

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HOMOJEN DOLGULU MOTORLARDA YÜKSEK BASIÇLI PÜSKÜRTME
TEKNOLOJİSİNİN DENEYSEL OLARAK UYGULANARAK PERFORMAN VE
EMİSYON AÇISINDAN KONVENSİYONEL DİSEL İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

ÜMİT TÜRKMEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ALP TEKİN ERGENÇ**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HOMOJEN DOLGULU MOTORLARDA YÜKSEK BASINÇLI PÜSKÜRTME
TEKNOLOJİSİNİN DENEYSEL OLARAK UYGULANARAK PERFORMANS VE
EMİSYON AÇISINDAN KONVENSİYONEL DİZEL İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

Ümit TÜRKMEN tarafından hazırlanan tez çalışması 11.10.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd.Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd.Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr Tarkan SANDALCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr Osman Akın KUTLAR
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Hazırladığım tez çalışmasında, homojen karışimli sıkıştırma yoluyla çalışan içten yanmalı motorları inceledim. Bu çalışmam sırasında bana yardımcı olan değerli hocam merhum Prof.Dr.Orhan DENİZ'e, Yrd.Doç.Dr Alp Tekin ERGENÇ' e , Arş.Gör Levent YÜKSEK'e, Arş. Gör. Orkun ÖZENER'e , Arş.Gör Emre ORAK'a , Arş.Gör Yasin KARAGÖZE'e ve yanımdan hiç eksik olmayan Yasemin TOPALOĞLU'na sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Ekim,2012

Ümit TÜRKMEN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Çizelge 5. 1 Deney Motorunun Özellikleri	68
Çizelge 5. 2 Sadece diesel püskürtme sonucu elde edilen veriler	71
Çizelge 5. 3 Diesel+ benzin püskürtme sonucu elde edilen veriler	71
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	14
1.1 Litaretür Özeti	14
1.2 Tezin Amacı	14
1.3 Hipotez	16
BÖLÜM 2	
HCCI YANMA TARİHÇESİ	17
2.1 HCCI Üzerine Yapılan Çalışmalar	17
2.2 HCCI Yanma Avantajları	20
BÖLÜM 3	
HCCI TEKNİKLERİ VE LİTARATÜRDEKİ UYGULAMALARI	22
3.1 Genel Tanımlama	22
3.2 Ön Karışimli HCCI Operasyonu.....	24
3.3 Erken Direkt Püskürtmeli HCCI Operasyonu.....	28
3.3.1 New ACE Institute, Japonya	28
3.3.2 Hino Motors, Ltd	35
3.3.3 Mitsubishi Motors Corporation	36
3.3.4 Toyota Motor Corporation	39
3.3.5 IFP (Institut Francais du Pétrole)	40
3.4 Geç Direkt Püskürtmeli HCCI Operasyonu.....	42

3.4.1	Nissan Motor Company	42
-------	----------------------------	----

BÖLÜM 4

HCCI YANMA FAZINI ETKİLEYEN PARAMETRELER.....		45
4.1	Emme Havası Sıcaklığı.....	46
4.2	Isı değiştirici	47
4.3	Sıkıştırma Oranı.....	47
4.4	Egzoz Gazının Tekrar Sirkülasyonunun (EGR) ve Art Gazın Etkileri	49
4.5	Su Püskürtülmesi.....	52
4.6	Doldurma Basıncı	53
4.7	Yakıt Püskürtme Stratejileri ve Silindir İçindeki Yakıt Dağılımının Etkisi... 54	
4.8	Yakıtların, Katkı Maddelerinin ve Yakıt Modifikasyonlarının Etkisi	59
4.9	Motor Hızı	62
4.10	Karışım Homojensizliğinin Etkisi	62
4.11	Türbülansın Etkisi.....	64
4.12	Yakıt Püskürtme Sistemi	65

BÖLÜM 5

DENEY DÜZENEğİNİN KURULMASI VE DENEYİN UYGULANMASI.....		67
5.1	Motor Yükleme Grubu	67
5.2	Deneyin Verileri ve Grafikleri.....	70

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER		86
KAYNAKLAR		88
ÖZGEÇMİş		91

SİMGE LİSTESİ

CH ₄	Metan
C ₂ H ₆	Etan
C ₃ H ₈	Propan
C ₄ H ₁₀	Bütan
C ₄ H ₈	Bütilen
CH ₃ OH	Metanol
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
e	Sıkıştırma oranı
HC	Hidrokarbon
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Buhar, su
l	Hava fazlalık katsayısı
NO _x	Azotoksit
N ₂	Azot
O ₂	Oksijen
P inj	Püskürtme basıncı
PO _x	Kısmi oksidasyon
Q _f	Bir çevrimde püskürtülen yakıt miktarı (hacmi)
Q inj	Püskürtme zamanı

KISALTMA LİSTESİ

AKI	Vuruntu Yapmama İndeksi
ASTM	Amerikan Standart Test Metotları
ATAC	Aktif Thermo-Atmosferik Yanma
ATDC	Üst Ölü Noktadan Sonra
BMEP	Fren Ortalama Efektif Basınç, Ortalama Efektif Basınç
CFD	Hesaba Dayanan Akış Dinamiği
CN	Setan Sayısı
CNG	Sıkıştırılmış Doğal Gaz
DHBP	Tertiary Butilperoksi Heksan
DI	Direkt Püskürtme
EGR	Egzoz Gazı Tekrar Sirkülasyonu
FTP	Federal Test Procedure
FVVT	Etkin Değişken Supap Zamanlaması
GDI	Direkt Benzin Püskürtme
GTL	Gazdan Sıvıya Dönüştürme
HCCI	Homojen Dolguyu Sıkıştırarak Tutuşturma
HCSI	Homojen Dolguyu Buji İle Tutuşturma
IFP	Institut Francais du Petrole
IMEP	İndike Ortalama Efektif Basınç
IPN	İzopropil Nitrat
IC	İçten Yanmalı Motorlar
ISFC	İndike Özgül Yakıt Sarfiyatı
KMA	Krank Mili Açısı
LHV	Alt Isıl Değer
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MK	Modulated Kinetics
MON	Motor Oktan Sayısı

MRG	Metanol Türevli Gaz %67 H ₂ + %33 CO
MTBE	Metil Tertiary Butil Eter
NADITM	Dar Açılı Direkt Püskürtme
NEDC	New European Drive Cycle
NiCE	Nippon Clean Engine Research Institute
ÖÜÖN	Üst Ölü Noktadan Önce
PFI	Manifolda Yakıt Püskürtme
PLIF	Planar Laser-Induced Fluorescence
PM	Partikül Maddesi, İS, Duman Emisyonu, Partikül
ppm	Milyon Partikül Miktarı
PREDIC	Ön karışımli fakir diesel yanması
PRF	Ana Referans Yakıtları
RPM	Dakikadaki Devir Sayısı
ROHR	Isının Açığa Çıkış Hızı
RON	Araştırma Oktan Sayısı
SCCI	Kademeli Dolguyu Sıkıştırarak Tutuşturma
SCSI	Kademeli Dolguyu Buji İle Tutuşturma
SI	Buji ile Ateşleme
SOI	Püskürtme Başlangıcı
THC	Toplam HC miktarı
UHC	Yanmamış HC miktarı
ULEV	Ultra Low Emission Vehicle Standarts
UNIBUS	UNiform BUIky combustion System
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
VVA	Değişken Supap Hareketi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1	Klasik ve kenar püskürtmeli PREDIC’de yakıt hüzmesinin lokasyonu	29
Şekil 3.2	Merkez püskürtmeli PREDIC’de yakıt hüzmesinin lokasyonu.....	30
Şekil 3.3	Kenar püskürtmeli PREDIC’de motor performansı ve emisyonları.....	30
Şekil 3.4	Kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunda ısı açığa çıkış hızı	31
Şekil 3.5	Kenar püskürtmeli PREDIC’de motor performansı ve emisyonu.....	31
Şekil 3.6	Kenar püskürtmeli PREDIC için ısı açığa çıkış hızının kıyaslanması	32
Şekil 3.7	Klasik diesel ve kenar püskürtmeli PREDIC için yanma fotoğrafları.....	32
Şekil 3.8	Merkez püskürtmeli PREDIC’in motor performansı ve emisyonu	33
Şekil 3.9	Merkez püskürtmeli PREDIC için ısı açığa çıkış hızı	34
Şekil 3.10	Çarpışan hüzmeli memenin hüzmeye karakteristikleri	37
Şekil 3.11	Motor testlerindeki çarpışan hüzmeli memenin yapısı	37
Şekil 3.12	Çarpışan hüzmeli memenin yakıt hüzmesi görünümü	38
Şekil 3.13	NADI yanma sisteminin genel görünümü	41
Şekil 5.1	PLC kontrollü yüksek basınç püskürtmeli Lombardini LDA450 motor seti.	67
Şekil 5.2	Motor Çalışmasındaki Sinyaller	69
Şekil 5.3	Osiloskobun genel görünümü	70
Şekil 5.4	NOx Emisyon Değişimi	72
Şekil 5.5	HC Emisyon Değişimi.....	72
Şekil 5.6	CO Emisyon Değişimi.....	73
Şekil 5.7	Motor Güç Değişimi	73
Şekil 5.8	10 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	74
Şekil 5.9	10 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	74
Şekil 5.10	10 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	75
Şekil 5.11	10 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	75
Şekil 5.12	15 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	76
Şekil 5.13	15 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	76
Şekil 5.14	15 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	77
Şekil 5.15	15 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	77
Şekil 5.16	20 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	78
Şekil 5.17	20 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	78
Şekil 5.18	20 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	79
Şekil 5.19	20 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	79
Şekil 5.20	25 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	80

Şekil 5.21	25 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	80
Şekil 5.22	25 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	81
Şekil 5.23	25 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	81
Şekil 5.24	30 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	82
Şekil 5.25	30 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	82
Şekil 5.26	30 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği	83
Şekil 5.27	30 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği	83
Şekil 5.28	Diesel püskürtmesi ile oluşan avanslara göre basınç grafikleri	84
Şekil 5.29	Diesel püskürtmesi ile oluşan avanslara göre ısı yayınım grafikleri	84
Şekil 5.30	Diesel+benzin püskürtmesi ile oluşan avanslara göre basınç grafikleri	85
Şekil 5.31	Diesel+benzin püskürtmesi ile avanslara göre ısı yayınım grafikleri	85

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 5. 1 Deney Motorunun Özellikleri.....	68
Çizelge 5. 2 Sadece diesel püskürtme sonucu elde edilen veriler.....	71
Çizelge 5. 3 Diesel+ benzin püskürtme sonucu elde edilen veriler.....	71

**HOMOJEN DOLGULU MOTORLARDA YÜKSEK BASINÇLI PÜSKÜRTME
TEKNOLOJİSİNİN DENEYSEL OLARAK UYGULANARAK PERFORMANS VE
EMİSYON AÇISINDAN KONVENSİYONEL DİZEL İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

Ümit TÜRKMEN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ

Homojen karışimli (dolgulu) sıkıştırma tutuşmalı (genelde HCCI olarak bilinen) yanma prosesi, NO_x ve partikül emisyonlarını önemli derecede azaltma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte yüksek termik verim ve yakıtların geniş bir yelpazesinin kullanılabilirliği söz konusudur. Bu özellikler HCCI motorlarını merak edilen bir teknoloji haline getirmektedir. Bu teknoloji, görünüşte diesel vari yakıt verimi ve çok düşük emisyonları sağlayabilir ve böylece düşük sıcaklık ard işlem sistemlerine ihtiyaç duyulmadan emisyon kriterlerinin yerine getirilmesini mümkün kılabilir. Son yıllarda bu teknolojinin araştırılması ve geliştirilmesi hususunda büyük ilerlemeler kaydedildi. Bu tez HCCI teknolojisinin ulaştığı en son nokta hakkında temel bir bilgi vererek gelecek için bir perspektif oluşturmaktadır. Bu tez, HCCI motorlar ile emisyon azaltılmasına yönelik literatür çalışmalarını ve konuya yönelik yapılan tezi içermektedir.

Anahtar Kelimeler: HCCI, Homojen Dolgulu Motorlar, Homojen karışimli sıkıştırma tutuşmalı motorlar

**THE PERFORMANCE AND EMISSION COMPARISON STUDY OF THE HIGH
PRESSURE FULLED HCCI ENGINE WITH THE CONVENTIONAL DIESEL
ENGINE**

Ümit TÜRKMEN

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Alp Tekin ERGENÇ

The homogeneous charge, compression-ignition (HCCI) combustion process has the potential to significantly reduce NO_x and particulate emissions, while achieving high thermal efficiency and the capability of operating with a wide variety of fuels. This makes HCCI engine an attractive technology that can ostensibly provide diesel-like fuel efficiency and very low emissions which may allow emissions compliance to occur without relying on leanaftertreatment systems. A profound increase in the level of research and development of this technology has occurred in the last decade. As this thesis giving a basic introduction to the state-of-the-art of HCCI technology, provides a perspective for the future. This thesis aimed at reducing emissions of HCCI engines literature. Includes work and the thesis contains topic-oriented.

Key words: HCCI, Homogeneous charge engine ,Homogeneous charge compression ignition

1.1 Litaretür Özeti

Buji ile ateşlemeli ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlardaki teknolojik gelişmelere rağmen, halen bir takım eksiklikler bulunmaktadır. Diesel motorları, yüksek sıkıştırma oranı ve şarj dolgusunu herhangi bir kısılma olmadan alabilmesi sayesinde yüksek termik verime sahiptir. Fakat, diesel motorlarında NOx ve is emisyonları zıt eğilim karakteristiği nedeni ile eş zamanlı olarak azaltılamamaktadır. Diesel motorlar için NOx emisyonlarını azaltmak üzere geliştirilen katalizör sistemleri ucuz ve pratik olarak uygulanamamaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlarda oluşan vuruntu sebebiyle sıkıştırma oranının çok fazla artırılmaması ve farklı motor yüklerini kontrol etmek için emme dolgusunun silindirlere kısılarak alınması neticesinde diesel motorlara göre termik verimleri düşük kalmaktadır. Egzoz sonrası emisyon kontrolünde, üç yollu katalitik dönüştürücüler sayesinde oldukça düşük egzoz emisyonları elde edilebilmektedir. Fakat stokiyometrik yakıt/hava karışımlarına yakın çalışma aralığı ile bu uygulama yeni geliştirilen farklı motor tiplerine karşı sınırlı kalabilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar (HCCI), konvansiyonel buji ile ateşlemeli ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorların ortak avantajlarını barındırmaktadır. Yüksek termik verim ve düşük egzoz emisyonlarını karşılayabilecek potansiyele sahip yeni bir kavram

olarak gelecek vaat etmektedirler. Bir diesel ya da buji ile ateşlemeli motor üzerinde değişikliğe gidilerek HCCI motoruna dönüşüm sağlanabilmektedir. HCCI yanması, fakir ve homojen yakıt/hava dolgununun kendi kendine tutuşması ile başlamaktadır. Motor yükü, emme havasında kısılma olmaksızın hava/yakıt oranının kontrolü ile sağlanmaktadır. Genellikle motorun sadece kısmi yüklerinde homojen dolgu olarak oldukça fakir karışımlarda çalışabilmektedir. Klasik diesel motorlarında, yakıt olarak zengin ve fakir bölgelerin meydana gelmesi ile NO_x-is oluşumu gerçekleşmektedir. İdeal HCCI yanma işleminde, yanma odasının genelinde ve bölgesel alanlarındaki lambda ve sıcaklık oranlarında bir farklılık olmadan, yüksek hava fazlalık oranı ile hava/yakıt karışımı homojen olarak hazırlanmaktadır. Homojen ve fakir dolgunun sıkıştırılması ile yanma odasındaki karışımının tümünün eşzamanlı olarak kendi kendine tutuşması sağlanabilmektedir. Böylece zengin yakıt karışım bölgeleri mevcut olmadan, is oluşumuna neden olan öncü moleküller önlenemekte ve yanma sırasında parlak olmayan alev meydana gelmektedir. Yüksek hava fazlalık oranı nedeni ile silindir içerisindeki bölgesel sıcaklıklar, buji ile ateşlemeli motorlardaki alev cephesinin önünde ya da diesel yakıt huzmesinin stokiyometrik bölgelerinden daha düşük olmaktadır. Difüzyon alevi oluşmadan ön karışimli homojen dolgunun tamamen yanması ile termal NO_x emisyonlarının oluşumu azalmaktadır. Bununla birlikte, yakıt ve havanın homojen olarak hazırlanıp sıkıştırılması sırasında silindir duvarlarının ıslanması, piston tepesinde ve silindir ile segmanlar arasında dolgunun birikmesine yol açarak HC emisyonlarının artışına neden olmaktadır. Bu yüzden düşük uçuculuğa sahip yakıtlar silindir duvarlarının ıslanmasında önemli derecede problem teşkil ederek HC emisyonlarının artışında önemli rol oynayabilmektedir. Bununla birlikte, dolgunun oldukça fakir oluşu ve düşük silindir içi sıcaklıkları nedeniyle silindir duvarlarına yakın kısımlarda kısmi yanmanın oluşmasına ve art yanma oksidasyon oranının azalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden diesel ya da buji ile ateşlemeli motorlara göre tipik olarak HCCI yanmasında CO emisyonları yüksek olabilmektedir. NO_x ve is emisyonlarındaki iyileşmelerle birlikte yukarıda anlatılan sebepler nedeniyle genellikle silindir içi HC ve CO emisyonlarında artış görülmektedir. Klasik diesel yanmasında reaksiyon oranı, türbülans karışimli (difüzyon) yanmayla, buji ile ateşlemeli motorlarda ise yanma odasında oluşan belirli bir alev cephesinin ilerlemesiyle kontrol edilmektedir. HCCI motorlarda yanma reaksiyonları, homojen dolgunun belli bir sıcaklığa erişmesi ile tüm yanma odasının her yerinde eş zamanlı

olarak kendi kendine başlamaktadır. Bu yüzden daha hızlı bir şekilde ısı dağılımı gerçekleşmektedir. Homojen dolgunun kendi kendine tutuşma sıcaklığını sağlayabilmek ve yanmanın faz evresini kontrol edebilmek için uygulamalar genellikle iki ana yaklaşımda yapılmaktadır. İlk gruptaki uygulamalar, karışımın termodinamik özelliklerinin zaman-sıcaklık ile birlikte gelişim aşamalarını değiştirmek için uygulanan metotlardır. Bu uygulamalar; yakıt enjeksiyon zamanlamasının değişimi, emme dolgusunun sıcaklığının değişimi, sıkıştırma oranının değişimi ve değişken supap zamanlaması gibi yöntemlerdir. İkinci grup uygulamalar; iki ya da daha fazla yakıtın kullanılması, bazı katkı maddeleri ile yakıtların özelliklerinin, farklı yakıt-hava oranları ile yakıt kompozisyonunun değiştirilmesi ya da egzoz gaz resirkülasyonu (EGR) tarafından karışımın ısı kapasitesinin ve oksijen miktarının değişimi ile yakıtın reaktivitesinin kontrol edilmesini içermektedir. Kimyasal reaksiyonların başlangıcı, termodinamik koşullar ve silindir dolgusunun kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak gerçekleşmektedir.

1.3 Hipotez

Yapılacak deney ile homojen dolgulu motorların hava soğutma tek silindirli motorlardaki uygulanıp uygulanamayacağı, emisyon miktardalarındaki azalma gösterilecek hava kirliliğinin ve emisyon standartlarını sağlayabilmek için yapılacak çalışmalara katkı sağlayacaktır.

HCCI YANMA TARİHÇESİ

2.1 HCCI Üzerine Yapılan Çalışmalar

HCCI yanma başlangıçta iki stroklu içten yanmalı motorlar için bir alternatif yanma modu olarak keşfedilmiştir. Daha yüksek yakıt ekonomisi elde etme gayretleri otomotiv sanayisinde bu yanma moduna olan ilgiyi yeniden körüklemiştir. Bu yanma modu binek taşıtları ve kamyonlar için düşük emisyon ve yüksek yakıt ekonomisi potansiyeline sahiptir. HCCI yanma prosesi literatürde çeşitli isimlerle anılmaktadır. HCCI yanma prosesinin ilk pratik uygulaması, HCCI yanma modunun iki stroklu motorların çalışmasını iyileştirmek üzere kullanılabileceği fark edildiğinde Onishi vd. tarafından gerçekleştirilmiştir. İki stroklu motorların dezavantajları, düşük yüklerde yüksek miktarda art gaz ve motor durdurulduğunda yanmanın devam etme eğiliminde olmasıdır. Onishi ve yardımcıları hem iç art gazların yüksek seviyelerine hem de yüksek ilk dolgu sıcaklıklarına dayanan bir yanma modu tasarlayarak yukarıda ki olumsuzlukları güce dönüştürdüler. Silindir içindeki dolgunun kendiliğinden tutuşmasıyla sonuçlanan koşulların yaratılmasıyla emisyonlarda önemli azalmaların ve yakıt ekonomisinde iyileşmenin elde edilebileceğini bulmuşlardır. Bu yanma modunu “aktif termo-atmosferik yanma” veya ATAC diye adlandırdılar. Düşük yüklerde iki stroklu motorların diğer bir problemi de yüksek çevrimsel değişkenliğe sahip olmalarıdır. Motor ATAC yanma modunda çalışırken çevrimden çevrime yinelenebilirlik daha iyi hale gelir. Bir optik motorda yanma prosesini gözetleyerek şunlar bulunmuştur; bu yanma modunda oda boyunca yayılan hiçbir ayırt edilebilir alev cephesi yoktur. Yerine, yanma sırasında tüm odanın her tarafında aşamalı (kademeli) yanma reaksiyonlarının ve yoğunluk varyasyonlarının mükemmel bir

modelini gözlemlenmiştir. Onishi vd. HCCI yanmanın elde edilmesi için kritik parametreleri şöyle tanımlamışlardır. Kendi kendine tutuşma için yeteri kadar yüksek sıcaklıkları elde etmek üzere yüksek seviyede seyreltim. Art gaz ve taze dolgu arasında uniform karışım. Çevrimden çevrime yinelenebilir dolgu değişimidir. Onishi, art gaz ile yüksek seviyede karışım elde etmek üzere dolgu değişimi kesitine bir transfer manifoldu eklemiştir. Böylece silindir içinde daha yüksek hızlar ve daha iyi karışım elde ettirmiştir. HCCI operasyonu en düşük yüklerde veya ağır yükte sağlanamamıştır. Her ne kadar düşük yüklerde art gazların büyük miktarları varsa da, egzoz gaz sıcaklığı düşüktür ve sıkıştırma sırasında neticelenen kütle averaj sıcaklığı kendi kendine tutuşmayı başlatmak için yeteri kadar yüksek değildir. Benzer şekilde ağır yüklerde ilave taze dolgu art gazların yerini alır ve yine sıcaklık kendi kendine tutuşmayı sağlamak için yeteri kadar yüksek değildir. Kararlı HCCI yanma, yine de bu düşük ve ağır yük sınırları arasında 1000 d/dak.' dan 4000 d/dak.' ya kadar uzanan motor hız aralığında 7.5:1' luk sıkıştırma oranıyla benzin kullanılarak sağlanabilmiştir. Bu öncü çalışma NiCE' de doğrudan doğruya Pratik uygulamaya konuldu. 10GC motoru bir stasyonel jeneratör olarak piyasaya sürülmüştür. NiCE' de gerçekleştirilen çalışmayla aynı zamana rastlayan bir deneysel çalışma Toyota' da HCCI yanma üzerine gerçekleştirilmiştir. Karşı pistonlu iki stroklu bir motorda HCCI yanmanın spektroskopik analizini gerçekleştirdiler. NiCE grubu tarafından elde edilen neticelere benzer şekilde Noguchi vd., kısmi-yük koşullarında iki stroklu motorlara HCCI yanmanın oldukça uygun olduğunu buldular. Motor HCCI modunda çalıştırıldığı esnada bir uçtan bir uca yanma hızları çok hızlıydı, yanma son derece düzgündü ve motor, mükemmel yakıt tüketimini ve düşük emisyonları sağlamıştır. Optik araştırmalarla silindirin her tarafında birçok noktada tutuşmanın gerçekleştiğini ve yanma sırasında hiçbir ayırt edilebilir alev cephesi gözlenmediğini notlarına geçirdiler. Ara ürünleri ortaya çıkarmak üzere spektroskopik metotların kullanılmasıyla kendi kendine tutuşma olayından önce silindir içerisinde CH₂O, HO₂ ve O radikallerinin yüksek seviyeleri ölçülmüştür. Bu ara ürünler, daha büyük bir oranı parafinik hidrokarbon olan yakıtların düşük sıcaklıkta kendi kendine tutuşma kimyasının karakteristiğidir. Tutuşma gerçekleştikten sonra CH, H ve OH radikallerini yüksek yoğunlukta gözlemlədiler. Bu radikaller, ana yanma sırasında yüksek sıcaklık kimyasının göstericisidirler. Bu ara ürün değerleri, geleneksel SI motor yanmasında gözlenenlerden önemli derecede farklıdır. Daha doğrusu bu değerler, son gazın kendi kendine tutuşması ve vuruntusu ile iştirakli ara ürünleri daha fazla anımsatmaktadır. Bu durum, bir SI motordaki

kendi kendine tutuşma ve HCCI yanma arasındaki benzerliklerin daha ileri kanıtıdır. İki stroklu motorlardaki önceki çalışmaya dayandırarak Najt ve Foster çalışmayı dört stroklu motorlara uylamışlardır. HCCI yanmanın temel fiziğini daha fazla anlamak için çalışmışlardır. Deneyler bir dizi motor hızında ve seyreltim seviyesinde parafinik ve aromatik yakıtların karışımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Motor, iki stroklu motorlardaki iç art gazların faydası olmadan çalıştırıldığı için HCCI yanmasını elde etmek üzere emme havası, yüksek sıcaklıklara ısıtılmak zorundadır. Basınç datasının ısı açığa çıkış analizi ile birlikte basitleştirilmiş kimyasal kinetik modellemeyi kullanarak HCCI yanma prosesinin “tutuşma” ve “ana enerji açığa çıkışı” şeklinde iki yarı-bağımsız prosese ayrılabilceğini göstermişlerdir. Kendi kendine HCCI tutuşmasının, SI motorlarda vuruntu ile sonuçlanan benzer düşük sıcaklık (1000 K’ den aşağı) kimyası ile kontrol edildiği ve ana enerji açığa çıkışının, CO oksidasyonu tarafından domine edilen yüksek sıcaklık (1000 K üzeri) kimyası ile kontrol edildiği sonucuna vardılar. Sadece kimyasal kinetiklere (reaksiyon mekanizmalarına) dayandırılan bir korelasyonu enerji açığa çıkış hızı için geliştirdiler. Bu korelasyon, sıkıştırma oranı, denklik oranı, seyreltim seviyesi, motor hızı ve yakıt tipi değişikliklerine HCCI yanma prosesinin gözlemlenen cevabını açıklar. Bu sonuçlara ve Onishi ve Noguchi’ nin önceki çalışmasına dayandırarak HCCI yanmanın silindir içindeki dolgunun bileşimi, basıncı ve sıcaklığı ile kontrol edilen bir kimyasal kinetik yanma prosesi olduğu sonucuna vardılar. Alev yayılımını kullanan geleneksel bir SI motorundan ve yakıt/hava karışımına çok bağımlı diesel yanmasından farklı olarak, Najt ve Foster HCCI yanmanın bir karışım kontrollü yanma prosesi olmadığı sonucunu çıkardılar. Daha doğrusu bir HCCI motorunun sıkıştırma tutuşmalı bir karışım kimyasal reaktörü gibi davrandığı sonucuna vardılar. Ayrıca HCCI yanmanın tutuşma prosesinin kontrolsüzlüğünden ve sınırlı çalışma aralığından dolayı olumsuzluk yaşadığını not ettiler. Bunlar iki stroklu HCCI motorlarda Onishi ve Noguchi tarafından tanımlanan benzer problemlerdir. Bundan başka karışımı seyreltmek için harici egzoz gazının tekrar sirkülasyonu (EGR) kullanıldığından beri, kendi kendine tutuşmayı başlatacak olan aktif radikallerin silindir içerisinde tekrar çevrime katılmalarının küçük bir olasılığı söz konusudur. İki stroklu motorlarda radikaller HCCI yanmasında rol alabilmekte iken, kendi kendine HCCI tutuşmasını sağlamak için onlara ihtiyaç olmadığını bu çalışma gösterdi. Thring, tam karışimli benzin ile çalışan bir HCCI motorunun performansını inceleyerek Najt ve Foster’ in dört stroklu motorlardaki çalışmasını daha ileri taşıdı. Tek silindirli motorun çalışma rejimi, hava/yakıt denklik oranının ve harici

EGR miktarının bir fonksiyonu olarak ayrıntılı olarak düzenlenmiştir. HCCI operasyonunun sınırlamaları tekrar not edildi, çalışma rejimi kısmi-yük operasyonu ile sınırlıdır ve kendi kendine tutuşma zamanlamasının kontrolü problemlidir. Bu incelemede HCCI yanma modunun potansiyel olarak bir motor çalışma stratejisine entegre edilebileceği önerildi. Bu durumda motor, kısmi yüklerde HCCI yanmasıyla çalışır ve ağır yüklerde SI alev yayılımına geçer [1].

