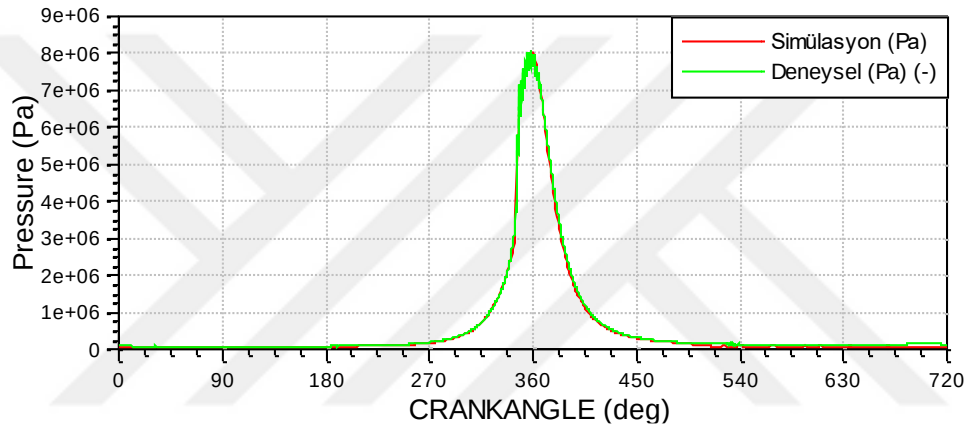
Şekil A.31 T33 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



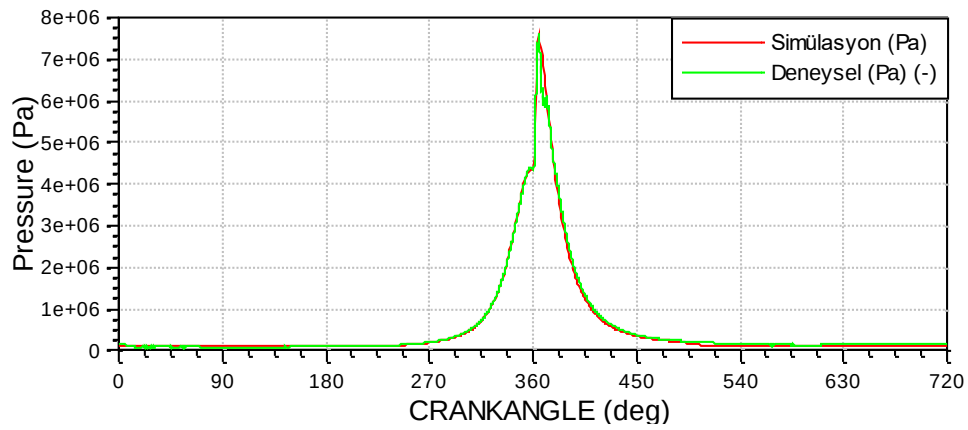
Şekil A.32 T38 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



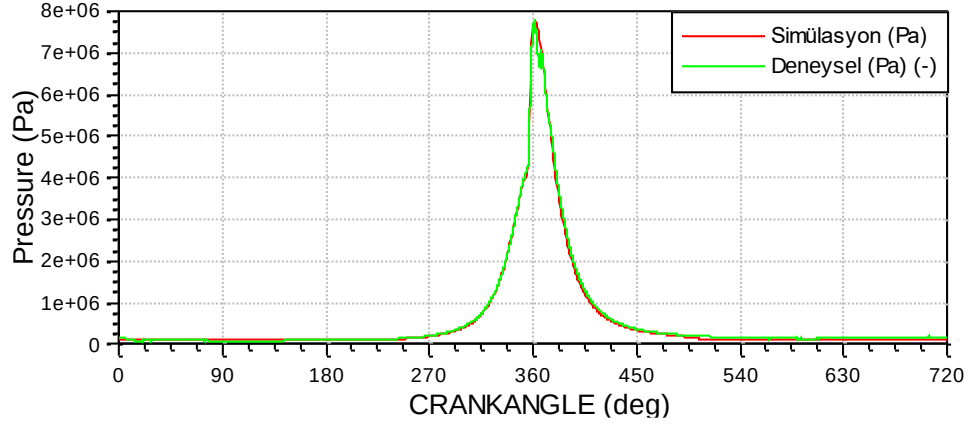
Şekil A.33 T43 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



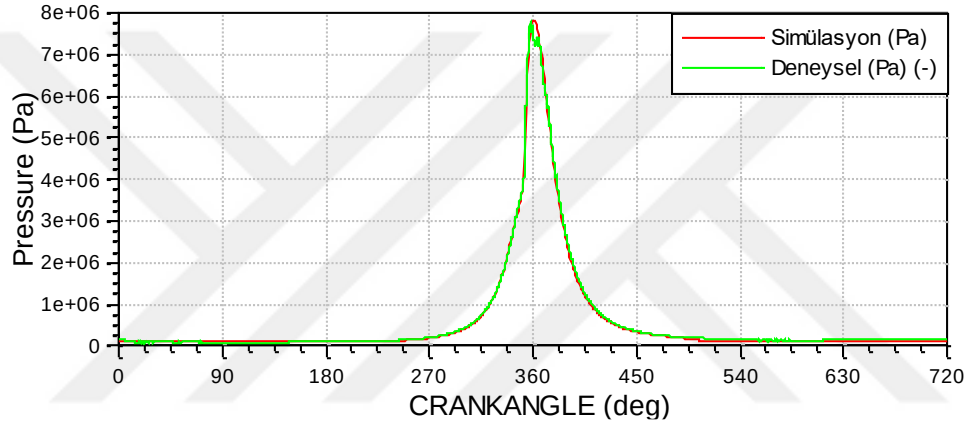
Şekil A.34 T48 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



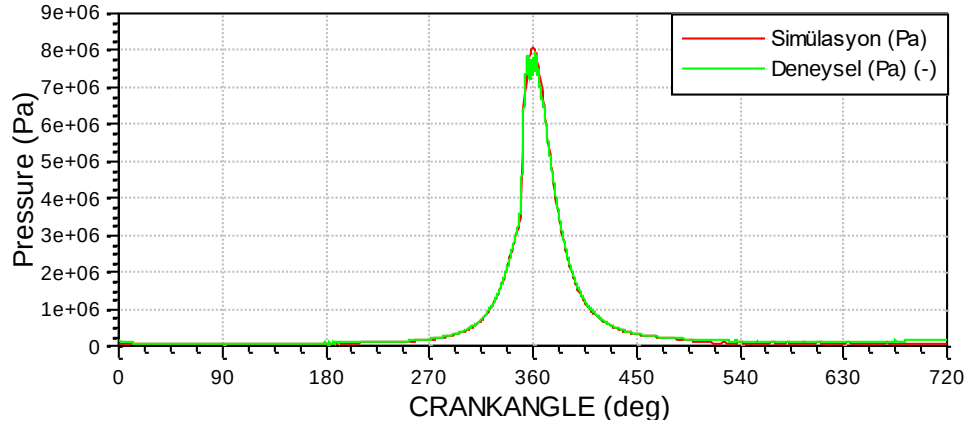
Şekil A.35 T19 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



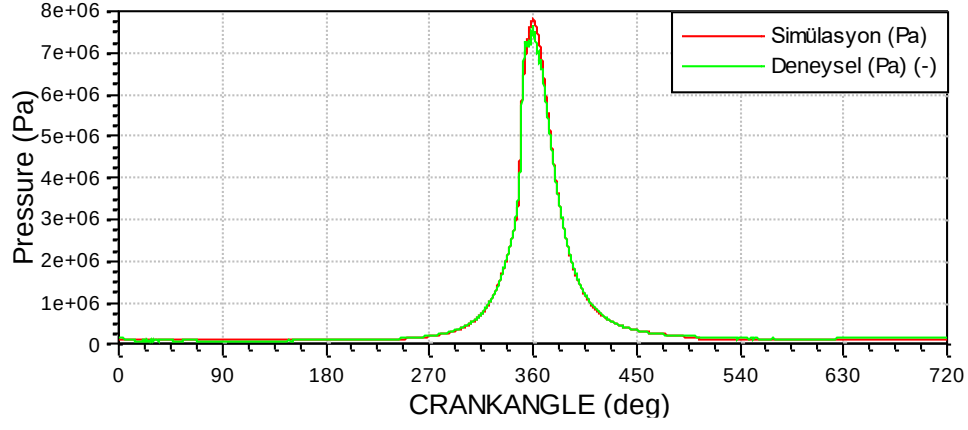
Şekil A.36 T24 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



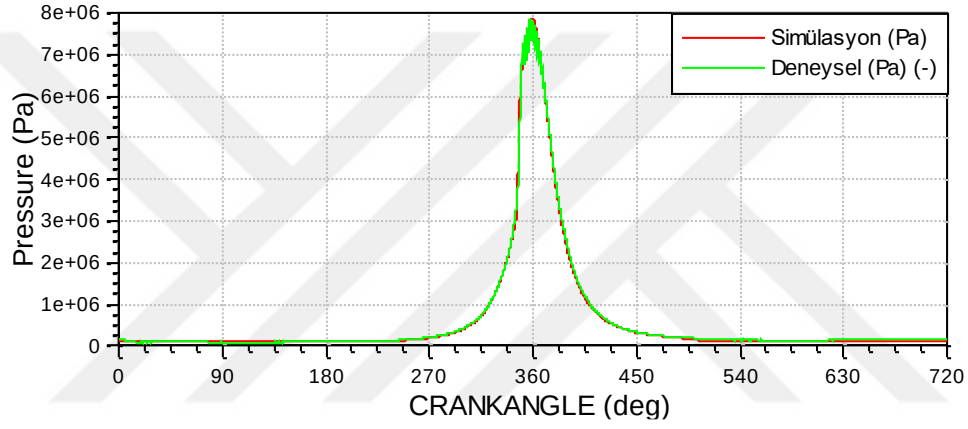
Şekil A.37 T29 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



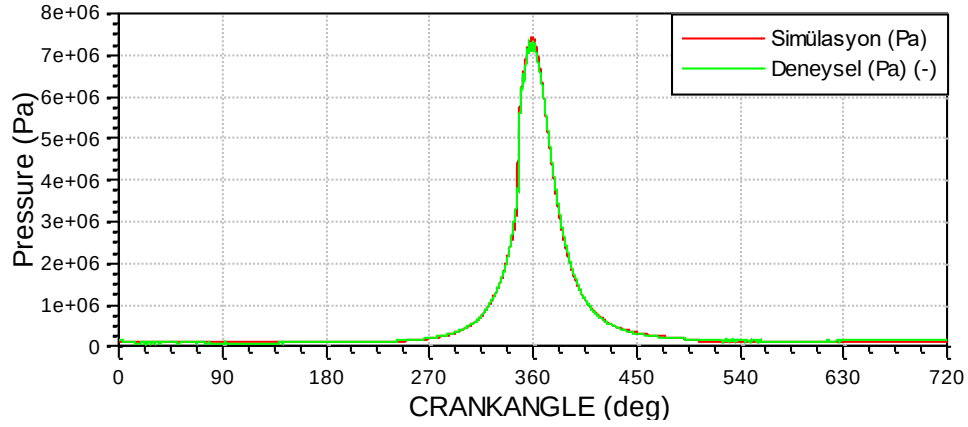
Şekil A.38 T34 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



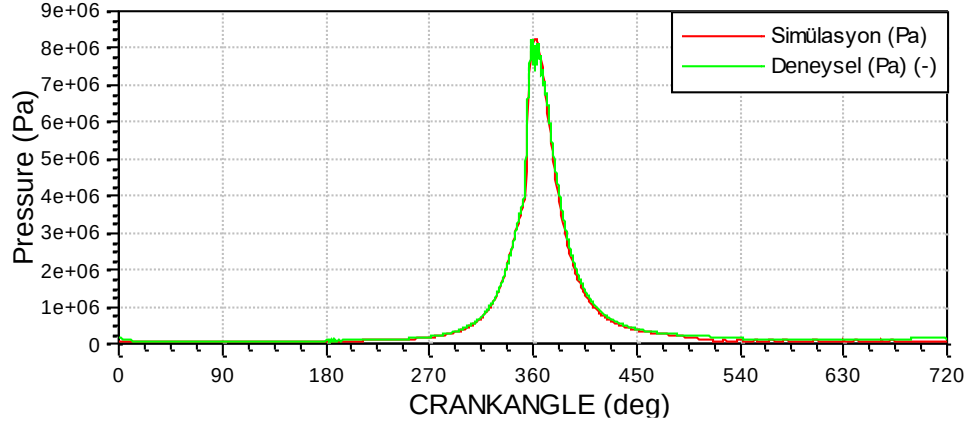
Şekil A.39 T39 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



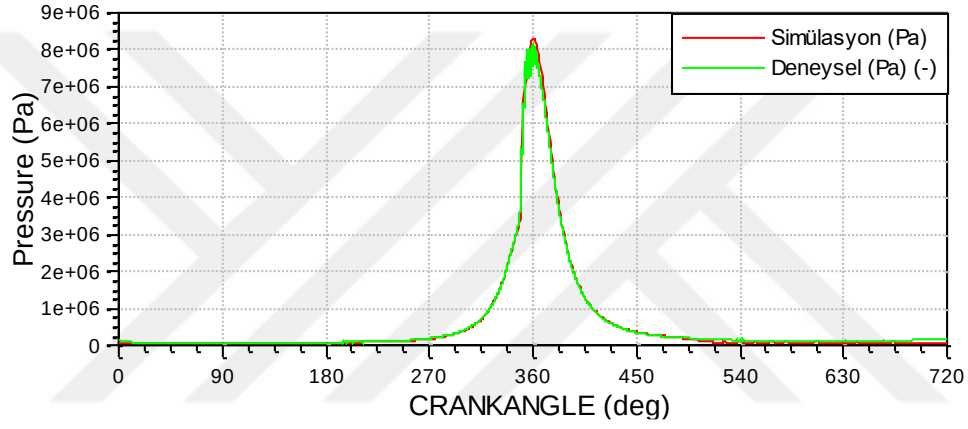
Şekil A.40 T44 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



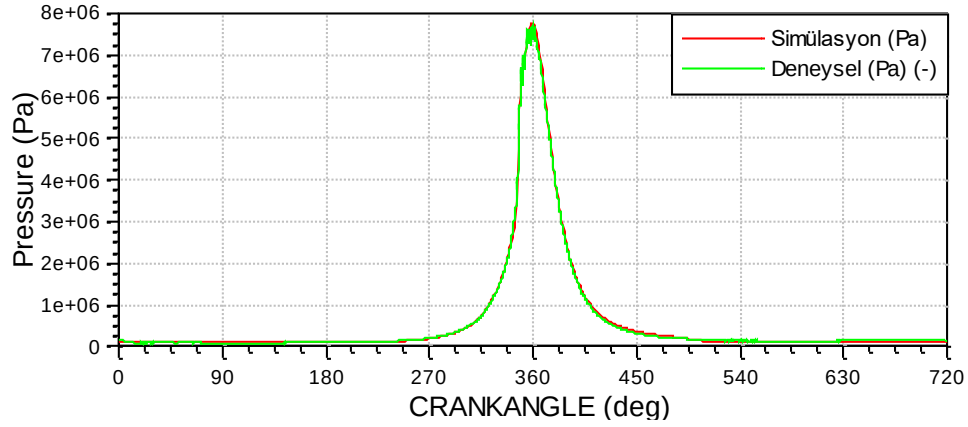
Şekil A.41 T49 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



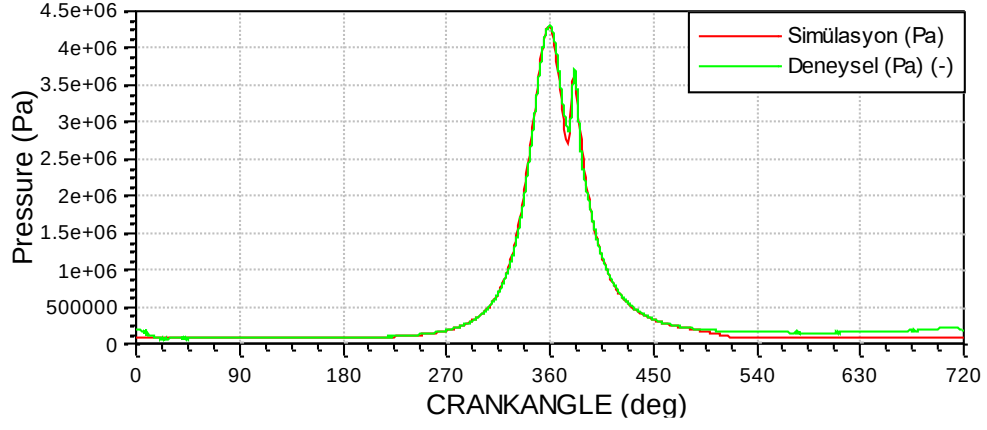
Şekil A.42 T51 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



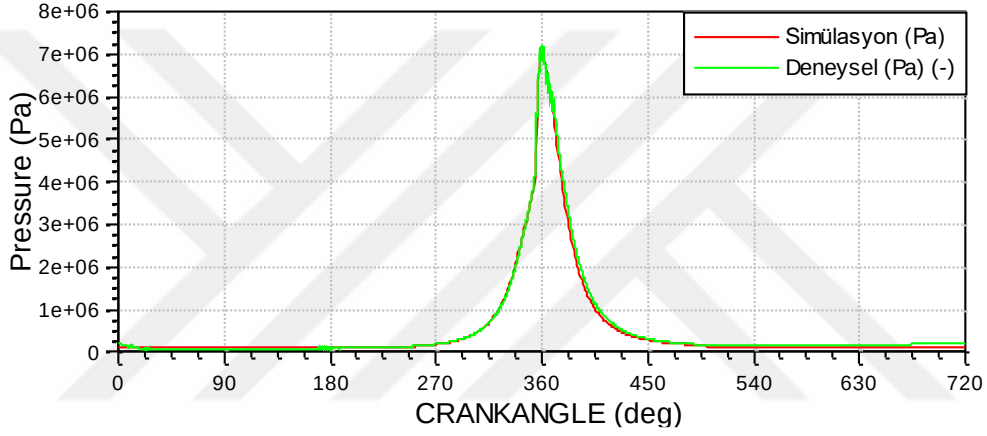
Şekil A.43 T52 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



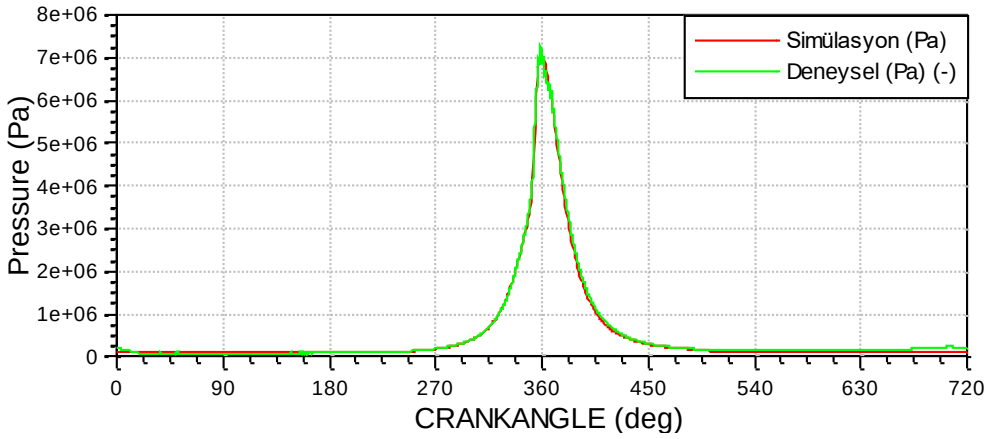
Şekil A.44 T53 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



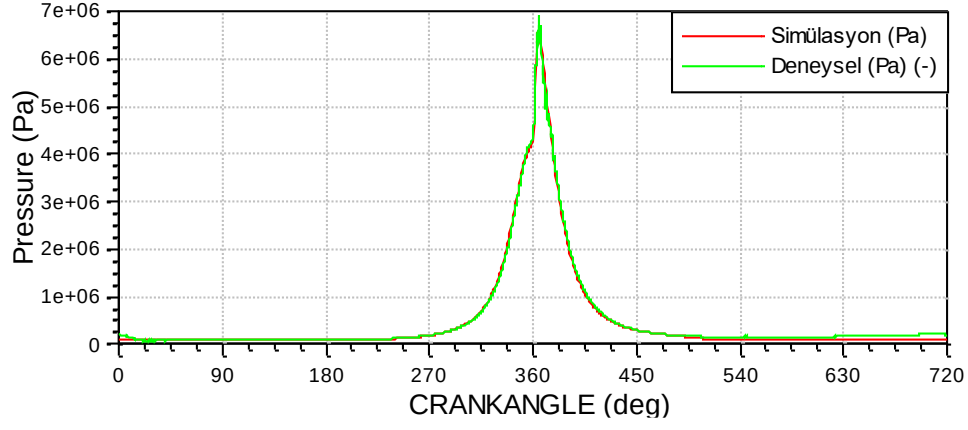
Şekil A.45 T54 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