2.2 HCCI Yanma Avantajları

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar (HCCI), konvansiyonel buji ile ateşlemeli ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorların ortak avantajlarını barındırmaktadır. Yüksek termik verim ve düşük egzoz emisyonlarını karşılayabilecek potansiyele sahip yeni bir kavram olarak gelecek vaat etmektedirler. Bir diesel ya da buji ile ateşlemeli motor üzerinde değişikliğe gidilerek HCCI motoruna dönüşüm sağlanabilmektedir. HCCI yanması, fakir ve homojen yakıt/hava dolgunun kendi kendine tutuşması ile başlamaktadır. Motor yükü, emme havasında kısılma olmaksızın hava/yakıt oranının kontrolü ile sağlanmaktadır. Genellikle motorun sadece kısmi yüklerinde homojen dolgulu olarak oldukça fakir karışımlarda çalışabilmektedir. Klasik diesel motorlarında, yakıt olarak zengin ve fakir bölgelerin meydana gelmesi ile NO_x-is oluşumu gerçekleşmektedir. İdeal HCCI yanma işleminde, yanma odasının genelinde ve bölgesel alanlarındaki lamda ve sıcaklık oranlarında bir farklılık olmadan, yüksek hava fazlalık oranı ile hava/yakıt karışımı homojen olarak hazırlanmaktadır. Homojen ve fakir dolgunun sıkıştırılması ile yanma odasındaki karışımının tümünün eşzamanlı olarak kendi kendine tutuşması sağlanabilmektedir. Böylece zengin yakıt karışım bölgeleri mevcut olmadan, is oluşumuna neden olan öncü moleküller önlenmekte ve yanma sırasında parlak olmayan alev meydana gelmektedir. Yüksek hava fazlalık oranı nedeni ile silindir içerisindeki bölgesel sıcaklıklar, buji ile ateşlemeli motorlardaki alev cephesinin önünde ya da diesel yakıt huzmesinin stokiyometrik bölgelerinden daha düşük olmaktadır. Difüzyon alevi oluşmadan ön karışimli homojen dolgunun tamamen yanması ile termal NO_x emisyonların oluşumu azalmaktadır. Bununla birlikte, yakıt ve havanın homojen olarak hazırlanıp sıkıştırılması sırasında silindir duvarlarının ıslanması, piston tepesinde ve silindir ile sekmanlar arasında dolgunun birikmesine yol açarak HC emisyonlarının artışına neden olmaktadır. Bu yüzden düşük uçuculuğa sahip yakıtlar silindir duvarlarının ıslanmasında

önemli derecede problem teşkil ederek HC emisyonlarının artışında önemli rol oynayabilmektedir. Paralelinde dolgunun oldukça fakir oluşu ve düşük silindir içi sıcaklıkları nedeniyle silindir duvarlarına yakın kısımlarda kısmi yanmanın oluşmasına ve art yanma oksidasyon oranının azalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden diesel ya da buji ile ateşlemeli motorlara göre tipik olarak HCCI yanmasında CO emisyonları yüksek olabilmektedir. NO_x ve is emisyonlarındaki iyileşmelerle birlikte yukarıda anlatılan sebepler nedeniyle genellikle silindir içi HC ve CO emisyonlarında artış görülmektedir. Klasik diesel yanmasında reaksiyon oranı, türbülans karışım (difüzyon) yanmayla, buji ile ateşlemeli motorlarda ise yanma odasında oluşan belirli bir alev cephesinin ilerlemesiyle kontrol edilmektedir. HCCI motorlarda yanma reaksiyonları, homojen dolgunun belli bir sıcaklığa erişmesi ile tüm yanma odasının her yerinde eş zamanlı olarak kendi kendine başlamaktadır. Bu yüzden daha hızlı bir şekilde ısı dağılımı gerçekleşmektedir. Homojen dolgunun kendi kendine tutuşma sıcaklığını sağlayabilmek ve yanmanın faz evresini kontrol edebilmek için uygulamalar genellikle iki ana yaklaşımda yapılmaktadır. İlk gruptaki uygulamalar, karışımın termodinamik özelliklerinin zaman-sıcaklık ile birlikte gelişim aşamalarını değiştirmek için uygulanan metotlardır. Bu uygulamalar; yakıt enjeksiyon zamanlamasının değişimi, emme dolgusunun sıcaklığının değişimi, sıkıştırma oranının değişimi ve değişken supap zamanlaması gibi yöntemlerdir. İkinci grup uygulamalar; iki ya da daha fazla yakıtın kullanılması, bazı katkı maddeleri ile yakıtların özelliklerinin, farklı yakıt-hava oranları ile yakıt kompozisyonunun değiştirilmesi ya da egzoz gaz resirkülasyonu (EGR) tarafından karışımın ısı kapasitesinin ve oksijen miktarının değişimi ile yakıtın reaktivitesinin kontrol edilmesini içermektedir. Kimyasal reaksiyonların başlangıcı, termodinamik koşullar ve silindir dolgusunun kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak gerçekleşmektedir [2].

HCCI TEKNİKLERİ VE LİTARATÜRDEKİ UYGULAMALARI

3.1 Genel Tanımlama

Diesel motorları son on yıldan daha uzun bir süredir gittikçe katılan emisyon mevzuatı ile karşı karşıyadır. Emisyonlardaki mevcut iyileştirmelere rağmen yeni standartlar, 2007 – 2010' da yürürlüğe girmiştir. Bu yeni standartlar, hem NO_x hem de partikül maddesi (PM) emisyonlarını daha düşük değerlere çekecektir. Bu yeni standartlar gelişimcidir (zorlayıcıdır) ve bu standartlar, motor çıktısı emisyonları azaltmak için gelişmiş yanma sistemlerinin gelişimini, uygun, güvenilir ve fiyat etkili ard işlem sistemlerinin gelişimini ve motor ve ard işlem sistemi operasyonlarının beraber uygulanışındaki iyileştirmeleri kapsayan stratejilerin bir kombinasyonunu muhtemelen gerektirecektir. HCCI yanma, diesel vari yüksek verimi (verimlilikleri) sürdürmesine karşın hem NO_x hem de partikül (PM) emisyonlarını büyük oranda azaltma potansiyeline sahip olan cazip bir gelişmiş yanma prosesidir. Klasik diesel yanmasından (operasyonundan) farklı olarak HCCI yanma bir alev cephesinin ilerleyişini kullanmaz. Daha doğrusu yanma, dolgu gaz (karışım) hacminin her tarafındaki birçok noktada içten gelen kendi kendine tutuşmanın sonucu olarak meydana gelir. HCCI' nin bu eşsiz özelliği çok fakir veya seyreltik karışımların yanmasına imkan verir ki düşük yanma sıcaklıklarının sonucu olarak motor çıktısı NO_x emisyonları azalır. Aynı zamanda klasik diesel yanmasından farklı olarak (PM) emisyonları çok düşük olabilmektedir çünkü dolgu iyice karışmıştır. HCCI' nin ilk uygulamaları benzin yakıtlı motorlarda gerçekleştirildi ve günümüzde bu teknolojinin takibi sıkı bir şekilde sürdürülmektedir. Bununla birlikte diesel motorların emisyonlarının azaltılmasının gerekliliği, 1990' lı yılların ortasından itibaren diesel yakıtlı HCCI' nin potansiyelinin araştırılmasına hız verildi. Diesel yakıtlı HCCI operasyonunun tercih edilmesi

için birçok sebep vardır. Diesel yakıtlı HCCI operasyonu özellikle orta ve ağır ölçekli kamyon motoru pazarı için tercih edilmelidir. Şu da bir gerçektir ki taşıt motorlarında HCCI' nın kullanımı yanma sistemi çift modlu motorlarla sınırlıdır. HCCI' nın bu kullanım şekli yakın gelecek için geçerlidir. Soğukta motoru harekete geçirmedeki ve ağır yüklerde HCCI motorlarının yanma hızlarının kontrol edilmesindeki zorluklardan ötürü (bu koşullar motorun çalışma sahasının 1/3' ü ila 1/2' lik kısmını kapsar) bu koşullarda, klasik diesel veya buji ateşlemesi (SI) operasyonu kullanılır. Çalışma sahasının geri kalanında HCCI' nın avantajlarından faydalanılır. HCCI operasyonu için tahmin edilen yük limitinin üzerindeki yüklerde çalışma, kamyon motorlarının pek çoğu için sürüş çevriminin önemli bir kısmını teşkil ettiği için motor HCCI modunda değilken motorun bir diesel motor gibi çalıştırılmasının önemli verim avantajları vardır. Ayrıca diesel motorları SI motorlarına göre geçmişten bugüne deign güvenilirlik ve işletme masrafları avantajlarına sahiptir. Neticede tüm ağır yük kamyonları genellikle diesel yakıtı kullandığı için gerekli tesisler bakımından diesel yakıtı tercih edilir. HCCI motorları kullanıldığında rafineri üretimlerini daha uçucu yakıtlara dönüştürmek ve yakıt dolum istasyonlarında iki yakıt çeşidini bulundurmak çok pahalı olacaktır. Bu sebeplerden ötürü iki yakıt çeşidi kamyon gövdesinde taşınmadıkça HCCI operasyonu, bu kamyon motorlarında diesel yakıtı ile başarılmak zorundadır. Diesel motorlarda düşük yükler için HCCI' nın kullanımı, aynı zamanda potansiyel (muhtemel) diesel motor ard işlem sistemleriyle elde edilen benzer emisyon sonuçlarını verir. Diesel ard işlem teknolojilerinin birçoğu (örneğin NOx adsorpsiyon katalizörleri), egzoz gazı sıcaklığının düşük yüklerde normal diesel operasyonu tarafından üretilen egzoz gazı sıcaklıklarından yüksek olmasını gerektirir. HCCI' nın kullanımı, ard işlem proseslerinin uygulanmasının daha zor olduğu düşük yük koşullarında NOx ve PM emisyonları için ard işlem ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Bununla birlikte düşük yükteki HCCI operasyonu, düşük sıcaklıklarda hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) emisyonlarını kontrol etmesi için oksidasyon katalizörlerine muhtemelen gereksinim duyacaktır. Yukarıda özetlenen sebeplerden ötürü her ne kadar diesel yakıtlı HCCI operasyonu tercih edilse de iki ana sebepten ötürü diesel yakıtı ile uygun HCCI yanmanın elde edilmesi zordur. Birinci sebep şudur. Önemli derecede buharlaşma meydana gelmesi için yükseltilmiş dolgu sıcaklıklarına gerek vardır ki bu yüksek sıcaklıklar, bir ön karışımli homojen dolgu modelinin oluşturulmasını zorlaştırır. İkinci sebep ise diesel yakıtın soğuk-yanma kimyasına sahip olmasıdır. Bu soğuk yanma kimyası, sıkıştırma

sırasındaki sıcaklıklar 800 K' ni aştığında çabucak kendi kendine tutuşmayı sağlar. Yukarıdaki olaylar aşırı derecede gelişmiş yanma fazıyla sonuçlanabilir. Bu nedenle sıkıştırma oranlarının azaltılması ve düşük emme havası sıcaklıkları gerekir. Bununla birlikte HCCI' nin birçok potansiyel avantajından ötürü diesel yakıtlı HCCI' nin anlaşılması ve HCCI' nin ticari uygulamaları için bazı yaklaşımların geliştirilmesi adına büyük çabalar sarf edilmektedir. Diesel yakıtlı HCCI' nin gelişimi ve araştırmaları yakıt tedariki tekniklerine göre üç ana katagoride incelenebilir. Ön karışimli HCCI operasyonunda yakıt, emme prosesinden önce havanın içine dağıtılır. Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda yakıt, kendi kendine tutuşma olayından önce karışımın oluşabileceği şekilde ÜÖN' nin yeterince uzağında silindir içerisine püskürtülür. Geç direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda yakıt, klasik diesel yanmasındakinden daha geç püskürtülür. Bu operasyon, hızlı karışım oluşumu için yüksek türbülans seviyeleriyle ve tutuşmayı geciktirmek için egzoz gazının tekrar sirkülasyonunun (EGR) yüksek seviyeleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamalar kendi kendine tutuşma olayından önce yakıt ve havanın yeterince karışmış olmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca çeşitli yakıt püskürtme stratejileri için tutuşma zamanlamasını control etmenin ve ısının açığa çıkış hızını yavaşlatmanın bir çaresi olarak son zamanlarda su püskürtmenin kullanımı incelenmektedir. Müteakip dört ana kısım, diesel ve diesel benzeri yakıtları kullanan HCCI operasyonları için yukarıdaki üç tip yakıt tedariki tekniğini ve su püskürtmesini kapsayan literatürü gözden geçirmektedir [3].

3.2 Ön Karışimli HCCI Operasyonu

Manifolda yakıtın püskürtüldüğü klasik bir SI motoruna benzer bir şekilde emme supabının yukarı kısmında emme havasının içine yakıt püskürtülmesi bir ön karışimli dolgunun elde edilmesi için belki de en basit yaklaşımdır. Bu yaklaşım, geçmişte diesel isini azaltmak için ,diesel yakıtlı HCCI operasyonuna ait yakın tarihteki araştırmalarda ön karışimli diesel yakıtlı HCCI operasyonunun diğer incelemeler ile birlikte ele alındığı daha yeni çalışmalarda kullanıldı. Ryan III ve Callahan, kendilerinin öncü çalışmasında emme havası akımına diesel yakıtını tedarik etmek üzere bir PFI yakıt enjektörü kullandılar. Yakıt püskürtme noktasının yukarı kısmında bir emme havası ısıtıcısının kullanımı ön ısıtmayı gerçekleştirdi ve motorun sıkıştırma oranı 7.5:1 ila 17:1 arasında değiştirildi. Aynı zamanda EGR' de uygulandı. Yukarıdaki inceleme ve aynı motorda devam ettirilen incelemeler, diesel yakıtlı HCCI

operasyonu için üç önemli sonucu belirledi. Birinci sonuç şudur. Normal diesel sıkıştırma oranları kullanıldığında çok erken tutuşma ve neticesinde vuruntu meydana gelmektedir. Memnun edici sonuçlar EGR' nin miktarına ve emme havası sıcaklıklarına da bağlı kalarak sıkıştırma oranının 8:1 ile 13:1 arasındaki değerlerinde elde edildi. 9:1 ile 11:1 arasındaki sıkıştırma oranları, yakıt tedarigi derecelerinin (fakir yada zengin karışım) en geniş aralığında uygun bir yanma sağladı fakat yanma fazı, bu düşük sıkıştırma oranlarıyla bile hala gelişikti. Elde edilen ikinci sonuç şudur. Sıvı yakıtın emme sistemindeki yüzeylerde birikimini azaltmak için 135 °C ile 205 °C arasında değişen epeyce yüksek emme havası sıcaklıkları gereklidir. Aynı zamanda emme havası sıcaklıkları 130 °C' nin altına düştüğünde duman emisyonları (is) önemli derecede arttı. Araştırmacılar bu durumun yanmanın iri damlacıkların çevresinde dağınık difüzyon alevleri şeklinde gerçekleşmesinden ötürü meydana geldiğini öne sürdüler. Elde edilen üçüncü sonuç şudur. Yanmamış HC emisyonları oldukça yüksektir. Düşük yanma veriminin, azaltılmış sıkıştırma oranlarının ve optimal olmayan yanma fazının bir sonucu olarak normal direkt püskürtmeli diesel yanmasına (operasyonuna) göre yaklaşık %28' lik bir ortalama ile yakıt sarfiyatı arttı. Bununla birlikte HCCI operasyonunda NOx emisyonları, bir spesifik güç temelinde klasik diesel yanmasındakilerden (operasyonundakilerden) yaklaşık olarak 100' lük bir faktörün etkinliğiyle daha düşük seviyelere indi. Yukarıda not edilen optimal aralıktaki emme havası sıcaklıklarıyla bütün HCCI noktaları için duman seviyeleri aynı zamanda 0' a yakın azaldı. Gray ve Ryan III (1997), aynı zamanda yanma odası yüzeylerinde seramik kaplama kullanımını araştırdı. Her ne kadar tüm değişimler çok miktarda olmasa da seramik kaplama uygulaması ile şunları not ettiler; düşük emme havası sıcaklıklarında yakıt tedarigi derecelerinin daha geniş bir aralığında memnun edici HCCI operasyonu sağlanabilmektedir ve aynı zamanda yanma veriminde küçük bir iyileşme söz konusudur. Diğer araştırmacıların müteakip incelemelerinde HCCI operasyonu için ön karışimli yakıt tedarigi tekniği uygulandı ise de bu incelemeler, daha kapsamlı araştırmaların bir parçası olarak yürütüldü. Christensen vd. (1999a), değişik yakıt tipleriyle HCCI operasyonunun kontrol edilmesi (sağlanması) için değişken sıkıştırma oranı araştırmalarının bir parçası olarak PFI yakıt tedarigi yöntemiyle diesel yakıtlı HCCI operasyonunu araştırdılar. Elde edilen sonuçlar, [Ryan III ve Callahan, (1996); Gray ve Ryan III, (1997)]' nin kilerle genel olarak uyuşmaktadır. Memnun edici HCCI operasyonunun 10:1 ile 11.2:1 arasındaki sıkıştırma oranlarında ve bu sıkıştırma oranlarına sırasıyla tekabül eden 130 °C ile 90 °C arasındaki

emme havası sıcaklıklarında elde edildiğini buldular. Bununla birlikte tutuşma zamanlamasının (tutuşma gecikmesinin) üst ölü noktadan önce yaklaşık 5° krank açısı kadar bir avansla gerçekleşmesinin “iyileşmiş yanma kalitesi ve kararlı operasyon” elde etmek için gerekli olduğunu belirttiler. Duman emisyonları bazı koşullarda yüksekti ve her ne kadar NOx emisyonları çok düşük ise de (0.03 g/kWh) benzinli çalıştırılmadaki kadar düşük değildi. Bu sonuçların diesel yakıtının az buharlaşmasının homojen olmayan bir karışım oluşturmasından ötürü meydana geldiği düşünülürdü. Diğer bir grup, ön karışimli diesel yakıtlı HCCI operasyonunu normal (DI) diesel püskürtmesi ile birleştirerek araştırdı (Suzuki vd., 1998; Odaka vd., 1999). Alperstein vd.’nin 1958’deki is inceleme çalışmalarındakinden farklı olmayan bir teknik kullanıldı. Bu çalışmada bir benzin tipi direkt püskürtme enjektörü (GDI) 5 MPa püskürtme basıncıyla emme manifold içerisine diesel yakıtını tedarik etmek için kullanıldı. Diğer araştırmalarda da görüldüğü üzere diesel-vari sıkıştırma oranı kullanıldığında dolgunun ön karışimli kısmının yanma fazı ciddi şekilde aşırı gelişiktir öyle ki ağır yüklerde vuruntu problemi ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda ön karışimli diesel yakıt tedariki tekniğinde HC emisyonları çok yüksektir ve düşük yanma verimi ve zamansız (yersiz) yanma fazından ötürü yakıt sarfiyatı artar. Bu çalışmanın ana hedeflerinden biri, (DI) diesel püskürtmesiyle ateşlenen ön karışimli dolgunun yanma (tutuşma) zamanlaması kontrolünün elde edilmesidir. Bu olay izooktanın ön karışimli yakıt olarak kullanıldığı bazı koşullarda sağlandı. Bununla birlikte diesel yakıtı kullanıldığında ön karışimli yakıtın kendi kendine tutuşması daima direkt püskürtülen yakıtın kendi kendine tutuşmasından önce meydana gelmektedir. Direkt püskürtme üst ölü noktadan 15° krank açısı önce gerçekleştirildi (Suzuki vd., 1998; Odaka vd., 1999). Diesel yakıtına MTBE’ nin ilave edilmesi ön karışimli yakıtın kendi kendine tutuşmasını geciktirdi. %50’ lik MTBE ve %50’ lik diesel yakıt karışımının kullanılmasıyla ön karışimli yakıtın kendi kendine tutuşmasındaki gecikme, ÜÖN civarlarında gerçekleştirilen direkt püskürtme tarafından yanmanın kontrol edilmesi için yeterlidir. Böylece arzu edilen yanma zamanlaması kontrolü, diesel yakıtından farklı diğer yakıtlarla da başarıldı. Ön karışimli diesel yakıtlı HCCI operasyonu aynı zamanda emme manifoldu üzerine yerleştirilen 12 MPa püskürtme basınçlı bir kapalı tip enjektör kullanılarak gerçekleştirildi. HCCI operasyonunun çalışma sahasının genişletilmesi için su püskürtmesi kullanımı araştırmalarının bir parçası olarak ön karışimli diesel yakıtlı HCCI operasyonu sağlandı (Kaneko vd., 2002). Bu incelemede emme havası sıcaklığı 20 °C’ de tutuldu ve hiçbir ısı

buharlaşmaya yardım etmesi için tedarik edilmedi. Diesel yakıtı kullanıldığında tahminen (muhtemelen) diesel yakıtının silindir duvarına yapışmasından ötürü HC emisyonları arttı ve yağlama yağı incelme. Diesel yakıtı kullanıldığında aynı zamanda epeyce NOx ve kayda değer duman emisyonları söz konusudur ki bu durum, karışımın yeterince homojen olmadığına işaret etmektedir. Diesel yakıtı distilasyon karakteristikleri benzininkine benzer olan hafif nafta ile değiştirildiğinde yukarıdaki problemler yok edildi. Bununla birlikte Kaneko vd.' nin (2002) araştırmaları, diesel yakıtının tek kayda değer avantajını gösterdi. Naftanın 27' lik setan sayısı ile kıyaslandığında diesel yakıtı 48' lik bir setan sayısına sahip olmasına rağmen vuruntu sınırına ulaşılması öncesinde diesel yakıtı önemli derecede daha yüksek yakıt tedariki derecelerinde (daha zengin karışımlarla) HCCI operasyonuna olanak sağladı. Vuruntuyla sınırlı IMEP, diesel yakıtı ve nafta için sırasıyla yaklaşık 5 bar ve 3.8 bar idi. Bu farklılık diesel yakıtlı dolgu karışımının yeterince homojen olmayışına dayandırıldı. Diesel gibi yakıtlar, iki safhalı tutuşma prosesiyle sonuçlanan soğuk yanma kimyasına sahiptir. Soğuk yanma safhası (1.safhadır) vasıtasıyla açığa çıkan ısının miktarı yakıt/hava denklik oranına (f) dayandığı için ana tutuşmanın başlangıcı (2.safhadır) denklik oranı değıştikçe farklı hızlarda gerçekleşir. Yüksek denklik oranlı karışımlarda ana tutuşmanın başlangıcı daha hızlı olmaktadır (Kelly-Zion ve Dec, 2000). Bu nedenle homojen olmayan diesel yakıtı/hava dolgusunun farklı denklik oranlı bölgelerinin farklı hızlarda kendi kendine tutuşacağı tahmin edilmektedir. Bu durum daha düşük bir toplam ısı açığa çıkış hızına neden olur ki böylece vuruntu için daha düşük bir doğal eğilim söz konusudur . İzooktan gibi tek-safhada tutuşan yakıtlar için tutuşma zamanlamasının denklik oranı üzerine bu şekilde bir bağımlılığı gözlenmedi (Kelly-Zion ve Dec, 2000). Ön karışimli yakıt tedariki tekniğini kullanan yukarıdaki araştırmaların sonuçları, esas itibariyle diesel yakıtlı motorların NOx ve duman emisyonlarının azaltılması için HCCI operasyonunun yüksek potansiyelini göstermektedir. Bununla birlikte araştırma sonuçları aynı zamanda şunu da belirtmektedir. Seri üretim diesel yakıtlı motorlarda uygulanabilir (pratik) bir teknikle ön karışimli HCCI operasyonu gelişecek gibi değildir. Ön karışimli HCCI operasyonunda diesel yakıtı kullanımıyla ilgili zorlukları aşmak için alternatif yakıt tevzi ve karışım oluşturma teknikleri muhtemelen gerekecektir [4].

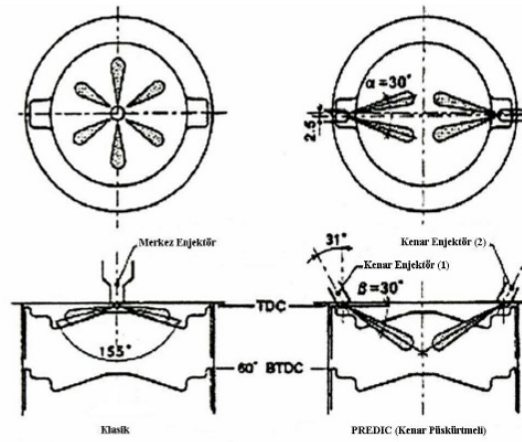
3.3 Erken Direkt Püskürtmeli HCCI Operasyonu

Üst ölü noktadan çok önce direkt yakıt püskürtme prosesi, diesel yakıtlı HCCI operasyonu için belki de yaygın olarak araştırılan yaklaşımdır. Emme prosesindeki (manifoldundaki) ön karışım oluşumuyla kıyaslandığında bu yaklaşım, üç potansiyel avantaj sağlamaktadır. Sıkıştırma strokunun belli bir aşamasından sonra yakıtın püskürtülmesiyle silindir içerisindeki daha yüksek sıcaklıklar ve yoğunluklar, diesel yakıtının buharlaşmasına ve karışım oluşumunun gelişimine yardım edebilir. Bu durum daha soğuk emme havası sıcaklıklarının kullanılmasına olanak verir ki böylece dolgunun erken tutuşma doğal eğilimi azaltılır. Özenle dizayn edilmiş bir enjektörün kullanılmasıyla yakıtın silindir duvarını ıslatmasını minimize etmenin olasılığı vardır. Yakıtın silindir duvarını ıslatması, yanma yetersizliğine ve yağın seyrelmesine neden olabilir (Akagawa vd., 1999; Kaneko vd., 2002). Prensipinde hem HCCI hem de klasik diesel operasyonu için sadece tek yakıt tedariki sistemi gereklidir. Bununla birlikte literatürde rapor edilen HCCI DI-yakıt tedariki sistemlerinin tümü, klasik diesel yanması (operasyonu) ile bağdaşmaz. HCCI operasyonu için erken direkt püskürtmenin ana dezavantajı, yakıt/hava karışımının oluşması için daha az sürenin mevcut olmasıdır. Eğer karışım yeterince tam (homojen) değilse NO_x ve PM emisyonları yüksek olabilir. Ayrıca yakıtın aşırı nüfuziyetinden ötürü silindir duvarının kolayca ıslanması söz konusudur. Neticede püskürtme zamanlaması, klasik diesel yanmasındaki (operasyonundaki) kadar yanma fazının direkt olarak kontrol edilmesinde etkili bir çare olmadığı için erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda yanma fazı kontrolünün hala kritik bir konu olduğu unutulmamalıdır. Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunu klasik diesel püskürtmesi ile birleştiren iki safhalı püskürtme tekniklerinin kullanıldığı erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonun, birçok farklı metodu araştırıldı. Bu teknikler aşağıdaki başlıklar altında tartışılmaktadır ki bu başlıklar, uluslararası literatürde tekniklerin yayınlanış kronolojisine göre ismen sunulmaktadır [5].

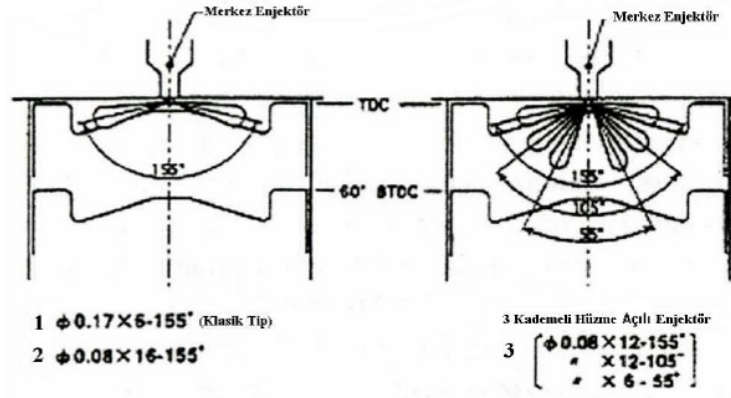
3.3.1 New ACE Institute, Japonya

Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunun en önemli uygulamalarından biri, Japonya'daki New ACE Enstitüsünde yürütülen çalışmadır. Takeda vd. 1996 ve Nakagome vd. 1997 tarafından yürütülen bu çalışmanın ilk raporları, değişik yakıt püskürtme stratejilerini tartışır ve bu teknikle, çok düşük NO_x ve duman emisyonlarının sağlanmasının mümkün olduğu

gösterilmiştir. Bununla birlikte ön karışimli diesel yakıtlı HCCI operasyonuna benzer şekilde düşük yanma verimi ve aşırı derecede gelişmiş yanma fazından ötürü klasik diesel çalışmasına göre HC emisyonları yüksektir ve yakıt sarfiyatı önemli derecede artar. Bu araştırmalarda rapor edilen maksimum yakıt tedarigi derecesi $f = 0.4$ ($l = 2.5$)' tür ki en iyi sonuç için (emisyon yönünden) üst ölü noktadan önce 120° krank açısı gibi çok erken bir püskürtme zamanlamasını gerektirmektedir. Klasik diesel enjektörlerinin dizayn edilmiş olduğu ÜÖN koşullarına kıyasla silindir içi hava yoğunlukları ve sıcaklıkları daha düşükken yakıt üst ölü noktadan çok önce püskürtüldüğünde meydana gelme olasılığı bulunan aşırı nüfuziyet ve silindir duvarının ıslanması problemini azaltmak ve yakıtı daha iyi dağıtmak için iki alternatif püskürtme tekniği denendi. Bu alternatif teknikler; Meme deliği ölçüsünün 0.17 mm' den 0.08 mm' ye küçültülmesini ve meme deliği sayısının 6' dan 16' ya çoğaltılmasını ,değişik açılarda yerleştirilmiş otuz adet 0.08 mm çapında meme deliği bulunan bir enjektör ucunun kullanılmasını silindirin her iki kenarına yerleştirilen iki karşı konumlu enjektörün kullanılmasını kapsar ve böylece enjektörlerin her biri birbirlerine yönlendirilmiş iki yakıt hüzmesi oluşturmaktadır ki bu yakıt hüzmeleri, yanma odasının ortasında çarpışır [6].

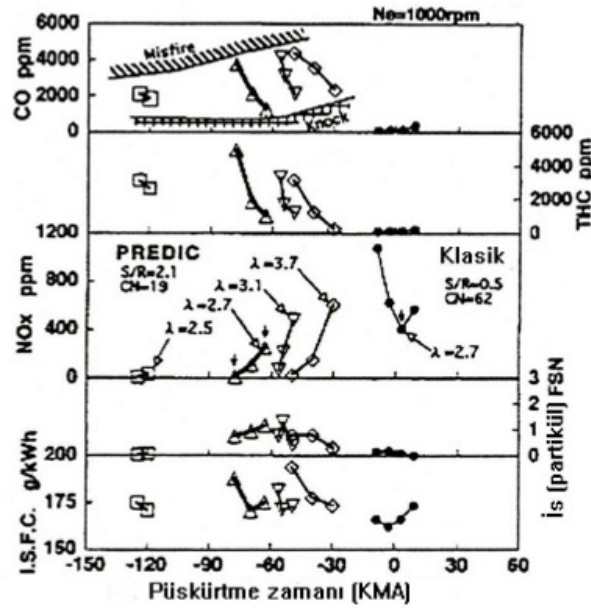


Şekil 3.1 Klasik ve kenar püskürtmeli PREDIC'de yakıt hüzmelerinin lokasyonu

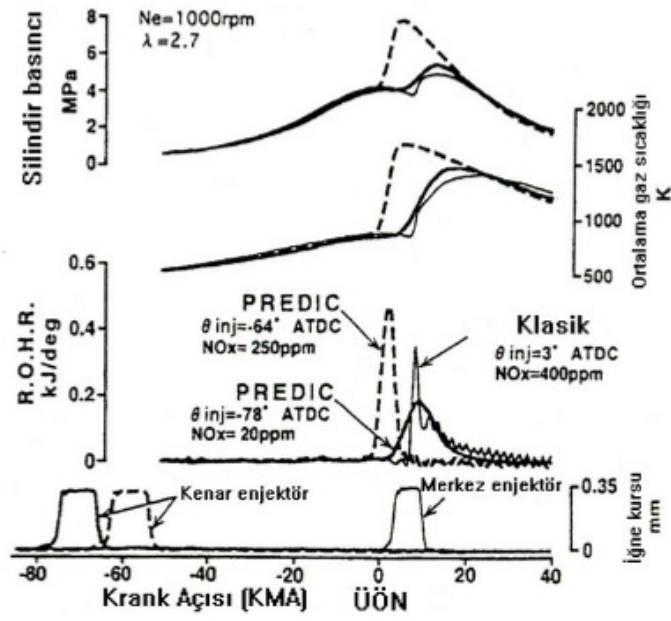


Şekil 3.2 Merkez püskürtmeli PREDIC'de yakıt hüzmesinin lokasyonu

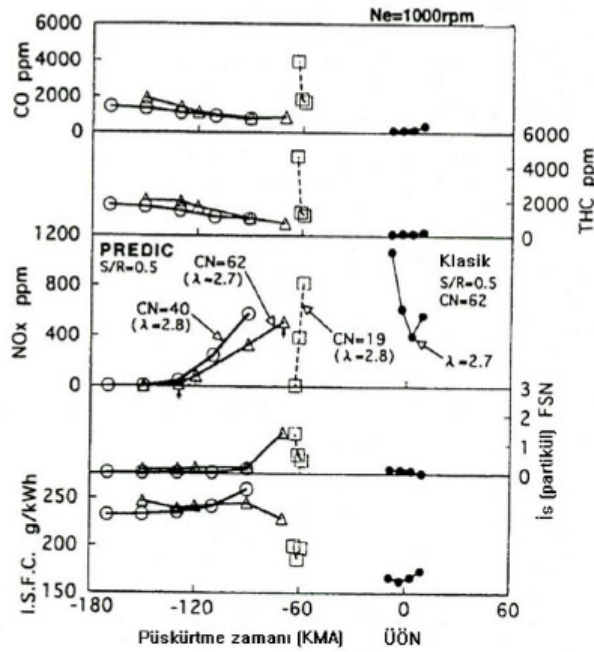
Setan sayısı 62 olan temel diesel yakıtının 16.5:1' lik temel sıkıştırma oranıyla beraber kullanımı önemli derecede aşırı gelişmiş yanmayla sonuçlanmıştır. Aşırı gelişmiş yanma probleminin üstesinden gelmek için setan sayısı 19 ve 40 olan özel yakıt karışımları geliştirilmiş ve bu özel yakıt karışımları, emme havası sıcaklığı ve sıkıştırma oranı değişiklikleri ile beraber test edilmiştir [7].



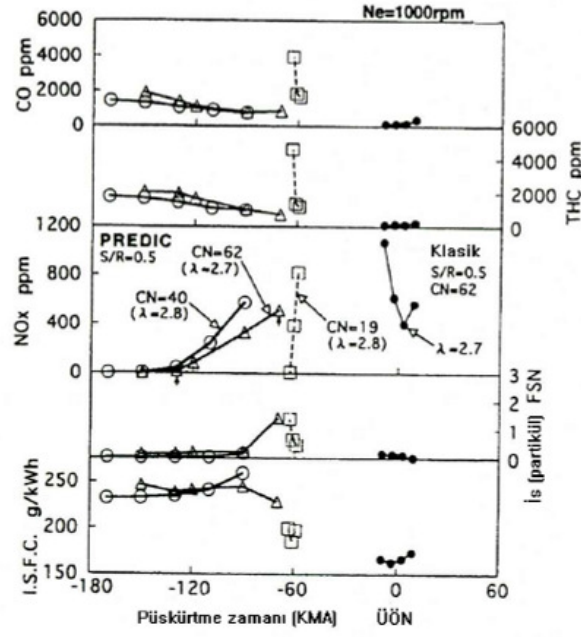
Şekil 3.3 Kenar püskürtmeli PREDIC'de motor performansı ve emisyonları



Şekil 3.4 Kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunda ısı açığa çıkış hızı



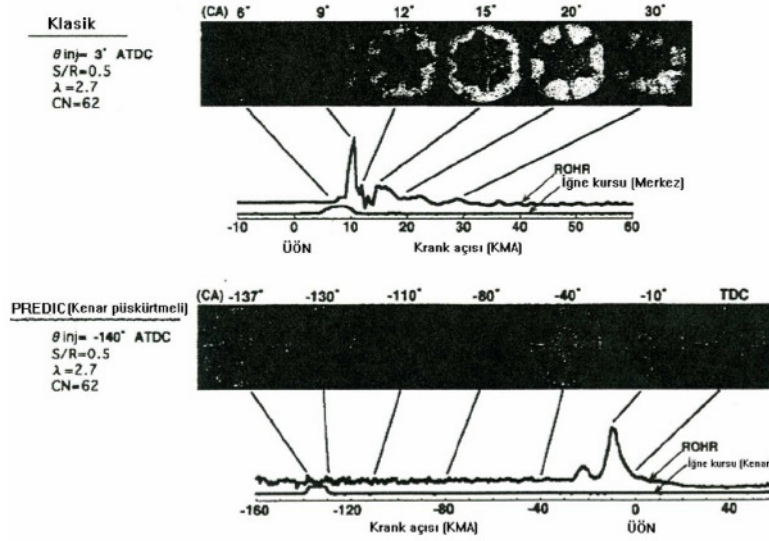
Şekil 3.5 Kenar püskürtmeli PREDIC'de motor performansı ve emisyonu



Şekil 3.6 Kenar püskürtmeli PREDIC için ısı açığa çıkış hızının kıyaslanması

1

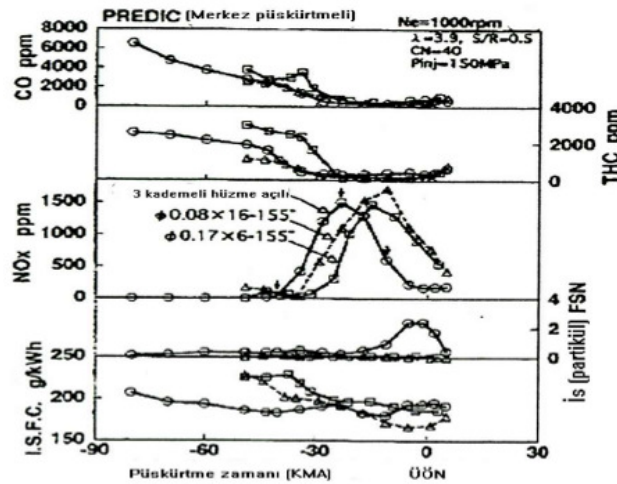
33



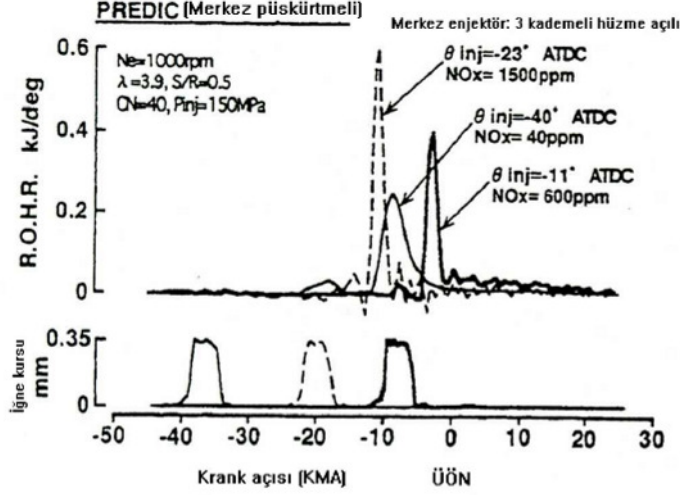
Şekil 3.7 Klasik diesel ve kenar püskürtmeli PREDIC için yanma fotoğrafları

Yanma gözlemi, iki ayrı yakıt püskürtme tekniği için gerçekleştirildi. Bunlardan biri klasik diesel püskürtmesi, diğeri ise kenar püskürtmeli PREDIC operasyonu içindir. Motorun özellikleri korunarak motor, alt görüş tipinde bir vizüel (görsel) motora dönüştürüldü ve resimler, lazer gölgegrafi metodu kullanılarak çekildi. Her iki durumda da türbülans oranı 0.5

ve yakıt setan sayısı 62' dir. Şekil 3.7, gözlem sonuçlarını ve aynı zamanda ısının açığa çıkış hızını göstermektedir. Yanma odasının şekli (piston yapısı), düz tabak tipindedir ve buradaki oyuk, gözlem alanı olarak iş görmektedir. Klasik diesel operasyonunda yakıt püskürtme prosesi, merkez enjektör kullanılarak ÜÖN' dan 3° krank açısı sonra başlatılmaktadır. Kısa bir tutuşma gecikmesi periyodunun ardından yanma, parlak alevlerin varlığında gerçekleşmektedir. Şekil 3.5' in sonuçlarından bu koşuldaki NOx konsantrasyonunun yaklaşık 400 ppm olduğu görülebilir. Kenar püskürtmeli PREDIC operasyonuna bakıldığında püskürtme prosesi, ÜÖN' dan 140° krank açısı önce başlatılmaktadır ve yakıt hüzmeleri, silindir merkezi civarlarında birbirleriyle çarpışmaktadır ve böylece yakıt hüzmeleri gözlem alanına iyice yayılır. Bu evreden sonra yakıtın daha çok buharlaşmasını sağlayacak şekilde basınç artışıyla beraber silindir içi sıcaklıklar yükselir. ÜÖN' dan yaklaşık 40° krank açısı önce yakıt hüzmeleri, ayırt edilemez (homojen) durumdadır. ÜÖN' dan yaklaşık 25° krank açısı önce bir yumru hasil olmaktadır ki bu durum, muhtemelen soğuk alev safhasına karşılık gelmektedir. Bu evreden sonra ana yanma gerçekleşmektedir. Şekil 3.7' de görüldüğü üzere ana yanma esnasında parlak alev gözlenmemektedir. Bu durumun yerine "dalgalanma" olarak tabir edilebilen bir görüntü şekli (formu) söz konusudur. Bu dalgalanmanın da ana yanma periyodu zarfındaki yoğunluk farklılıklarından ileri geldiği düşünülmektedir. Bu dalgalanmayı sabit fotoğraflara bakarak fark etmek zordur fakat videodaki gibi hareketli resimlere bakarak dalgalanmayı gözlemek mümkündür. Şekil 3.5' in sonuçlarından bu koşuldaki NOx konsantrasyonunun yaklaşık 20 ppm olduğu görülebilir [8].



Şekil 3.8 Merkez püskürtmeli PREDIC'in motor performansı ve emisyonu



Şekil 3.9 Merkez püskürtmeli PREDIC için ısı açığa çıkış hızı

Aynı zamanda çeşitli seyreltikleştirici gazlar incelenmiştir ve CO₂ gazının daha yüksek özgül ısısından ötürü yanma fazının kontrol edilmesi için yararlı bir etkiye sahip olduğu keşfedilmiştir. Yukarıdaki parametrelerin çeşitli kombinasyonlarıyla yanma fazı, ÜÖN yakınlarında elde edilir ki bu durum, yakıt sarfiyatının azalmasıyla sonuçlanır. Müteakip bir araştırmada bir türbülanslı akış kapalı tip enjektörünün gelişimi, daha üniform bir karışım oluşturulmasını sağlamaktadır ve silindir duvarının yakıt tarafından ısıtılışı azalır ve böylece yanma verimi iyileşir. Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda daha yüksek güç yoğunlukları elde etmek için ÜÖN yakınlarında ikinci bir yakıt püskürtmesi denenmiştir. Ön karışımli fakir dolgu elde etmek için silindir kenarlarına yerleştirilmiş yakıt hüzmeleri birbirleriyle çarpışan iki enjektörün ve ÜÖN yakınlarında ilave yakıt püskürtmesi için silindir merkezine yerleştirilmiş (enjektör silindir kafasındadır) bir enjektörün kullanılması ile amaca ulaşıldı. Her bir safhada yaklaşık olarak yakıtın yarısı püskürtüldü ki ön karışımli yakıtın, vurutuya neden olmadan kullanılabilir maksimum miktarına yakın bir kısmı idi. Yakıt setan sayısının ve her iki safha için püskürtme zamanlamalarının çeşitli kombinasyonları, performansı ve emisyonları optimize etmek için kullanılmıştır. İkinci safha klasik diesel yanmasına benzer şekilde gerçekleştiği için bu yaklaşımda, NO_x ve PM emisyonları arı HCCI operasyonu ile elde edilenlerden çok daha yüksektir. Bununla birlikte yakıt sarfiyatında önemli bir artış olmadan NO_x emisyonları, klasik diesel yanmasınıninkinin yaklaşık yarısına indirildi. Aynı zamanda duman emisyonları da azalmış fakat HC emisyonları daha yüksekti. New ACE Enstitüsünde gerçekleştirilen yukarıdaki çalışmaların çok iyi bir tekrarı Akagawa' nın

çalışmalarında görülebilir. Ayrıca Akagawa bu çalışmaların birçok yeni ilavelerini sunmaktadır. En üstteki piston segmanı, yarık hacmini azaltmak için kaldırıldı. Yarık hacmi azaltılışının HC ve CO emisyonlarının daha düşük bir mertebeye çekilmesi için yararlı olduğu gösterildi. Soğutulmuş EGR' nin HCCI üzerine etkisi araştırıldı ve HCCI yanma fazını geciktirmek için soğutulmuş EGR' nin yararlı olduğu gösterildi. Böylece HCCI yanma fazı ÜÖN yakınlarında gerçekleşti. Yanma fazı üzerine katkı maddelerinin etkilerini belirlemek için birçok yakıt katkı maddesi, diesel yakıtı ile karıştırıldı. Bu katkı maddeleri dimetil karbonat, dietilen glikol dimetil eter, MTBE ve etanoldür. Düşük setan sayılarına sahip olan MTBE' nin ve etanolün, aşırı derecede gelişmiş HCCI yanmasını önlemek için elverişli oldukları belirlendi. Daha yüksek çıkış güçleri elde etmek için erken direkt püskürtmeli HCCI operasyon sahasının genişletilmesi aynı zamanda tartışıldı. Havanın silindir içerisine doğal olarak emildiği koşullarda maksimum IMEP, klasik diesel yanmasınıninkinin yaklaşık %50' siyle sınırlıdır. Havanın silindir içerisine 86 kPa mertebesinde aşırı doldurulmasıyla maksimum IMEP, havanın silindir içerisine doğal olarak emildiği tam yükteki klasik diesel yanmasınıniki ile kıyaslanabilir seviyededir [9].

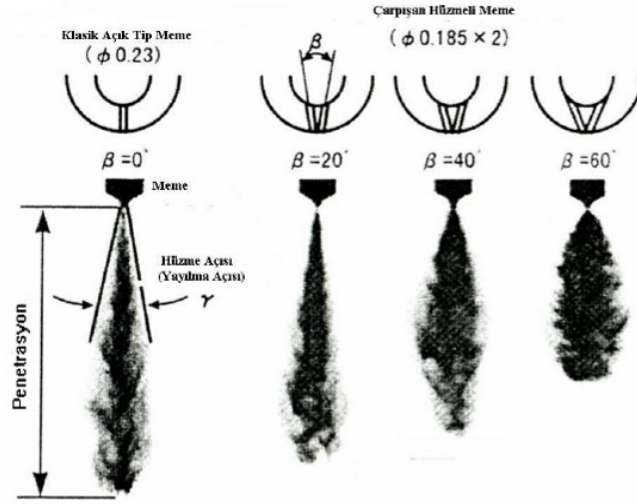
3.3.2 Hino Motors, Ltd

Erken direkt püskürtmeli yakıt püskürtmesi kullanılarak diesel motor emisyonlarının iyileştirilmesi için diğer bir öncü uygulama Yokota tarafından denenmiştir. Bu çalışmada erken (DI) püskürtmesi, iki yayılı püskürtme stratejisinin bir parçası olarak araştırılmıştır. Yakıtın %50' si erken püskürtüldü ve diğer %50' si ÜÖN yakınlarında püskürtüldü. Yakıtın %50' si erken püskürtüldü ve %35' i ÜÖN yakınlarında püskürtüldü ve %15' i üst ölü noktadan çok sonra püskürtüldü. Bu iki strateji arasındaki performans ve emisyon farkları büyük değildir. İlk testler 0.23 mm delik çaplı standart 6 delikli enjektör ucuyla gerçekleştirildi. Sadece erken püskürtme için veri yoktuysa da klasik diesel yanması için veri vardır. Erken püskürtmenin ve ÜÖN yakınlarındaki püskürtmenin bileşik uygulandığı durumların klasik diesel püskürtmesiyle yapılan kıyaslamaları, erken püskürtmenin neden olduğu değişimlere işaret eder. Yakıtın %50' sinin erken püskürtülmesiyle NOx emisyonları yaklaşık olarak 800 ppm' den 200 ppm' e azaltılmıştır. Bununla birlikte duman ve HC emisyonları çok yüksekti ki HC emisyonları, 3000 ppm ila 8000 ppm aralığında seyir etti. Bu değerlerin erken püskürtme sırasında yakıtın aşırı nüfuziyetinden ötürü oluştuğu düşünüldü. Bu problemin üstesinden

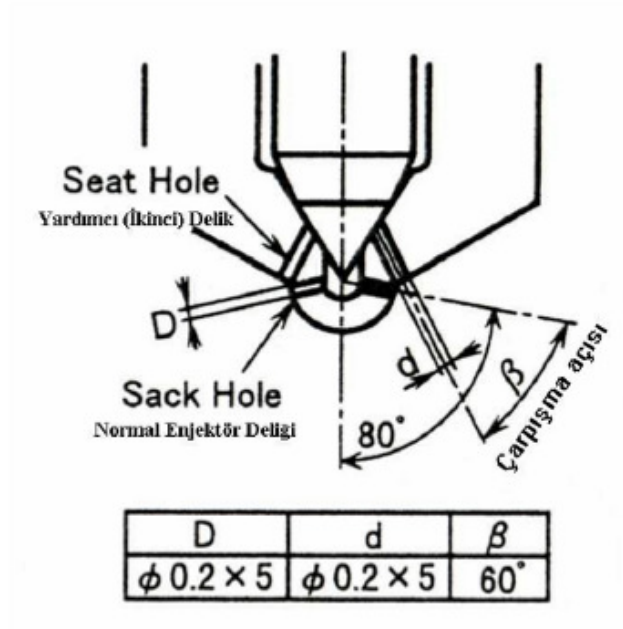
gelmek için özel bir enjektör ucu dizayn edildi. Bu enjektör ucu çeşitli açılarda yerleştirilmiş 0.10 mm çaplı otuz küçük deliğe sahiptir ki Takeda tarafından kullanılabileceğine benzerdir. Bu çok delikli enjektörün kullanımı neticesindeki ısı açığa çıkış hızı, erken püskürtülen yakıtın yanmasının önemli derecede iyileşmiş olduğunu göstermektedir ve NOx emisyonları hala 200 ppm seviyesindedir. Bununla birlikte bu çok delikli enjektörün ÜÖN yakınlarında püskürttüğü yakıt, uygun karışım oluşumunu (teşkilini) sağlamadığı için ikinci safha zayıf (verimsiz) yanmayla sonuçlanmıştır. Buradan hareketle iki tip enjektör ucuna ihtiyaç olduğu sonucuna vardılar. Erken püskürtme için çok delikli bir enjektör ucu ve ÜÖN yakınlarındaki püskürtme için klasik bir enjektör ucu gereklidir. Daha sonraki bir çalışmada bu bileşik erken ve ÜÖN yakınlarındaki püskürtme stratejisinin, seri üretim motorlarındaki emisyon hedeflerini karşılamak üzere tatbiki tartışıldı. Erken püskürtülen yakıtın aşırı derecede gelişmiş tutuşmasını önlemek üzere MTBE' nin kullanımını gösteren veriler aynı zamanda mevcuttur [10].

3.3.3 Mitsubishi Motors Corporation

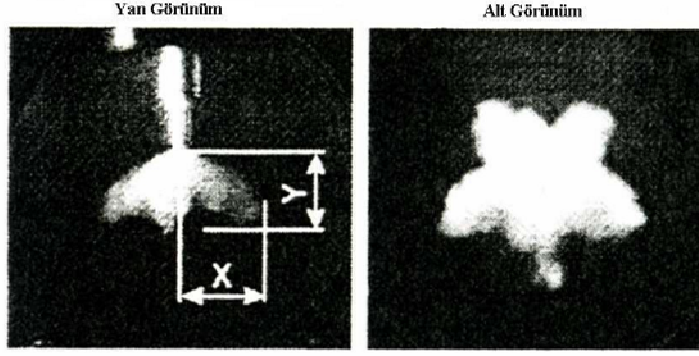
Birçok kilit parametrenin araştırılmasını ve iyi işleyecek gibi görünen yeni bir çarpışan yakıt hüzmesi konseptinin geliştirilmesi tartışmalarını içeren bir erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunun incelenen sonuçları sunulmuştur. Silindir cidarının yakıtla ıslatılmasını azaltmayı hedefleyen ilk çalışmalar, 40°, 80°, 120° ve 157° merkez açılı meme deliklerinden püskürtülen yakıtın deneysel sonuçlarını ve CFD analizlerini içermektedir. CFD sonuçları, OH – radikallerinin kimyasal ısı altındaki görüntüleri ve motor performansı verilerinin tümü 80° lik meme açısının en iyi sonucu verdiğini göstermektedir. Diesel yakıtı kullanıldığında oluşan aşırı gelişmiş yanma fazı problemini gidermek için normal diesel sıkıştırma oranı 12:1'e çekildi. 12:1' lik sıkıştırma oranının ve 80° lik enjektör ucunun kullanılmasıyla $f = 0.38$ ($I = 2.6$)' e kadar uzanan yakıt yüklerinde ve üst ölü noktadan önce 40° ila 60° krank açısı gibi geç püskürtme zamanlamalarıyla çok düşük NOx emisyonları sağlanmıştır. Bununla birlikte duman emisyonları çok yüksektir ve HC emisyonları 1000 ppm ila 2500 ppm arasındaki değerleriyle HCCI operasyonu için makul derecede yüksekti ve yakıt sarfiyatı klasik diesel operasyonundakinden daha fazlaydı [11].



Şekil 3.10 Çarpışan hüzme memenin hüzme karakteristikleri



Şekil 3.11 Motor testlerindeki çarpışan hüzme memenin yapısı



Şekil 3.12 Çarpışan hüzmeli memenin yakıt hüzmeleri görünümü

Yanmayı iyileştirmek için memede yakıt hüzmelerinin birbirine çarptırılmasını sağlayan yeni bir enjektör ucu geliştirilmiştir. Her bir normal enjektör deliğiyle bitişik ikinci bir delik açılır öyle ki yakıt hüzmeleri, 60° lik çarpışma açısıyla meme çıkışının hemen aşağısındaki bir noktada birleşir. Bu durum, geniş yayılma açılı yakıt hüzmelerinin oluşmasını sağlar ve yakıt nüfuziyetini azaltır. Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda bu enjektörün kullanımı önemli iyileşmeler sağlamıştır. Her ne kadar duman emisyonları 0' a yakın azaltıldı ise de ve yakıt sarfiyatı %10 iyileştirildi ise de ve düşük NOx emisyonlarının sağlandığı koşullarda HC emisyonları önemli derecede azaltıldı ise de bu değerler, klasik diesel yanmasındakilerle kıyaslandığında hala yüksekti. Ayrıca vurunuyla sınırlı maksimum yük, EGR kullanılmadan HCCI operasyonu için rapor edilen en yüksek değerlerden biri olan $f = 0.45$ ($l = 2.2$) mertebesine kadar çıkartılabildiği görülmüştür. Daha ağır yüklerde vurunusuz çalışma sağlanabilse bile belli bir ağır yük noktasının ötesinde eğer yakıt tedariki önemli derecede arttırılırsa yanma sıcaklıkları çok yüksek olacağı için bu ağır yük noktasında düşük NOx operasyonu sınırına yaklaşılır. Aynı zamanda yanma katalizörü kullanımı incelenmiş ve yanma katalizörü kullanımının, HC emisyonlarının yanma katalizörünün kullanılmadığı klasik diesel operasyonundaki HC emisyonlarıyla kıyaslanabilir seviyelere azaltılmasında etkili olduğu bulunmuştur. HCCI operasyonunda katalizörün iş görmesi için emme havasının silindire giriş sıcaklığı 470 K' nin üzerindedir. 12:1 gibi düşük sıkıştırma oranına rağmen yanma fazı hala gelişiktir. Soğutulmuş EGR' nin kullanımı araştırılmış ve sıkıştırma oranının 13.5:1' e yükseltildiği durumlarda bile üst ölü noktadan çok sonra yanmayı sağlamak için soğutulmuş EGR kullanımının, yanma fazının kafi derecede değiştirilmesinde etkili olduğu bulunmuştur. Son olarak daha ağır yük operasyonları elde etmek için aşırı doldurma denenmiştir ve 80 kPa

mertebesindeki emme havası basıncıyla şu sonuca ulaşılmıştır ; havanın silindir içerisine doğal olarak emildiği tam yükteki klasik diesel operasyonunun çıkış gücüyle kıyaslanabilir çıkış güçleri elde edilebilir. Bu çalışma koşulunda NOx emisyonları klasik diesel yanmasındakinden %90 daha düşüktür, duman emisyonları 0' a yakındır ve yakıt sarfiyatı, havanın silindir içerisine doğal olarak emildiği geciktirilmiş püskürtme zamanlamalı klasik diesel yanmasıyla kıyaslanabilir seviyededir [12].