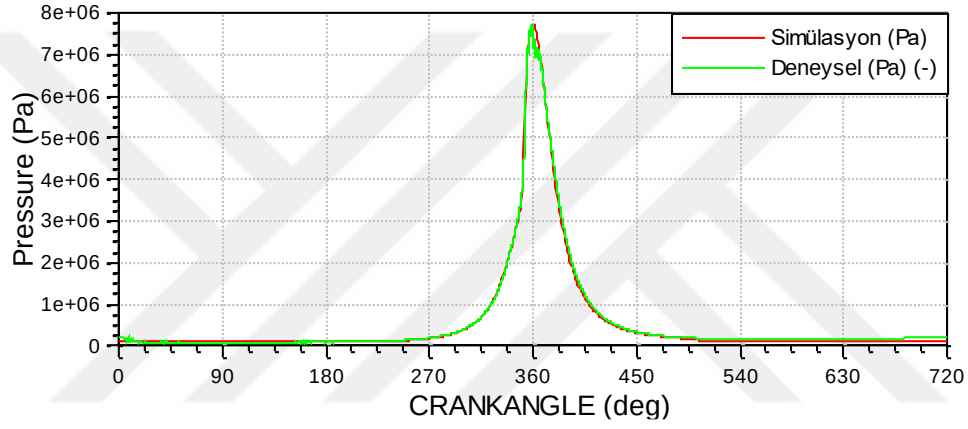
Şekil A.46 T56 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



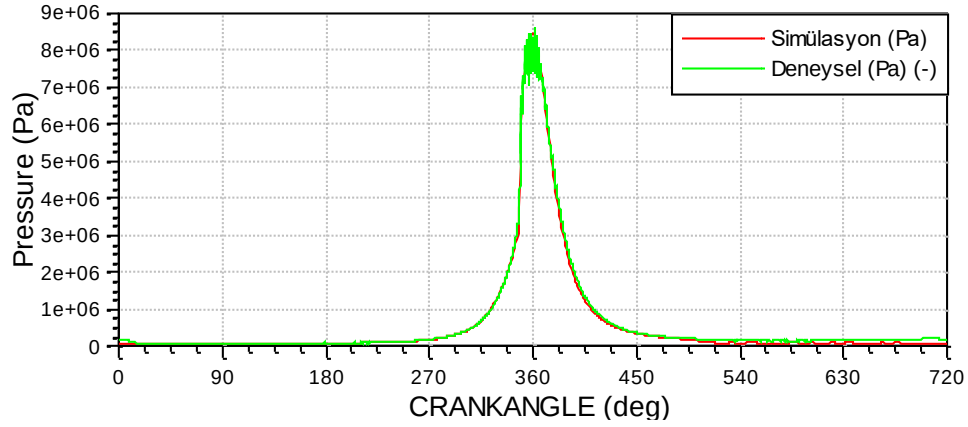
Şekil A.47 T57 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



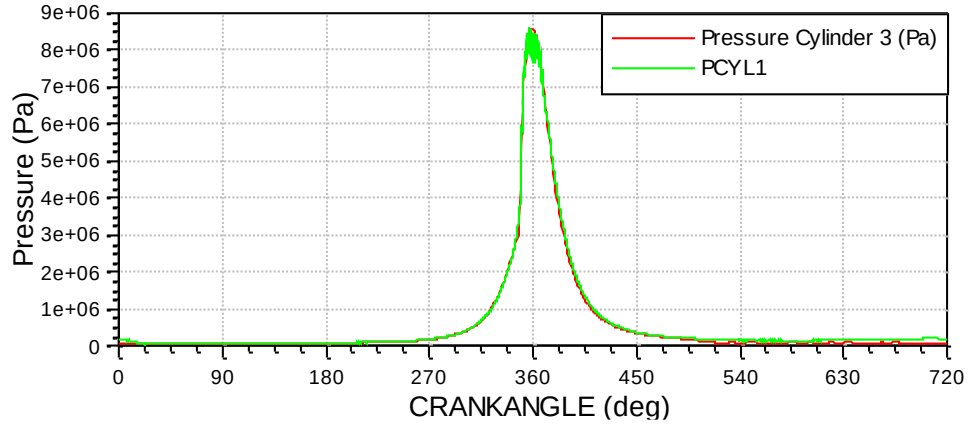
Şekil A.48 T55 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



Şekil A.49 T58 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



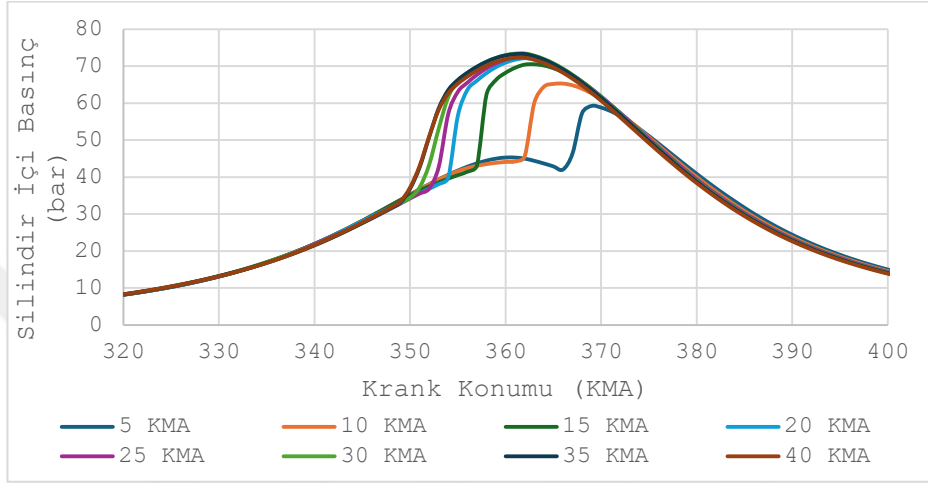
Şekil A.50 T60 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması



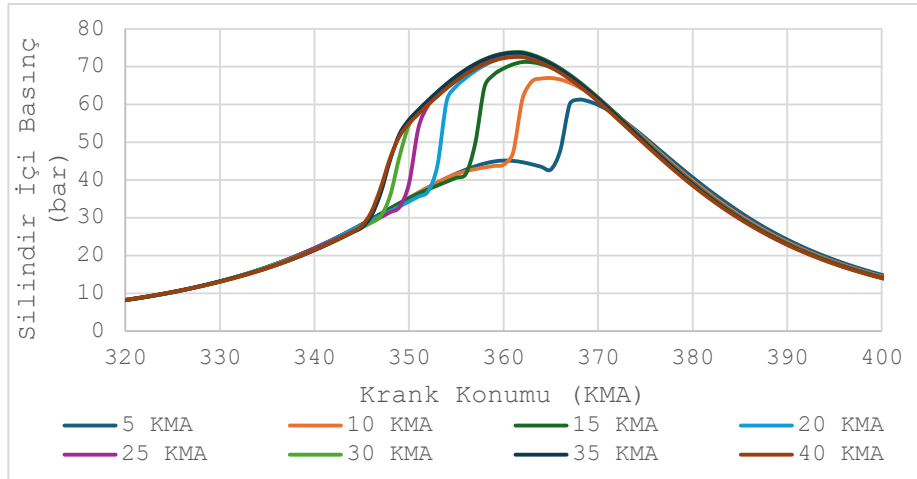
Şekil A.51 T59 noktasında deneysel veri ile simülasyon verisi basınç ve krank konumu grafiği karşılaştırması

B

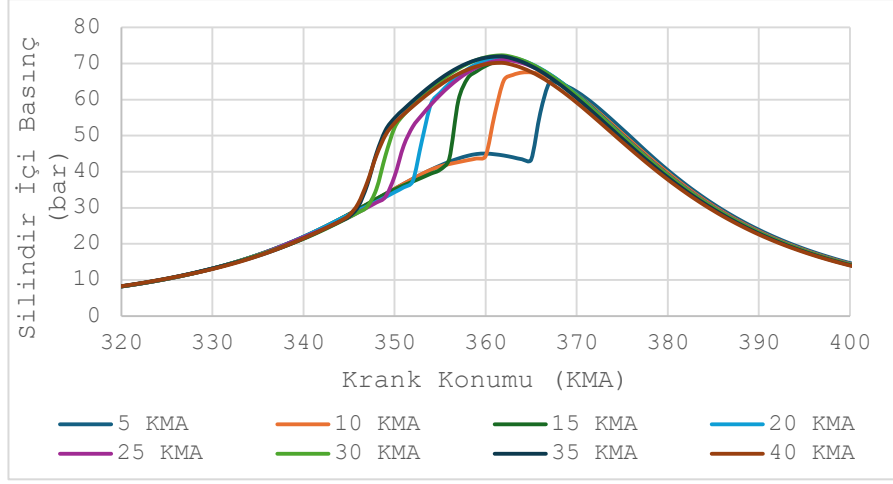
TEK FAZDA SİMÜLASYON SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN P- α DİYAGRAMLARI



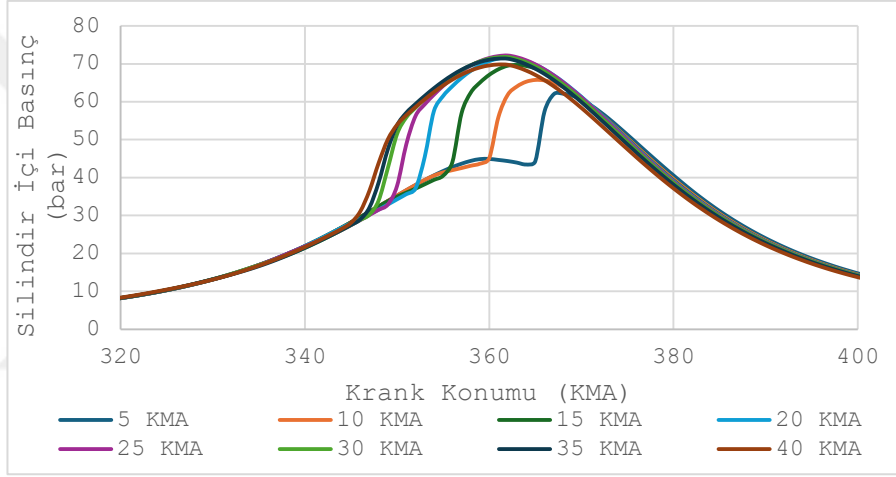
Şekil B.1 1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



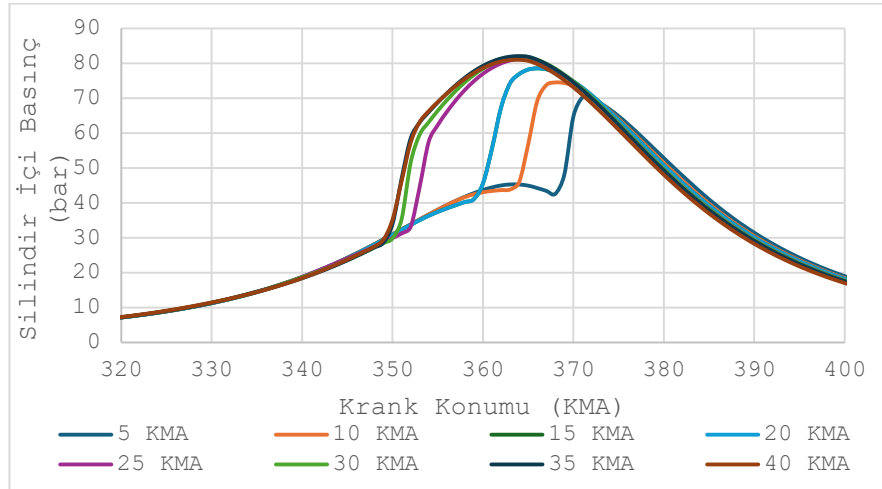
Şekil B.2 1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



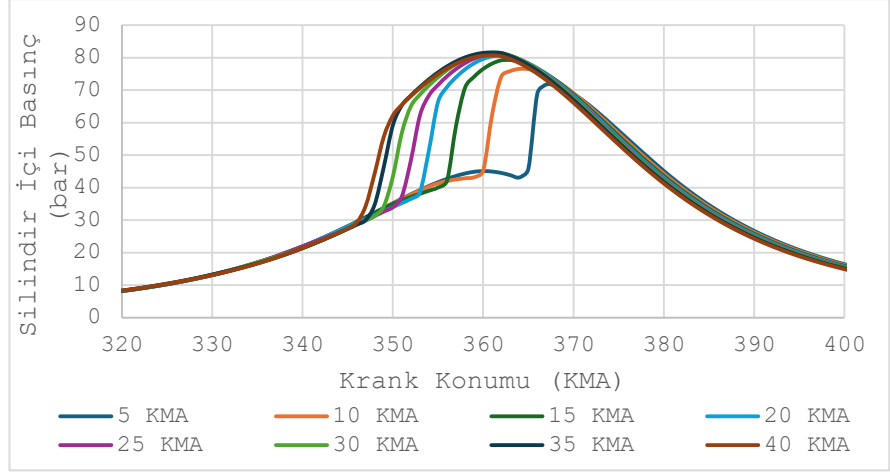
Şekil B.3 1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



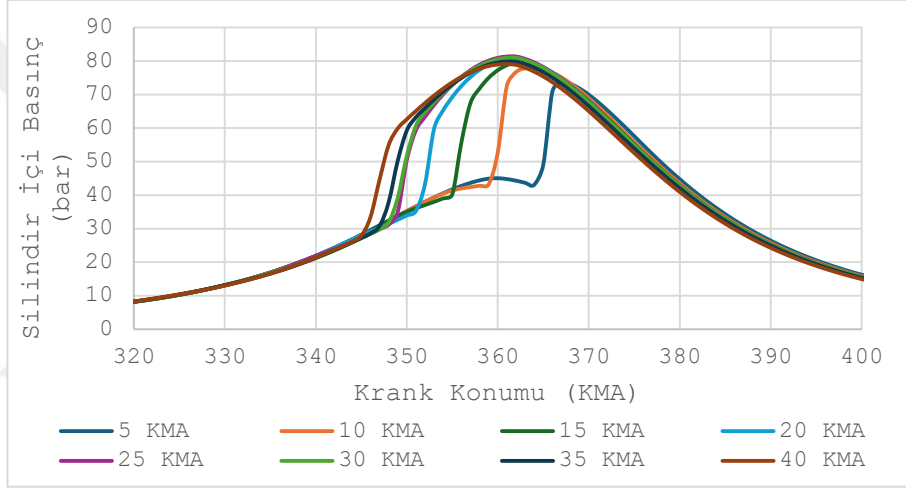
Şekil B.4 1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



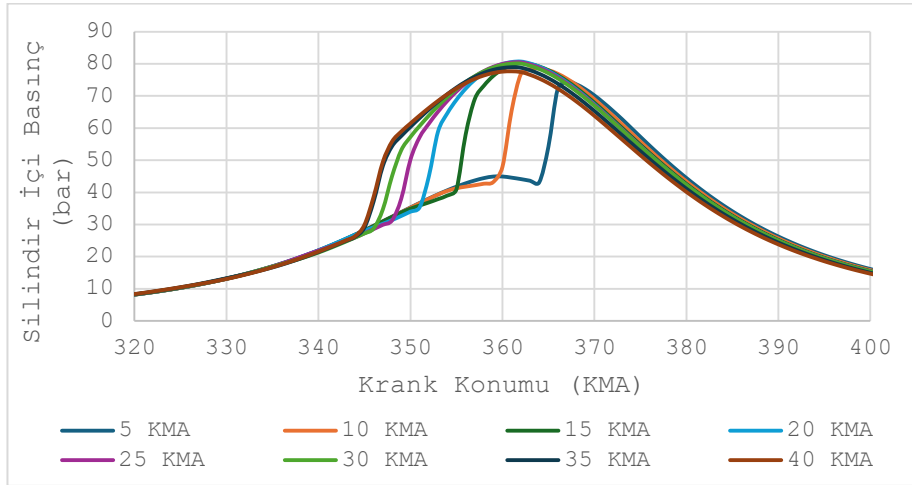
Şekil B.5 1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



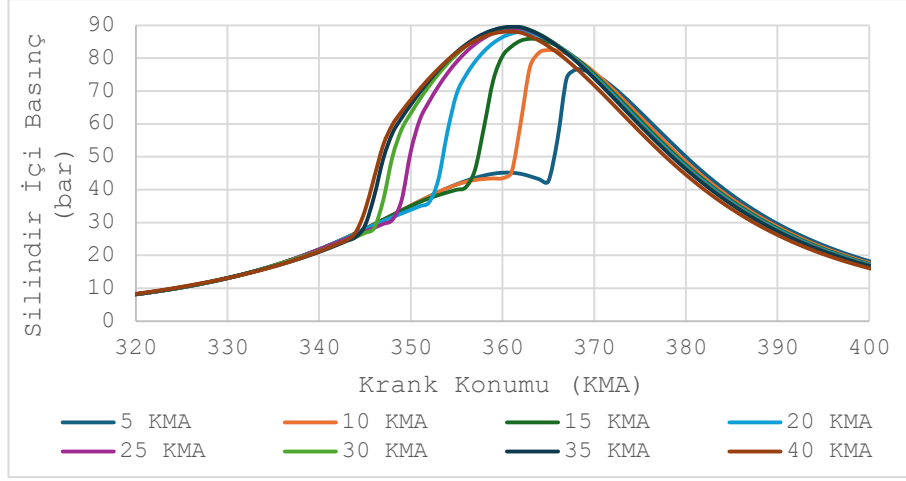
Şekil B.6 1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



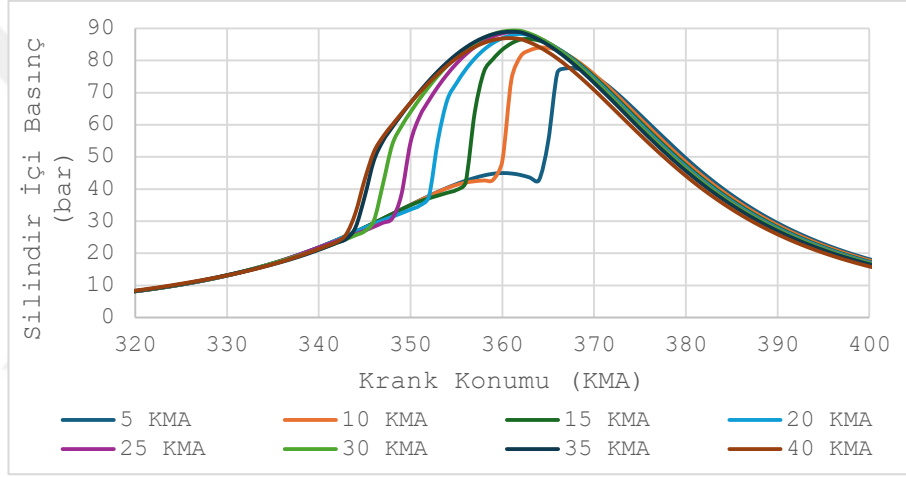
Şekil B.7 1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



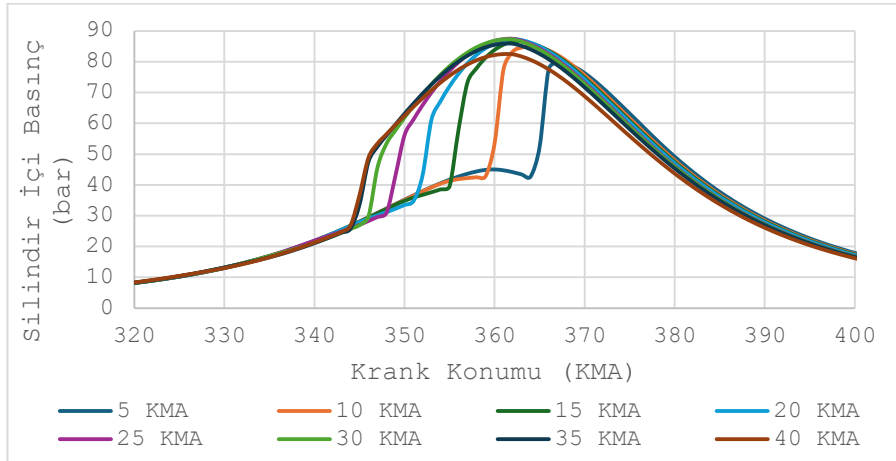
Şekil B.8 1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



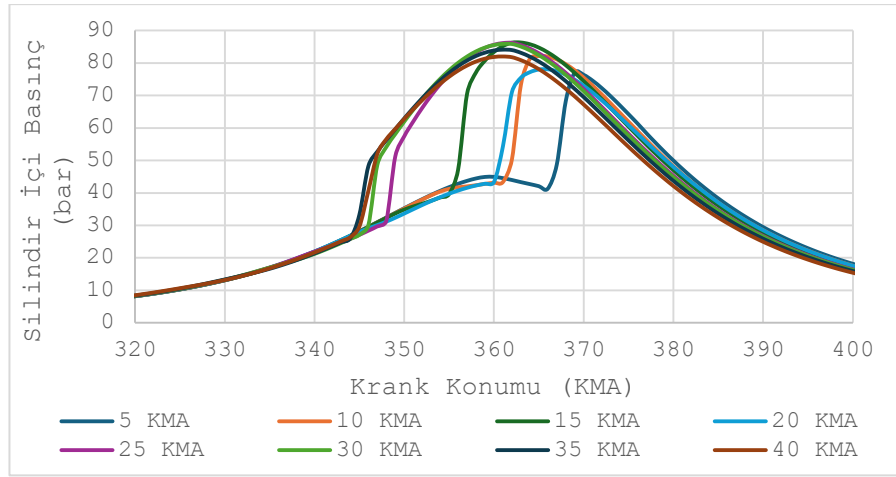
Şekil B.9 1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



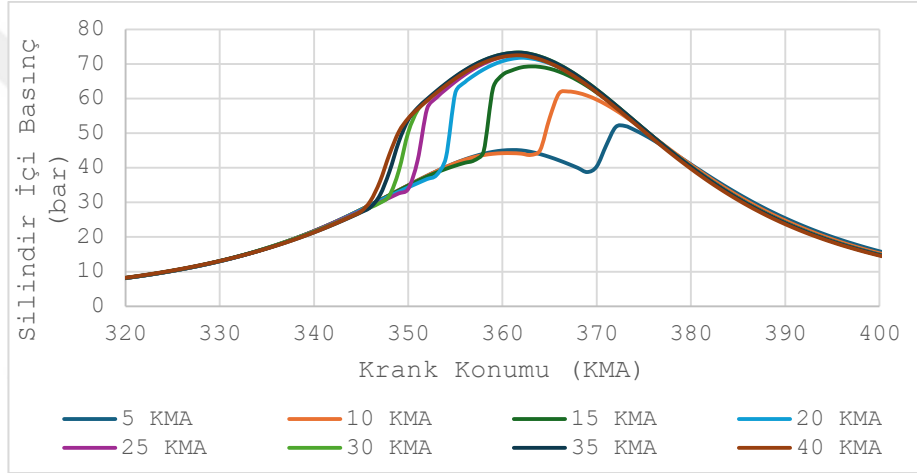
Şekil B.10 1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



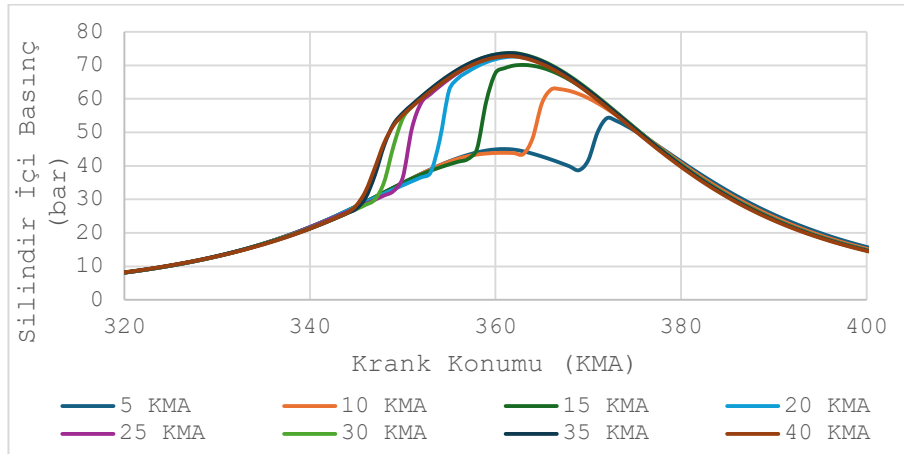
Şekil B.11 1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



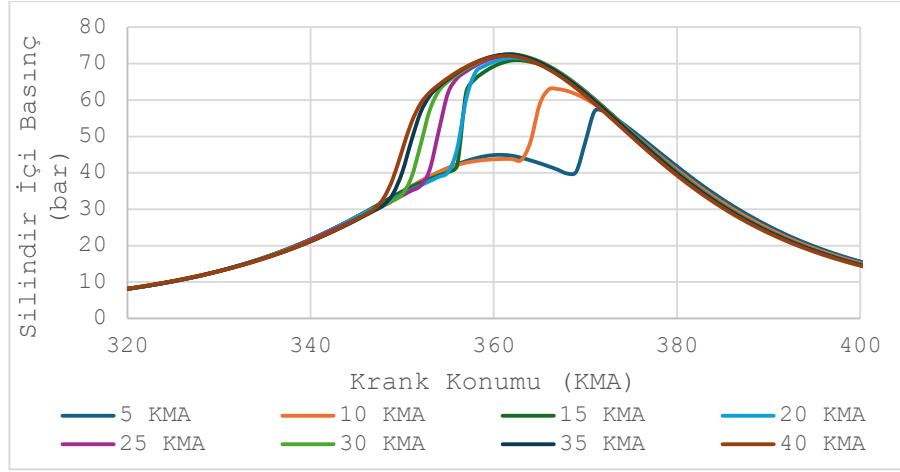
Şekil B.12 1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



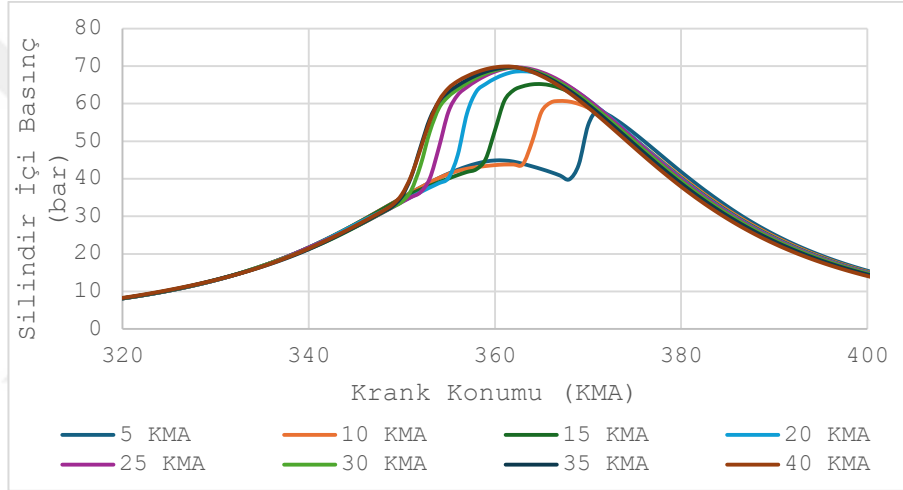
Şekil B.13 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



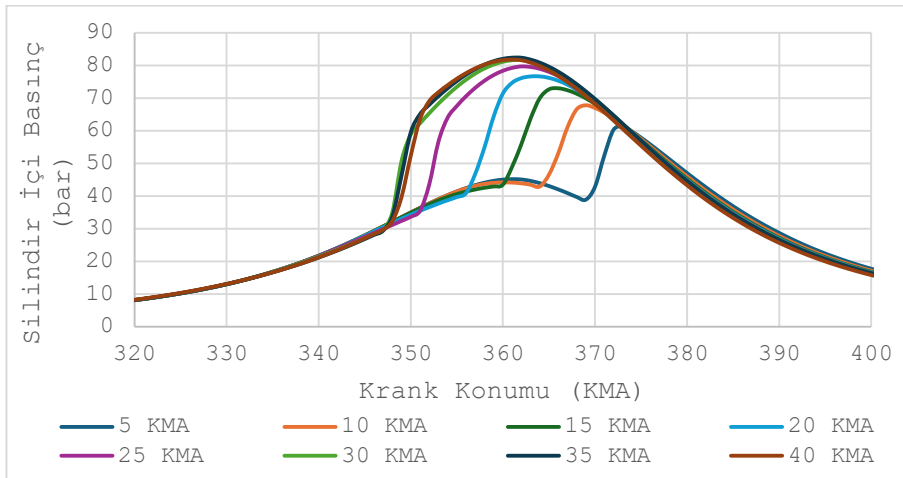
Şekil B.14 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



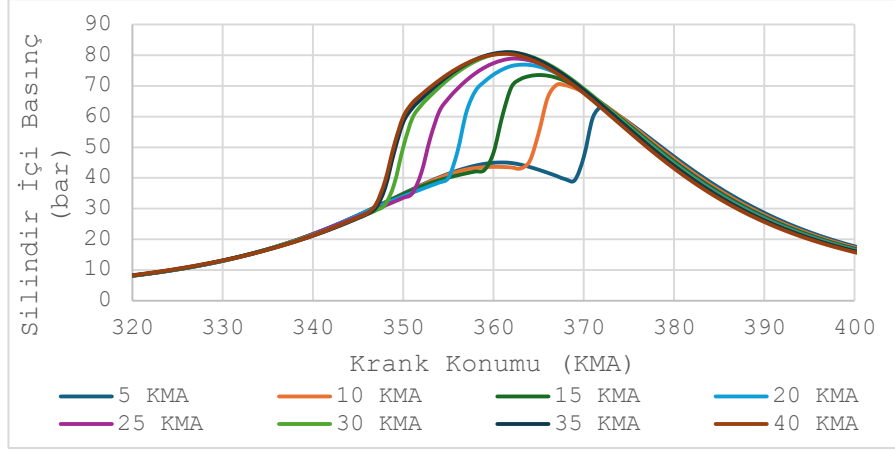
Şekil B.15 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



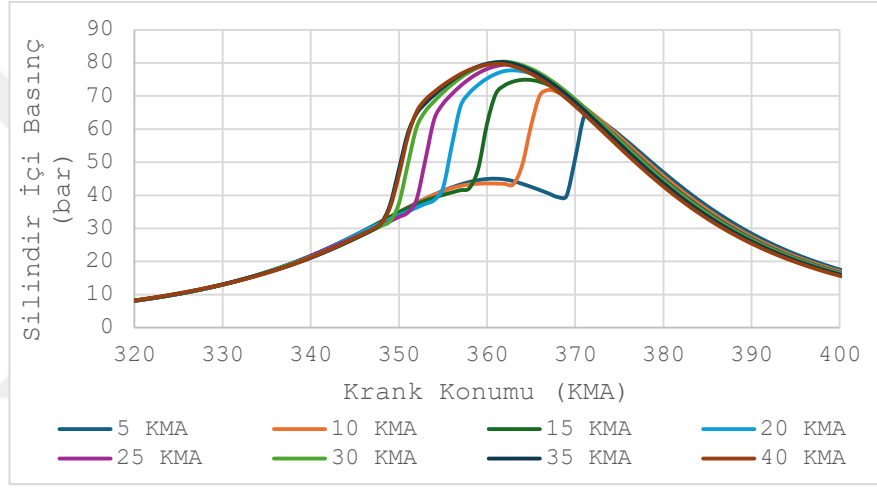
Şekil B.16 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



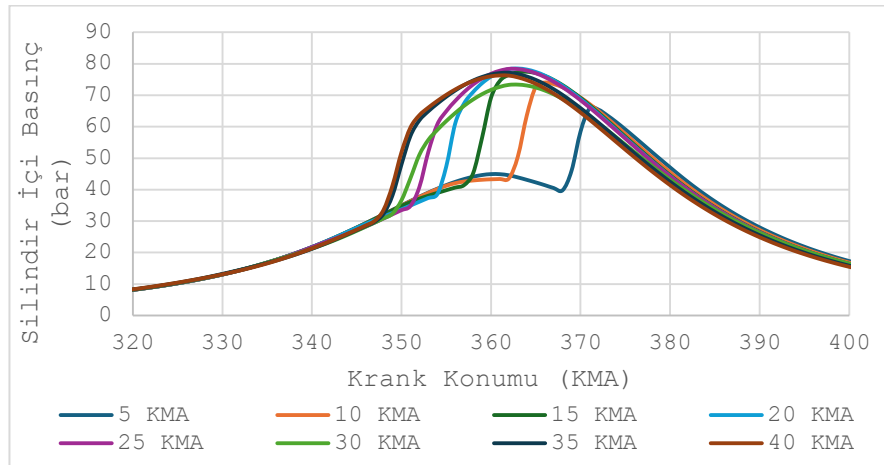
Şekil B.17 1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



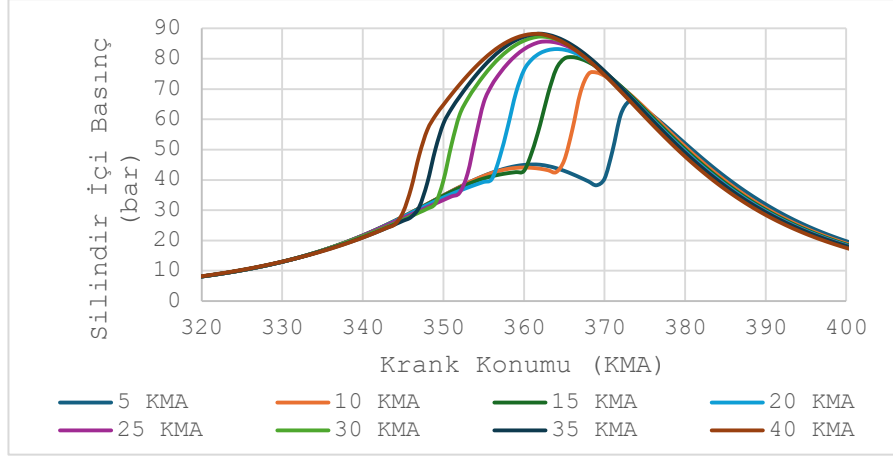
Şekil B.18 1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



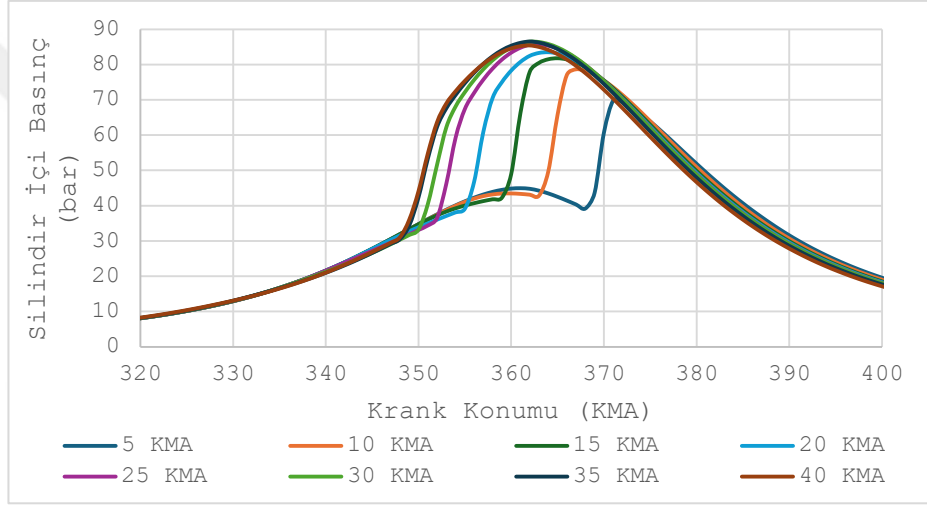
Şekil B.19 1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



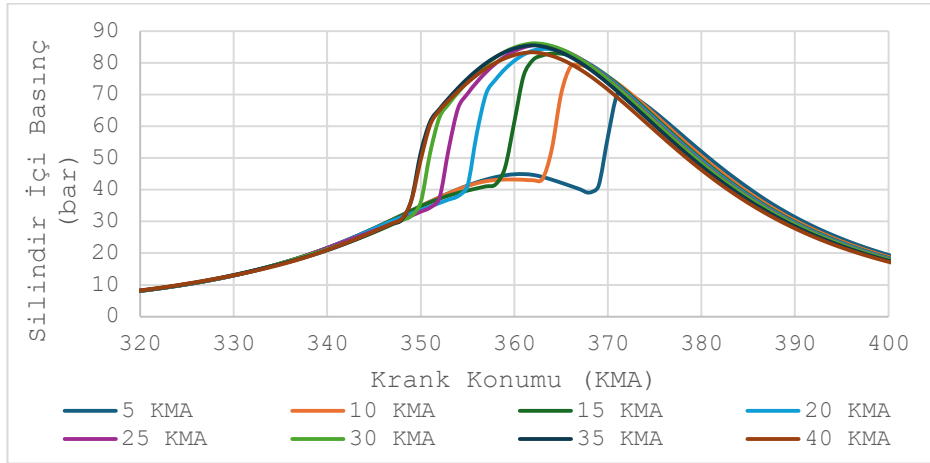
Şekil B.20 1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



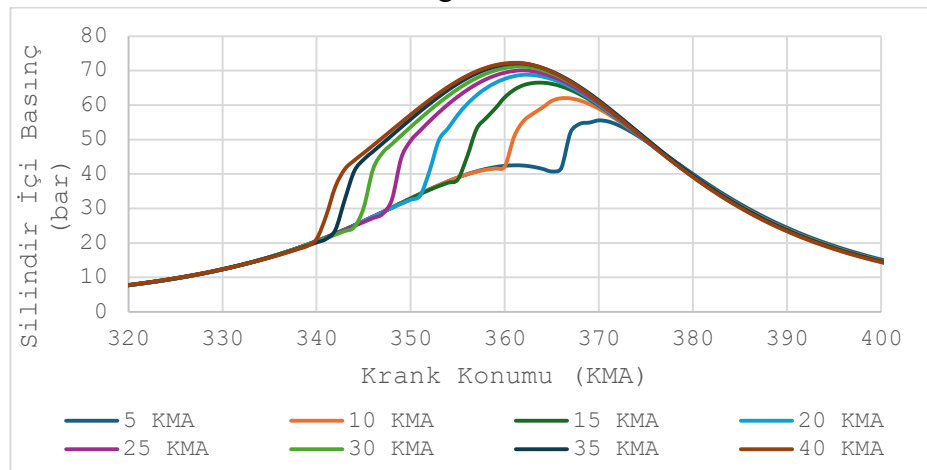
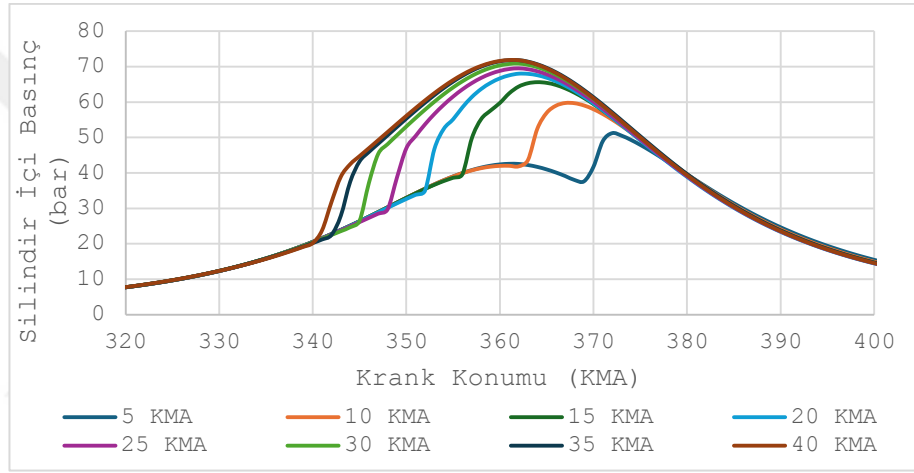
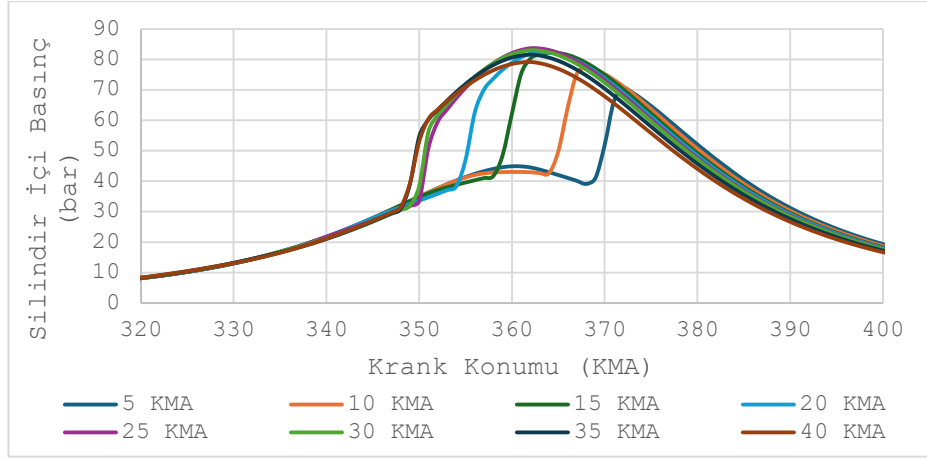
Şekil B.21 1500 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri

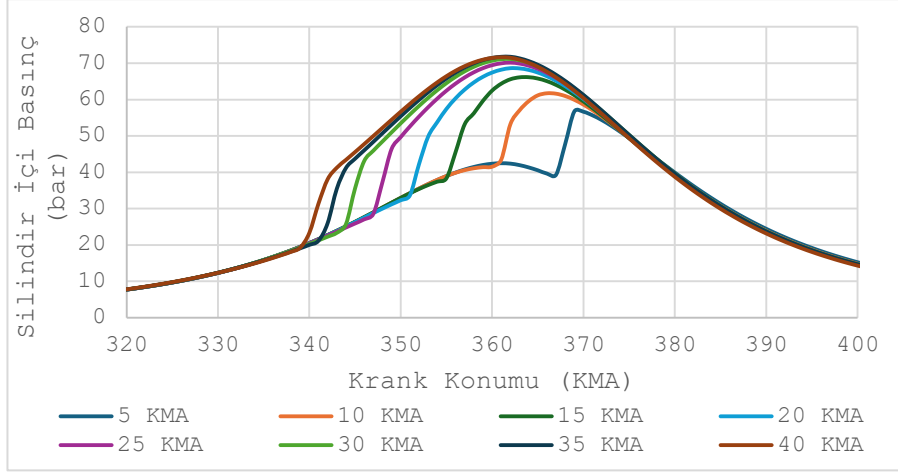


Şekil B.22 1500 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri

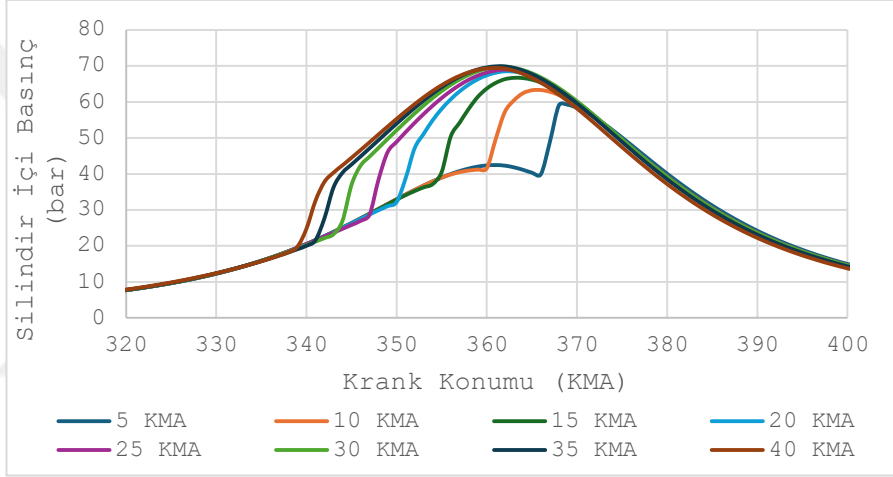


Şekil B.23 1500 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri

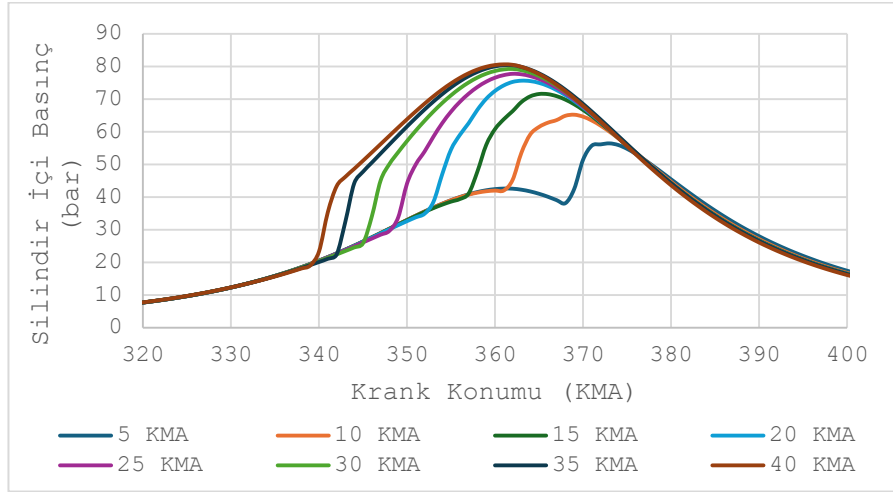




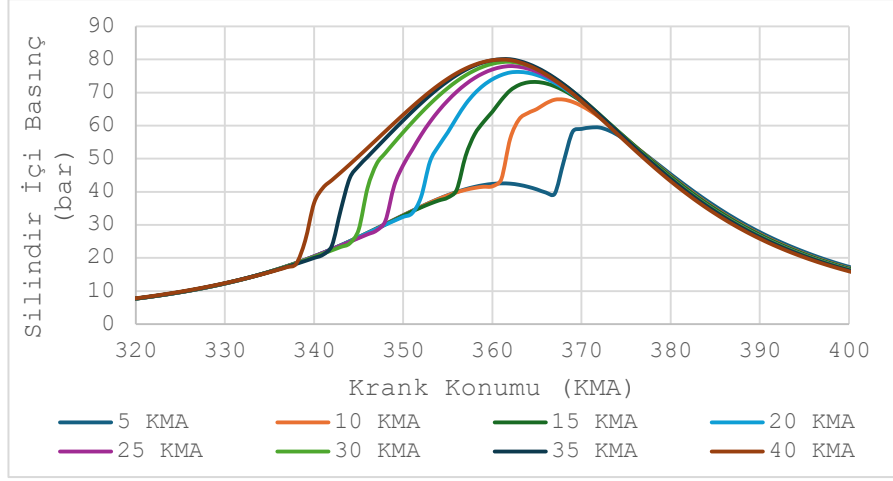
Şekil B.27 2000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



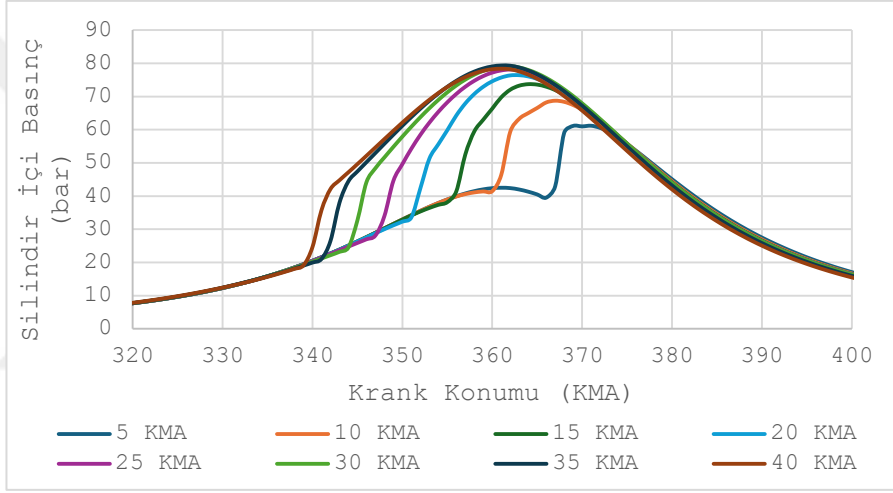
Şekil B.28 2000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



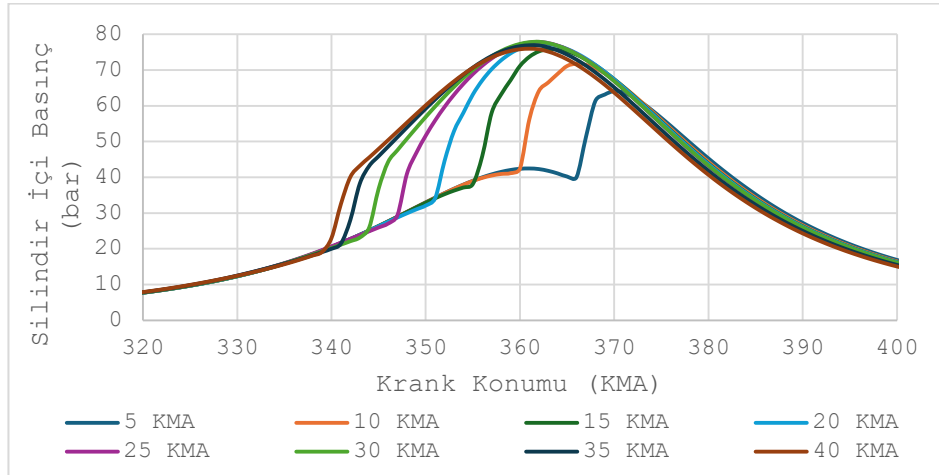
Şekil B.29 2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



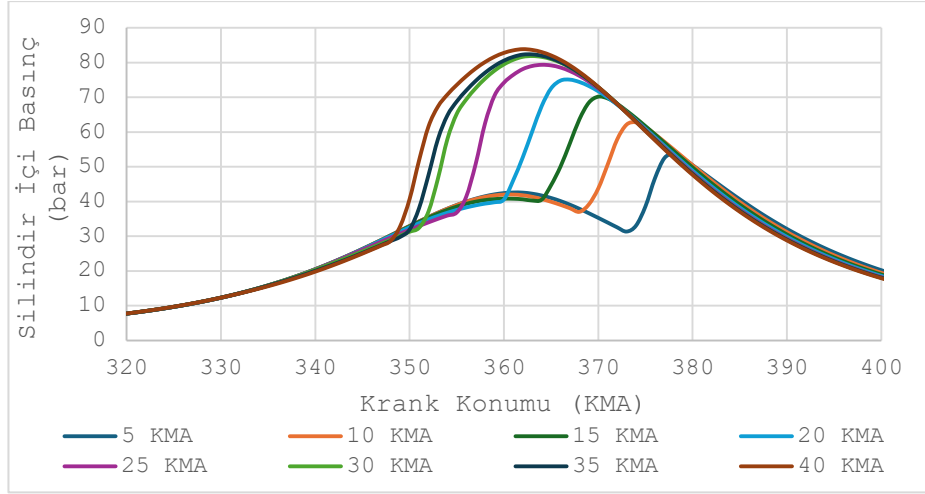
Şekil B.30 2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



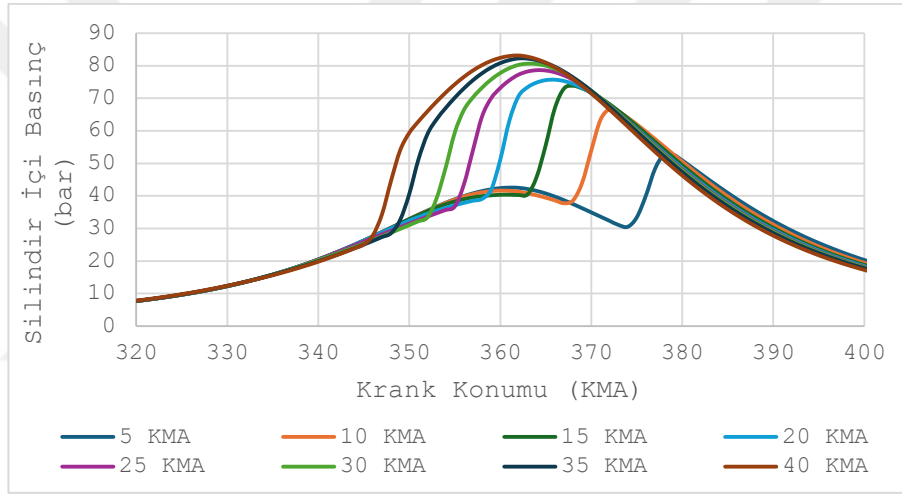
Şekil B.31 2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



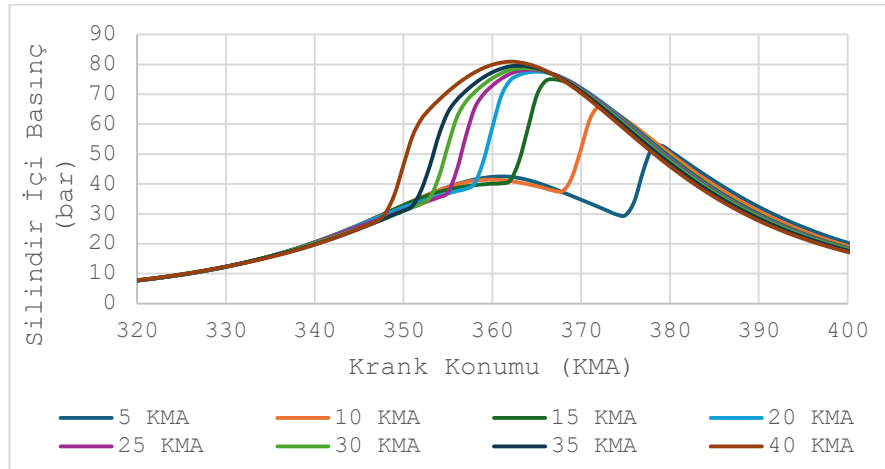
Şekil B.32 2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



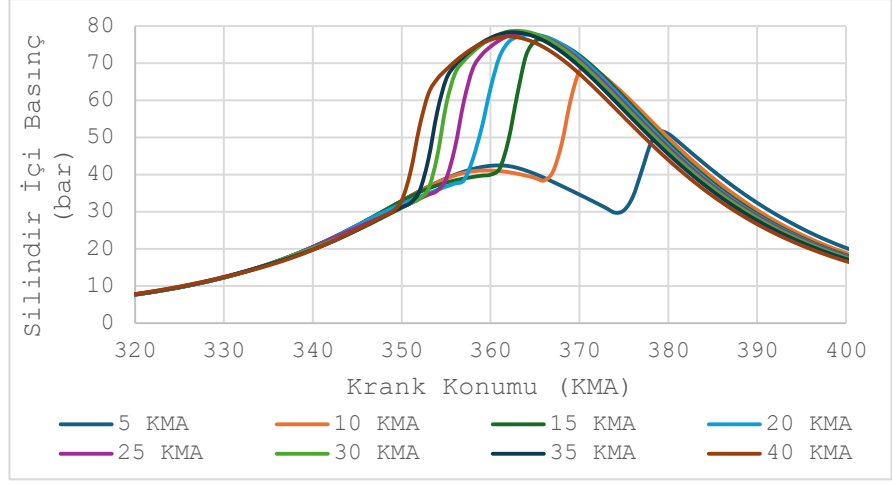
Şekil B.33 2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



Şekil B.34 2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



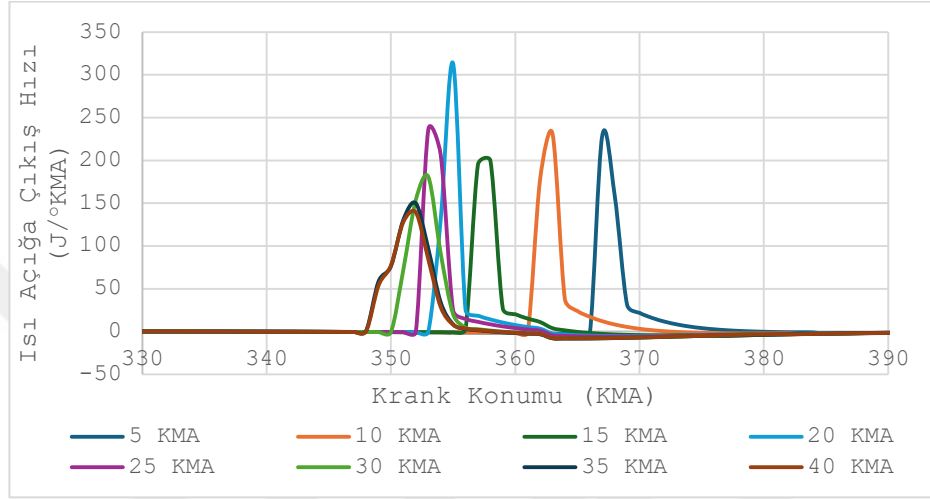
Şekil B.35 2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri



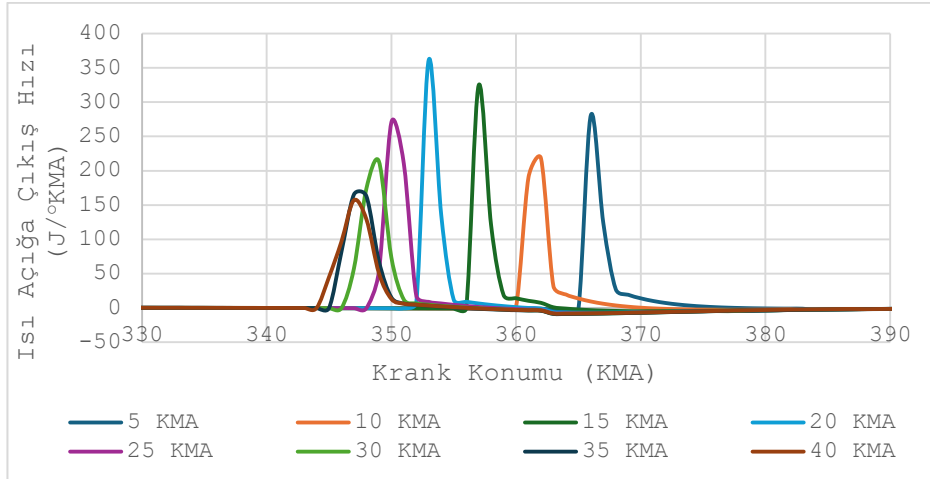
Şekil B.36 2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan silindir içi basınç-krank konumu eğrileri

C

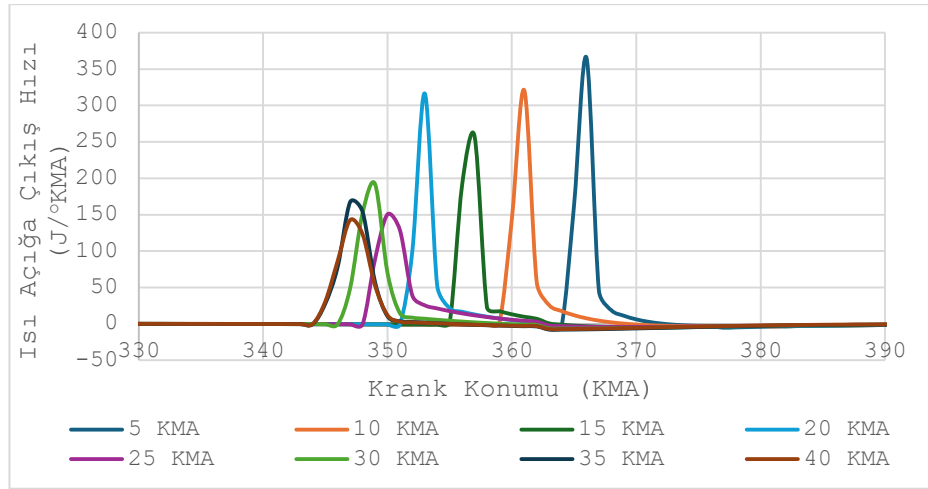
TEK FAZDA SİMÜLASYON ÇALIŞMASINDA ELDE EDİLEN ISI AÇIĞA ÇIKIŞ HIZI DİYAGRAMLARI



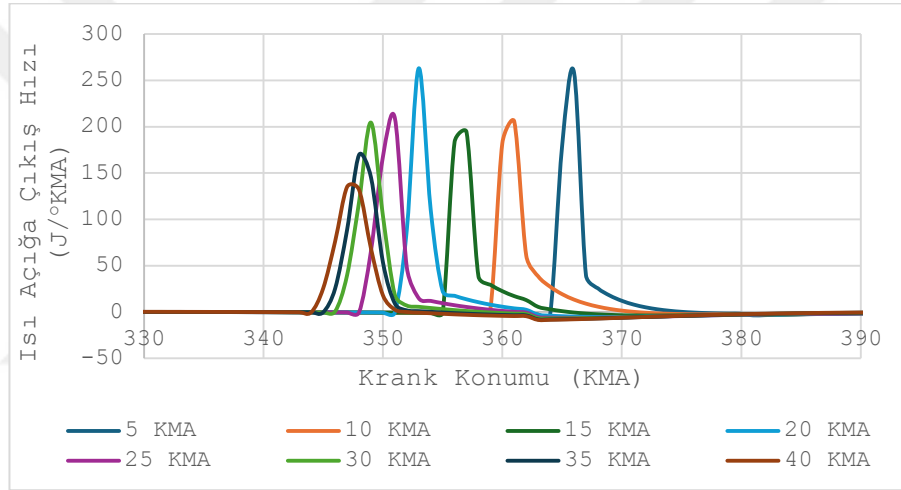
Şekil C.1 1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



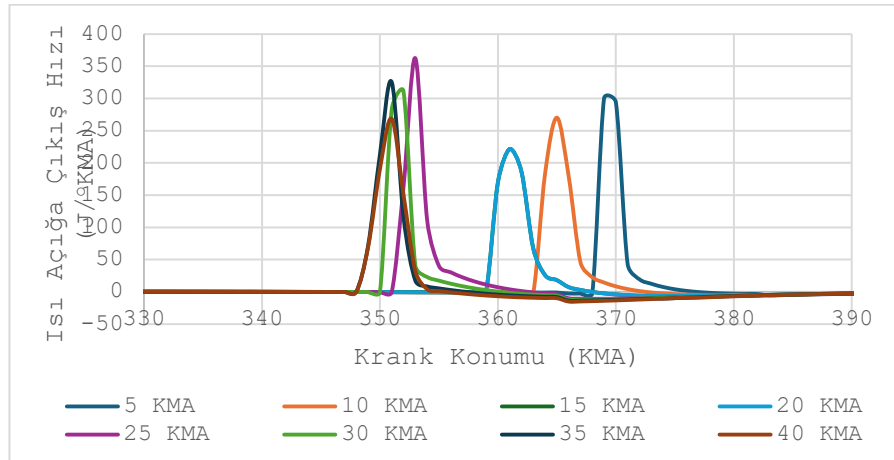
Şekil C.2 1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



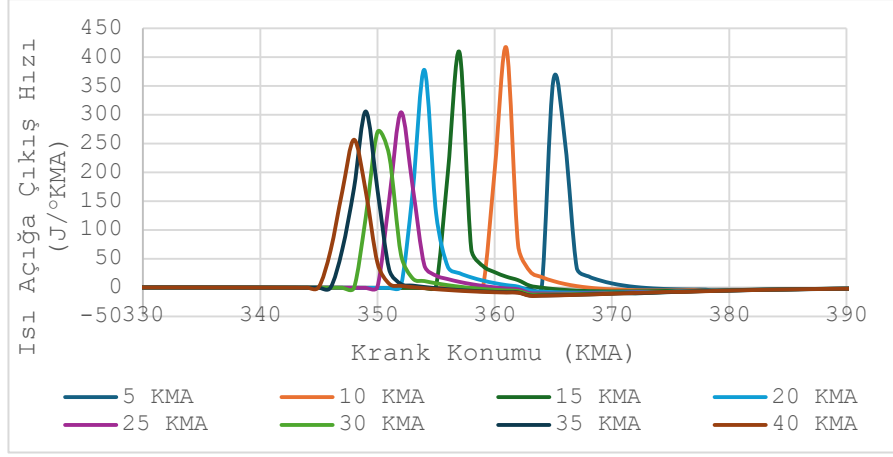
Şekil C.3 1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



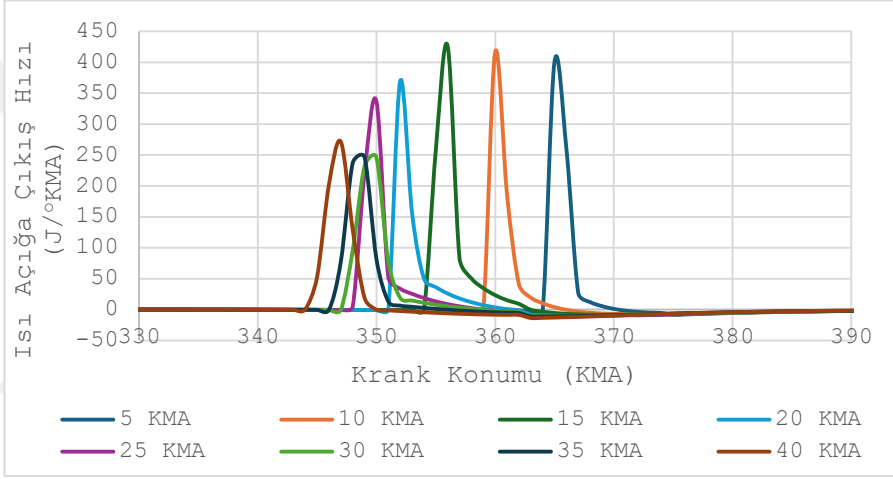
Şekil C.4 1000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