3.3.4 Toyota Motor Corporation

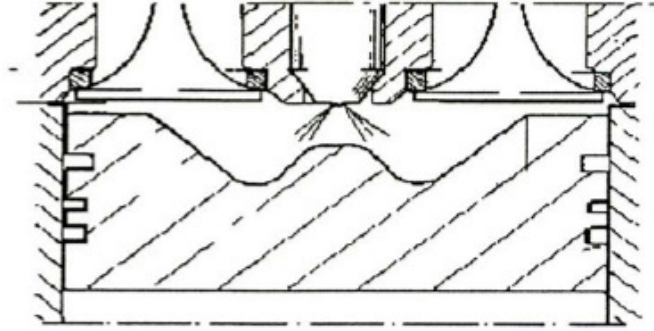
Toyota' nın UNIBUS (UNIFORM BULKY combustion System) yanma sistemi Japon pazarındaki bazı taşıtlarda 2000 yılında uygulamasına başlanılan bir erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonu tekniğidir. Bu tekniğin uygulanmasıyla motor, yaklaşık olarak orta yüklerle ve orta hızlara kadar UNIBUS modunda çalışır. Bu teknik, üst ölü noktadan yaklaşık 50° krank açısı önce bir erken püskürtmenin ve üst ölü noktadan yaklaşık 13° krank açısı sonra bir geç püskürtmenin bileşimini kapsar. Suzuki vd.' Nin çalışmalarını destekleyen direkt püskürtmeli diesel yakıtlı HCCI konseptleri, 1995 yılında hem Toyota hem de New ACE Enstitüsü tarafından tanıtıldı. Uluslararası literatürde UNIBUS yanma sistemi hakkında ne yazık ki bilgi kıtlığı söz konusudur ve hatta Yanagihara' nın 2001 seneli son makalesi UNIBUS yanma sisteminin birçok yönünü açıklamamaktadır. Diğer direkt püskürtmeli HCCI tekniklerinde olduğu gibi karışımın hazırlanması çok önemli bir konudur. Seri üretim motorlarında yeterli karışım oluşumu, açık tip memeli klasik bir yüksek basınçlı Common-Rail püskürtme sistemiyle elde edilmektedir. Bununla birlikte Yanagihara aynı zamanda birçok püskürtme denemesinde kapalı tip memelerin ve klasik açık tip memelerin modifiye edildiği araştırmalar hakkında bilgi vermektedir. Makalede sunulan verilerin çoğunluğu, muhtemelen ön karışımli yakıtın aşırı derecede gelişmiş yanmasını (erken tutuşmasını) önlemek üzere 12:1' lik bir sıkıştırma oranında elde edilmiştir. Bununla birlikte seri üretim motorunda kullanılan sıkıştırma oranı verilmemektedir. Aynı zamanda EGR' nin kullanımı tartışılmaktadır ve %60' lık bir EGR seviyesinin, HCCI yanma prosesinin geciktirilmesinde yaklaşık 7° krank açısı kadar etkisi olduğu gösterilmektedir. Yakıt setan sayısının 68' den 45' e düşürülmesi benzer şekilde yanma prosesini yaklaşık 7° krank açısı kadar geciktirmektedir. Üst ölü noktadan 13° krank açısı sonra ikinci bir püskürtmeyle yakıtın %50' sinin sağlandığı bir iki safhalı püskürtme stratejisi geliştirildi. Motor yapısının ve çalışma koşullarının detayları açıklanmadı. Bununla

birlikte mevcut veriler şunu belirtir; erken püskürtme zamanlamasının ($\sim 50^\circ$ ÖÜÖN) uygun ayarı, ön karışimli yakıtın üst ölü noktadan yaklaşık 10° krank açısı önce başlayan ve üst ölü noktadan sonraki 25° . krank açısının ötesine uzanan bir aşamalı ısı açığa çıkış prosesine neden olur. İkinci püskürtmeli ve ikinci püskürtmesiz ısı açığa çıkış hızlarının kıyaslamaları şunu gösterir; ikinci püskürtmenin neden olduğu yanma üst ölü noktadan sonraki 20° . krank açısından az sonra başlar ki birinci yanmadaki (1. yanma erken püskürtme sonucudur) ısı açığa çıkışının sonlanmasının biraz öncesidir. İkinci püskürtme, HC emisyonlarını yaklaşık 5000 ppm' den 2000 ppm' in altına düşürerek ve CO emisyonlarını yaklaşık 8000 ppm' den 2000 ppm' e düşürerek erken püskürtülen yakıtın yanma verimini önemli derecede iyileştirir. Bu nedenlerden ikinci püskürtmeden gelen yakıtın yanması, erken püskürtülen yakıtın açığa çıkan ısısının bir kısmı için bir tetikleyici olarak kabul edilebilir. Ayrıca bu modda çalışıldığında yanmanın görünüşleri, her iki birinci veya ikinci püskürtmelerden gelen yakıtın yanmasında hiçbir is parlaklığını (gazışillliğini) göstermez ve duman seviyeleri düşüktür. Her ne kadar ikinci püskürtme sadece erken püskürtmenin uygulanmasıyla elde edilen $0'$ a yakın NOx emisyon seviyelerini yukarılara taşısa da NOx emisyonları hala bir diesel motoru için çok düşüktür. Seri üretim motoru UNIBUS modunda çalışırken seri üretim motorunun bir sürüş çevrimi olan Japon test modunda 70 ppm' den daha düşük NOx emisyonlarına sahip olduğu belirlenmiştir [13].

3.3.5 IFP (Institut Francais du Pétrole)

Erken direkt püskürtmeli HCCL operasyonu için yeni ve umut verici bir yaklaşım şu yakınlarda IFP' de tanıtılmıştır (Walter vd., 2002). Bu yaklaşım HCCL operasyonu için daha optimal olan bir ayarın temin edilmesinde, tüm yanma sisteminin tekrar dizayn edilmesini içermektedir fakat buna rağmen tekrar dizayn edilen yanma sistemi, ağır yüklerde ve yüksek hızlarda kullanılacak olan klasik diesel yanmasında (operasyonunda) iyi işlemektedir. Yanma sisteminde iki büyük değişiklik yapılmıştır. Birinci değişiklik şudur: 100° den daha küçük merkez açılı dar bir yakıt hüzmesi konisi oluşturmak için meme delikleri aşağıya doğru yönlendirilmiş yüksek basınçlı bir Common-Rail yakıt enjektörü kullanılmıştır. Bu uygulamadaki yakıt hüzmesinin konik açı değeri, daha önceden tartışıldığı üzere Iwabuchi vd. (1999) tarafından belirlenen optimal yakıt hüzmesi açısıyla uyusmaktadır. İkinci değişiklik şudur: dar koni açılı enjektörün kullanıldığı klasik yanma modunda iyi yanma elde etmek için

piston oyuğu tamamen tekrar dizayn edilmiştir. Piston oyuğunu tekrar dizayn etme teşebbüsü, ana oyuk şeklinin verilmesinde ve yeni oyuğun test edilmesinde CFD aletlerinin esaslı kullanımını kapsamaktadır ve piston oyuğunun tekrar dizayn edilmiş hali, daha iyi performans sağlamaktadır. Temel sıkıştırma oranı 16:1 olarak belirlendi ki bu sıkıştırma oranı, tüm klasik modlu yanma testleri için kullanılmaktadır [14].



Şekil 3.13 NADı yanma sisteminin genel görünümü

HCCI modlu operasyonda 16:1' lik temel sıkıştırma oranında aşırı derecede gelişmiş kendi kendine tutuşma prosesini önlemek için soğutulmuş EGR' nin yüksek seviyeleri gereklidir. Bu konfigürasyon, 1500 d/dak.' da 4 bara kadar ulaşan bir IMEP değerine olanak verdi. IMEP' in 2 bar olduğu daha düşük yüklerde yakıt sarfiyatı klasik diesel referansından sadece biraz yüksektir. Bununla birlikte IMEP 4 bar olduğunda yakıt sarfiyatı yaklaşık %8 artmıştır. Daha ağır yüklerde HCCI operasyonunu elde etmek için sıkıştırma oranı 14:1' e düşürüldü ki bu sıkıştırma oranı, daha düşük EGR seviyeleriyle iyi (uygun) yanma fazına (tutuşma zamanlamasına) olanak sağladı. Bu konfigürasyon, IMEP' i 6 bara kadar ulaşan yüklerde çalışmasına olanak sağladı ve yanma verimini önemli derecede iyileştirdi ki IMEP 5 bar olduğunda %98' lik bir yanma verimi elde edilmiştir. Değişken supap hareketi, bir seri üretim motorundaki etkin sıkıştırma oranını değiştirmenin potansiyel bir yolu olarak tartışılmıştır. Motor performansı aynı zamanda 2500 d/dak.' da test edilmiştir. Bu daha yüksek hızda iyi HCCI yanma prosesi, daha ağır yüklerde elde edilebilmiştir. 16:1' lik sıkıştırma oranında IMEP 6 bara ulaştığında ve 14:1' lik sıkıştırma oranında IMEP 9 bara ulaştığında 18:1 sıkıştırma oranlı klasik diesel yanmasına göre yakıt sarfiyatı önemsiz miktarda yüksektir. IMEP' in 5 barın üzerinde olduğu HCCI operasyonlarında emme havası basıncı derece derece arttırıldı fakat emme havası basıncı bu yüklerde çalışan klasik bir diesel motorundaki değerlerin daima

aşağısında tutulmuştur. Rapor edilen tüm HCCI koşullarında NO_x ve PM emisyonları, klasik bir diesel motorundakinden sırasıyla yaklaşık 100 ve 10 defa daha düşüktür. CO ve HC emisyonları klasik bir diesel motorundakinden daha yüksekti fakat bu CO ve HC emisyonlarının, direkt püskürtmeli benzinli bir SI motorundakiyle kıyaslanabilir seviyede olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ilgi çekici sonuç 2000 yılında Walter vd. tarafından açıklandı. Kendi yanma sistemlerinde püskürtme zamanlamasındaki varyasyonlar, bir dereceye kadar yanma fazını değiştirmek için kullanılabilmiştir. Klasik diesel yanma prosesinde püskürtme zamanlaması ve yanma fazı arasında direkt bir korelasyon vardır ki bu durumun, HCCI operasyonlarında geçerli olmadığı yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır fakat püskürtme zamanlamasındaki o değişiklikler, yakıtın kademelenişindeki değişimlere sebep olup kendi kendine tutuşma zamanlamasını değiştirmek için kullanılabilir. Bir incelemede püskürtme zamanlamasındaki değişikliğin yanma fazında yaklaşık olarak 10° krank açısı mertebesinde bir değişime neden olduğu görülmüştür [15].

3.4 Geç Direkt Püskürtmeli HCCI Operasyonu

3.4.1 Nissan Motor Company

Diesel yakıtlı HCCI operasyonunun elde edilmesi için bugüne kadar ki en başarılı sistemlerden biri, Nissan Motor Şirketi tarafından geliştirilen ve MK (modulated kinetics) olarak bilinen geç direkt püskürtmeli HCCI tekniğidir. Genelde düşük yüklere ve düşük hızlara kapalı olan bu yanma sistemi, Nissan'ın yüksek hızlı (devirli) direkt püskürtmeli diesel motorunun yeni bir türünün bir parçası olarak uluslararası literatürde açıklanmıştır. Bu motorun 1998 yılında Japon pazarı için üretimine başlanmıştır. Bu geç direkt püskürtmeli HCCI yanma prosesinin temel kuralları tanımlanmıştır. HCCI operasyonu için gerekli seyreltik homojen karışımı elde etmek üzere yakıtın tümü, kendi kendine tutuşma prosesinden önce püskürtülmüş ve silindir içi gazlarla iyice karışmış olmak zorundadır. Bu durum, uzun bir tutuşma gecikmesi süresini ve hızlı karışım oluşumunu gerektirmektedir. Püskürtme zamanlamasının ÜÖN'ün 7° krank açısı öncesinden ÜÖN'ün 3° krank açısı sonrasına geciktirilmesiyle ve EGR'nin yüksek seviyelerinin kullanımıyla tutuşma gecikmesi süresi uzatılmaktadır. EGR'nin kullanımıyla silindir içi gazlarındaki oksijen yüzdesinin %15 – %16' lara düşürülmesi (havadaki O₂ yüzdesi %21) tutuşma gecikmesi süresinin uzatılması için yeterlidir. Yüksek türbülans oranlarının ve

toroidal bir yanma oyuğunun bileşik etkisiyle hızlı karışım oluşumu sağlanmaktadır. Her ne kadar türbülans oranı konsept motorda sadece 5' e yükseltildi ise de seri üretim motorundaki emme manifoldları 12 gibi yüksek türbülans oranlarının oluşturulması için dizayn edilmiştir ki bu emme manifoldları, klasik diesel operasyonu için türbülans oranının 3.5 mertebesine kadar kontrol edilebilir olmasına da olanak sağlamaktadır (Kawashima vd., 1998; Mase vd., 1998). Birinci jenerasyon MK sisteminin çalışma sahası, azami (pik) torkun yaklaşık üçte biriyle ve orta hız seviyeleriyle sınırlıdır. MK modunda NOx emisyonları, PM emisyonlarında herhangi bir artış olmadan yaklaşık 50 ppm seviyesine azaltılmaktadır. Yanma gürültüsü aynı zamanda önemli derecede azaltılmaktadır. Ayrıca bu geç direkt püskürtmeli HCCI tekniği, klasik bir diesel motordakine benzer şekilde yanma fazının püskürtme zamanlaması vasıtasıyla kontrol edilmesini sağlar ki (MK yanma prosesinin sağlanabildiği püskürtme zamanlamalarının limitleri dahilinde) bu olay, ön karışım ve erken direkt püskürtmeli HCCI tekniklerine göre geç direkt püskürtmeli HCCI tekniğinin bir üstünlüğüdür [16]. MK konseptindeki her bir yanma faktörünün egzoz emisyonlarına ve termik verime olan etkisi, düşük oksijen konsantrasyonu ile NOx emisyonları yaklaşık olarak %90 mertebesinde azaltılmaktadır ve geciktirilmiş püskürtme zamanlaması, duman (is) emisyonlarını belirgin bir şekilde düşürmektedir. Ayrıca yüksek türbülans oranının, duman ve yanmamış HC emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğu görülmektedir. NOx emisyonlarının azaltılmasında bariz bir etkiye sahip olan düşük oksijen konsantrasyonu ile termik verim iyileşmektedir bununla birlikte termik verim, geciktirilmiş püskürtme zamanlaması ile kötüye gitmektedir. Yüksek türbülans oranı, termik verimi klasik diesel operasyonun üzerindeki bir değere taşımaktadır. İlginç bir şekilde termik verim, MK operasyonunda yanma fazı önemli derecede geciktirilmiş olmasına rağmen klasik diesel operasyonuna göre hafifçe artmıştır. Termik verimdeki bu iyileşme, azalan ısı transferine atfedilir. Bu düşüncüyü doğrulamak için sıkışma bölgesindeki piston oyuğu üzerine ve yanma oyuğunun yan duvarları üzerine ısı akısı sensörleri yerleştirilmiştir (Kimura vd., 1999a; Ogawa vd., 2000). Isı akısı ölçümleri, motor operasyonu MK moduna değiştirildiğinde pistona doğru olan ısı transferinin önemli derecede azaltıldığını göstermiştir. Her ne kadar azalan ısı kayıplarının nedeni açıklanamasa da MK modunda hiçbir parlak yanmayı göstermeyen yanma görünümlerine dayanarak radyasyonla ısı transferinin büyük ölçüde azalmış olduğu tahmin edilmektedir. Eğer yanma esnasında piston oyuğu duvarı yakınlarında yüksek sıcaklıklı alevlerin bulunmayışı ve yanma esnasındaki düşük akımlı dolgu (sıvı) hareketi, arttırılmış türbülansın etkilerini frenlemekte ise ayrıca konveksiyonla ısı transferi azalan olabilir. İkinci jenerasyon MK sisteminin geliştirilmesi için çeşitli modifikasyonlar yapılmıştır. Bu modifikasyonlarla MK sisteminin operasyon sahası, daha ağır yüklere ve daha yüksek hızlara genişletilmiştir. Daha ağır

yüklerde daha çok yakıtın püskürtülmesi zorunluluğu olduğu için MK operasyonunun gerekli koşulunun yerine getirilmesi giderek daha zorlaşır ki bu koşul, yakıt püskürtme süresinin tutuşma gecikmesi süresinden daha kısa olması zorunluluğudur. Bu maksatla yüksek basınçlı bir Common-Rail yakıt sistemi, tüm hızlarda yüksek püskürtme basınçları sağlaması için kullanılmaktadır. Sıkıştırma oranının 17.5:1-18:1' den 16:1' e azaltılmasıyla ve silindire gönderilen EGR gazının soğutulmasıyla sıkıştırma stroku sonundaki ÜÖN yanma sahasının gaz sıcaklığı düşürülerek tutuşma gecikmesi süresi arttırılmaktadır. Yukarıdaki değişikliklerin sonucu olan daha düşük sıkıştırma sonu sıcaklıklarında sıvı yakıtın piston oyuğu duvarına çarpma potansiyelini minimize etmek üzere piston oyuğu çapı 47 mm' den 56 mm' ye arttırıldı. Bu değişiklik, soğuk motor koşulları altında HC emisyonlarını önemli derecede azaltmaktadır [17]. Bu prototip ikinci jenerasyon MK sistemindeki maksimum yükler ve hızlar açık olarak belirtilmedi fakat makalede MK operasyonunun, günlük sürüş sahasının tümünde sağlandığı anlatılmaktadır. Buda şunu gösterir. Motor yaklaşık olarak orta (yarı) yükte ve 3/4' lük hız seviyesinde ikinci jenerasyon MK sisteminin hedeflerini karşılar ki bu operasyon bölgesi, Japon 10-15 test modunun tüm operasyon sahasını da kapsamaktadır. EGR' nin kullanılmadığı klasik diesel operasyonu ile kıyasla yapıldığında NOx emisyonlarının %98 oranında azalmış olduğu saptandı ve elde edilen veriler PM emisyonlarının klasik diesel motorundakilerle aynı seviyede olduğunu göstermektedir. EGR' nin kullanıldığı klasik diesel operasyonu ile kıyasla yapıldığında MK operasyonundaki NOx emisyonları, EGR' li klasik diesel operasyonundaki en düşük değerlerden yaklaşık 4 ila 5 defa daha düşükken MK operasyonunda PM emisyonları ve yakıt sarfiyatı da önemli derecede daha iyidir. Her ne kadar MK operasyonundaki PM seviyeleri yoğun EGR' li klasik diesel operasyonundaki PM seviyelerinin çok aşağısında ise de bu MK operasyonundaki PM seviyelerinin, 2007 standartları tarafından zorunlu tutulan seviyelerin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum bir partikül filtresinin kullanımını gerektirebilir. İkinci jenerasyon MK operasyonu sahasında HC ve CO emisyonları görülmedi. 5-ışlevli bir katalizörün (5-ışlevli katalizör, oksidasyon katalizörünün, NOx tutucu katalizörünün ve bir partikül filtresinin görevlerini yerine getirir) teçhiz edildiği bir otomobilde ikinci jenerasyon MK sisteminde yürütülen testler şunu gösterir ki MK modunda ULEV emisyon standartları ($NO_x < 0.07$ g/mil ve $PM < 0.01$ g/mil) karşılanabilmektedir [18].

HCCI YANMA FAZINI ETKİLEYEN PARAMETRELER

HCCI operasyonunu sağlamak için gerekli olan ısı denge koşulu, hızlı ve kısa süreli operasyonlara (hızlı mod değişimlerine) sık sık maruz kalan taşıt uygulamalarında bu teknolojiye büyük zorluklar yüklemektedir. Silindir içindeki ısı koşullarının değişmesine neden olabilen herhangi bir unsur, yanma olayını başlatmak için gerekli olan koşulları etkileyebilir. Kendi kendine tutuşma esnasında eğer dolgunun ısı koşulları ve bileşimi doğru değilse ateş almamayı ve motor vuruntusunu önlemek üzere hiçbir kolayca işe yarar çare yoktur. Motor çalışma koşullarının geniş bir aralığında sağlıklı HCCI yanma kontrolü için önceden sağlanması gerekli olan şey ısı sınır koşullarının doğru bir şekilde kontrol edilmesidir. İyi bilindiği üzere yanma odası boyunca geniş sıcaklık gradyanları mevcuttur ve bu sıcaklık gradyanı aynı zamanda motor çalışma koşullarının önemli bir fonksiyonudur. Çevrimden çevrime ve parçadan parçaya bu sıcaklıklar önemli derecede değişiklik gösterir. Dolgu ve silindir yüzeyleri (piston, silindir cidarı, supaplar, silindir kafası) arasında önemli derecede ısı alış veriş gerçekleşir. Yanma odası yüzey sıcaklıkları, aynı zamanda taşıtın ömrü zarfında yakıt kalıntıları oluştuğunda, döküldüğünde ve tekrar oluştuğunda değişim gösterir. Yakıt kalıntılarının kalınlığı zamandan zamana ve taşıttan taşıta değişiklik gösterir. Ayrıca kullanılan harici egzoz gazı tekrar sirkülasyonunun (EGR' nin) miktarı ve sıcaklığı, emilen dolgunun ısı koşulları, ısıtma bujilerinin kullanımı ve soğutucu ve yağ devrelerindeki akış hızları ve sıcaklıklar kontrol prosesini karmaşık hale getiren tüm parametrelerdir. Tutuşmanın başlangıcı ve yanma hızı ile ilgili olarak silindirler arasındaki farklılıklarda güvenli motor çalışmasını ve verim ve emisyon iyileşmelerini tehlikeye sokabilen sorunlu konulardır. Sıkıştırma oranındaki, EGR dağılımındaki, hava dağılımındaki, her bir silindire püskürtülen yakıt miktarındaki farklılıklar ve soğutma maddesi sıcaklığındaki, silindir kafası ve piston

sıcaklıklarındaki dengesizlikler aynı zamanda dikkate alınmak zorundadır. Hız ve yük değıştikçe yüksek tekrarlanabilirlikli hızlı mod değışimleri esnasındaki çalışma koşuluna dolgu sıcaklığının doğru şekilde uyum göstermesi zorunlu olduğu için kısa surely motor çalışmasında gerekli seviyede kontrolün sağlanabilmesi çok daha zordur. Yük ve hız haritası boyunca kararlı HCCI operasyonunu sürdürebilecek ve motorun kısa sureli operasyonlarını (mod değışimlerini) idare eden etkili çareler bulunmalıdır. Kontrol stratejisi, HCCI modunun başlangıcını, HCCI çalışma domenindeki yüke ve hıza bağılı kısa sureli operasyonları ve HCCI operasyonu ve klasik yanma modları arasındaki geçişleri idare edebilmek zorundadır. HCCI operasyonlarının kontrolü için değışken sıkıştırma oranı ve değışken supap zamanlaması gibi çeşitli çarelere ait kısa süreli cevapların, sarsıntısız geçişleri sağlamak üzere dikkatle incelenmesi zorunludur. HCCI operasyonunun kontrolü için kullanılan herhangi bir yaklaşım sonlu (sınırlı) cevap süresine sahip olduğu için motorun çalışma tarzı, çalışma koşullarının ani değışikliklerine karşı dikkatle değerlendirilmeli ve idare edilmelidir. Kontrol stratejisi ile motor çalışma koşullarının uyumsuzluğu, işletilebilirlik ve emisyon problemlerine neden olacaktır ve HCCI operasyonu kazanımlarını maksimize etmek yerine çalışma aralığını daraltacaktır. HCCI operasyonları ve klasik yanma modları arasındaki geçişlere ek olarak motor, aynı zamanda büyük bir sıcaklık değışikliğinin beklendiği durumlarda yakıtı kesme ve yeniden verme proseslerini idare edebilmek zorundadır. Yukarıda anlatılan bütün bu değışkenler, HCCI operasyonun kontrolü için algoritmaların ve stratejilerin tasarlanmasında aşırı büyük zorluklar ortaya koymaktadır. HCCI operasyonunun yanma başlangıcı ve ısı açığa çıkış hızları, yakıt-hava-art gaz karışımının kendi kendine tutuşma kimyasıyla ilişkilidir. Yanma fazı öyle önemlidir ki ne erken kendi kendine tutuşma ne geç kendi kendine tutuşma sistem optimizasyonu açısından istenmeyen bir durumdur. Yakıt-hava karışımının kendi kendine tutuşması, karışımın özellikleriyle (karışımın reaktifliğiyle) ve karışım sıcaklığının zaman içinde maruz kaldığı evrelerle domine edilir [19].

4.1 Emme Havası Sıcaklığı

Bir HCCI motorundaki kendi kendine tutuşma zamanlamasına birçok değışken etki eder. Sıcaklık faktörü bu değışkenlerden en etkin olanıdır. Yüksek emme havası sıcaklıkları, erken tutuşma başlangıcını ve yüksek ısı açığa çıkış hızlarını gerçekler. Yüksek emme havası sıcaklıkları, birinci safha tutuşmanın başlangıcını iyileştirir ve ana tutuşma gecikmesi süresini

kısaltır. Bahis konusu olan bu sıcaklık faktörü, literatürde geçen HCCI operasyonunun kontrolü ile ilgili olan yaklaşımlar arasında geçmişten beri en kapsamlı şekilde incelenendir. Yüksek emme havası sıcaklıkları HCCI yanmasını geliştirir fakat bu koşullardaki kontrol edilebilir çalışma aralığı nispeten sınırlı kalmaktadır. Eğer kendi kendine tutuşma olayı sıkıştırma stroku sırasında baş gösterecek kadar gelişirse bu durumun termik verimde bir kayba neden olması gerçeğinden ötürü kontrol edilebilir çalışma aralığının haricinde motorun, volumetrik ve termik verimleri büyük ölçüde azalmaktadır. Aynı zamanda motor yükü ve hızı değiştiğinde bu olayları karşılamak üzere dolgu sıcaklığına müdahale edilmezse kendi kendine tutuşma zamanlaması yine değişkenlik gösterecektir. Özellikle çevrim bazında düdüldüğünde kısa süreli koşullar altında emilen havanın ısıtılmasındaki sınırlılıklardan ötürü bu tür müdahaleler genellikle ağır kalmaktadır [20].

4.2 Isı değiştirici

Egzoz gazlarındaki atık ısı enerjisinden faydalanarak emilen havayı ısıtmak üzere ısı değiştiricilerinin kullanıldığı uygulamalar gerçekleştirilmiştir . Ayrıca değişken supap zamanlamasının kullanıldığı bir yaklaşım atık ısı enerjisinden faydalanabilmek için geliştirilmiştir.Bu dizayn, silindir içerisinde tutulan art gaz miktarını arttırarak dolayısıyla emilen havanın ısıtılmasına olan gerekliliği azaltacak şekilde supap bindirme süresini uzatabilmektedir. Araştırmalarda şu görüldü ki düşük yüklerde egzoz gazı ile emme havası sıcaklıkları arasındaki fark emme havasının ısıtılması için yetersiz kalmaktadır. Bu sıcaklık farkını karşılamak için emme havasının kısılması gereklidir. Kısa süreli operasyonlar sırasında motorun kontrol gereksinimlerini karşılamak için emilen havanın silindire giriş sıcaklığının yeterince çabuk ayar edilmesi, ısıtma prosesinin termik ataletinden ötürü ısı değiştiricileri kullanıldığında genelde güçlükle sağlanabilir [21].

4.3 Sıkıştırma Oranı

Benzinli bir HCCI motoru için optimum sıkıştırma oranının seçimi belirgin değildir. Sıkıştırma oranının yükseltilmesi, boşa yakın yüklerde benzinin kendi kendine tutuşmasının başlatılması için kesin bir çözüm olacak gibi görünürken iki önemli faktör bu duruma karşı koyar. Birincisi ağır yüklerde klasik SI yanmasını kullanan bir motor konseptine benzinli HCCI yanmasını entegre etme ihtiyacı sıkıştırma oranına pratikte bir sınırlama getirir. Klasik benzinli SI

motoru operasyonunda sıkıştırma oranlarını 12:1' in ötesine taşımak için herhangi bir teşebbüsün, gaz kelebeğinin tam açık konumunda ciddi vuruntu problemlerine götürmesi muhtemeldir. İkincisi sıkıştırma oranının yükseltilmesiyle HCCI yanma rejiminde çalışırken yanma ile meydana gelen gürültü problemlerinde artış olması muhtemeldir. Sıkıştırma oranı arttırıldıkça silindir içindeki gaz sıcaklıkları ve aktif kimyasal ara ürün konsantrasyonları da artar. Bu artışlar esas itibariyle kimyasal reaktifliğin yüksek seviyelerine, iyileştirilmiş (öne çekilen) tutuşma zamanlamalarına ve pik enerjinin yüksek açığa çıkış hızlarına götürür. Böylece düşük motor hızlarında ve yüklerinde güçlü HCCI yanmasına imkan vermek için arttırılmış sıkıştırma oranının kullanılması potansiyeline rağmen arttırılmış sıkıştırma oranı, basınç yükseliminin ve yanma ile meydana gelen gürültünün aşırı oranları problemini şiddetlendirir. Basınç yükselimi ve yanma gürültüsü uygulanabilir HCCI operasyonu için üst yük sınırını tanımlar. Najt ve Foster (1983), PRF yakıt karışımları kullanarak bir dizi sıkıştırma oranıyla deneyler gerçekleştirdiler. Tutuşma gereksinimleri ve ana enerjinin açığa çıkış hızları arasında en iyi uzlaşmanın daha düşük sıkıştırma oranlarında elde edildiği sonucuna vardılar. Benzer şekilde Thring (1989), daha düşük sıkıştırma oranlarının düzgün HCCI operasyonuna daha çok uygun olduğunu buldu. Değişken sıkıştırma oranı yukarıda ki probleme potansiyel bir çözüm olacak gibi görünmektedir fakat uygulanabilir değişken sıkıştırma oranı mekanizmalarının gerçekleştirilmesi zordur ve hiçbir uygulanabilir icat tanıtılmadı. Gerçekte var olan sıkıştırma oranı emme supabının geç kapatılmasıyla azaltılabilirken bu durum, aynı zamanda azalan yer değiştirme hacmi ve gaz kelebeğinin tam açık konumunda önemli bir tork kaybı ile sonuçlanır. Ayrıca Christensen vd. (1999a), bir HCCI motorunun yanma veriminin artan sıkıştırma oranı ile lineer olarak düştüğünü buldu. Christensen vd., diesel yakıtının, benzin karışımlarının ve PRF yakıtlarının bir dizisini kullanarak HCCI yanmasına sıkıştırma oranının etkisini araştırdı ve şunları buldu; 10:1' lik bir sıkıştırma oranında yanma verimi %94' tü. 22:1' lik bir sıkıştırma oranında yanma verimi %83' e düştü. Düşük yüklerde HCCI çalışma sahasında verim artışındaki ilerlemelerden daha fazla bir verim kaybı söz konusudur. Değişken sıkıştırma oranı mekanizmalarının zorlukları göze alındığında sıkıştırma oranı için en iyi uzlaşmanın motordan tam-yük performansı elde etmek üzere mümkün olan en yüksek değerin seçilmesi gibi gözükmektedir. En düşük yüklerde daha uygulanabilir olan diğer önlemler, HCCI yanmasında en alt yük sınırını genişletmek üzere aranmak zorundadır. Emilen havanın ısıtılmasına bir alternatif teşkil eden sıkıştırma oranı, HCCI yanma

kontrolünün sağlanmasında etkili bir çare olarak dikkatle incelendi . Yüksek sıkıştırma oranı, sıkıştırma stroku sırasında dolgu sıcaklığını arttırabilir ve böylece etkili bir şekilde kendi kendine tutuşma prosesinin başlangıcını geliştirir. Doğal emişli benzinli bir HCCI motorunda yüksek sıkıştırma oranı, düşük optimum emme havası sıcaklığını ve bunun neticesinde yüksek çıkış gücü için gereken yüksek emme havası yoğunluğunu sağladı. Ayrıca yüksek sıkıştırma oranı, yüksek termik verim sağlar. Bununla birlikte yüksek sıkıştırma oranlı bir HCCI motoru düşük oktan sayılı yakıtlarla çalıştırıldığında ağır yüklerde vuruntu problemi ile karşılaşır. Değişken sıkıştırma oranı bu probleme potansiyel bir çözüm olacak gibi gözükmemektedir fakat pratik değişken sıkıştırma oranı mekanizmalarının gerçekleşmesi zordur ve henüz hiçbir pratik buluş mevcut değildir. Değişken sıkıştırma oranı mekanizması kullanılsa bile HCCI operasyonu kontrolünün pratik olarak tatbiki için çevrim-çözünümlü cevap gereksinimi ve sıcaklık gradyanları dikkatle incelenmesi zorunlu olan konulardır. SAAB' in değişken sıkıştırma oranlı prototip motorunun kullanıldığı bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada doğal emişli çok silindirli bir HCCI motoru için emme havası sıcaklığı ve sıkıştırma oranı arasındaki denge unsuru incelendi. Bu çalışmada şu görüldü ki yüksek sıkıştırma oranı, emme havası ısıtmasının yerini tutabilmektedir. Fakat yüksek sıkıştırma oranı kullanmadaki çekince hızlı gerçekleşen genişleme prosesinden ötürü reaksiyon süresinin kısılmasıyla CO emisyonlarının artmasıdır. Sıkıştırma oranları, kullanılan yakıtta ve aynı zamanda HCCI operasyonunun kontrolü için sistemde kullanılan diğer yaklaşımlara göre incelenen sisteme uygun olmalıdır [22].