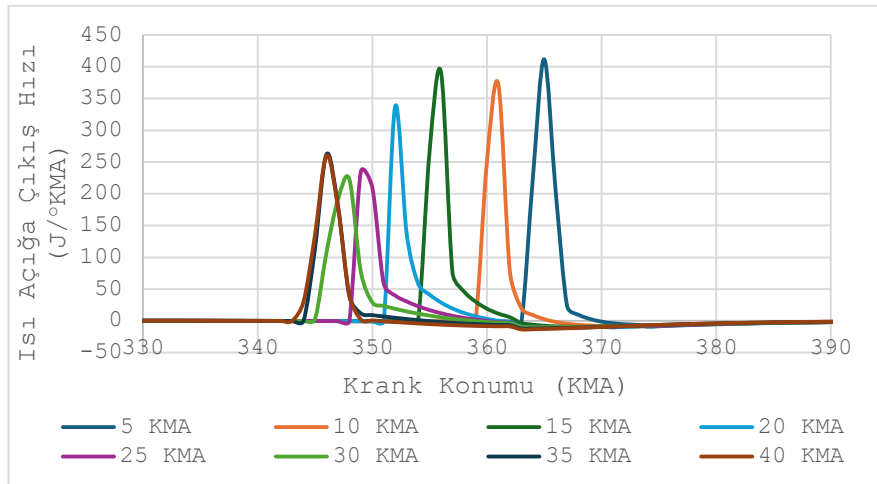
Şekil C.5 1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



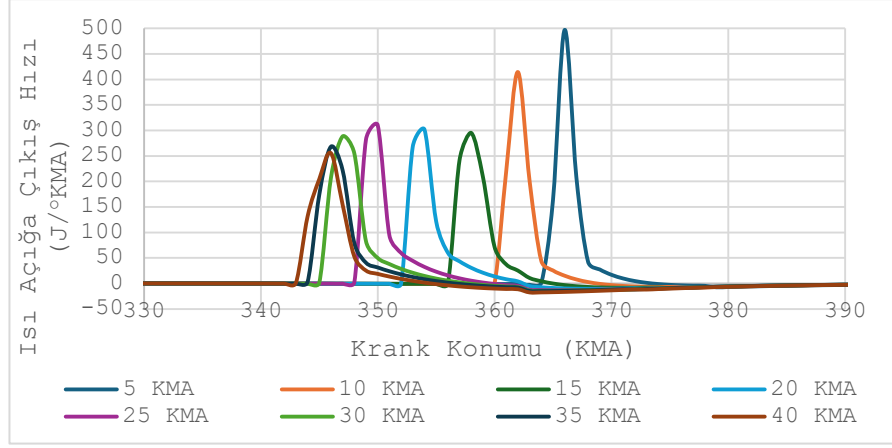
Şekil C.6 1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



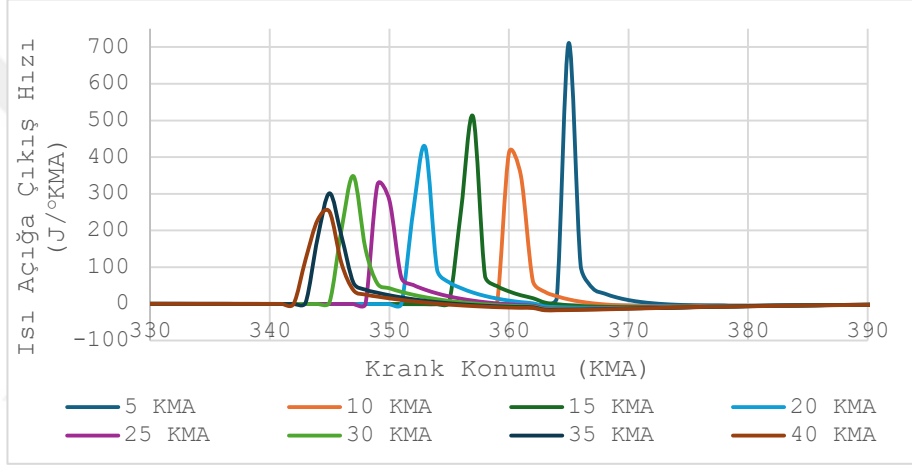
Şekil C.7 1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



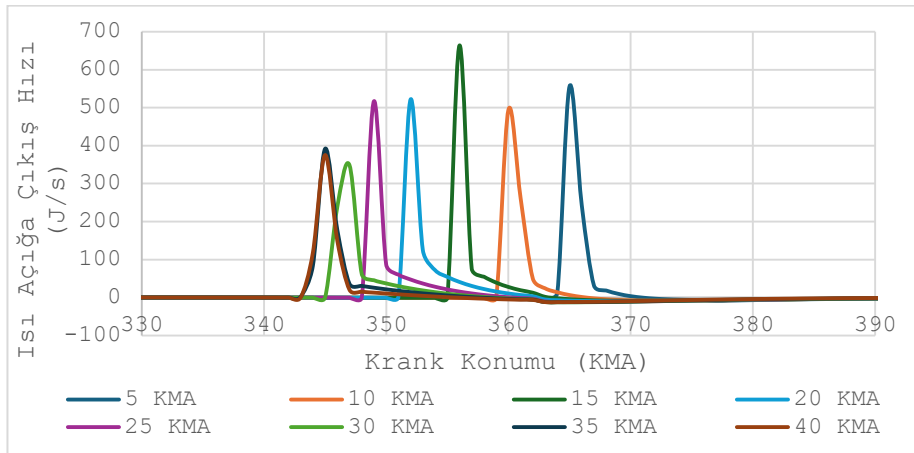
Şekil C.8 1000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



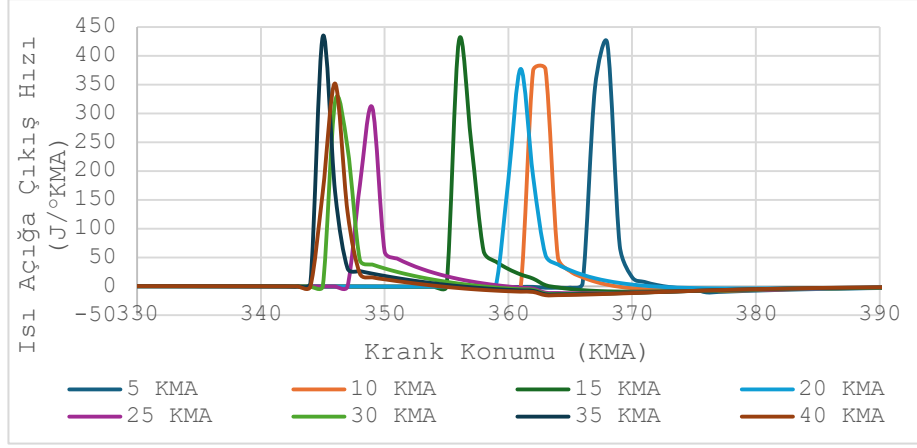
Şekil C.9 1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



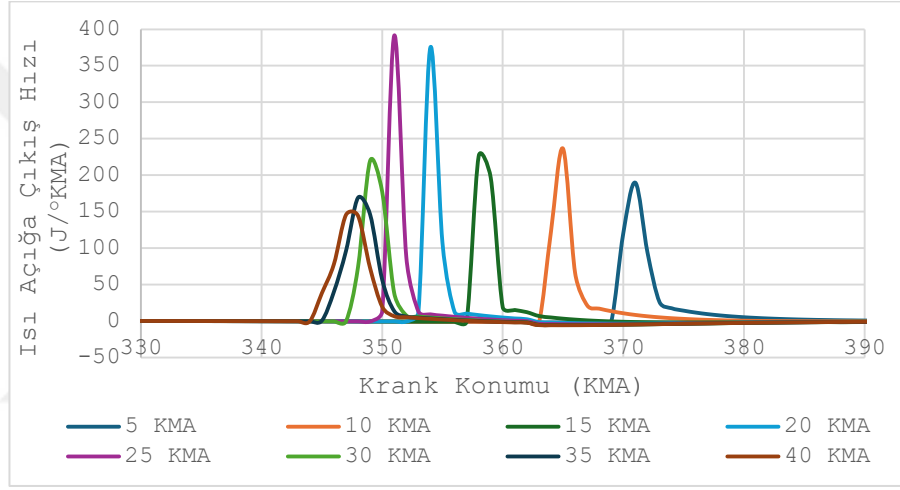
Şekil C.10 1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



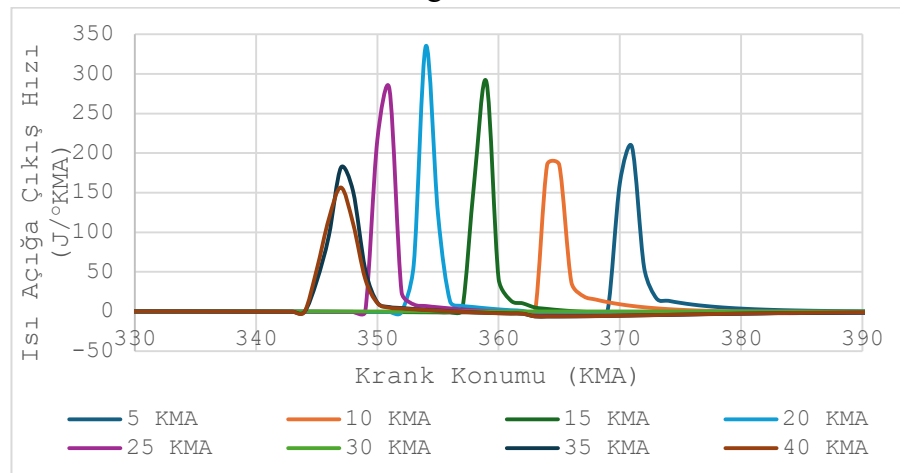
Şekil C.11 1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



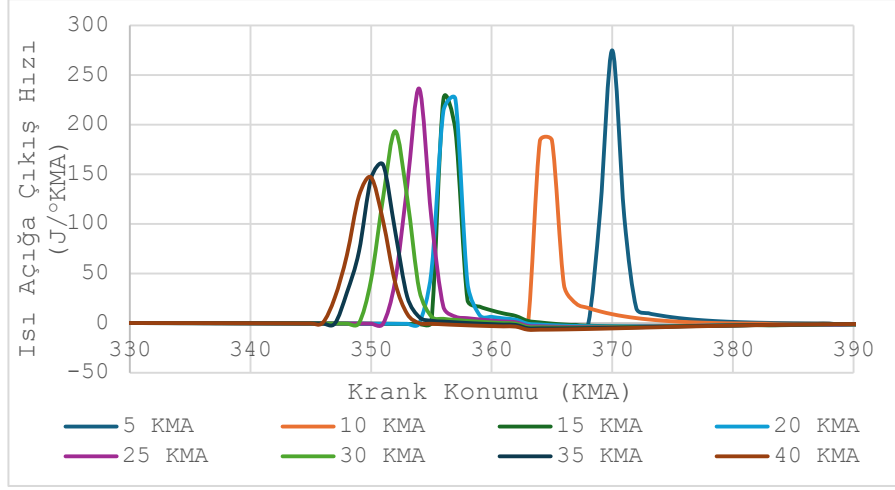
Şekil C.12 1000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



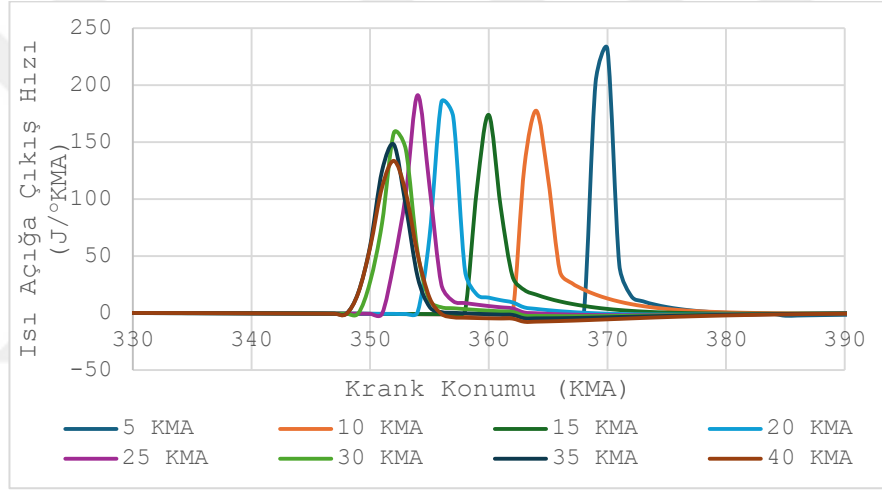
Şekil C.13 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



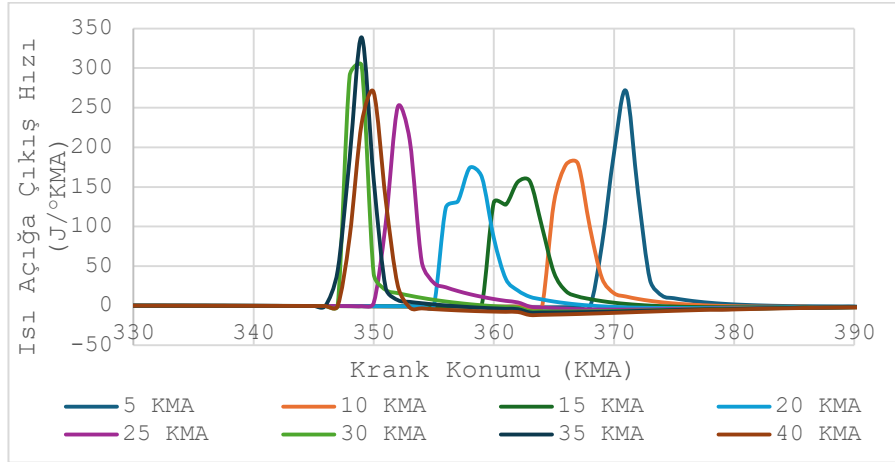
Şekil C.14 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



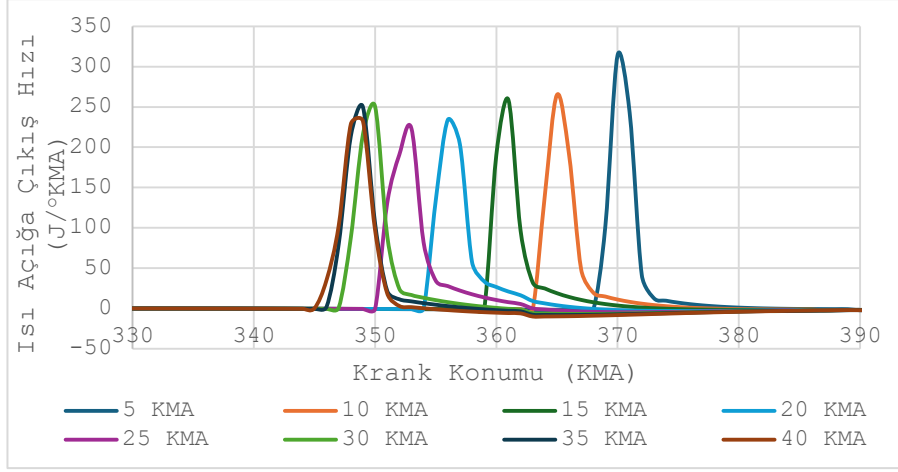
Şekil C.15 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



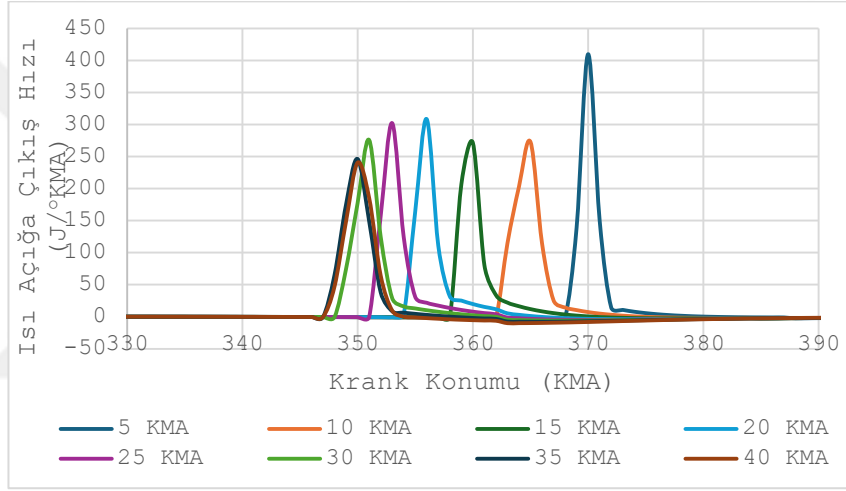
Şekil C.16 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



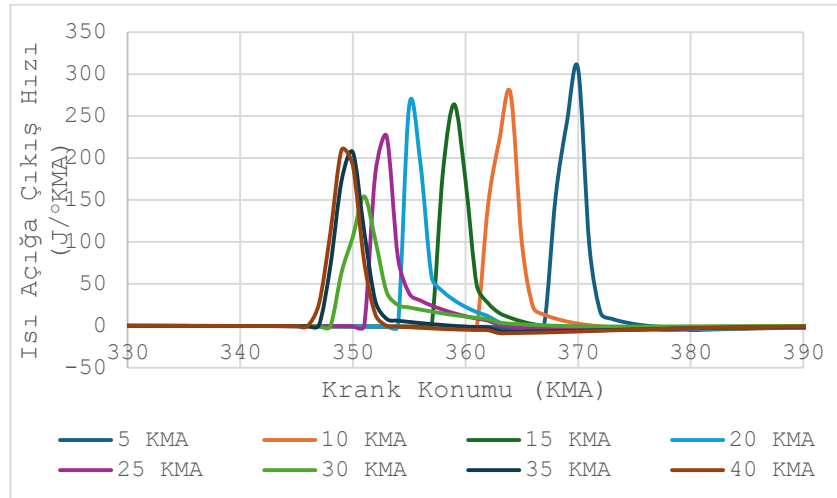
Şekil C.17 1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



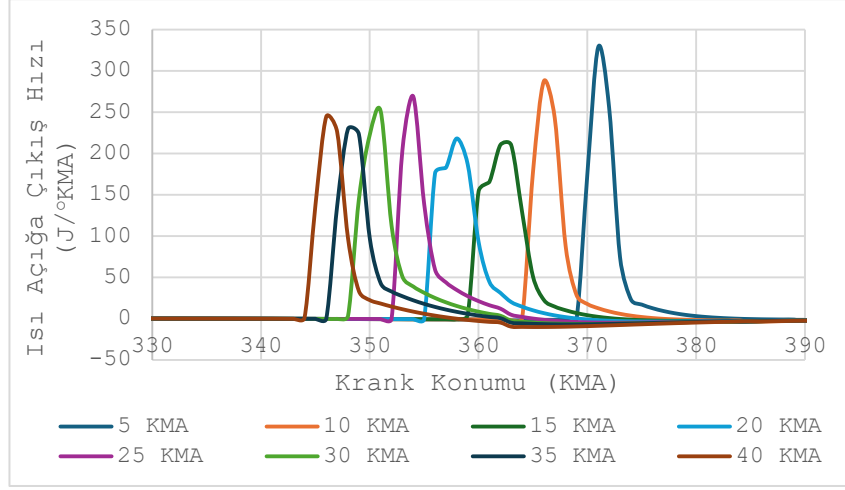
Şekil C.18 1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



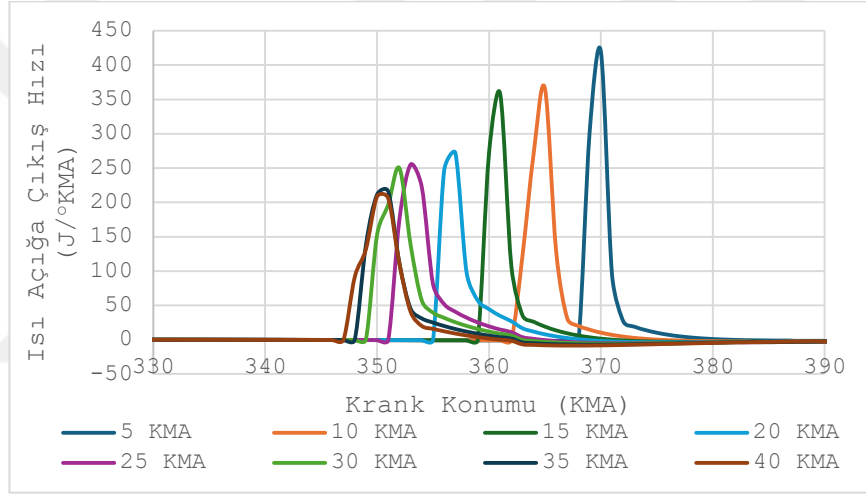
Şekil C.19 1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