4.4 Egzoz Gazının Tekrar Sirkülasyonunun (EGR) ve Art Gazın Etkileri

Bir HCCI motorunda dolgu sıcaklığını kontrol etmenin en pratik yolu, emme sırasında tekrar sirküle edilen egzoz gazlarının yüksek seviyelerinin kullanılmasıyla sağlanır. Şu kesinlikle doğrulanmıştır ki sıcak EGR, aktif radikallerin varlığından daha ziyade ekseriyetle emilen karışımın yüksek sıcaklığı dolayısıyla dört stroklu HCCI motorlardaki yanmayı iyileştirmektedir. EGR' nin ısı etkisine ilave olarak EGR içinde var olan inert gazlar kimyasal reaksiyon hızına olan etkileri dolayısıyla ısı açığa çıkış hızını kontrol etmek için kullanılabilir. Inert gazların etkisi altındaki kimyasal reaksiyon hızları, kendi kendine tutuşma süresini uzatabilir, ısı açığa çıkış hızını yavaşlatabilir ve böylece pik silindir basıncını azaltabilir. Harici EGR basitliğinden ötürü iyi işler. Fakat harici EGR' nin ısı etkisi, EGR sistemindeki ısı

kaybından ve kısa süreli operasyonlardaki cevabının ağır kalmasından ötürü sınırlıdır. Değişken supap zamanlaması yoluyla silindir içindeki egzoz art gazlarının tutulması sayesinde, harici EGR yaklaşımında karşılaşılan sistemle ilgili yukarıdaki sorunların birçoğu önlenir. Bir grup araştırmacı tarafından değişken supap zamanlamaları HCCI yanma prosesinin kontrolü kapsamında incelendi. Motor supap zamanlamasının ayarlanması sonucunda iç art gazların işe yarar miktarının silindir içinde tutulması sağlanabilir ve bu iç art gazların taze dolguyu ısıtması neticesinde sıkıştırma yoluyla ısıtma ihtiyacı azalır. Gereki art gaz miktarının sağlanması neticesinde HCCI yanmanın, tutuşma gecikmesi süresi ve ısı açığa çıkış hızı ayarlanabilir. Silindir içinde tutulan yanmış gaz olsa bile şu görüldü ki art gazın HCCI operasyonundaki kendi kendine tutuşma üzerine olan ana etkisi termaldir ve dolgu seyreltiminin başlıca etkisi ana yanma üzerine olmaktadır. Bu yargı iki stroklu motorlar için kaydedilenden farklıdır. Şunu belirtmekte fayda vardır ki değişken supap zamanlaması egzoz gazından tekrar enerji kazandırmak için kullanılabilirse bile elde edilebilir enerji miktarının sınırları mevcuttur. Motor, HCCI operasyonundaki yakıt verimi kazanımını maksimize etmek için dolgu seyreltiminin yüksek seviyeleriyle birlikte kelebeksiz (gaz kelebeği tam açık konumda) olarak çalıştırıldığı için sade bir ifadeyle çok düşük yüklerde kendi kendine tutuşmayı sağlamak için egzoz gazında yeterli ısı enerjisi olmadığı söylenebilir. EGR homojenliğinin HCCI yanma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görüldü. HCCI motoru fazlasıyla heterojen olarak dağıtılmış EGR' yi tolere etmeye yatkındır. Benzer EGR oranlarında heterojen EGR, çıkış gücünün arttırılması ve pik silindir basıncının düşürülmesi için faydalı olmaktadır. Taze dolgu ve art gaz arasındaki heterojenlik istenilen bir durumdur çünkü yanma odasının EGR' ce zengin bölgelerindeki sıcaklıklar, tamamıyla homojen silindir dolgusuyla ulaşılan değerlerden daha yüksektir. Yakıt-hava karışımı, EGR' ce zengin bölgelerin sınırlarında nispeten daha kolay kendi kendine tutuşur. Bu yargı şu düşünceyle uyumaktadır; küçük sıcaklık heterojenlikleri, ısı açığa çıkış hızının azaltılmasında faydalı olabilir. Şu belirtilmelidir ki EGR (art gazın)' nin rolü iki misli büyüktür. EGR' nin ısı etkisine ilave olarak inert gazlar vasıtasıyla gerçekleşen seyreltici etkisinin aynı zamanda dikkatle incelenmesi zorunludur. EGR oranı arttırıldığında (lambda düşer) silindir cidarlarının termal söndürücü etkisinin azalmasından ötürü spesifik HC emisyonları düşer. EGR kullanımı, oksitlenme katalizini daha etkin hale getirerek aynı zamanda egzoz gaz sıcaklığını yükseltir. EGR (art gazın)' nin doğal emişli benzinli HCCI motorunun çalışma aralığı üzerine olan etkisi

araştırıldı. Şu görüldü ki art gazın küçük miktarları ve düşük emme havası sıcaklıkları hava-yakıt oranının kullanılma sahasını (aralığını) daraltmaktadır. Fakat motor çıkış gücü önemli derecede artabilmektedir. Kıyaslama yapıldığında art gazın büyük miktarları ve yüksek emme havası sıcaklıkları kararlı yanma için hava-yakıt oranının kullanılma sahasını genişletmektedir fakat maksimum indike ortalama efektif basınç (IMEP) azalmaktadır. Düşük sıkıştırma oranı ve yüksek motor hızı, yüksek emme havası (dolgu) sıcaklığının sağlanabilmesi için silindir içindeki art gazların büyük bir çoğunluğunun tutulmasını gerektirir ki bu durumda, volumetrik verim düşer ve motorun yük sahası sınırlanır. Sabit emme havası sıcaklığında maksimum yük, EGR oranındaki artışla beraber artar. Bu şu sebepten gerçekleşir; EGR oranındaki artış daha verimli bir yanmaya olanak verecek şekilde tutuşma gecikmesi süresini ve yanma süresini uzatır. Bu durum nispeten daha ağır-yük operasyonlarının sağlanmasını mümkün kılmaktadır. Minimum emme havası sıcaklığında her bir EGR oranı için maksimum yük incelendiğinde yanmanın bozulmasından ötürü EGR oranındaki artışla beraber maksimum yükün düştüğü görüldü ve bu nedenle bu durumu dengelemek için yüksek emme havası sıcaklıkları gereklidir. Sonuç olarak volumetric verim ve de maksimum yük düşmektedir. Doğal emişli benzinli bir HCCI motorunun yük sahasının, ne harici EGR ne iç art gaz vasıtasıyla oksijen konsantrasyonunu azaltarak genişletilemeyeceği sonucuna varıldı. Bu sonuç bir diesel yakıtlı HCCI motorunda gözlemlenen ile ters düşmektedir ki orada EGR, motor çıkış gücünü arttırmak için kullanılabilir. Son günlerde değişken supap zamanlaması yaklaşımları, iç art gazların yüksek seviyelerini sağlamadaki esnekliğinden ötürü büyük ilgi görmektedir. Bu koşulu sağlaması için iki metot ileri sürüldü. 1. metot egzoz strokunda egzoz supaplarının nispeten erken kapatılmasıyla egzoz gazlarının (yanma neticesinde oluşan silindir içindeki art gazların) önceden belirlenmiş bir miktarının silindir içinde tutulmasına dayanmaktadır. Tutulan egzoz gazı bundan sonra o egzoz strokunun son safhalarında sıkıştırılır. Piston bir sonraki emme strokuna geçtiği anda emme supapları açılır ve taze dolgu silindir içerisine çekilir. Sıkıştırma strokunun son safhasında karışımın basınç ve sıcaklığı yeterince arttığında HCCI operasyonu gerçekleşir. 2. metotta egzoz supapları açılır ve egzoz gazının tümü egzoz strokunun sonunda silindirden dışarı atılır. Piston bir sonraki emme strokuna geçtiği anda hem emme hem de egzoz supapları eş zamanlı olarak açılır ve hem taze dolgu hem de egzoz gazı aynı anda silindir içerisine çekilir. Yukarıdaki iki metot kıyaslandığında ısı enerjisi 1. metotta 2. metoda göre çok daha iyi korunmaktadır çünkü 2. metotta egzoz gazının,

silindirden dışarı atıldığı ve daha sonra emme stroku sırasında geri emildiği periyot zarfında egzoz manifoldu çevresinde önemli derecede ısı kaybı gerçekleşmektedir. Ayrıca 2. metotta HCCI operasyonunun başlatılması için gerekli olan egzoz gazının miktar olarak tam kontrolünün sağlanabilmesi çok daha zordur. Art gazın daha hızlı ve daha optimal bir şekilde kontrolünün sağlanabilmesi için kamsız supap tahrik sistemleri kullanılabilir. Fakat henüz pratik uygulamalar için güvenilir bir sistem geliştirilemedi [23].

4.5 Su Püskürtülmesi

Dec tarafından da incelendiği üzere HCCI operasyonunun kontrolü kapsamında ısı açığa çıkış hızını yavaşlatmanın ve kendi kendine tutuşma zamanlamasını kontrol etmenin bir yolu olarak son günlerde su püskürtmesinin kullanılması araştırılmaktadır. Su püskürtmesinin kullanılmasıyla çeşitli motor çalışma koşullarında tutuşma zamanlaması kontrolünün mümkün olduğu kanıtlandı fakat bu tarz çalıştırılma neticesinde zaten yüksek olan CO ve yanmamış HC emisyonları daha da artmaktadır. HCCI operasyonlarında çok düşük seyir eden NOx emisyonları, su püskürtmesi uygulandığında daha da azalmaktadır. Yüksek emme havası sıcaklıkları kullanıldığında su püskürtmesi, tutuşma zamanlaması üzerinde daha da büyük bir etkiye sahiptir. Bu büyük etkinin, yüksek emme havası sıcaklıklarında suyun daha uniform dağılmasından ve daha fazla buharlaşmasından ötürü olması muhtemeldir. Suyun atomizasyonu, buharlaşması ve dağılımı system optimizasyonu için önemli olan tüm parametrelerdir. Diesel yakıtlı HCCI yanma fazını kontrol etmek için su püskürtme prosesinin incelenmesi şunu gösterdi; su püskürtülmesi ısı açığa çıkış hızını önemli derecede azaltabilir. Son derece düşük NOx emisyonlarına ve dumansız bir yanmaya sahip olan mevcut motor çalışma aralığı, daha ağır yüklere doğru genişletildi. Her ne kadar su püskürtme prosesinin reaksiyon bastırıcı etkisi, erken su püskürtme zamanlamalarıyla artsa da optimal olan bir su püskürtme zamanlaması mevcuttur. Su püskürtme prosesinin reaksiyon bastırıcı etkisini azaltan daha erken su püskürtme zamanlamalarıyla suyun buharlaşması geciktirilir. Arttırılan su püskürtme miktarı ile birlikte yanma üzerindeki bastırıcı etki de arttığı halde aşırı derecede su püskürtülmesi, HC emisyonlarındaki ve indike özgül yakıt sarfiyatındaki (ISFC) artışlarla sonuçlanır. Bu nedenle püskürtülen su miktarı, aşırı derecede gelişmiş yanmanın yeterince bastırılması için gerekli olan minimumla sınırlı olmalıdır [24].

4.6 Doldurma Basıncı

Doldurma basıncı uygulaması, motorun IMEP değerinin yükseltilmesinde ve HCCI yanma modu için hava-yakıt oranının kullanılma sahasının genişletilmesinde etkili bir yol olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte doldurma basıncı uygulaması, yüksek silindir basınçlarına neden olur ki bu yüksek basınçlar, doldurma basıncının potansiyel uygulanabilirliğini sınırlayabilir. Aşırı doldurmanın (süperşarjın) HCCI operasyonunda ulaşılabilen IMEP değerini arttırabileceği belirlendi Yakıt olarak doğal gazın kullanıldığı bu araştırmada ulaşılabilen en yüksek IMEP değeri 14 bardır. Bu değer, motorun maksimum basınç limiti 250 bara ayarlı olduğu durumda 2 barlık doldurma basıncı ve 17:1' lik bir sıkıştırma oranı ile sağlandı. Daha düşük bir sıkıştırma oranı ve daha yüksek doldurma basıncıyla daha da yüksek IMEP değeri elde edilebilir fakat bu durumda termik verim düşecektir. Doldurma basıncındaki ve motor yükündeki artışla HC emisyonları azalır. CO emisyon miktarı, hava-yakıt oranına ve ön ısıtmaya çok bağlıdır. Motor, ısıtılmış emme havası ve zenginlik sınırlarına yakın karışımlarla çalıştırıldığında CO emisyonları ihmal edilebilir bir düzeydedir. Tüm test koşullarında NOx emisyonları son derece düşüktür. Turboşarjlı çift-yakıtlı HCCI operasyonu için modifiye edilen 6 silindirli bir kamyon motorunun çalışma karakteristikleri incelendi. Etanol ve n-heptan gibi iki farklı yakıt, tutuşma zamanlamasını kontrol etmek için kullanıldı. Bu araştırmanın amacı, büyük boyutlu bir HCCI motorunun ağır yüklerde nasıl çalıştığını göstermek ve turboşarjlı HCCI operasyonu ile alakalı tipik nitelikteki bazı sıkıntıları irdelemektir. Bu araştırma, turboşarj ve çift yakıt uygulamasıyla 16 bar ortalama efektif basıncına (BMEP) kadar ulaşan ağır yük operasyonlarının ve son derece düşük NOx emisyonlarının elde edilebilme olasılığını kanıtlamaktadır. Her ne kadar bu sistem büyük potansiyel gösterse de emme havası ön ısıtmasının olmayışı, yanma veriminin bozulduğu düşük yüklerde bir dezavantaj yaratmaktadır. Ağır yüklerde düşük seyir eden egzoz sıcaklıkları, turboşarj prosesi için çok az enerji sağlar. Bu nedenle turboşarjlı klasik bir diesel motordakinden daha fazla pompa kaybı (türbin-kompresör grubunda) söz konusudur. Bu yüzden turboşarjer (türbinli doldurucu) dizaynı, yüksek pompa verimi ile ağır yük operasyonunun birlikte sağlanabilmesi için çok önemli bir konudur [25].

4.7 Yakıt Püskürtme Stratejileri ve Silindir İçindeki Yakıt Dağılımının Etkisi

Lokal dolgu sıcaklığı ve hava-yakıt oranı, HCCI yanma prosesinin başlangıcının kontrol edilmesinde rol alan kilit nitelikteki değişkenlerdir. Silindir içerisine yakıtın direkt olarak püskürtülmesi, püskürtme zamanlamasının çeşitlenmesi neticesinde lokal yakıt konsantrasyonunun değiştirilmesi suretiyle HCCI yanma prosesinin kontrol edilmesinde büyük bir potansiyele sahiptir. Karışımın sıcaklığı (lokal dolgu sıcaklıkları), aynı zamanda yakıtın buharlaşmasından ötürü dolgunun soğuması neticesinde değişim gösterebilir. Erken yakıt püskürtme prosesi, yakıtın buharlaşıp hava ile karışarak homojen bir dolgu oluşturması için yeterli süreyi sağlar. Sıkıştırma stroku sırasında yanma odasına yapılan geç pilot püskürtme, yanma odasının bazı bölgelerinde lokal yakıt konsantrasyonunu arttırarak HCCI yanma fazını kontrol edebilir. Karışımın zenginleştirilmesi aynı zamanda özgül sıcaklık değerlerini düşürür ve böylece dolgudaki net sıkıştırma ısıtmasının miktarı azalır. Bu nedenle karışımı kendi kendine tutuşma sıcaklığına getirmek için daha fazla sıkıştırma yapılmalıdır fakat bu durumda, kendi kendine tutuşmanın başlangıcı gecikir. İki safhalı püskürtme sayesinde bu iki teknik (erken püskürtme ve geç pilot püskürtme), aynı çevrimde beraber uygulanabilir. Egzoz supabının erkenden kapatıldığı ve yakıtın silindirin içine püskürtüldüğü bir kombinasyon vasıtasıyla benzinli HCCI yanma prosesini kontrol etmek üzere bir konsept ileri sürüldü (Willand vd., 1998). Erken kapanan egzoz supabı, art gazların önemli bir miktarını silindir içinde tutar ve böylece HCCI yanma prosesini başlatmak için gerekli olan sıcaklığın bir kısmını sağlar. Art gazların ısısından yararlanarak yakıtın buharlaşmasını kolaylaştırmak için emme supabının açılışından çok önce bir DI benzin enjektörü vasıtasıyla yakıt silindir içerisine direkt olarak püskürtülebilir. Böylece homojen bir dolgu elde etmek için yeterince uzun bir karışım oluşturma süresi temin edilebilir. Egzoz supabının erkenden kapatılmasıyla sağlanan egzoz gazının tekrar sıkıştırılması periyodu zarfında yapılan yakıt püskürtmesinin, zamanlama ve miktar koşulları araştırıldı (Hiraya vd., 2002b). Kendi kendine tutuşma prosesindeki fakirlik sınırının, egzoz gazı tekrar sıkıştırma strokunda yapılan yakıt püskürtmesiyle önemli derecede genişletilebileceği görüldü. Egzoz gazı tekrar sıkıştırma strokunda tamamlanan yakıt püskürtme prosesine kıyasla emme stroku sırasında yakıtın bir kısmının püskürtülmesiyle sağlanan kendi kendine tutuşma prosesindeki fakirlik sınırı daha geniştir. Egzoz gazı tekrar sıkıştırma periyodu zarfında gerekli olan optimal yakıt miktarı, yükteki artışa bağlı olarak azalmaktadır. Şu açıktır ki çok safhalı direkt yakıt püskürtmesi

sayesinde, HCCI yanma prosesinin kontrolü bir dereceye kadar sağlanabilir. Direkt püskürtme kontrollü olarak yakıtın kademelendirilmesine olanak sağladığından ötürü direkt püskürtme prosesinin, HCCI operasyonu için etkili bir yanma fazı kontrol parametresi olduğu belirtilmektedir. Çeşitli emme havası sıcaklıklarında, motor yüklerinde ve motor hızlarında optimal yanma fazının elde edilmesi için yakıtın kademelendirilmesi faydalı olmaktadır. Yakıtın kademelendirilmesi, motorun yük durumuna bağlı olarak emme havası sıcaklıklarının yaklaşık 20 °C' lik bir diferansiyelinde optimal yanma fazını devam ettirebilir. Sabit bir emme havası sıcaklığında yakıtın kademelendirilmesi sağlanarak optimum yanma fazı, yaklaşık olarak HCCI operasyonunun tüm yük sahasında sürdürülebilir. Yakıtın kademelendirilmesi aynı zamanda sabit bir emme havası sıcaklığının varlığında motorun tüm hız sahasında optimum yanma fazını sürdürmek için kullanılabilir. Bununla birlikte motor hızındaki bu kontrol esnekliği, sadece düşük yük koşullarına kapalıdır. Neticede tek bir kontrol parametresi olarak yakıtın kademelendirilmesi, motorun tüm hız ve yük sahasında optimum tutuşma zamanlamasını sürdürmek için yeterli değildir. Tek safhalı ve çok safhalı püskürtmeler için püskürtmenin başlangıç (SOI) zamanlaması parametreleri (değişkenleri), homojen veya yakıtın kademelendirilmiş olduğu bir dolguyu sağlamanın ve keza dumansız motor operasyonunu sürdürebilmenin bir çaresi olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yakıtın kademelendirilmesi, geç püskürtme koşullarında oluşan duman emisyonları dolayısıyla sınırlı bir seviyede tutulmaktadır. Püskürtme zamanlaması parametreleri ile oluşan dolgu kademeleri arasında kurulan dumansız çalışma sahası dahilindeki ilişki, bir dereceye kadar motor hızından etkilenmemektedir. Sonuç olarak yanma fazının kontrol edilebildiği yük ve emme havası sıcaklık sahasının da motor hızından etkilenmediği söylenebilir. Kademeli dolgulu operasyonların, homojen dolgulu operasyonlar ile karşılaştırması yapıldığında yanma performansının önemli derecede değiştiği görülebilir. Dolgunun kademelendirilmesi, HC emisyonlarının önemli derecede azalmasından ötürü yanma veriminin iyileşmesine neden olur. Sonuç olarak motorun genel termik verimi de iyileşme gösterir. Bununla birlikte yakıtın kademelendirilmesi, denk yüklerdeki homojen dolgulu operasyonlara göre her zaman daha yüksek NOx emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Genel olarak yakıtın kademelendirilmesi arttırıldıkça daha fazla NOx emisyonunun oluştuğu söylenebilir. Püskürtme zamanlaması parametreleri ile oluşan dolgu kademeleri arasındaki ilişki, yanma fazının kontrol esnekliğine rağmen NOx emisyonlarının

artmasına neden olur. Bununla birlikte bu NO_x artışının büyüklüğü, yakıt püskürtme prosesini iki bağımsız olarak ayarlanmış püskürtmeye ayırarak önemli derecede azaltılabilir. Genel olarak kademeli dolgulu operasyonlar, homojen dolgulu operasyonlara göre daha kısa sürmektedir. Sonuç olarak kademeli çalışma sahasının genelinde vurutu oluşmamaktadır. Bununla birlikte çok safhalı püskürtmeler, geçerli bir kademeli yanma prosesinin ısı açığa çıkış hızının yavaşlatılmasında ve toplam yük ve hız sahasının arttırılmasında da etkili olmaktadır. Silindir merkezinde daha zengin yakıt dağılımını oluşturmak suretiyle yakıtın kendi kendine tutuşma prosesinde bir zamanlama farkı meydana getirerek motorun çalışma sahasını genişletmek için bir strateji geliştirildi. Bu stratejide yakıt püskürtme prosesi, birinci püskürtme ve ikinci püskürtme şeklinde iki safhaya ayrılmıştır. Birinci püskürtme, yanma odasının her tarafında fakir ve homojen bir karışım oluşturmak için emme stroku sırasında yapılmaktadır. İkinci püskürtme, silindir merkezi civarlarında zengin bir karışım oluşturmak için sıkıştırma stroku sırasında gerçekleştirilmektedir. İkinci püskürtme zamanlaması, HCİ yanma zamanlamasını tayin eder. Deneysel sonuçlar da iki ayrı kendi kendine tutuşma prosesinin gerçekleştiğini göstermektedir ki bu proseslerde, ilk olarak silindir merkezi civarlarındaki karışımca zengin bölge tutuşur ve bu karışımca zengin bölge, bir tutuşturucu kaynak olarak birinci püskürtme vasıtasıyla hazırlanan çevredeki karışımca fakir bölgeyi tutuşturmak için kullanılmaktadır. Karışımca daha zengin bölgede hava-yakıt oranının dağılımı uniform olmadığı için NO_x emisyonları biraz yüksektir. Bu araştırmada görülen şudur ki bu iki safhalı yanma prosesi kararlı değildir ve ikinci yakıt püskürtme prosesinin çevrimden çevrime gösterdiği yakıt miktarındaki farklılıktan ötürü aralıklı olarak vurutu ve ateş almama olayları gerçekleşir ki bu farklılaşma, tutuşma zamanlamasının değişmesine ve kararsız bir yanmanın gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu durum kararlılık gösteren iki-safhalı yanma prosesini elde edebilmek için tutuşma zamanlamasını control etmenin etkili bir yolunun bulunması gerektiğini ortaya koymaktadır. Önerilerden biri buji kullanılmasıdır. Bu iki safhalı yanma konseptinde buji, basınç ve sıcaklık artışını sağlamak amacıyla silindir merkezindeki zengin karışımın sadece küçük bir miktarını tutuşturmak için kullanılmaktadır ve böylece yakıtın geri kalan kısmı, kendi kendine tutuşma prosesi vasıtasıyla tutuşmaktadır. Oluşan NO_x miktarını azaltmak için silindir merkezindeki zengin karışım miktarı, ortamdaki yakıtın sıkıştırma yoluyla kolayca tutuşmasını sağlayabilen en düşük seviye ile sınırlı olmalıdır. Bununla beraber bu çalışma, ağır yük koşullarında silindir merkezinde karışımca zengin bir

bölgenin oluşturulmasıyla vuruntunun önlenilme olasılığını ortaya koymaktadır. Karışımca zengin bölge, ortamdaki karışımca fakir bölgenin tutuşturulmasında bir tutuşturucu kaynak olarak iş görür. İki safhalı yanma, bu şekilde yani iki ayrı kendi kendine tutuşma prosesi vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu çalışma tarzı, ağır yüklerde vuruntu oluşmadan benzin yakıtlı HCCI motorunda kararlı kendi kendine tutuşma prosesinin elde edilebilme olanağını sağlamaktadır. Bu çalışma tarzı aynı zamanda herhangi bir komplike donanıma gereksinim duyulmadan kısa süreli operasyonlar için tutuşma kontrolünü sağlamanın başka bir yolunu göstermektedir. Çeşitli yakıt püskürtme stratejileri, diesel yakıtlı HCCI operasyonlarının kontrolü kapsamında araştırılmaktadır. Bu araştırmalarda çok safhalı (bölünmüş) püskürtme stratejileri, emme manifolduna yapılan püskürtmelerle, silindir içerisine çok erken yapılan püskürtmelerle ve silindir içerisine geç yapılan püskürtmelerle birlikte kullanılmaktadır. Diesel yakıtlı HCCI motorunun ilk gelişim evresinde bir benzin manifold yakıt püskürtme sistemi kullanılarak emme supabının açılmasından önce diesel yakıtı, emme havası içerisine dağıtıldı. Basitliğine rağmen bu yaklaşım, homojen bir yakıt-hava karışımının oluşturulmasında iyi iş görmektedir. Fakat bu yaklaşım, emme havasının ön koşullandırılmasını ve diesel yakıtı için düşük bir yakıt püskürtme basıncında iyi atomize olmuş bir yakıt hüzmesini sağlayabilen bir enjektörün kullanılmasını gerektirir. Ayrıca yağın önemli derecede seyrelmesi ve ağır yük operasyonlarına geçme zorluğu gelişim kapsamında çözülmesi gereken konulardır. Diesel yakıtlı HCCI motoru için başka bir alternatif olarak silindir içine yapılan tek safhalı erken püskürtme prosesi aynı zamanda kapsamlı bir şekilde araştırıldı çünkü bu proses, klasik bir diesel yakıt sistemini kullanabilmektedir. Silindir içine yapılan erken yakıt püskürtme stratejisi kullanılarak yakıt, sıkıştırma strokunun erken safhalarında püskürtülmektedir. Yakıtın buharlaşması, ortamdaki gazlardan ısı çeker ve tüm karışımın sıcaklık kompozisyonunu önemli derecede etkiler. Diesel yakıtının erken püskürtülmesiyle elde edilen deneysel sonuçlar, emisyon azalimleri yönünden iyi netice vermektedir. Bu püskürtme stratejisindeki zorluk, özellikle çok erken püskürtme zamanlamalarında klasik yüksek-basınçlı yakıt püskürtme sistemleri kullanıldığı zaman minimize edilmiş yakıt hüzmesi-silindir cidarı etkileşiminin varlığında homojen bir karışım oluşturulmasıdır. Yakıt hüzmesinin penetrasyonunu (boyunu) azaltan ve iyi atomizasyon sağlayan bir meme şiddetle gereklidir. Bu sebeple birçok farklı meme modeli araştırıldı ve bu modeller, literatürde yer almaktadır. Sistem karmaşıklığı göz önünde tutulduğunda henüz