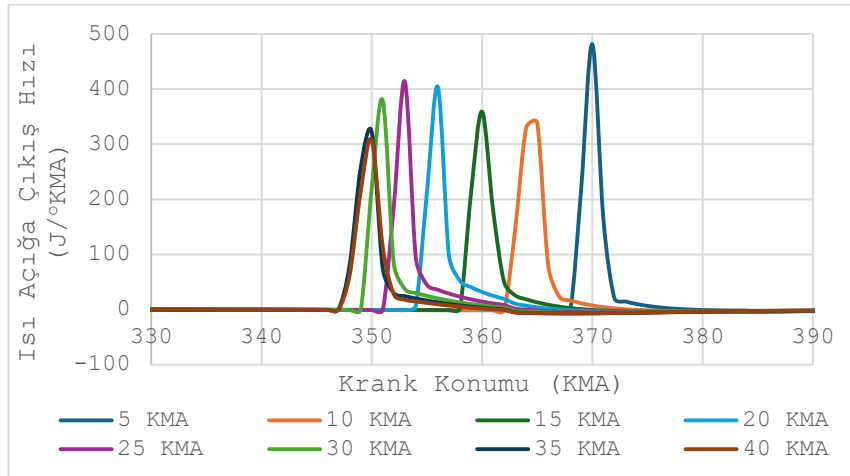
Şekil C.20 1500 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



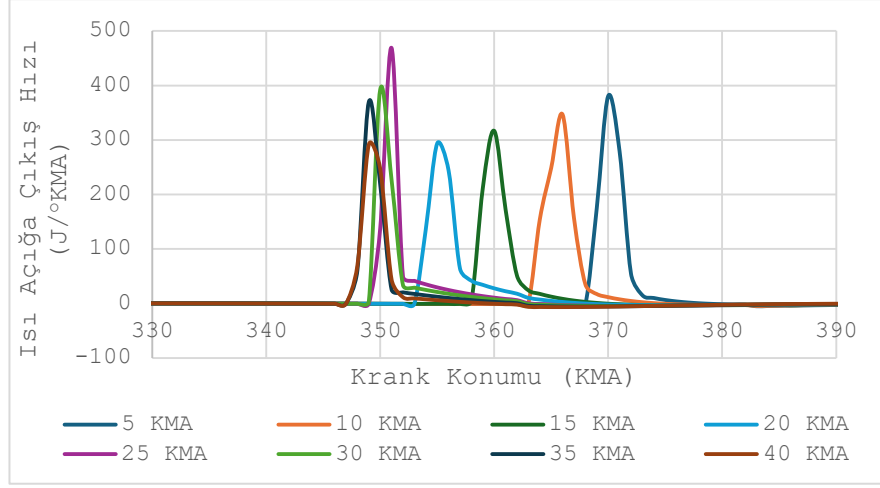
Şekil C.21 1500 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



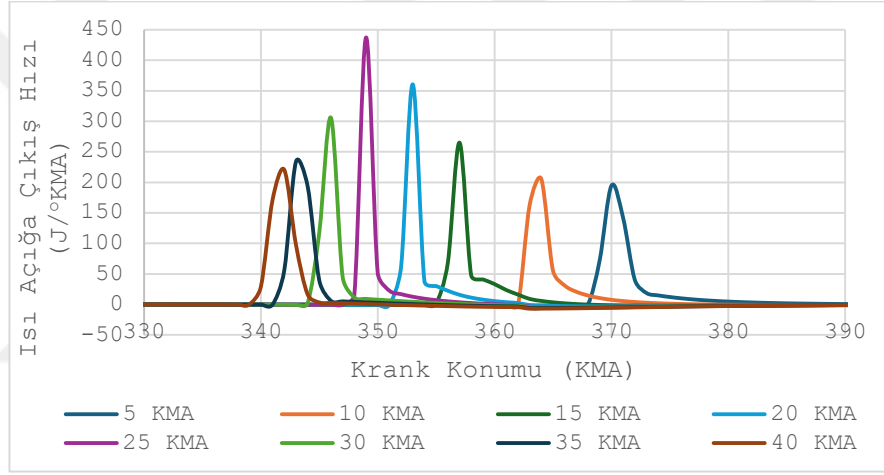
Şekil C.22 1500 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



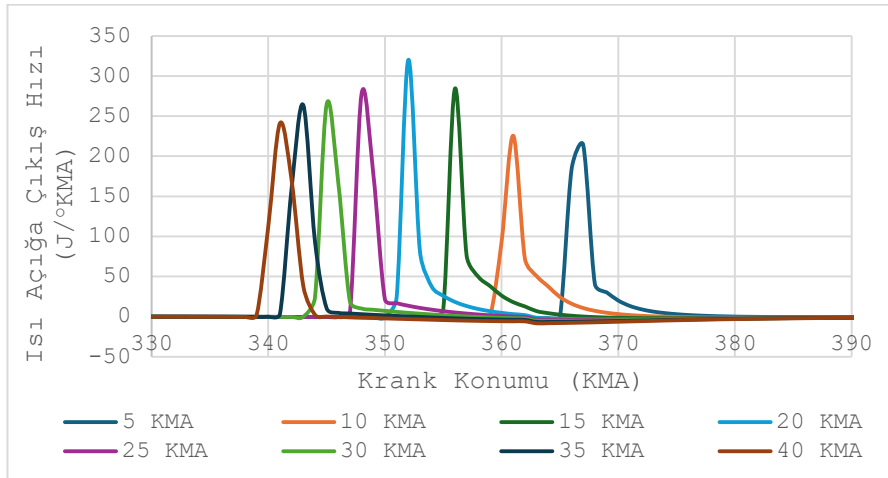
Şekil C.23 1500 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



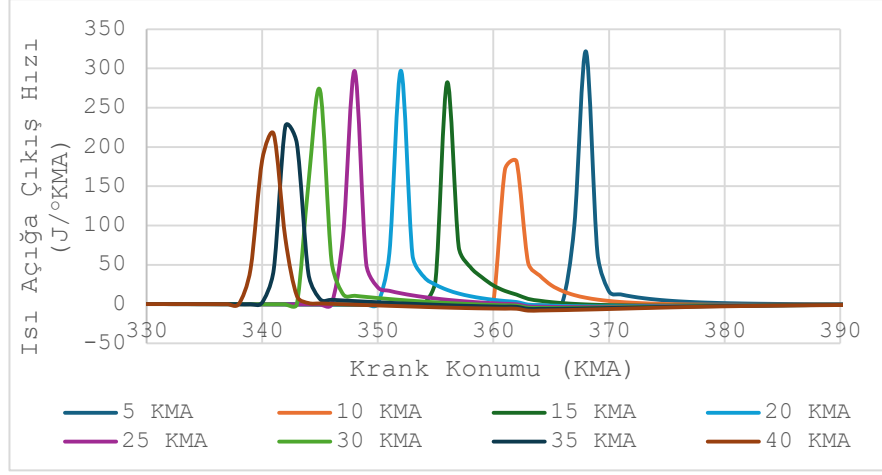
Şekil C.24 1500 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



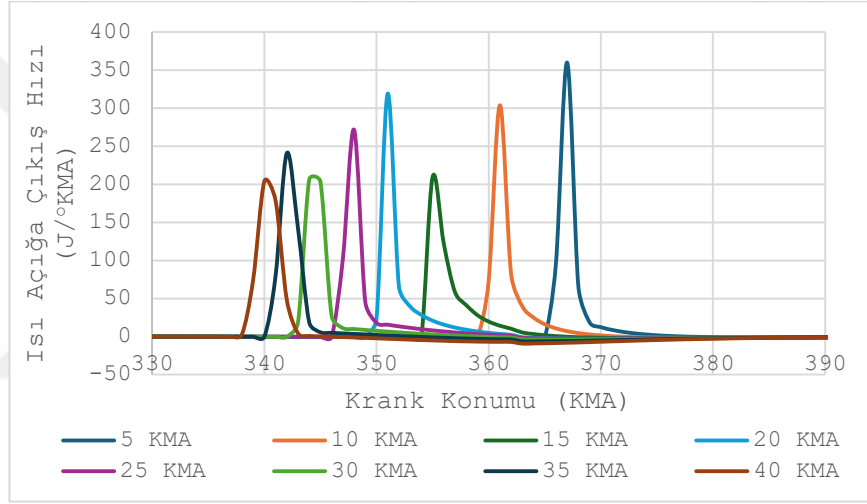
Şekil C.25 2000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



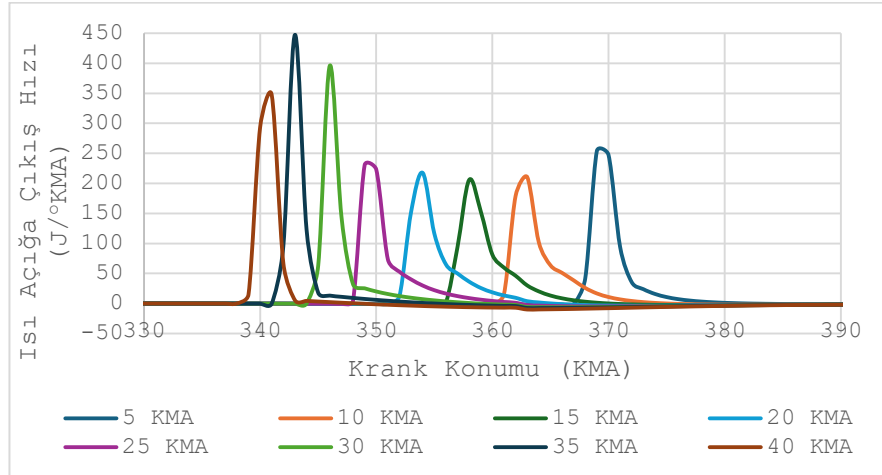
Şekil C.26 2000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



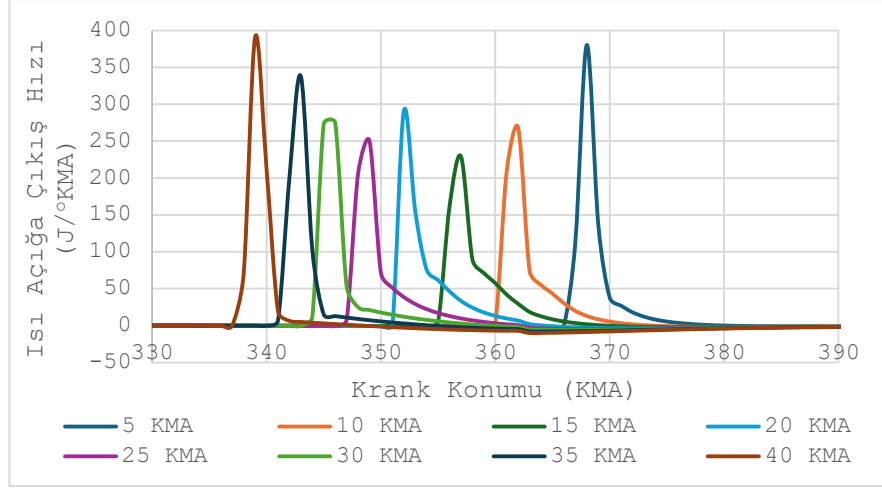
Şekil C.27 2000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



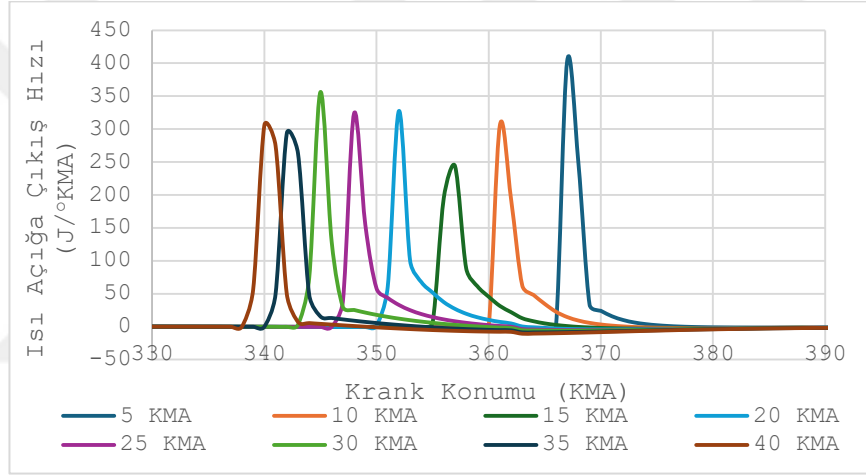
Şekil C.28 2000 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



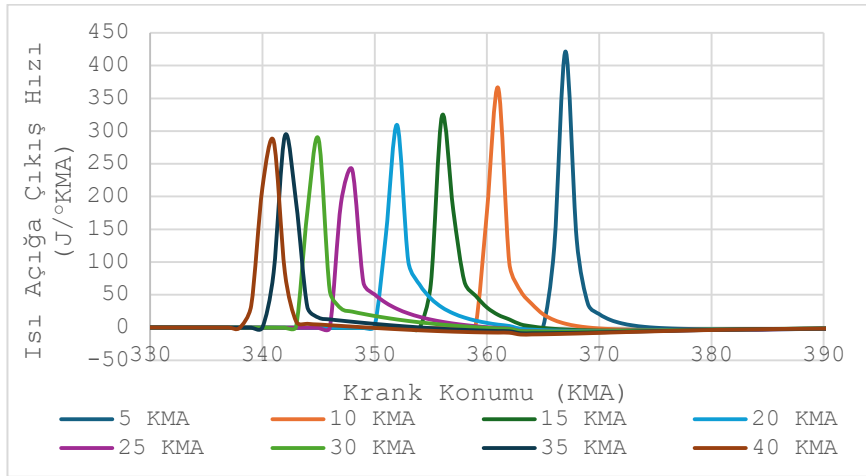
Şekil C.29 2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



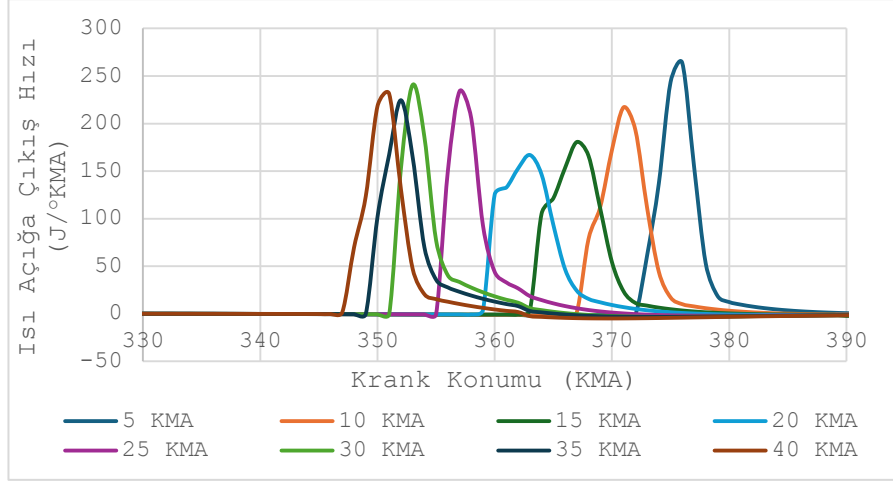
Şekil C.30 2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



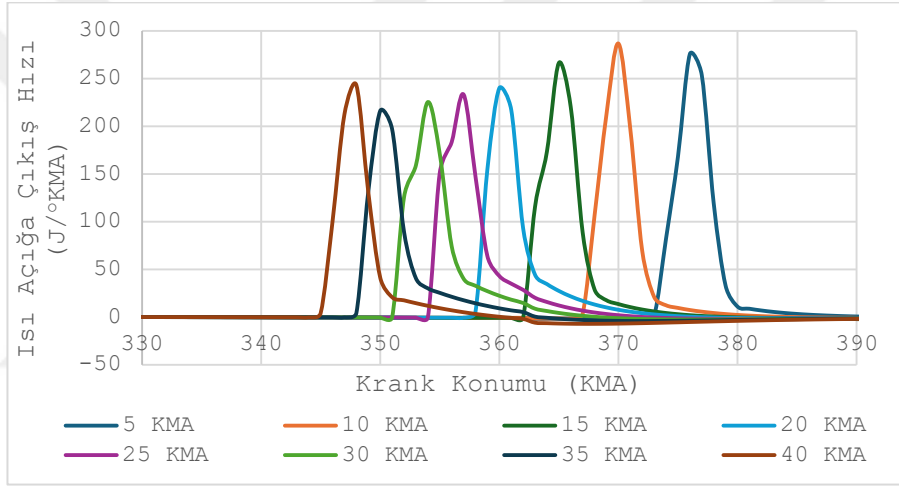
Şekil C.31 2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



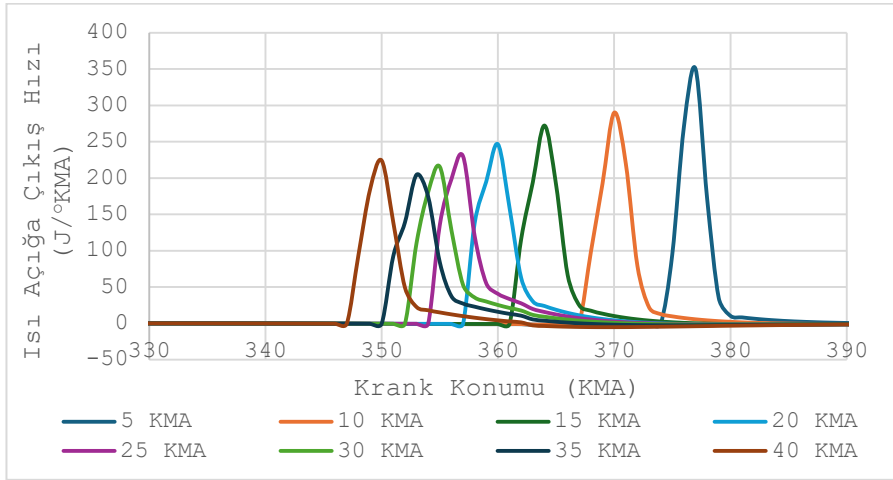
Şekil C.32 2000 dev/dak motor hızı, 20 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



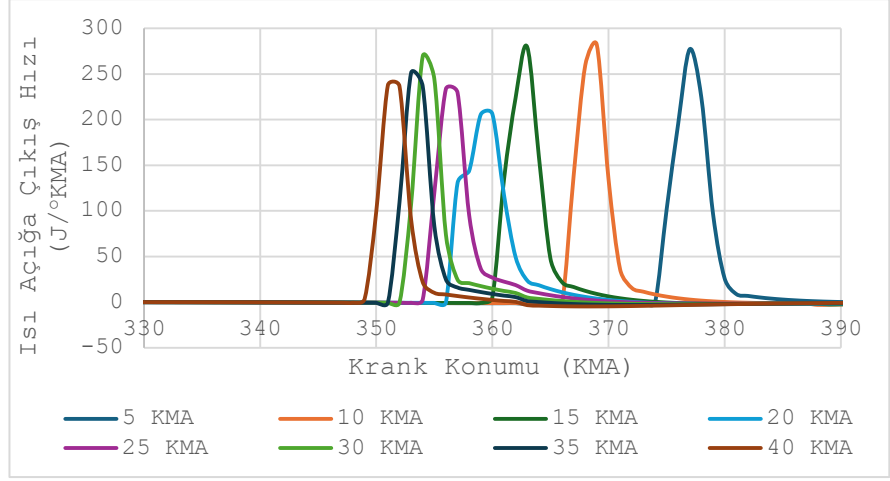
Şekil C.33 2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 600 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



Şekil C.34 2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 800 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



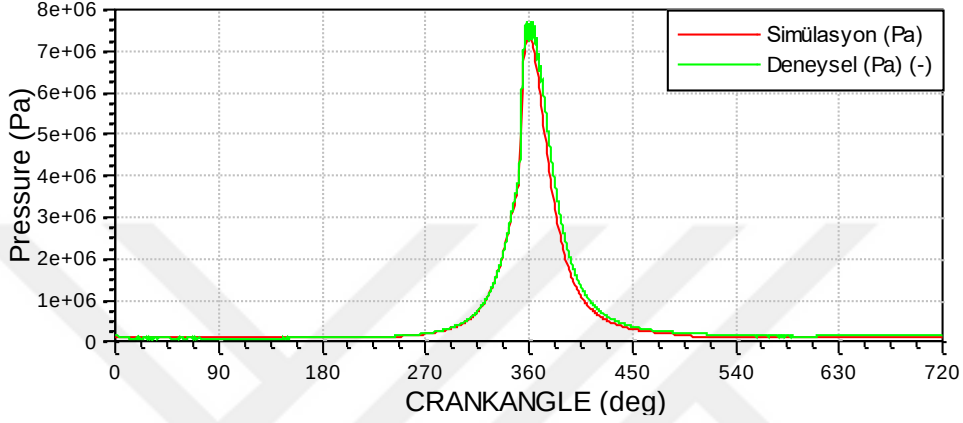
Şekil C.35 2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1000 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri



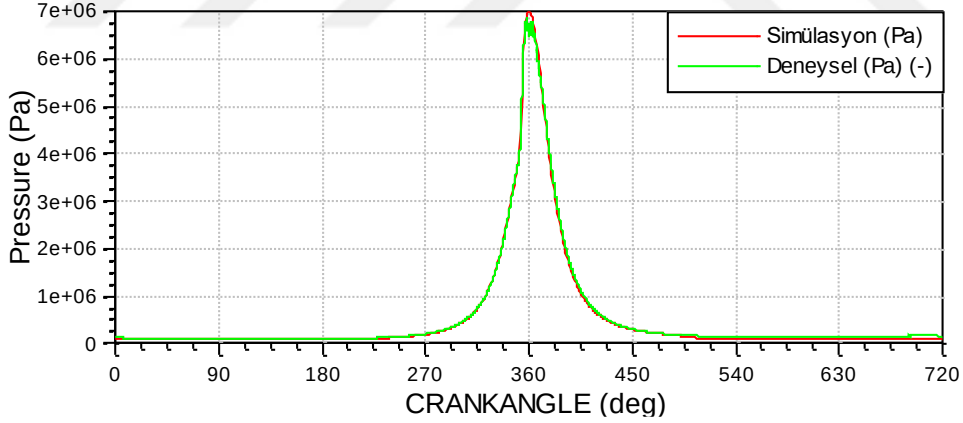
Şekil C.36 2000 dev/dak motor hızı, 25 mg/strok yakıt püskürtme miktarı ve 1200 bar püskürtme basıncında ortaya çıkan ısı açığa çıkış hızı-krank konumu eğrileri

D

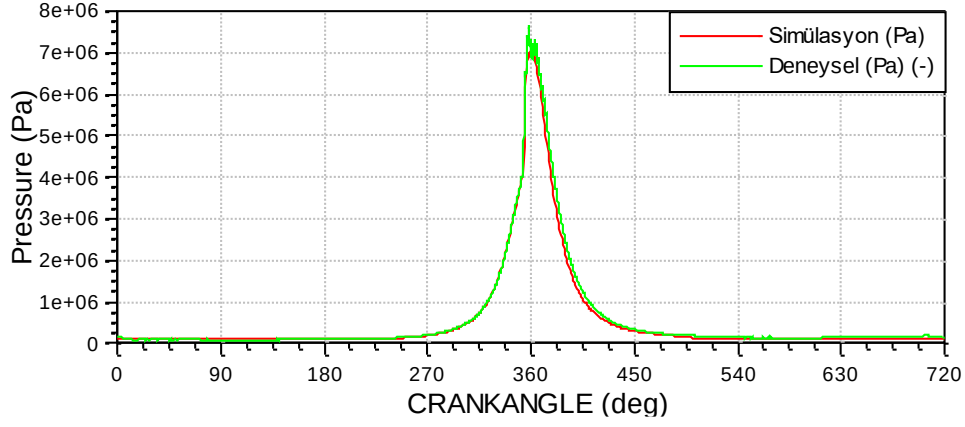
ÇİFT FAZDA GERÇEKLEŞTİRİLEN TERMODİNAMİK DOĞRULAMA ESNASINDA OLUŞAN P- α DİYAGRAMLARI



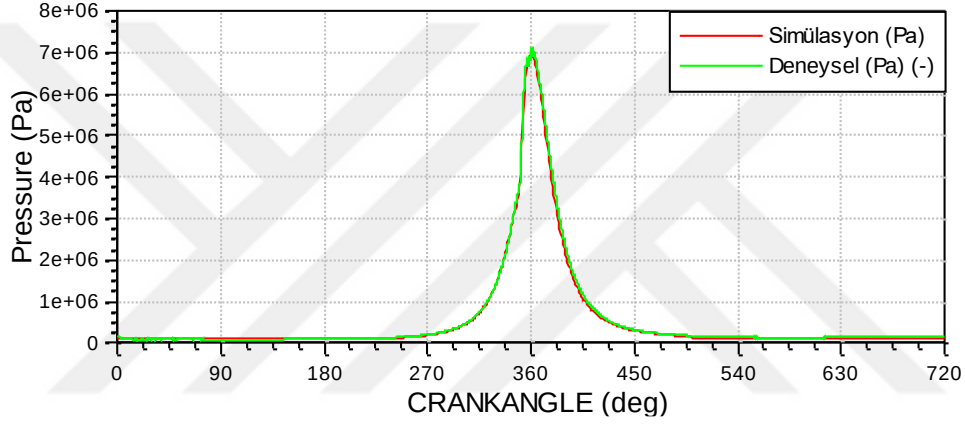
Şekil D.1 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



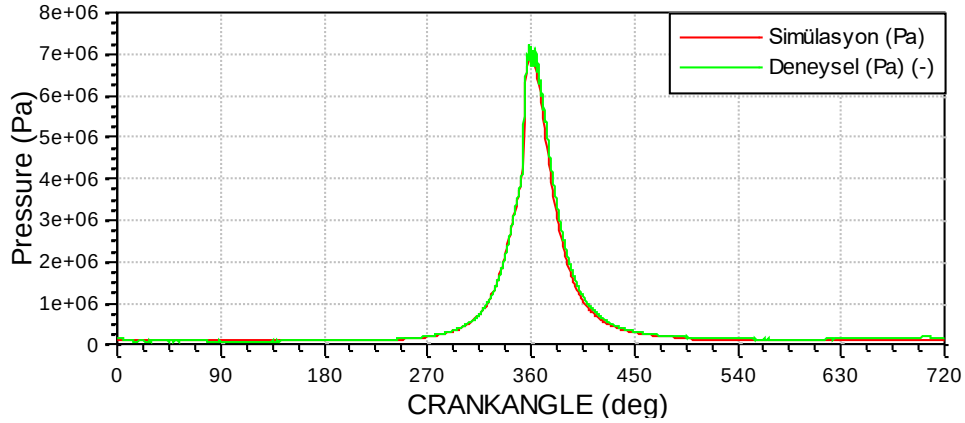
Şekil D.2 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 45° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



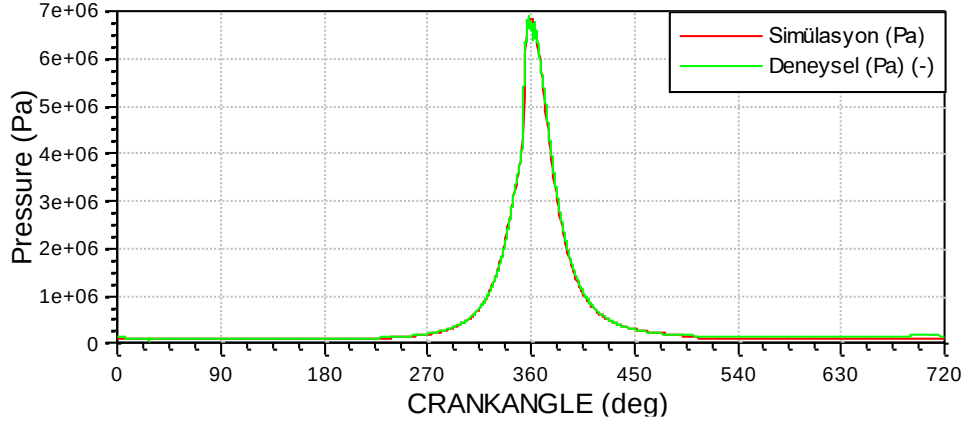
Şekil D.3 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 55° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



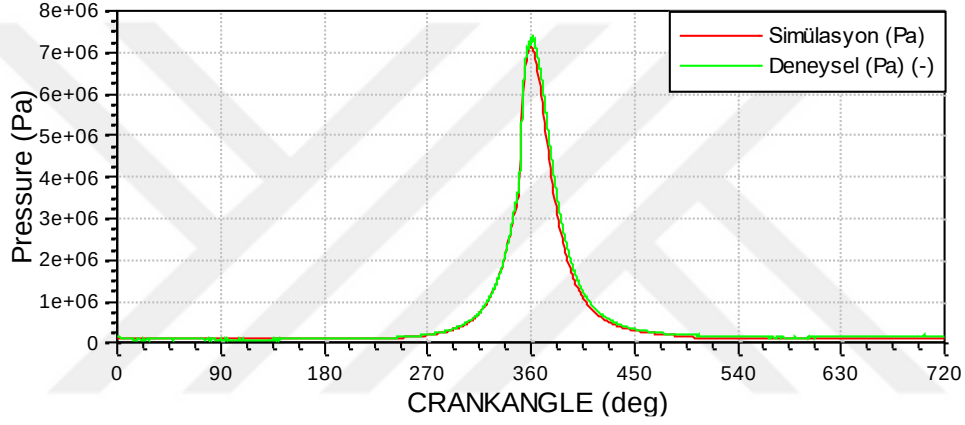
Şekil D.4 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %30 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



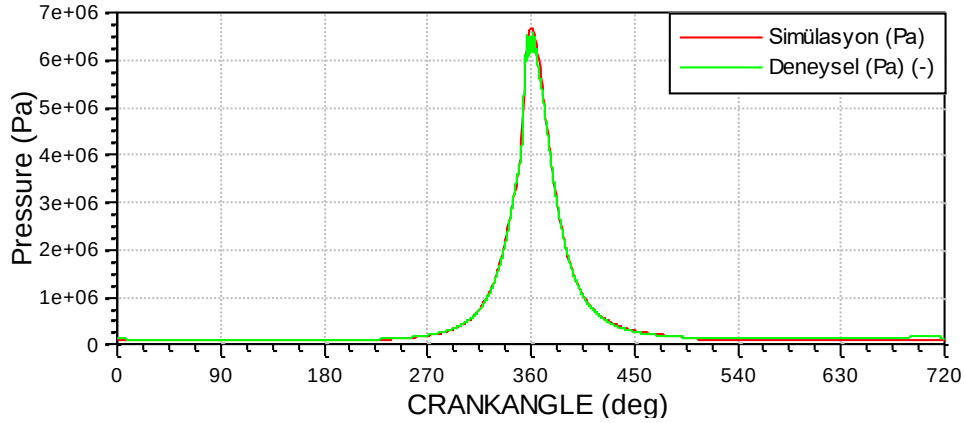
Şekil D.5 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %30 ön karışım oranı ve 45° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



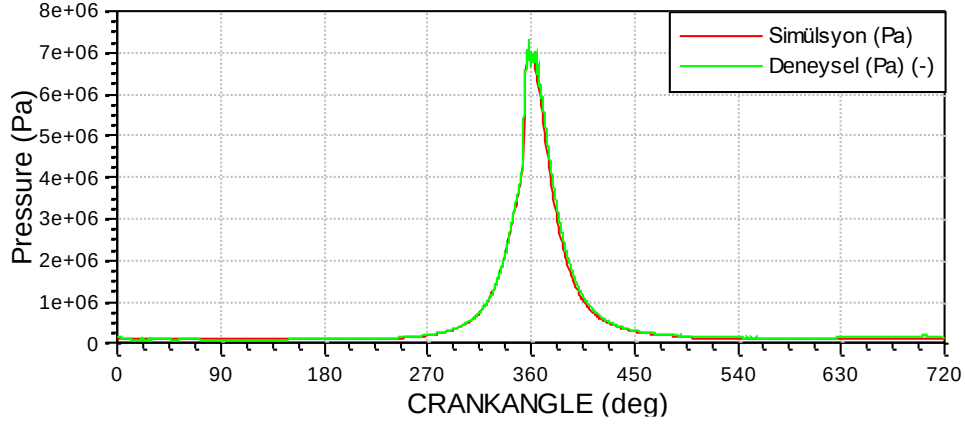
Şekil D.6 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %30 ön karışım oranı ve 55° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



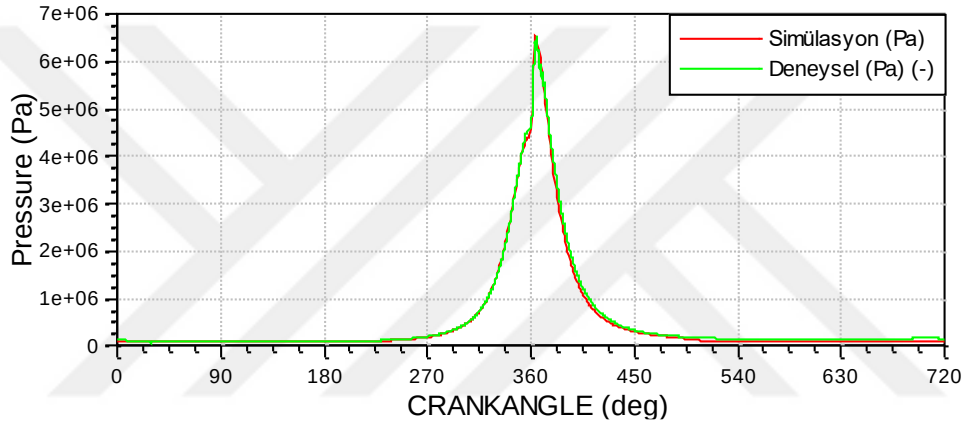
Şekil D.7 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %40 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



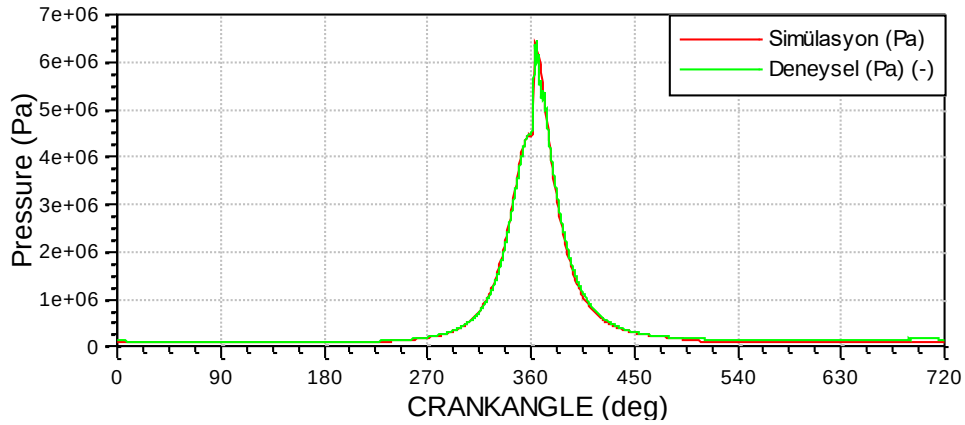
Şekil D.8 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %40 ön karışım oranı ve 45° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



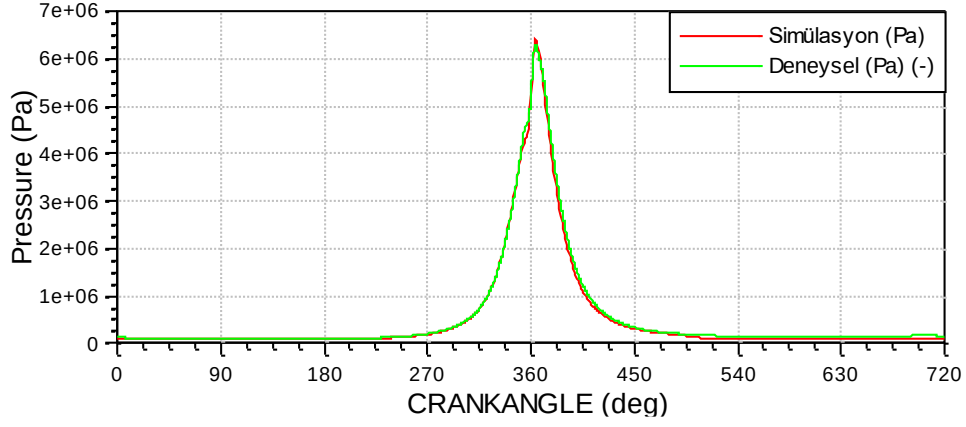
Şekil D.9 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 20° KMA ana püskürtme avansı, %40 ön karışım oranı ve 55° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



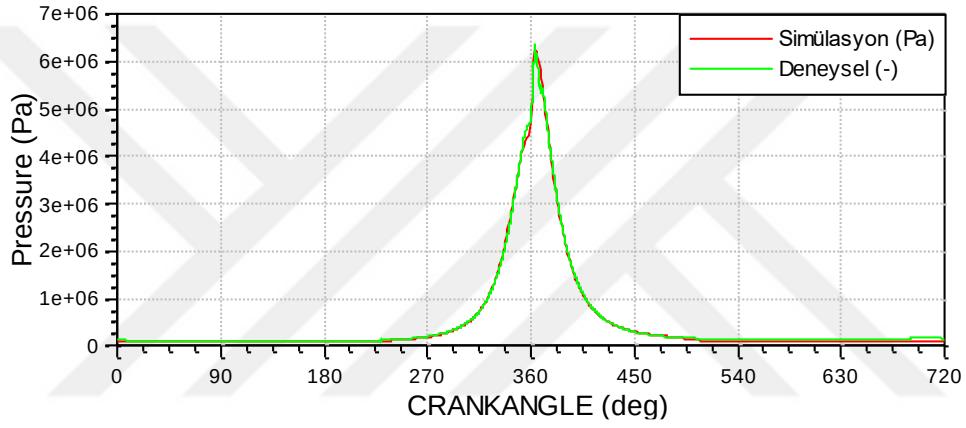
Şekil D.10 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



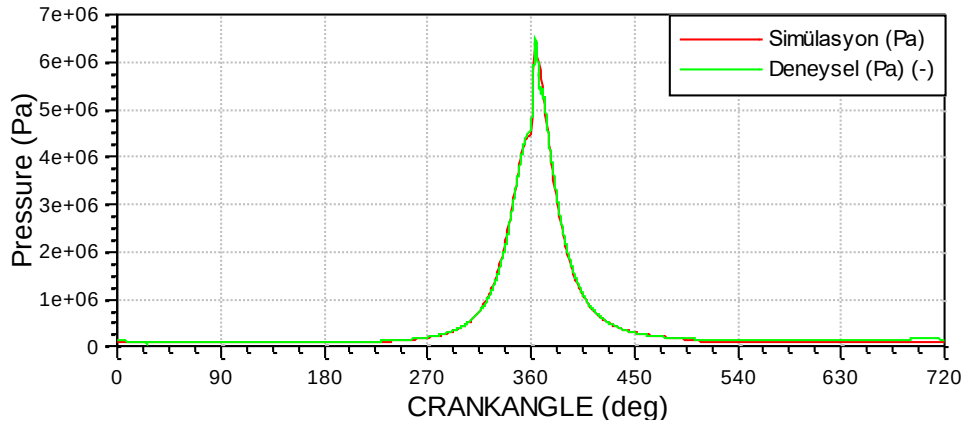
Şekil D.11 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 45° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



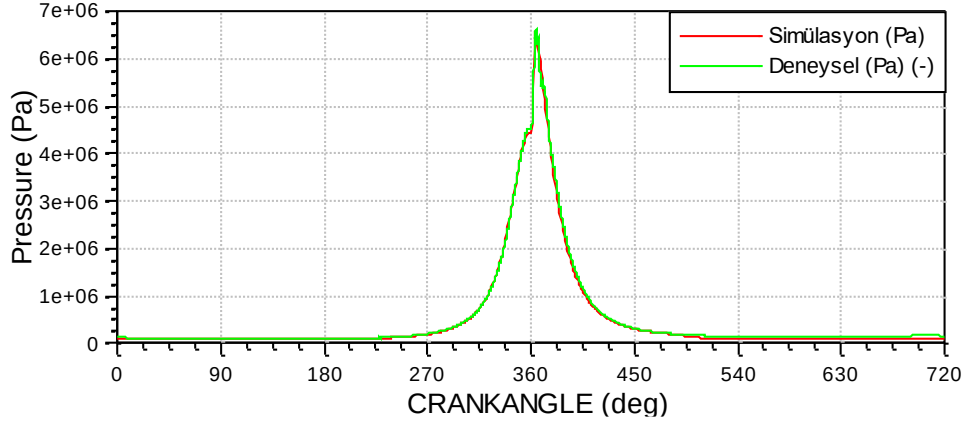
Şekil D.12 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %20 ön karışım oranı ve 55° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



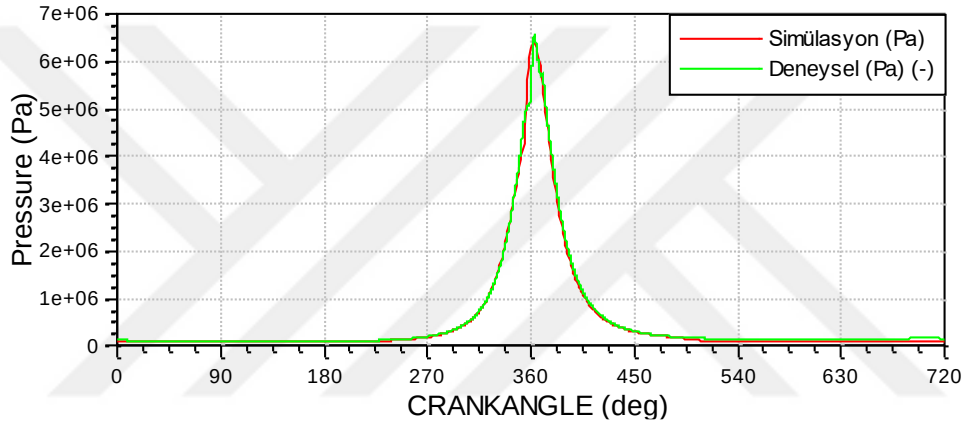
Şekil D.13 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %30 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



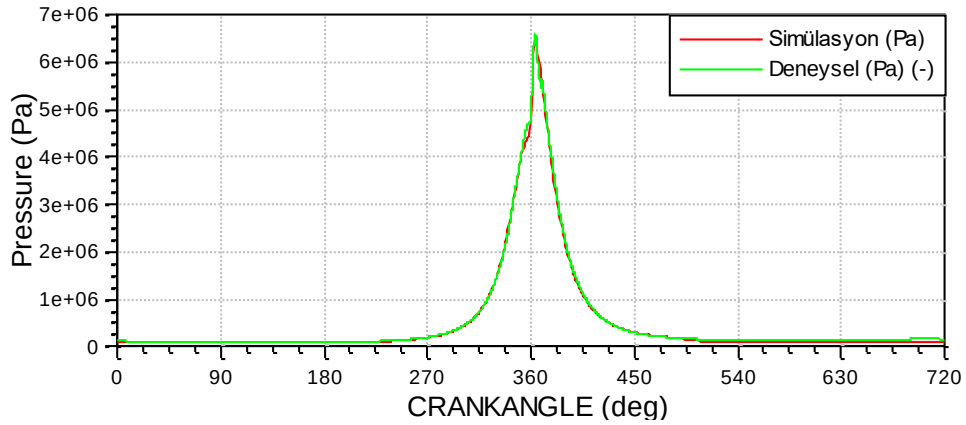
Şekil D.14 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %30 ön karışım oranı ve 45° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