pratik bir yakıt püskürtme sistemi geliştirilemedi. En başarılı yakıt püskürtme stratejisi, geç direkt püskürtmeli HCCI operasyonlarıdır. Bu operasyonlarda yakıt, klasik diesel yanmasındakinden (operasyonundakinden) daha geç püskürtülmektedir. Bu operasyonlarda hızlı karışım oluşumu için yüksek türbülans seviyeleri ve tutuşmayı geciktirmek için EGR' nin yüksek seviyeleri kullanılmaktadır . Bu koşullar, kendi kendine tutuşma prosesinden önce yakıt ile havanın yeterli derecede karışmış olmasına olanak sağlamaktadır. Fakat bu geç direkt püskürtme stratejisi, tutuşma gecikmesi süresi zarfında yakıt hüzmesinin, atomizasyonunu, buharlaşmasını ve karışım oluşturmasını sağlamak için çok hızlı bir karışım oluşturma prosesine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca bu tür operasyonlardaki tutuşma gecikmesi süreleri, geç direkt püskürtme stratejisinin ağır yüklerdeki çalışma kabiliyetini önemli derecede sınırlamaktadır. Erken ve geç püskürtme proseslerinin en iyi özelliklerini bir araya getirebilmek için çok safhalı püskürtme prosesleri de araştırıldı ve bu prosesler, literatürde yer almaktadır. Bu çok safhalı püskürtme proseslerinde erken püskürtme, ön karışimli homojen bir dolgu oluşturmak ve geç püskürtme, kendi kendine tutuşma prosesinin kontrolünü sağlamak maksadıyla kullanılmaktadır. Her bir püskürtme safhasında püskürtülen yakıt miktarı, kritik parametrelerden biridir. Her bir püskürtme prosesindeki buharlaşma derecesi ve yakıt dağılımı aynı zamanda is ve NOx emisyonlarını önemli derecede etkilemektedir. Farklı yakıt püskürtme safhaları uygulandığında bu safhaların yanma fazı ile uyumlu hale getirilmesi önemlidir. Eğer dolgunun ön karışimli kısmının yanma fazı ciddi şekilde aşırı gelişik ise ağır yüklerde ciddi vuru problemleriyle karşılaşılması kaçınılmazdır. Aynı zamanda ön karışimli operasyonlarda diesel yakıtı kullanıldığında HC emisyonları yüksektir ve sonuç olarak yakıt sarfiyatı, düşük yanma verimi ve zamansız yanma fazı nedeniyle olumsuz etkilenmektedir. Bununla beraber yakıt püskürtmeli kontrol stratejisi, yanma (tutuşma) zamanlamasının kontrolünde hızlı cevap potansiyeline sahiptir ve HCCI kontrolü için kısa süreli operasyonlarda uygulanabilmektedir. Son olarak şunu belirtmekte fayda vardır ki diesel yakıtı gibi ağır yakıtların silindir içine yapılan pilot püskürtmesi (kendi kendine tutuşma prosesinden önce silindir içine yapılan geç zamanlamalı yakıt püskürtmesi) HCCI operasyonlarının kontrolü kapsamında literatürde yer almaktadır. Bu strateji, emme havasının ön koşullandırılması üzerine olan bağımlılığı ortadan kaldırmaktadır ve son derece (aşırı) fakir bir karışımla bile HCCI operasyonlarına olanak sağlamaktadır. Artan partikül ve NOx emisyonları gibi geç zamanlamalı yakıt püskürtmesi ile alakalı herhangi bir olumsuzluk,

pilot püskürtme stratejisi için de bir sorun teşkil etmektedir. Pilot püskürtme yoluyla sağlanan yakıt dağılımı, tutuşturucu nokta sayısını sınırlar ve kendi kendine tutuşmalı klasik HCCI operasyonlarından farklı bir tarzda yanma prosesinin gerçekleşmesini sağlar. Bu strateji için aynı zamanda çift yakıtın kullanılabilirdiği bir sistem gerekli olabilir. Pilot yakıt miktarının kontrol edilmesi mecburidir. Ön karışimli yakıt için vurutuyla sınırlanmış bir sıkıştırma oranı ve bir hava-yakıt oranı var olmasına karşın pilot yakıtın, kendi kendine tutuşma prosesinde yüksek sıcaklığa gereksinimi vardır. Ön karışimli yakıtın kendi kendine tutuşma karakteristikleri, motorun çalışma aralığını belirler [26].

4.8 Yakıtların, Katkı Maddelerinin ve Yakıt Modifikasyonlarının Etkisi

Yakıt tercihi HCCI motor gelişiminde önemli bir unsurdur. Hem yakıtın uçuculuğu hem de kendi kendine tutuşma karakteristikleri önemli parametrelerdir. Homojen bir dolgunun kolaylıkla oluşturulabilmesi için yakıt yüksek uçuculuk özelliğine sahip olmalıdır. Kimyasal olarak tek safhada tutuşan yakıtlar, yükteki ve hızdaki değişikliklere karşı daha az duyarlıdır. Bu yakıt kaynaklı özellik, motor çalışma koşullarının geniş bir aralığı için HCCI kontrol sisteminin sağlaması gereken şartları azaltabilir. Yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığı, yüksek yakıt verimi elde edebilmek için optimal motor sıkıştırma oranının seçilmesi hususunda kritik bir konudur. Düşük yüklerde HCCI operasyonu için tüm gerekli koşulların karşılanmasına ilave olarak yakıt, aynı zamanda ağır yük operasyonlarındaki performans kriterlerini yerine getirmek zorundadır. Örneğin benzinli HCCI operasyonunu gerçekleştirmek için yakıtın kolayca kendi kendine tutuşması gereklidir. Bu yüzden benzin düşük bir oktan sayısına sahip olmalıdır. Yukarıdaki durumun aksine benzin, vurutu oluşmadan yüksek bir çıkış gücü elde edilebilmesi için ağır yüklerde klasik SI alev yayılımını sağlamak amacıyla yüksek oktan sayısına sahip olmalıdır. Birbiriyle bağdaşmayan bu farklı özellikteki yakıt gereksinimleri, HCCI motor gelişimini son derece zor bir olay haline getirmektedir. Kesin olarak HCCI uygulamalarına özgü hiçbir yakıtın bulunmadığı söylenebilir. Optimal yakıt tercihi, yanma kontrol stratejilerine ve aynı zamanda çalışma koşullarına tabidir. Şunu söylemek mümkündür; HCCI motorları herhangi bir yakıtla çalıştırılabilir. Fakat bunun için şu ikisinden biri yapılmalıdır. Yakıt, spesifik (özel) bir motor dizaynına veya bunun da ötesinde o motor için spesifik bir çalışma koşuluna uyarlanmalıdır. Diğeri ise motorun, spesifik bir yakıtı uyarlanmasıdır. Bu nedenle HCCI operasyonlarındaki kendi kendine tutuşma prosesleri, yakıtı

modifiye ederek kontrol altına alınabilir öyle ki tutuşma kabiliyetini arttırıcı veya frenleyici türden bir katığın ilavesiyle yakıt, kimyasal olarak daha fazla reaktif veya frenleyicidir. Örneğin doğal gazlı bir HCCI motorunda şu görülmüştür; silindir içerisinde tutulan egzoz gazı içinde bulunan NOx' lerin küçük bir miktarı bile HCCI operasyonlarında önemli bir iş görebilmektedir. Her ne kadar ilave azotlu bileşiklerin egzoz gazı kalitesinin bozulması üzerine olan etkilerini değerlendirmeye almak gerekse de kimyasal bir yakıt katkı maddesinin ilavesi suretiyle değişik miktarlarda NO2 kullanımı, HCCI operasyonlarının kontrolü için bir olanak sağlayabilir. CNG ve dimetil eter (DME) arasındaki büyük reaktiflik farkı, HCCI zamanlama kontrolünün geniş bir sahada elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte bir yakıt iyileştirici katık kullanılması durumunda CNG ve DME yakıt karışımlarının sağladığından daha sınırlı bir çalışma sahası söz konusudur. DME ve metanol türevli (%67 H₂ + %33 CO) gaz karışımını yakıt olarak kullanan bir HCCI sistemi ileri sürüldü. Burada bahsi geçen yakıtların her ikisi de methanol iyileştirici (yapılandırıcı) katık kullanılarak egzoz ısısından da faydalanmak koşuluyla taşıt üzerinde üretilmektedir. Bu sistem sayesinde denklik oranının (yakıt/hava oranının) geniş bir aralığında yüksek termik verim sağlanmaktadır. Metanol türevli gaz, DME yakıtlı HCCI operasyonundaki yüksek sıcaklık reaksiyonları vasıtasıyla ısı açığa çıkışının ikinci safhasının zamanlamasını etkili bir şekilde kontrol eder. Bu durum denklik oranının ve motor yükünün kullanılabilen aralığının genişletilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca metanol türevli gazda bulunan CO ve hidrojenin, ikinci safha ısı açığa çıkışının başlangıcını geciktirmede mutlak bir etkiye sahip olduğu görüldü. Kıyaslama yapıldığında hidrojen, DME yakıtlı HCCI operasyonundaki ısı açığa çıkışını karbon monoksit göre daha fazla etkilemeye eğilimlidir. Kendi kendine tutuşma zamanlaması kontrolünü sağlayabilmek için farklı oktan sayılı iki farklı yakıtın karıştırılmasına dayanan bir yaklaşım ileri sürüldü. Yüke ve hıza göre değişen her bir çalışma koşuluna karşı bu yakıtların optimal bir karışımının olması gerektiği görüldü. Motor operasyonlarının geniş bir çalışma sahasını elde edebilmek için mümkün olduğunca yüksek oktan sayılı yakıtın ve aynı zamanda mümkün olduğunca düşük oktan sayılı yakıtın kullanılması zaruridir. Karıştırılan yakıtlar arasında daha büyük bir oktan sayısı farkı varken daha geniş bir operasyon sahası elde edilebilmektedir. Bazı yüksek oktan sayılı yakıtlar zayıf olan kendi kendine tutuşma karakteristiklerinden ötürü tutuşmaya bilir (belli bir sıkıştırma oranında yüksek oktan sayılı yakıtın ateş almaması durumu) ve bu durum, klasik SI yanmasındakinden daha yüksek HC

emisyollarıyla sonuçlanır. Hem yakıtın toplam miktarı hem de karışım oranı, motorun tork şartını karşılamak üzere iyi ayarlanmalıdır ve bu konu, pratik uygulama için önem arz eden bir zorluk teşkil etmektedir. Diesel yakıtlı HCCI motorlarda yüksek sıkıştırma oranı, düşük yüklerdeki kendi kendine tutuşma kabiliyetini arttırmak ve silindir içine yapılan direkt yakıt püskürtmesi, yanma zamanlamasını kontrol etmek için kullanılabilir. Bununla birlikte diesel yakıtının düşük sıcaklık kimyası, sıkıştırma prosesi sırasındaki sıcaklıklar eşik değeri geçer geçmez hızlı bir şekilde kendi kendine tutuşma prosesini gerçeklemeye eğilimlidir öyle ki genellikle aşırı derecede gelişmiş yanma fazı söz konusudur. Bu nedenle ekseriyetle sıkıştırma oranlarının azaltılması gereklidir. Ayrıca diesel yakıtının düşük uçuculuğu ile birlikte ÜÖN' dan çok önce kendi kendine tutuşmaya karşı olan doğal eğilimi, partikülsüz yanma için var olan tüm potansiyelini araştırmak için gerekli olan homojen bir karışım oluşumunun elde edilmesini son derece zor bir hale sokmaktadır.mYükseltilmiş emme havası sıcaklıkları, yüksek seviyede bir buharlaşma olması için son derece önemlidir. Diesel yakıtlı HCCI konseptlerinin çoğu sadece tek bir yakıt sevk sistemine (tek bir enjektöre) ihtiyaç gösterse bile yüksek püskürtme basınçları nedeniyle silindir cidarlarının yakıtla ıslanması kaçınılmazdır. Bu durum artan HC, is ve NOx emisyonlarının sebebidir. Yetersiz derecede atomize olan yüksek momentumlu diesel yakıt hüzmeleri dolayısıyla HCCI püskürtme sistemlerinin dizaynı oldukça zordur.Yakıt püskürtme sisteminin, silindir hacminin bir ucundan diğer ucuna kadar her yerde fakir ve homojen bir karışım oluşturması ve aynı zamanda sıvı yakıtı silindir cidarlarından uzak tutması istenilen durumdur. Bununla beraber bu sistemin birçok potansiyel avantajından ötürü diesel yakıtlı HCCI operasyonlarını anlamak ve ticarileşmesi için bazı yaklaşımları geliştirmek üzere son yıllarda büyük çabalar sarf edilmektedir. Benzin yakıtlı HCCI motorlar için var olan problemler diesel yakıtlı HCCI motorlarınıninkinin tam tersidir. Benzin diesel yakıtına göre daha uçucu olduğu için benzin ile homojen bir karışım oluşturulması nispeten daha kolaydır. Ağır yüklerdeki motor vurunusunu önlemek için gerekli olan düşük sıkıştırma oranları ile benzinin yüksek oktan sayısı bir araya gelince düşük yüklerde kendi kendine tutuşma prosesinin gerçekleştirilmesi zorlaşır. Bu yüzden benzin yakıtlı HCCI konseptlerinin hemen hepsi, düşük sıkıştırma oranlarında ve düşük yüklerde kendi kendine tutuşma prosesi için gerekli olan sıcaklıkların elde edilebilmesi amacıyla dolgu ısıtmasını veya EGR/art gazın çok aşırı miktarlarını kullanmaktadır. Dolgu ısıtmasının seviyesi, HCCI operasyonları için minimum yükü ve

sıkıştırma oranının eşik değerini genel olarak belirler. Benzinin ve diesel yakıtının belirtilen kendilerine has özellikleri dolayısıyla bu yakıtların karıştırılması, çalışma koşullarının geniş bir aralığında istenilen HCCI operasyonlarını sağlamak için potansiyel bir yakıtı teşkil edebilir. Çift yakıt sisteminin nasıl önüne geçilebileceği konusu, gelişim sürecindeki zorluklardan biridir [27].

4.9 Motor Hızı

Kuramsal olarak HCCI yanmanın tutuşma gecikmesi süresi, büyük bir oranda karışım kimyasına bağlıdır ve motor hızından bir dereceye kadar etkilenmez. Bununla birlikte HCCI yanmanın krank açısı derecesi ile tanımlanan tutuşma gecikmesi süresi, motor hızı arttığında artar. Tutuşma ÜÖN' dan önce gerçekleştiğinde sıkıştırma sırasındaki sıcaklık artışı, yüksek motor hızlarındaki nispi (bağıl) tutuşma gecikmesini dengelemektedir. Eğer tutuşma ÜÖN' dan sonra gerçekleşirse yüksek motor hızlarının neden olduğu nispi tutuşma gecikmesi, sıcaklık artışını yavaşlatan genişleme prosesi dolayısıyla daha fazla artar. Optimal yanma fazının sağlanabilmesi için motor hızındaki artışa göre emme havası sıcaklığının artırılması gibi diğer çareler vasıtasıyla tutuşma gecikmesi süresi dengelenmelidir. Motor hızının artışından ötürü meydana gelen tutuşma gecikmesi süresindeki artışlar teorik olarak tamamen dengelenebilir fakat bu konu gerçekte pratik uygulama sahasının sınırları içinde gerçekleştirilebilir. Motor hızı arttıkça tutuşma gecikmesi süresi giderek artar. Bu durumda HCCI yanmasını başlatmak için yüksek bir emme havası sıcaklığının gerekli olduğu belirtildi. Sonuç olarak kararlı yanma, yüksek emme havası sıcaklıklarıyla ve maksimum yükteki azalmayla sağlanır. Mevcut zaman çerçevesi zarfında yanmayı başlatmanın işe yarar yolu, üst hız sahasının sınırlandırılmasından geçmektedir. Bu konu ile ilgili olarak 1000 d/dak.' dan 5000 d/dak.' ya kadar uzanan bir hız sahasında başarı sağlanmıştır [28].

4.10 Karışım Homojensizliğinin Etkisi

İki stroklu motorlarda HCCI yanması üzerindeki ısıl kademelendirmenin ve karışimsızlığın rolü şu tahmine götürdü. Karışım homojensizliği dört stroklu motorlarda HCCI yanmasını kontrol etmek için bir anahtar unsundur. HCCI yanma üzerine karışım homojensizliğinin etkilerini araştırmak üzere deneye ve hesaba dayanan önemli çabalar sarf edildi. Dört stroklu bir motorda HCCI yanmasının direkt gözlemi 35 oktan sayılı bir ana referans yakıt (PRF)

karışımını kullanan tek silindirli bir motorda gerçekleştirildi. Yakıt hazırlanışının yanma üzerine etkilerini araştırmak için ön karışımli önceden buharlaşmış yakıt ile ve ayrıca manifolda yakıt püskürterek deneyler gerçekleştirildi. Yakıt dağılımının görünümü iki farklı yakıt hazırlama stratejisi arasında önemli farklılıklar olduğunu gösterdi. Manifolda yakıt püskürtme stratejisi kullanıldığında silindir içerisindeki homojensizlikler 4 ila 6 mm kabilinden ölçüldü. Ön karışımli strateji de ise silindir içerisinde hiçbir önemli homojensizlik ölçülmedi. Bununla birlikte silindir içindeki OH radikal dağılımlarının kıyaslamaları iki yakıt hazırlama modu arasında herhangi bir önemli farkı göstermedi. Araştırmacılar karışimsızlığın HCCI yanması üzerine sadece orta seviyede bir tesire sahip olduğu sonucuna vardılar. HCCI yanmasına art gazların ve yakıt dağılımının etkileri araştırıldı. 50 oktanlı PRF yakıt karışımı ile çalışan tek silindirli bir motordaki yakıt dağılımını ölçmeyi umarak planer lazerle-indüklenmiş fluoresans (PLIF) kullandılar. Silindir kafası yüksek seviyede türbülans meydana getirmek üzere dizayn edilmiş emme manifoldlarına sahipti ve tekabülünde silindir içindeki yakıt dağılımında geniş gradyenler gözlemlendi. Her ne kadar yakıtın çoğu yanma odasının çevresi etrafında bulunmakta ise de kendi kendine tutuşmanın daima silindirin merkezinde başladığı gözlemlendi. HCCI prosesindeki yakıtın kendi kendine tutuşmasında art gazın ana etkisinin termal olduğu ve dolgu seyreltiminin en önemli tesirinin ana yanmada olduğu sonucuna vardılar. Deneylerle birlikte numerik modelleri kullanarak, tekrar çevrime katılmış olan egzoz gazı ara ürünlerinin yanma (tutuşma) üzerinde hiçbir kimyasal etkisi olmadığı sonucuna vardılar. Doğal gazın HCCI yanması üzerine EGR homojensizliğinin etkisi araştırıldı. Deneyler tek silindirli bir diesel motorunda 17:1' lik bir sıkıştırma oranında gerçekleştirildi. EGR motora girmeden önce harici olarak soğutuldu. EGR' nin kötü dağılımının etkisini motorun yukarı kısmındaki bir karışım tankının içine EGR' nin verildiği homojen durum ile, emme manifoldunun hemen yukarı kısmından EGR' nin verildiği homojen olmayan durumdaki motor performanslarını kıyaslayarak anladılar. Homojen olmayan EGR ile kendi kendine tutuşma zamanlaması hafifçe iyileşti ve 10° - 90° krank açısı yanma süresi uzadı. İyileşmiş (öne çekilen) tutuşma zamanlamasının karşılığı olarak motorun indike ortalama efektif basıncı (IMEP) yükseldi. Karışım homojensizliğinin HCCI yanması için tesirli bir kontrol aracı olarak kullanılabileceği sonucuna vardılar. HCCI yanması ve emisyonlar üzerine yakıt homojensizliğinin tesiri deneyler serisiyle araştırıldı. Deneyler hem metanı hem de propanı yakıt olarak kullanan 16:1 sıkıştırma oranlı tek silindirli bir motorda gerçekleştirildi. Yakıt

homojensizliğinin etkisi, yakıt tamamen motorun yukarı kısmındaki karışım tankına püskürtüldüğünde (homojen durum) ve yakıt emme manifolduna püskürtüldüğünde (homojen olmayan durum) elde edilen sonuçların motor performansları kıyaslanarak dolaylı olarak anlaşıldı. Her ne kadar NOx emisyonları %50 oranında, HC ve CO emisyonları %25 oranında arttı ise de IMEP, karışım homojensizliği ile değişmedi. Bir motor simulasyon modeli, nitel olarak benzer eğimler gösterdi çünkü yanma fazı homojensizliğe duyarsızdı. Oysa öngörülen NOx emisyonları artan karışimsızlıkla yükseldi [29].

4.11 Türbülansın Etkisi

HCCI prosesindeki yakıtın kendi kendine tutuşması ve yanması üzerine karışımın silindir içi türbülansının etkilerini direkt olarak ölçmek için pek çok deney gerçekleştirildi. HCCI yanmasına yanma odası geometrisinin etkileri deneysel olarak araştırıldı. Yanma odası içerisindeki türbülans miktarlarını değiştirmek üzere farklı olarak biçimlendirilmiş iki tip piston ile tek silindirli bir motorda deneyler gerçekleştirildi. Pistonlardan birinin tepesi düzdü ve diğer pistonun tepesinde kare şeklinde bir oyuk vardı. Tepesi oyuk piston ile ÜÖN civarlarında yüksek seviyede türbülans meydana getirildi. Deneyler sabit bir motor hızında gerçekleştirildi ve emme havası sıcaklığı 60 °C' den 200 °C' ye kadar değiştirildi. Kullanılan yakıt 50 oktan sayılı bir PRF karışımı idi. Aynı yanma fazında oyuk piston için giriş havası sıcaklığı düz piston için gerekli sıcaklıklardan 20 °C daha düşüktü. Bu durum şunu gösterir; türbülansın kendi kendine tutuşma üzerine olan etkisi (tutuşmayı kolaylaştırarak) sıcaklık gereksinimini azaltma yönündedir. Bununla birlikte oyuk piston için yanma süresi daha uzundu. Araştırmacıların düşündüğü ise türbülansın toplam yanma süresini arttırmaktan ziyade azaltma yönünde iş göreceği şekildeydi. Oyuk piston dizaynı daha fazla piston tepesi alanı sağlar. Bu durum her zaman şu anlama gelir; oyuk piston yüzey sıcaklığı, normal bir pistonunkine göre epeyce yüksektir. Oyuk pistonun daha yüksek yüzey sıcaklıklarının tutuşmayı kolaylaştıracağı öngörülmektedir. Oyuk pistonun daha fazla olan türbülansının aynı zamanda yanma sırasında gazdan olan ısı transferini arttırması ve tekabülünde yanma süresini uzatması söz konusu olabilir. Türbülansın ısı transferi üzerine karmaşık etkilerinden dolayı karışım hareketinin ve türbülansın HCCI prosesindeki yakıtın kendi kendine tutuşması ve yanması üzerine tesirini deneysel olarak belirlemek zordur. Türbülans arttığında silindirden olan ısı transferi artar ve birileri kendi kendine tutuşmanın ve yanmanın

gecikeceğini öngörmektedir. Karışım hareketinin yanma üzerine etkilerini açıkça anlamak için birisinin aynı zamanda karışım hareketinin ısı transferi üzerine etkilerini belirlemesi gereklidir. Benzer şekilde literatürde karışimsızlığın HCCI prosesindeki yakıtın kendi kendine tutuşmasını ve ana yanma hızını hangi mertebede etkilediği açık değildir. Karışimsızlığın yanma üzerine etkilerini açıkça anlamak için birileri karışimsızlığın büyüklüğünü ve yapısını tam olarak karakterize etmek zorundadır [30].

4.12 Yakıt Püskürtme Sistemi

En homojen karışımı elde etmek için taze dolgu ve yakıt arasında uzun bir karışım süresi olması istenir. Bu nedenle erken püskürtmeyi kullanan klasik bir PFI sisteminin, iyi homojen HCCI yanması elde etmek için en avantajlı sistem olacağı belli gibidir. Bir çok araştırmacı tarafından PFI yakıt püskürtmesi kullanılarak başarılı HCCI operasyonu sağlandı (Law vd., 2000; Kontarakis vd., 2000). Fakat bu çalışma modunun sakıncaları vardır. PFI püskürtme, ilave yanma fazı kontrolü için hiçbir potansiyel sunmaz ve maksimum kullanılabilir sıkıştırma oranını sınırlar. Direkt püskürtmeye geçiş sıkıştırma oranı artımı için potansiyel sunar (belirgin biçimde 1.0 ~ 1.5 sıkıştırma oranı artışı) ve böylece HCCI yanma prosesinin en düşük yük sınırında bir genişleme söz konusudur. Direkt püskürtme, aynı zamanda buji arkının artık tesirli (fili) olmadığı koşullar altında yanma fazı kontrolü için potansiyel sunar. Direkt püskürtme kullanılarak yanma fazının, püskürtme zamanlamasındaki değişiklikler ile kontrol edilebileceği gösterildi (Marriott vd., 2002a). Püskürtme zamanlamasının, emme strokundaki erken püskürtmeden sıkıştırma strokunun sonuna doğru yapılan püskürtmeye değiştirilmesiyle emme havası sıcaklıklarının, motor yüklerinin ve hızlarının bir dizisinde optimum yanma fazını elde edebildiler. CFD hesaplamaları bu yanma fazı değişimlerinin dolgunun kademelendirilmesindeki değişimlere bağlı olduğunu gösterdi. Dolgunun kademelendirilmesindeki değişimler püskürtme zamanlamasındaki değişimlerin sonucudur ve püskürtme zamanlaması emisyonlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Gerçekten değişen püskürtme zamanlamasıyla karışımın homojenlik seviyesine etki edilebildiğini buldular ve böylece motor çıktısı emisyonları değiştirebildiler. Çok homojen bir karışım oluşturmak için erken püskürtme kullanılarak son derece düşük NO_x ve partikül emisyonları elde edilebildi fakat HC emisyonları oldukça yüksekti. Önemli derecede dolgu kademelenmesiyle sonuçlanan geç püskürtme zamanlaması değişikliğiyle HC emisyonlarını

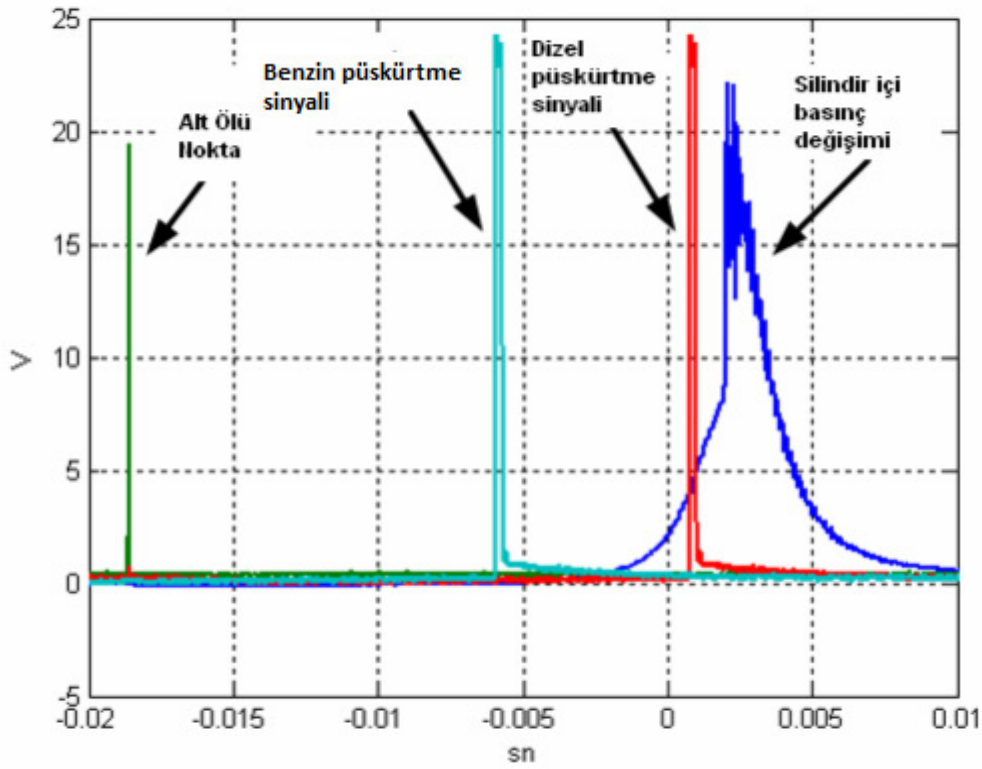
azaltabildiler fakat NO_x ve partikül emisyonları kabul edilemez dereceden yüksek seyir etti. Bununla birlikte optimum zamanlamayla üç emisyonunda düşük seviyelerini elde edebildiler. HCCI operasyonunun direkt püskürtmeye muhtaç olmadığı açıkken direkt püskürtme, DI yakıt sisteminin yüksek maliyetini temize çıkaran diğer cazip yararları sağlar. Belirtildiği gibi en düşük yüklerde HCCI operasyonu sağlanamadığında HCCI motoru diğer çalışma modlarına geçmek zorundadır. Eğer motor PFI yakıt püskürtmesi ile çalıştırılırsa motor, en düşük yüklerde gaz keleşinin kısık konumunda işletilmelidir. Bu durum büyük pompalama kayıplarına ve artan yakıt tüketimine neden olur. Direkt püskürtme işlemi ile motor kademeli dolgu modunda çalıştırılabilir ki bu durum, yüksek yakıt ekonomisi yararlarının en düşük yüklerde sürdürülmesini sağlar. Bu yaklaşımdaki problem NO_x emisyonlarının artmış olmasıdır ve gelecekteki emisyon mevzuatını karşılamak için düşük NO_x ard işlemini kullanmak gerekebilir. HCCI yanmanın kontrolü için direkt püskürtmenin belki de en fazla ilgi uyandıran kullanım şekli tarafından irdelendi. Egzoz gazının tekrar sıkıştırılması stratejisinin ve direct püskürtmenin kullanımı sayesinde bir ön-tutuşma kimyasal aktivasyon prosesi ile HCCI yanmasının kontrolünü sağlayabildiler. Emme prosesinden önce tutulmuş ve sıkıştırılmış olan egzoz gazlarına yine emme prosesinden önce direkt olarak yakıtın püskürtülmesiyle kimyasal aktiviteyi başlatabildiler. Bu kimyasal aktivite gerçek sıkıştırma strokunun sonundaki kendi kendine tutuşma prosesi üzerinde hızlandırıcı bir etkiye sahipti. Bundan başka yakıt püskürtme zamanlaması, kimyasal aktivitenin derecesi üzerinde ve dolayısıyla kendi kendine tutuşma prosesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tutulan art gazların sıkıştırılması sırasında yakıt püskürtülmesi, püskürtülen yakıtın sıcaklığını ve konsantrasyonunu yükseltir ve aktivasyon prosesi şiddetlendirilmiştir. Tam emme supabının açılmasından önce genleşme fazı (emme stroku) sırasında yakıt püskürtülmesi püskürtülen yakıtın sıcaklığını ve konsantrasyonunu düşürür ve aktivasyon prosesi daha az yoğundur. Böylece tutulan art gazların tekrar sıkıştırılması prosesindeki yakıt püskürtme olayının stratejik olarak ayarlanması ile kimyasal ön koşullandırmanın değişen derecelerini elde edebildiler. Kimyasal ön koşullandırma eninde sonunda kendi kendine tutuşmanın başlangıcına etkimektedir. Yanma kontrol sahası birer birer anlatılmazken yukarıdaki çalışma, HCCI yanma fazlarının kontrolü için direkt püskürtmenin potansiyelini açıkça göstermektedir. Bu püskürtme stratejisini kullanarak geniş bir operasyon (çalışma) sahasında yanma fazını kontrol etme becerisi gösterdi [31].