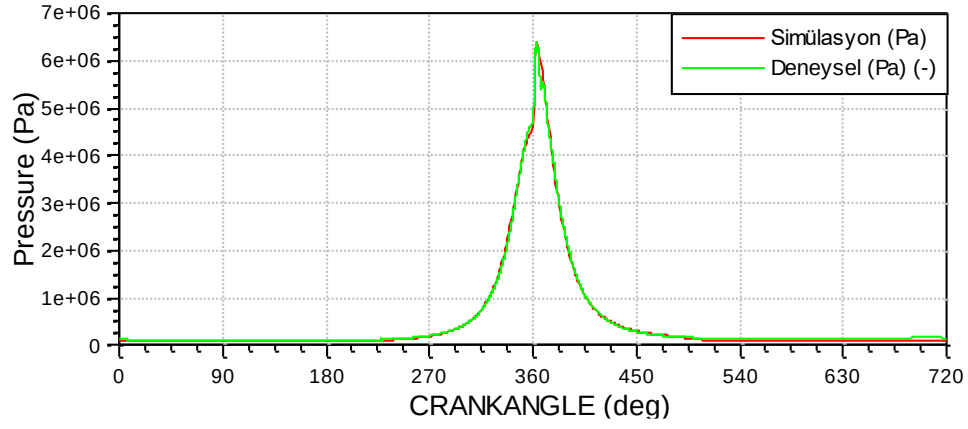
Şekil D.15 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %30 ön karışım oranı ve 55° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



Şekil D.16 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %40 ön karışım oranı ve 35° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



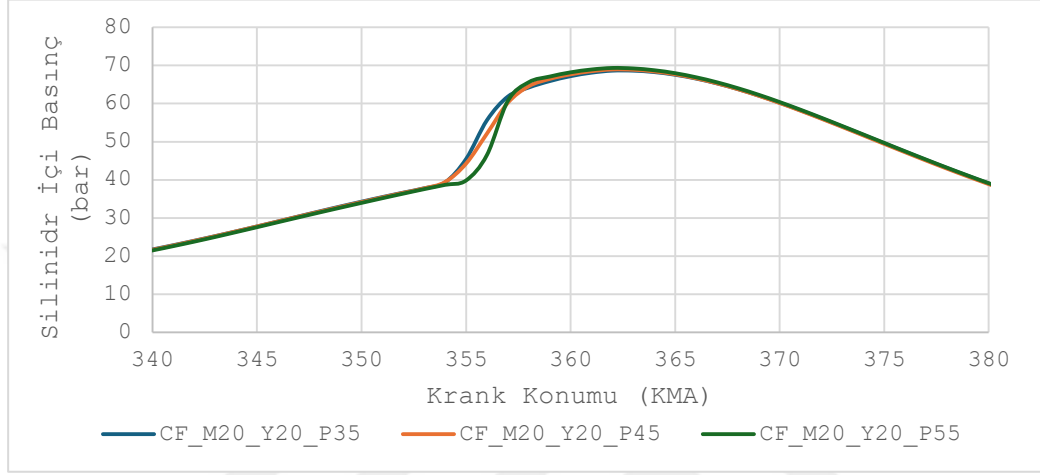
Şekil D.17 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %40 ön karışım oranı ve 45° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri



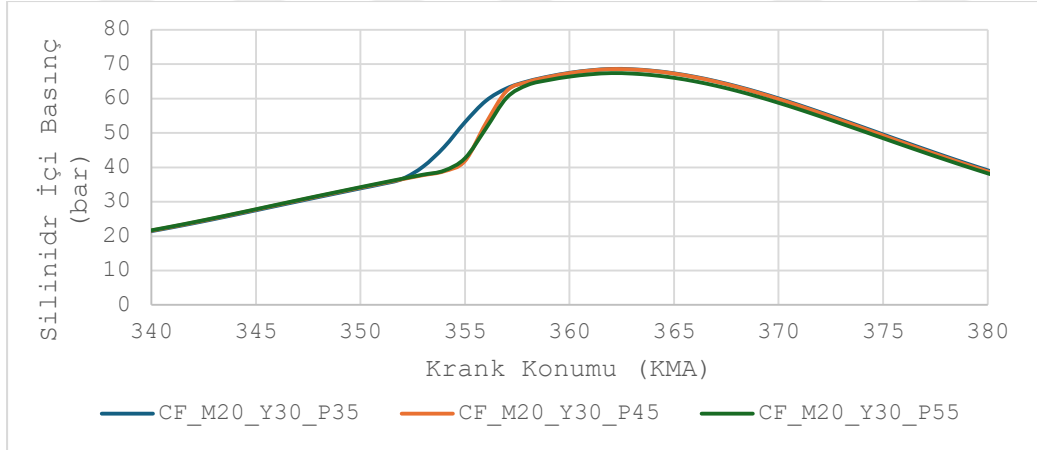
Şekil D.18 1500 dev/dak motor hızı, 15 mg/strok yakıt püskürtme kütlesi, 10° KMA ana püskürtme avansı, %40 ön karışım oranı ve 55° KMA ön püskürtme avansında silindir içi anlık basınç-krank konumu eğrileri

E

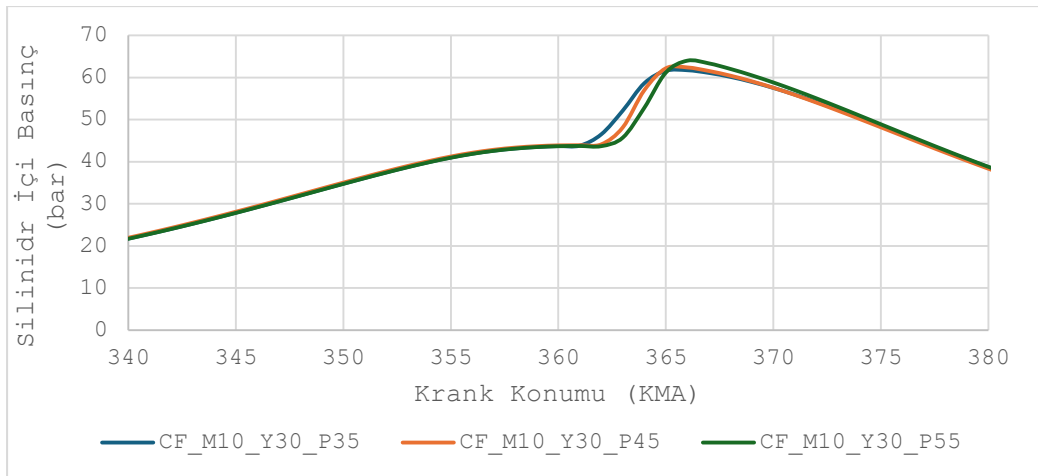
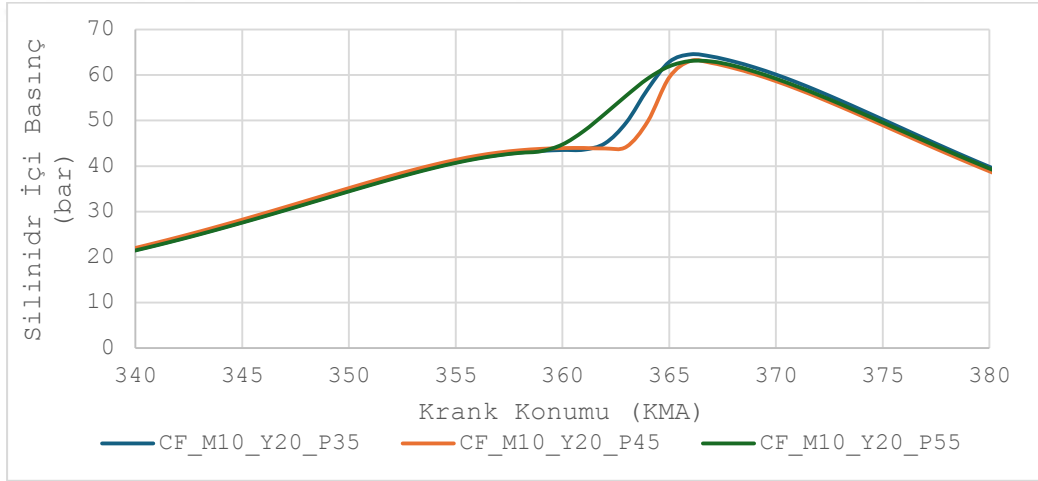
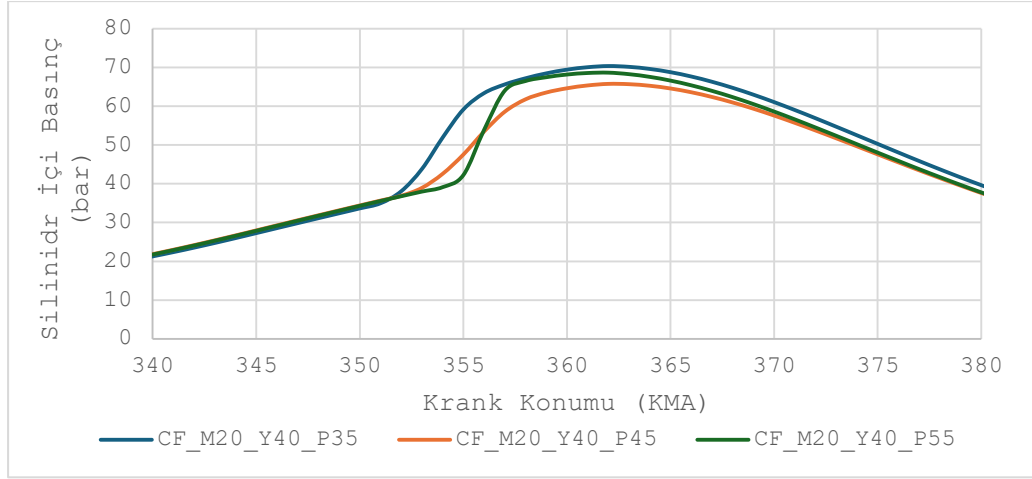
ÇİFT FAZDA SİMÜLASYON ÇALIŞMASI SONUCUNDA ELDE EDİLEN P- α DİYAGRAMLARI

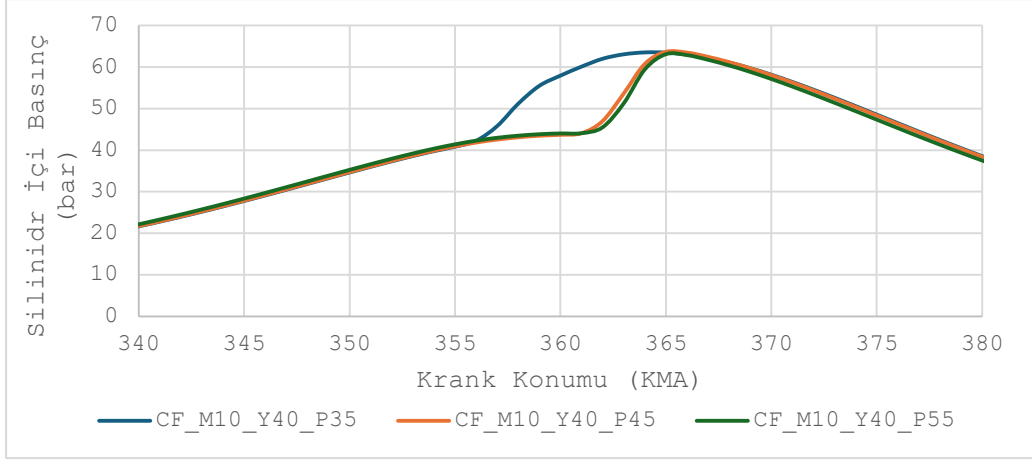


Şekil E.1 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 20° KMA an püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları



Şekil E.2 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 20° KMA an püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları

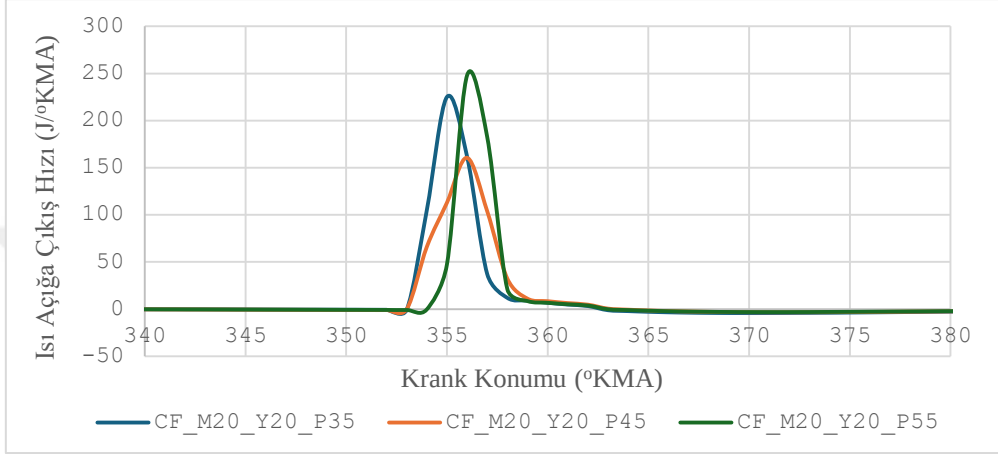




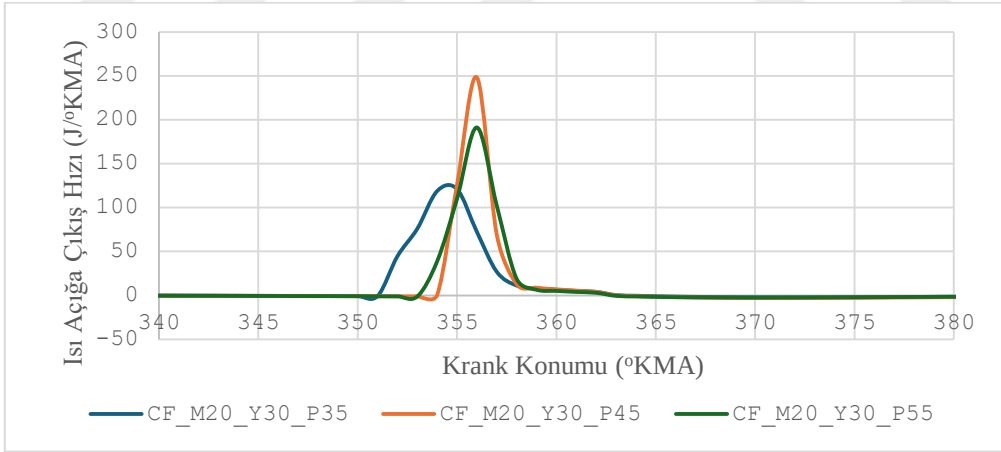
Şekil E.6 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 10° KMA an püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları



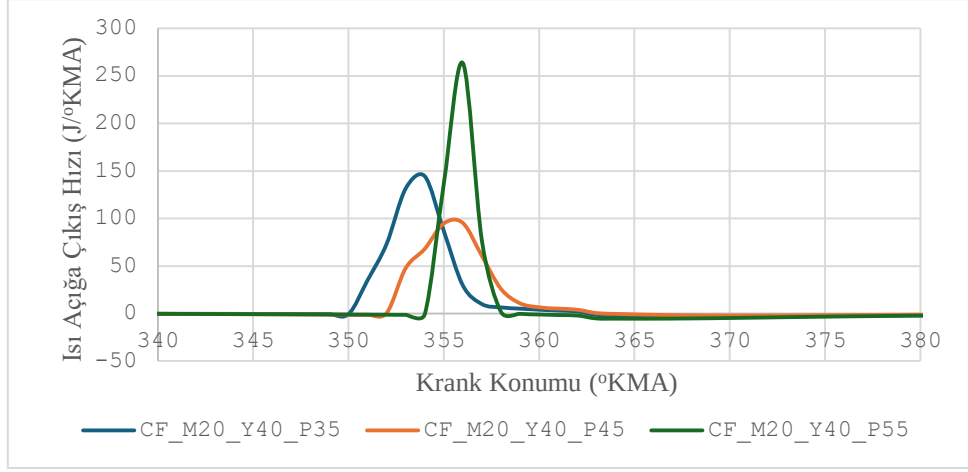
F ÇİFT FAZDA YAKIT PÜSKÜRTME ŞARTINDA ELDE EDİLEN ISI AÇIĞA ÇIKIŞ HIZI GRAFİKLERİ



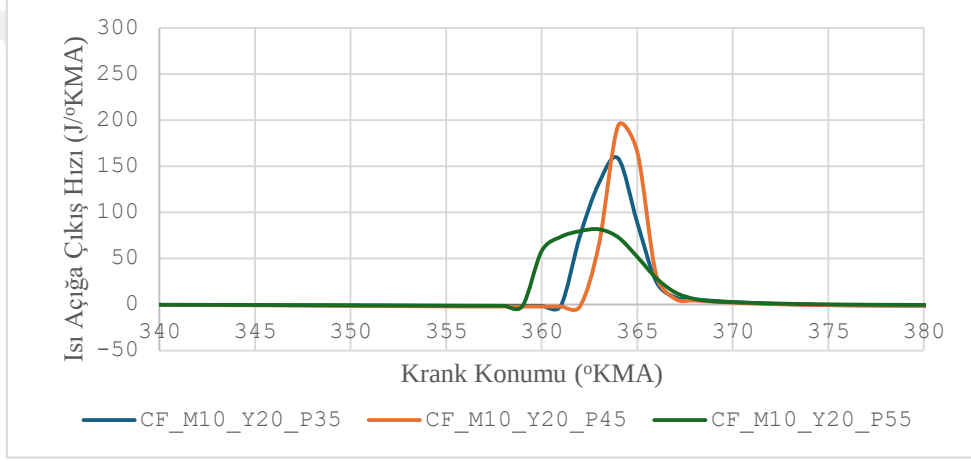
Şekil F.1 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 20° KMA an püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları



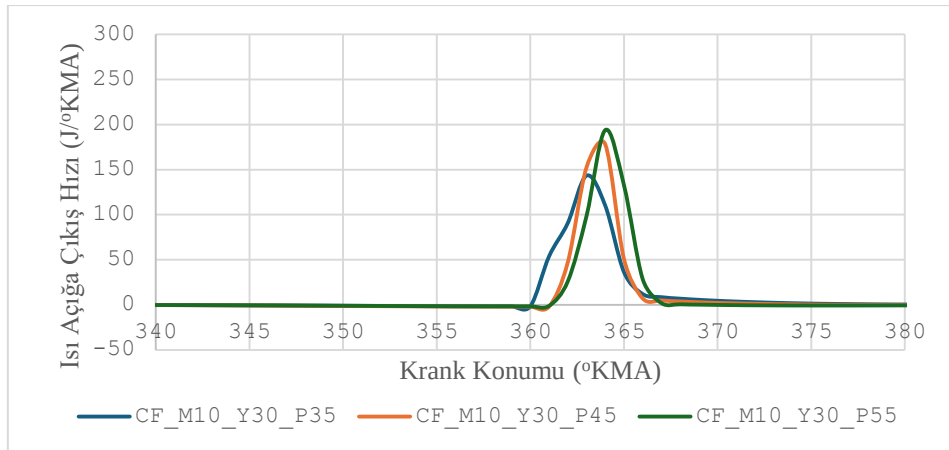
Şekil F.2 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 20° KMA an püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları



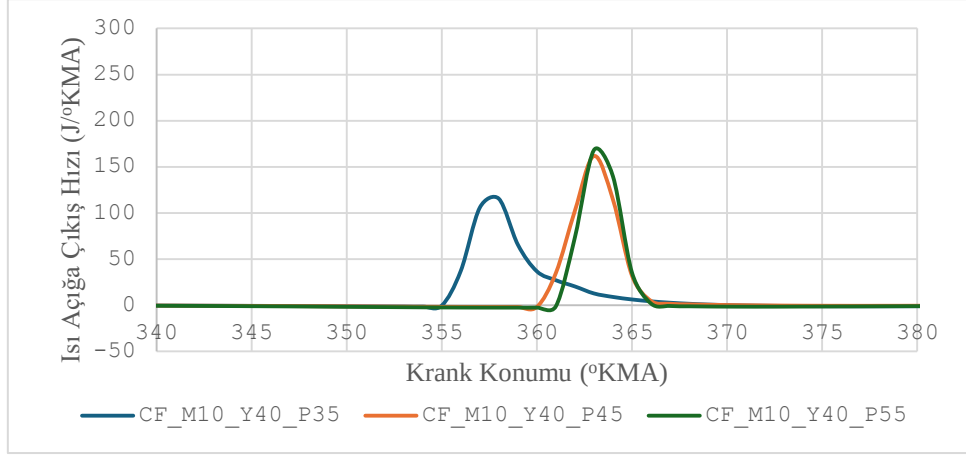
Şekil F.3 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 20° KMA an püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları



Şekil F.4 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 10° KMA an püskürtme avansı ve %20 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları



Şekil F.5 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 10° KMA an püskürtme avansı ve %30 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları



Şekil F.6 Çift fazda yakıt püskürtme şartında 10° KMA an püskürtme avansı ve %40 ön püskürtme oranında ortaya çıkan P- α diyagramları



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. O. Gezer, C. Buyuk O. Ozener, and M. Ozkan, “Analysis of Emissions of Low Temperature Combustion in a Diesel Engine According to the Combustion Process and Modeling of N₂O Emissions” in Proceedings of the 17th International Combustion Symposium, 2024, pp. 287–93. ISBN:978-625-6443-27-3

Makaleler

1. O. Gezer, O. Ozener, and M. Ozkan, “Experimental Investigation of Low Temperature Combustion in a Diesel Engine Depending on Injection Advance and Injection Pressure,” *Therm. Sci.*, vol. 28, no. 5, pp. 3951–3966, 2024, doi: 10.2298/TSCI240105155G.