Çizelge 5. 1 Deney Motorunun Özellikleri

Markası	ANTOR-LOMBARDINI
Modeli	LDA 450
Silindir sayısı (adet)	1
Silindir çapı (mm)	85
Stroku (mm)	80
Strok hacmi (cm ³)	454
Kompresyon oranı	17,5:1
Devir (d/d)	3000
Güç (N DIN70020) (kW)	7,5
Maksimum tork (Nm)	28,5
Yakıt tüketimi (lt/h)	1,7
Yağ tüketimi (kg/h)	0,007
Boş ağırlık (kg)	57
Yanma havası ihtiyacı (3000 d/d) (lt/1')	560
Soğutma havası ihtiyacı (3000 d/d) (lt/1')	9000
Krank mili maksimum eksenel yük (kg)	250

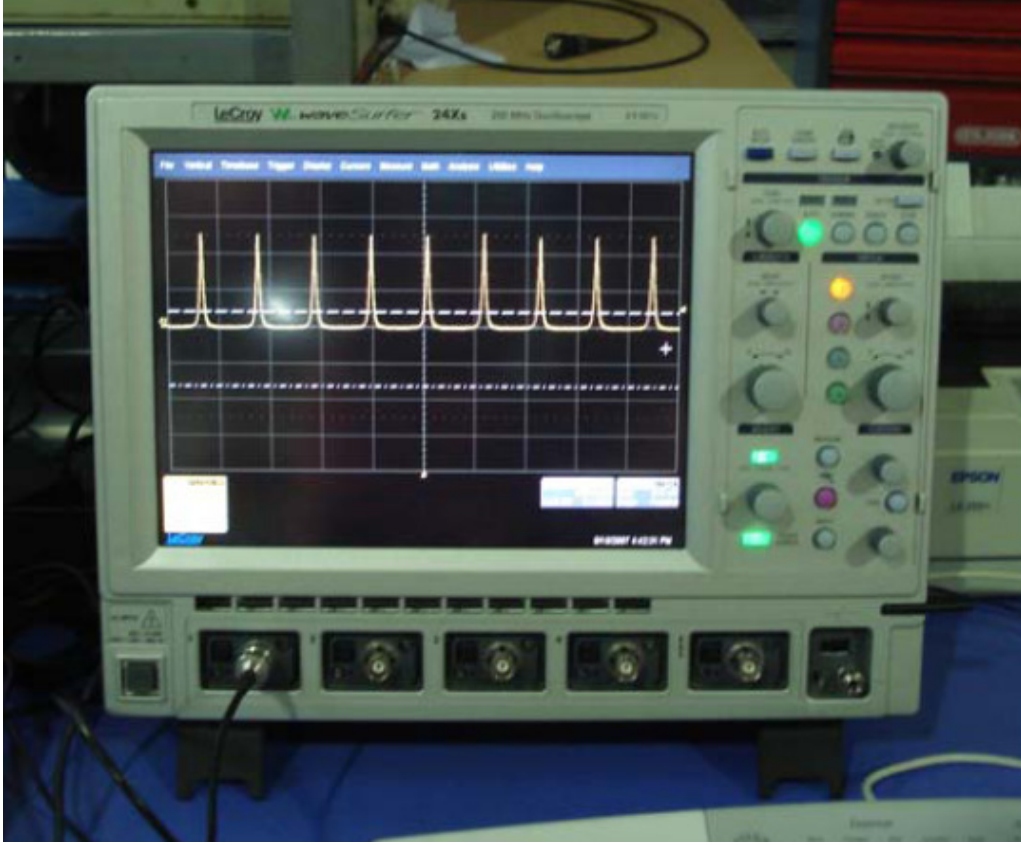
İçten yanmalı motora karşı yük yüklemek için Femsan marka bir elektrik motoru kullanılmıştır. Femsan marka DC motorun maksimum çalışma devri 3000 d/d olması nedeniyle, Diesel motor ile DC motor çift v kayışlı, ½ çevrim oranlı kayış kasnak bağlantısı ile birbirine bağlanmıştır. DC motor askıda kalacak şekilde iki tarafından yataklanmış ve yükleme momenti ölçümü yapılabilecek şekilde moment kolu bağlanmıştır. Motor tarafından DC motora uygulanan momentin ölçülebilmesi için moment kolu ucuna S tipi yük hücresi ve kontrol paneli üzerine dijital gösterge bağlantısı yapılmıştır. DC motoru motor ve generatif çalıştırabilmek amacı ile bir DC motor sürücü kullanılmıştır. DC motor alan sargılarının 0-200 volt gerilim ile uyarılması ve deney motorunun DC motoru döndürmesi ile üretilen elektrik 3.5 Ω luk toplam dirence sahip yükleme direncinde harcanmıştır. Deneylerde motor yönetim sistemi olarak micro-PLC serisinden S7-200 CPU224 modeli kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan siemens S7-200 tipi PLC, bu marka için geliştirilmiş Step7-Micro/WIN yazılımı ile Fonksiyon Blok Diyagram (FBD) yapısında programlanmıştır. Motor alt ölü noktasından belirli bir açı değeri sonra (üst ölü noktasından önce - Avans açısı) değiştirilebilen miktarda püskürtülme yapılmakta ve yük durumuna bağlı olarak motor belirli hızda dönmektedir. Çift püskürtmeli çalışmada alınan ve üretilen sinyaller Şekil 5.2 deki gibidir. Şekilde görüldüğü piston üzere üst ölü noktaya yaklaşırken silindir içi basınç artmakta ve püskürtme sonrasında

kritik sıkışmadan sonra patlamaya bağlı basınç sıçraması yaşanmakta ve ardışıl patlamalarla osilasyonlu bir şekilde pistonun da üst ölü noktadan uzaklaşması ile basınç düşmesi yaşanmaktadır. Şekil 5.2 de deney motorunun çalışma sırasındaki sinyal mantığını göstermektedir.



Şekil 5.2 Motor Çalışmasındaki Sinyaller

Load Cell, Bu çalışmada 300 N kapasiteli load cell kullanılmıştır. Load cell, elektrik motoruyla ilişkilendirilmiştir ve elektrik motorunun diesel motora uyguladığı karşı yükün tespiti için kullanılmaktadır. Kistler marka 6052 B serisi basınç sensörünün çıkış sinyali, Kistler 5011 serisi yükselticiden geçirilmiş ve Lecroy marka 4 kanal dijital Osiloskopta kayıt edilmiştir. Bu verinin işlenmesi ile silindir içi basınç değişimi elde edilmiştir. Osiloskopun genel görünümü Şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3 Osiloskobun genel görünümü

5.2 Deneyin Verileri ve Grafikleri

Deneyler max güç şartı olan 3000 d/d da, üst ölü noktadan 10-15-20-25-30° önce yapılan diesel yakıtı püskürtme şartında gerçekleştirmiştir. Deneylerde öncelikle %100 Diesel ile gerçekleştirilmiş, ardından aynı şartta %75 diesel, %25 benzin yakıtı ile tekrarlanmıştır. Benzin emme portuna enjektör ile ,diesel yanma odasına direkt olarak püskürtülmüştür. Güç ve emisyon değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Sadece diesel püskürtmesi sonucu oluşan veriler Çizelge 5.2 de , diesel+benzin püskürtülmesiyle oluşan verilen ise Çizelge 5.3 te gösterilmiştir.

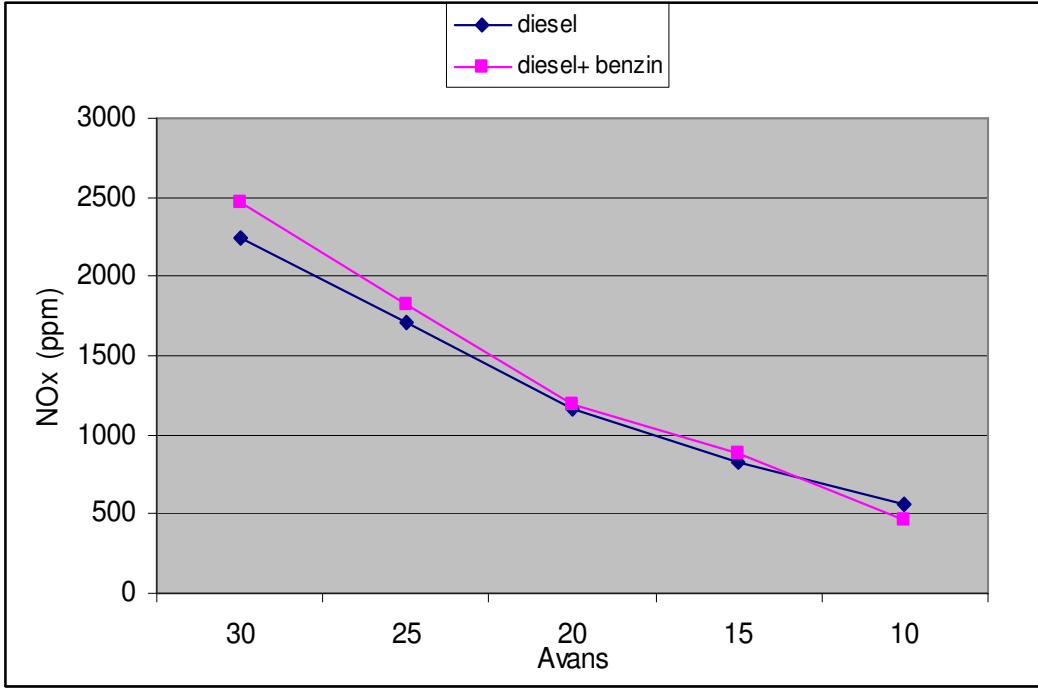
Çizelge 5. 2 Sadece diesel püskürtme sonucu elde edilen veriler

Avans (Kma)	Güç (Kw)	Lamda	CO (%)	CO2 (%)	O2 (%)	HC (%)	Nox (ppm)
30	5,11	1,355	0,25	10,5	5,6	29	2250
25	5,04	1,476	0,16	9,8	6,9	41	1712
20	5,04	1,611	0,17	8,9	8	51	1169
15	4,65	1,457	0,19	9,9	6,7	43	825
10	9,71	1,465	0,21	9,8	6,8	70	563

Çizelge 5. 3 Diesel+ benzin püskürtme sonucu elde edilen veriler

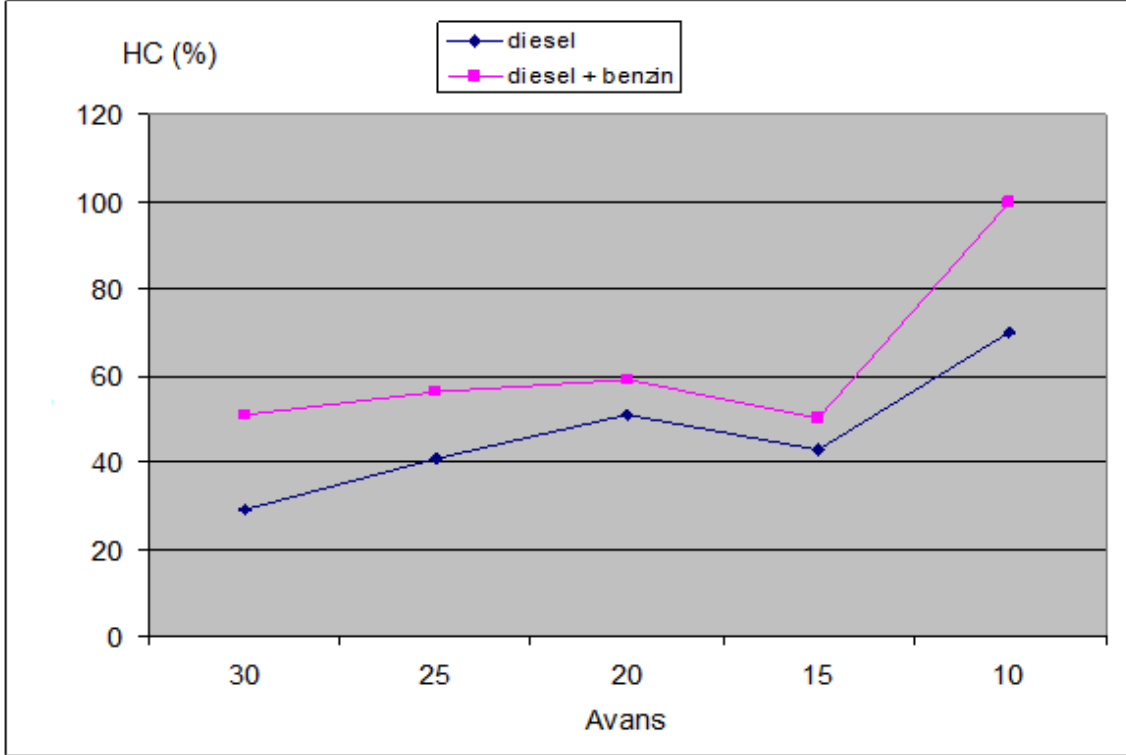
Avans (Kma)	Güç (Kw)	Lamda	CO (%)	CO2 (%)	O2 (%)	HC (%)	Nox (ppm)
30	4,81	1,35	0,25	10,5	5,6	51	2464
25	4,9	1,534	0,18	9,3	7,4	56	1816
20	4,73	1,44	0,2	9,9	6,7	59	1197
15	4,68	1,46	0,21	9,8	6,8	50	882
10	3,2	1,484	0,25	9,7	7,1	100	469

Deneyin emisyon olarak değerlendirme grafikleri Nox,HC ve CO için ayrı ayrı çizilmiştir. Şekil 5.4 te deneyde uygulanan avans değerleri ile Nox emisyonunda meydana gelen değişim gözükmemektedir. Her bir avans değeri için motorun devri 3000 dedir.



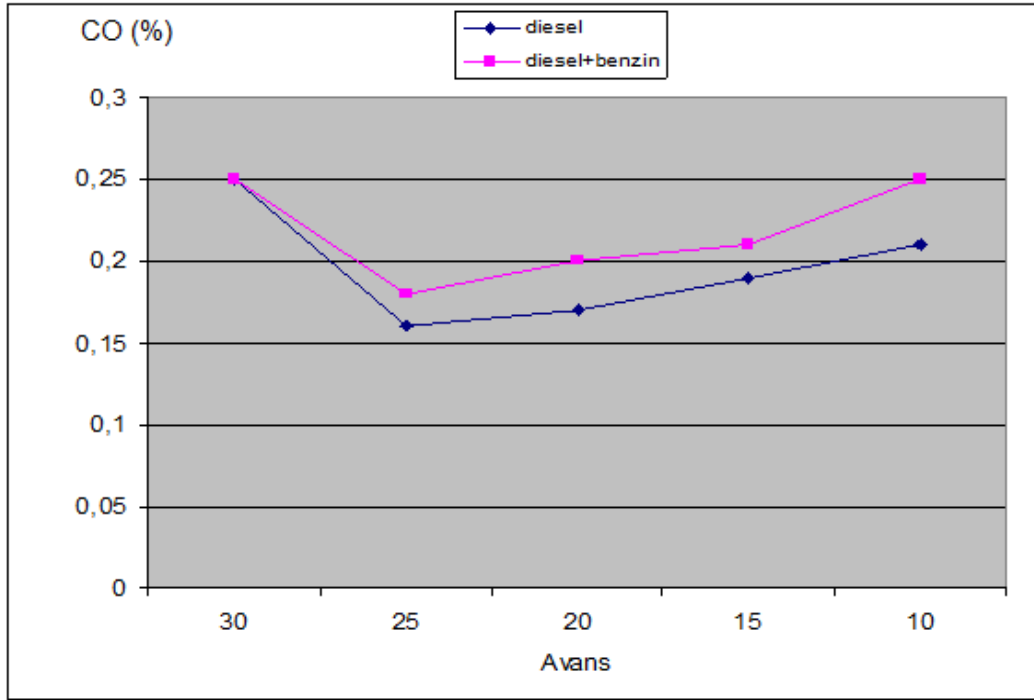
Şekil 5.4 NOx Emisyon Değişimi

Şekil 5.5 te deneyde uygulanan avans değerleri ile HC emisyonunda meydana gelen değişim gözükmektedir. Her bir avans değeri için motorun devri 3000 dedir.



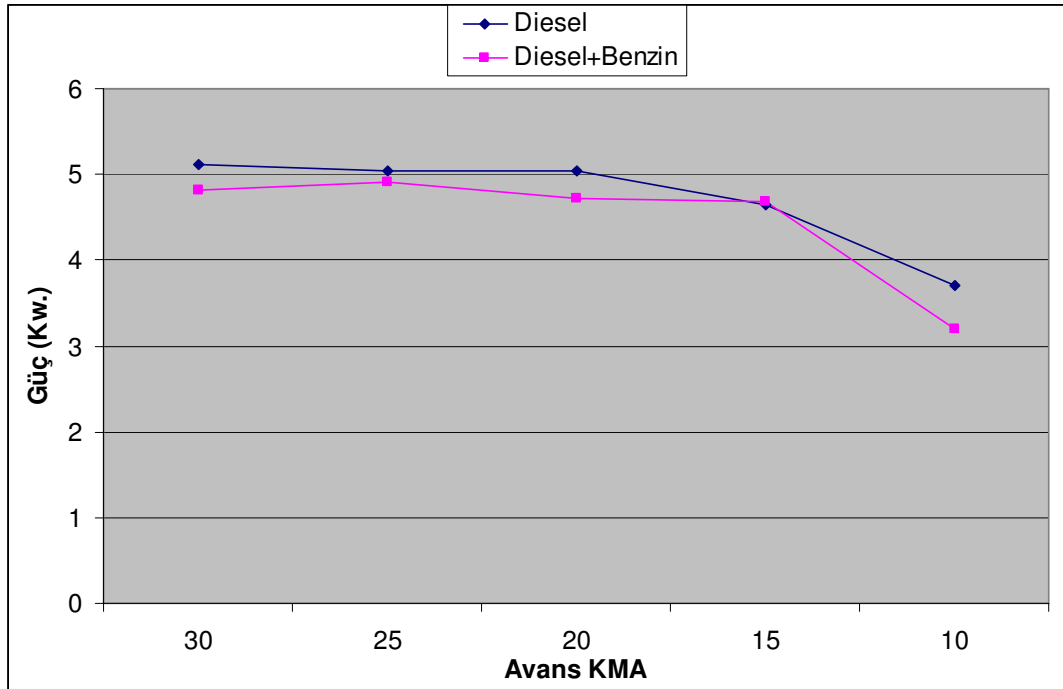
Şekil 5.5 HC Emisyon Değişimi

Şekil 5.6 de deneyde uygulanan avans değerleri ile CO emisyonunda meydana gelen değişim gözükmetedir. Her bir avans değeri için motorun devri 3000 dedir.



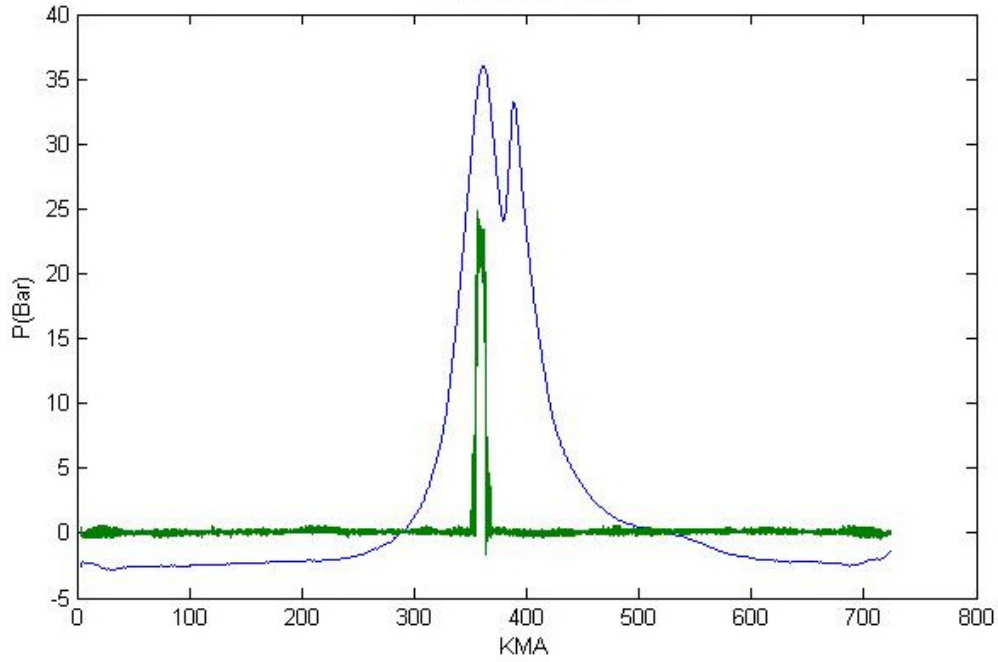
Şekil 5.6 CO Emisyon Değişimi

Şekil 5.7 de diesel ve diesel+ benzin püskürtülmesi sonucunda motor gücünde meydana gelen değişim gösterilmektedir. Tüm avans değerleri için motorun devri 3000 dir.

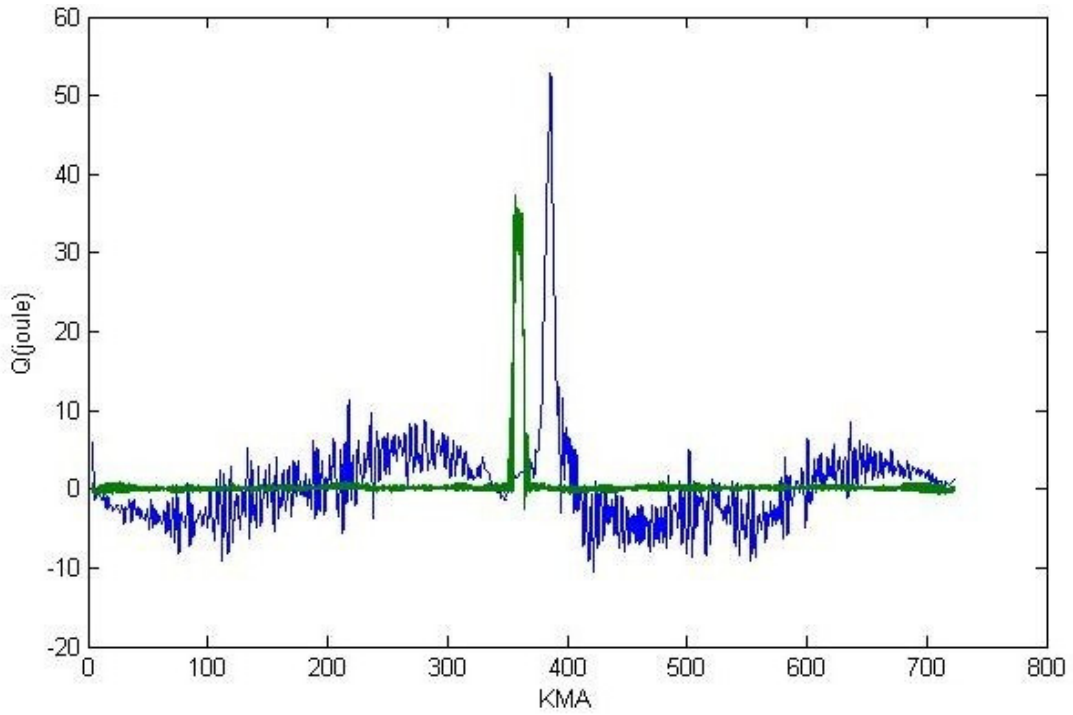


Şekil 5.7 Motor Güç Değişimi

Şekil 5.8 de 10 derece avans 3000 devirde diesel püskürtmesiyle meydana gelen motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.9 da 10 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi gözükmektedir.

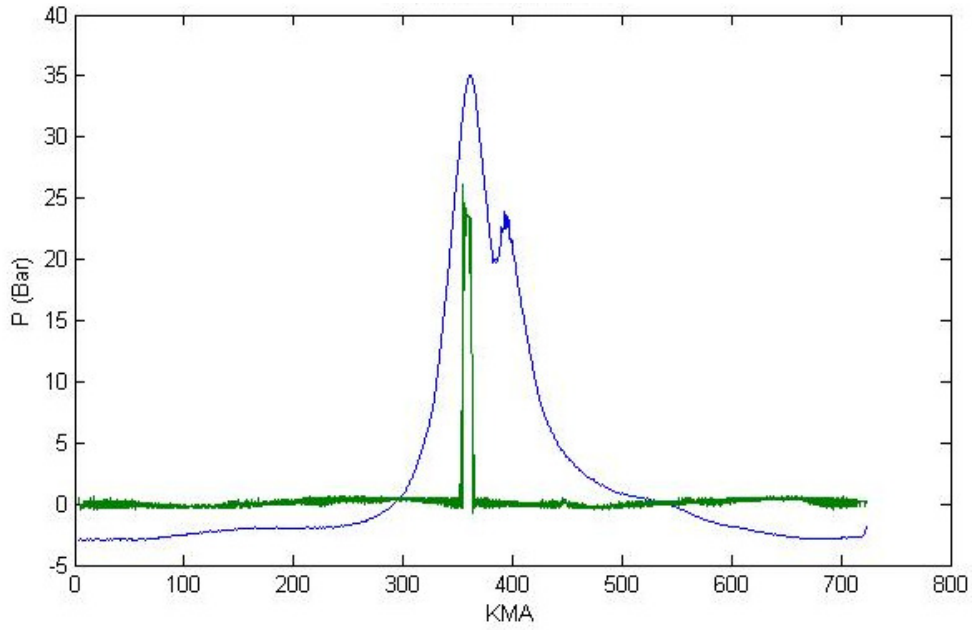


Şekil 5.8 10 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

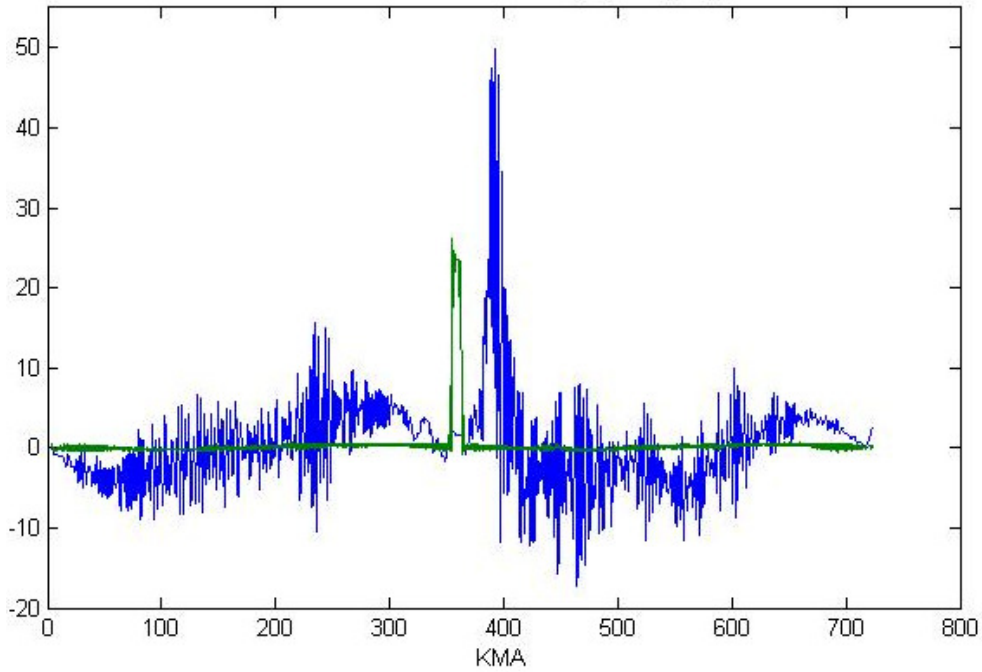


Şekil 5.9 10 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.10 de 10 derece avansta 3000 devirde diesel+benzin püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.11 da 10 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi gözükmetedir.

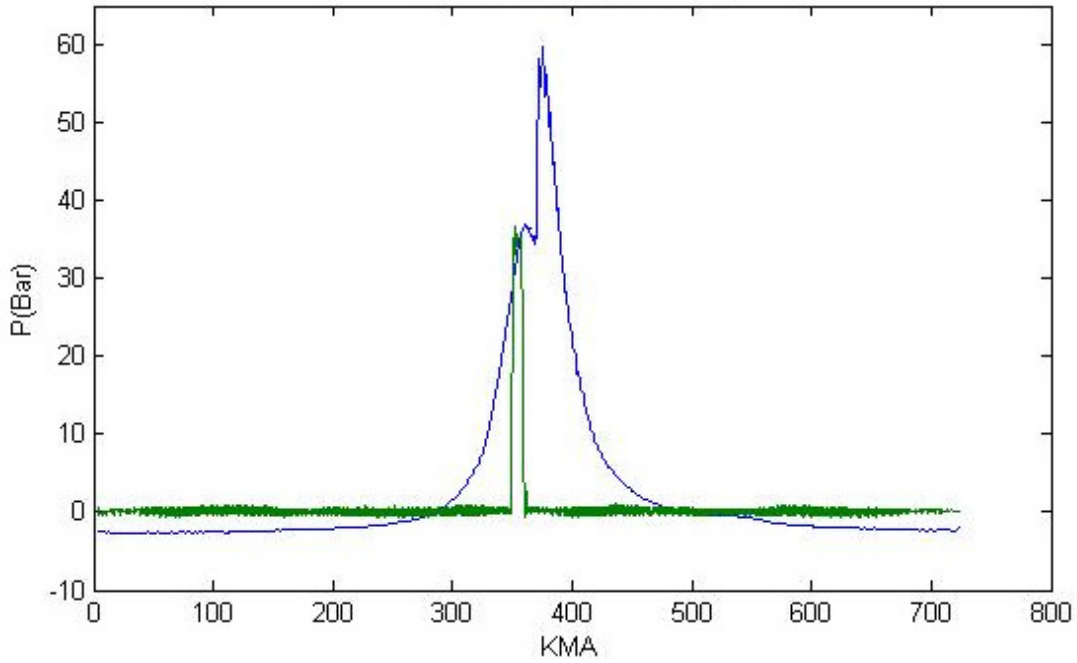


Şekil 5.10 10 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

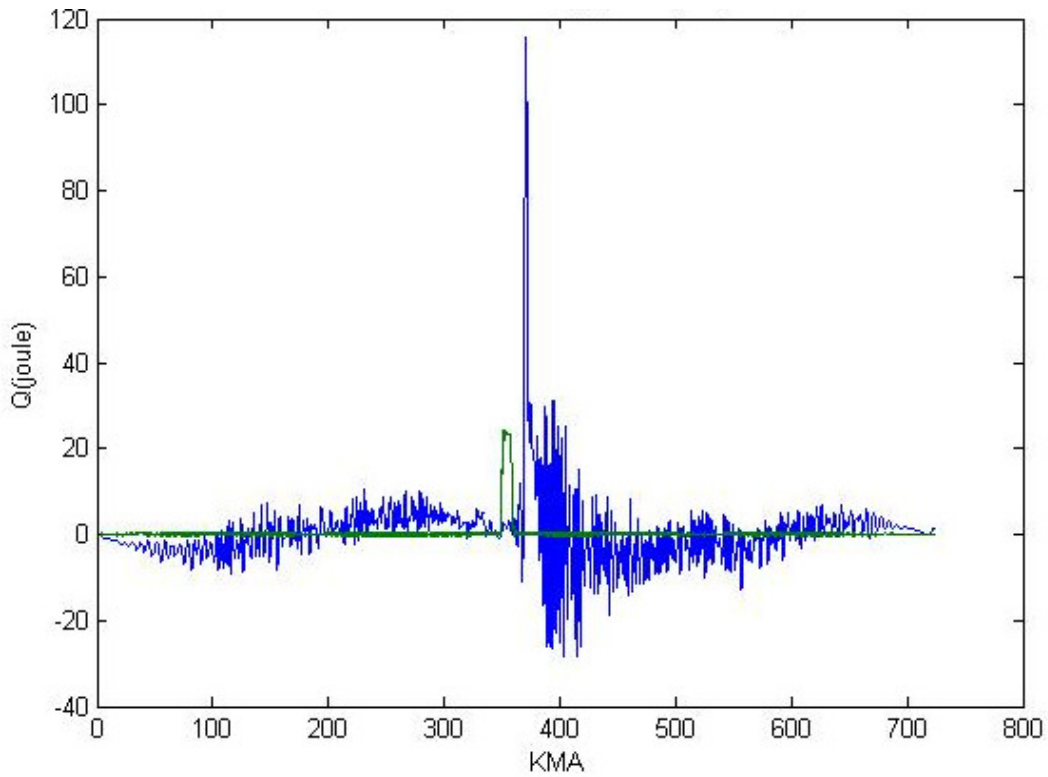


Şekil 5.11 10 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.12 de 15 derece avansta 3000 devirde diesel püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.13 de 15 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi görülmektedir.

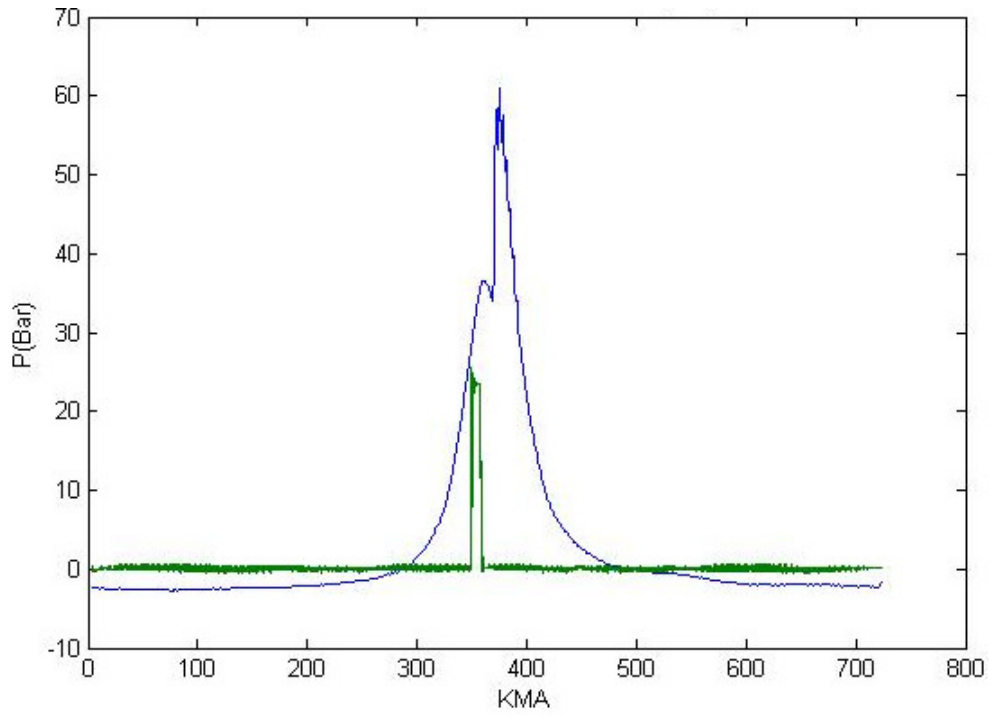


Şekil 5.12 15 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

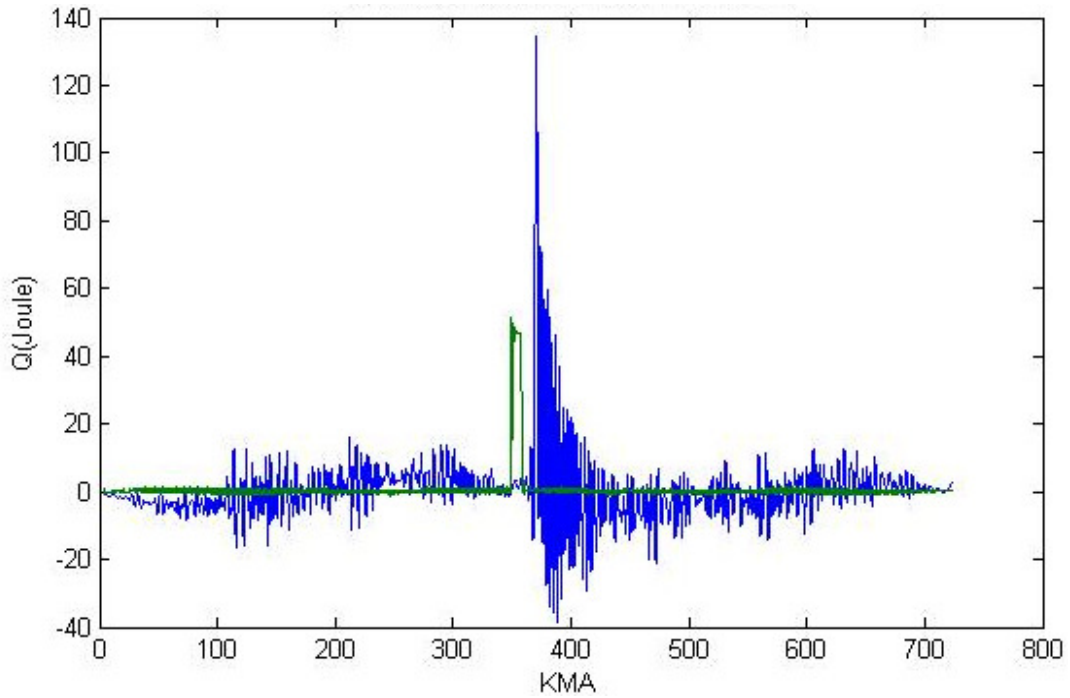


Şekil 5.13 15 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.14 de 15 derece avansta 3000 devirde diesel+benzin püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.15 de 15 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi görülmektedir.

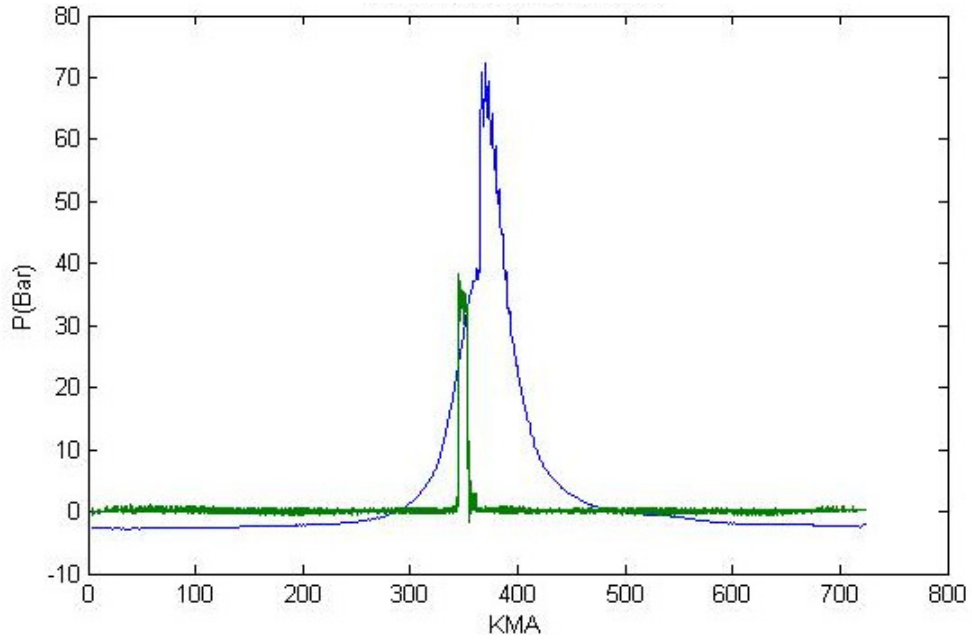


Şekil 5.14 15 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

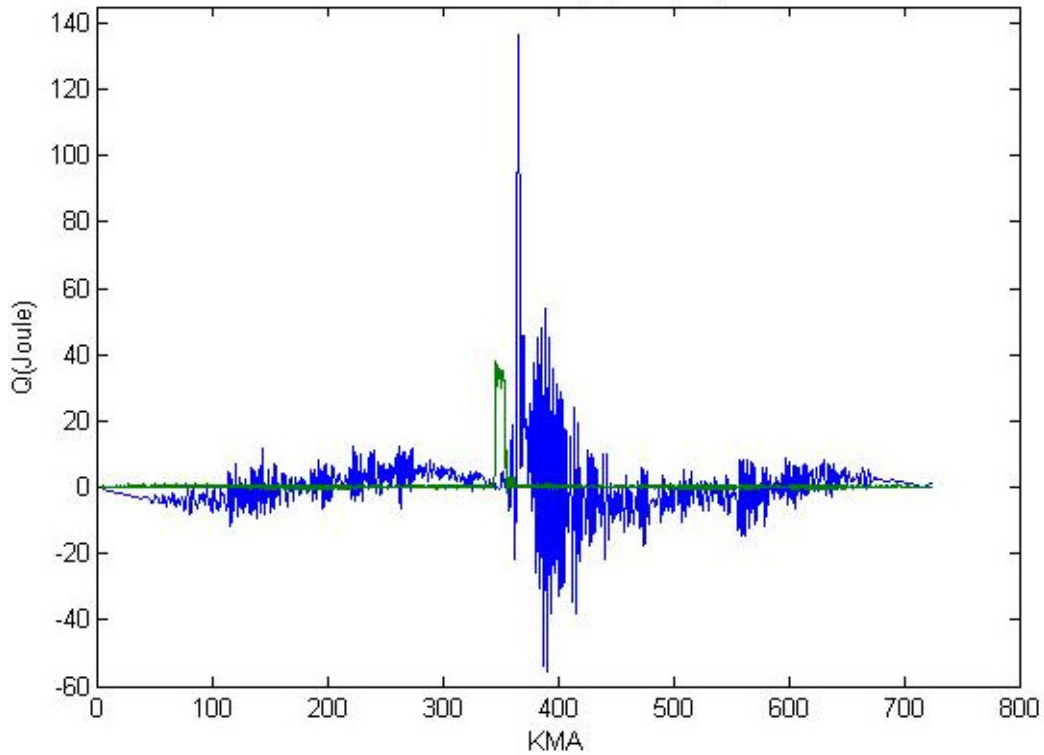


Şekil 5.15 15 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.16 da 20 derece avansta 3000 devirde diesel püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.17 de 20 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi gözükmemektedir.

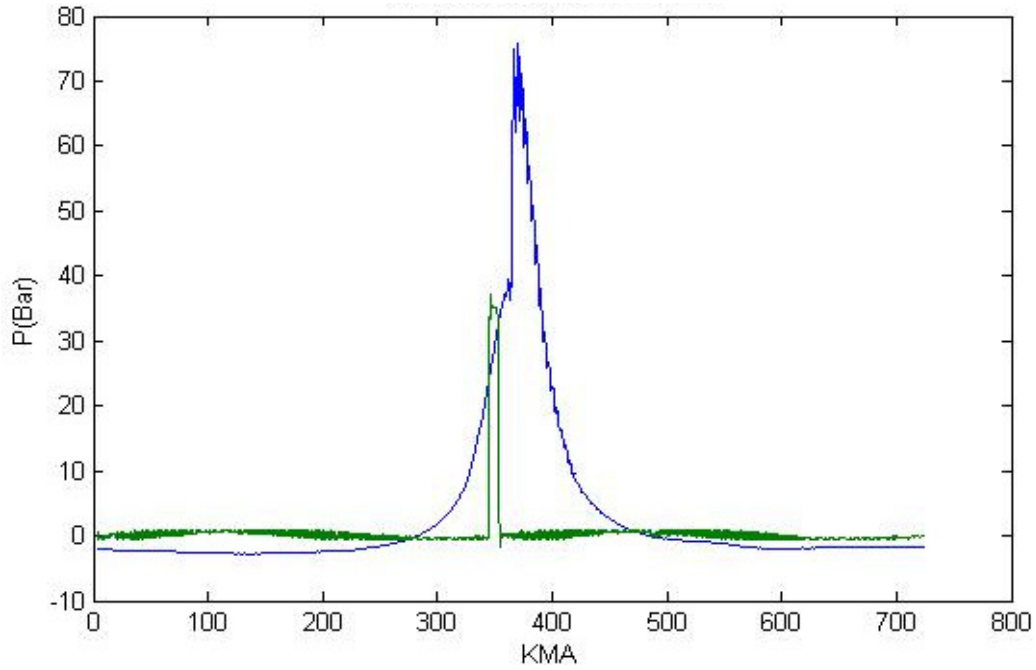


Şekil 5.16 20 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

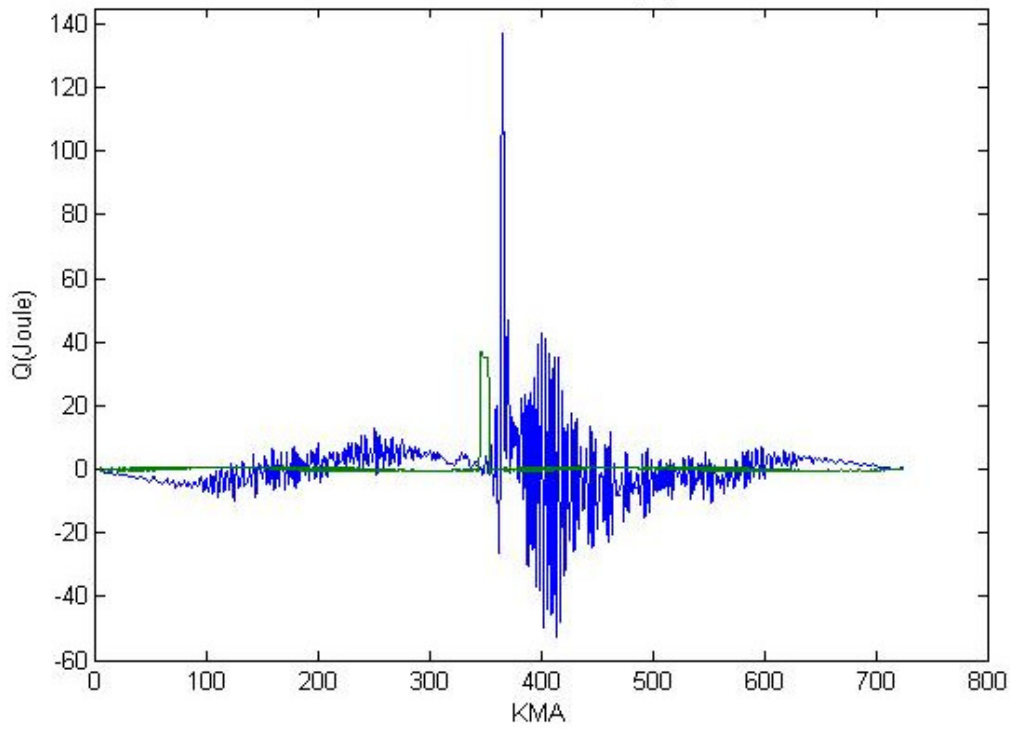


Şekil 5.17 20 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.18 de 20 derece avansta 3000 devirde diesel+benzin püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.19 de 20 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi görülmektedir.

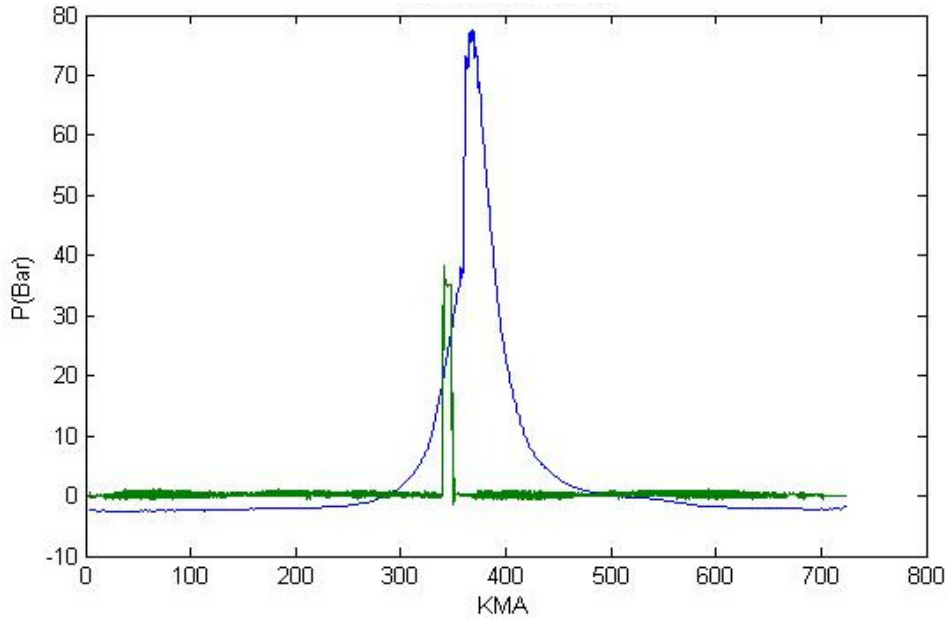


Şekil 5.18 20 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

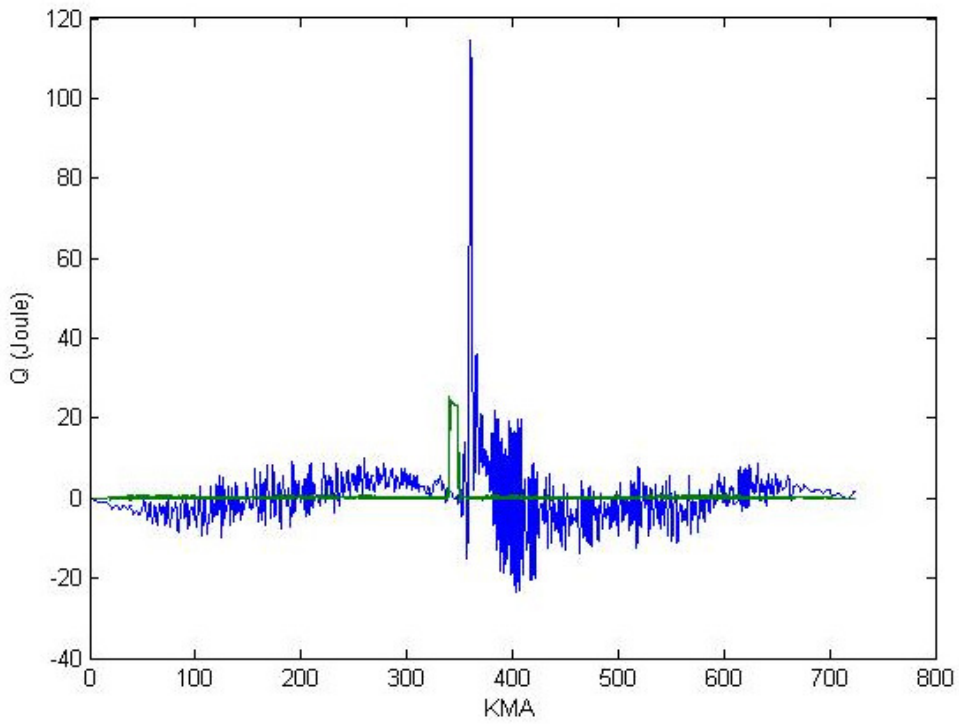


Şekil 5.19 20 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.20 de 25 derece avansta 3000 devirde diesel püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.21 de 25 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi gözükmemektedir.

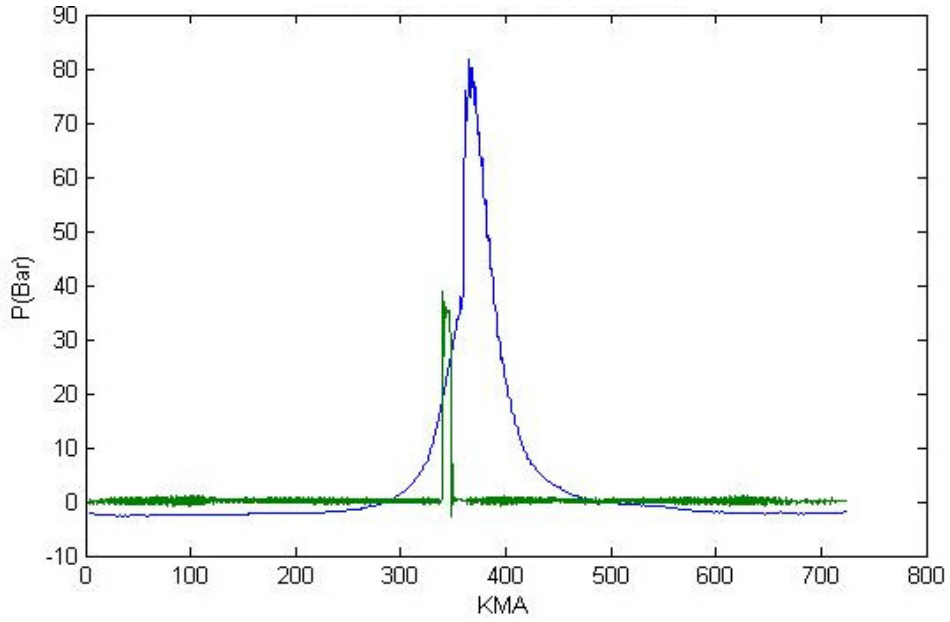


Şekil 5.20 25 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

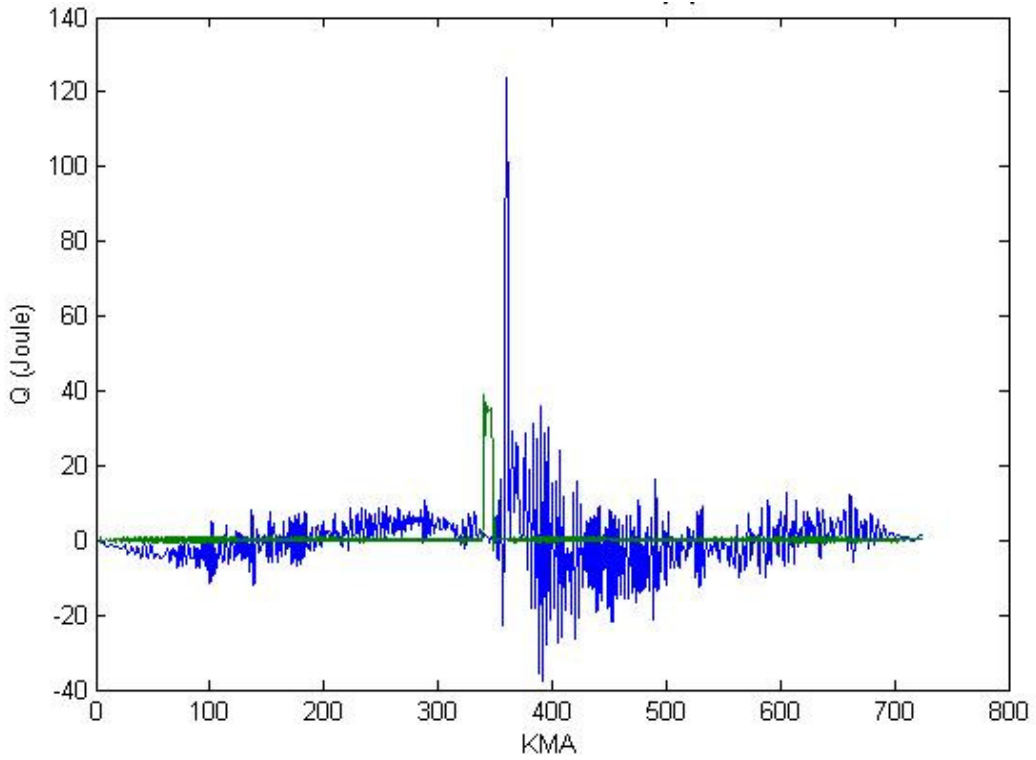


Şekil 5.21 25 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.22 de 25 derece avansta 3000 devirde diesel+benzin püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.23 de 25 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi görülmektedir.

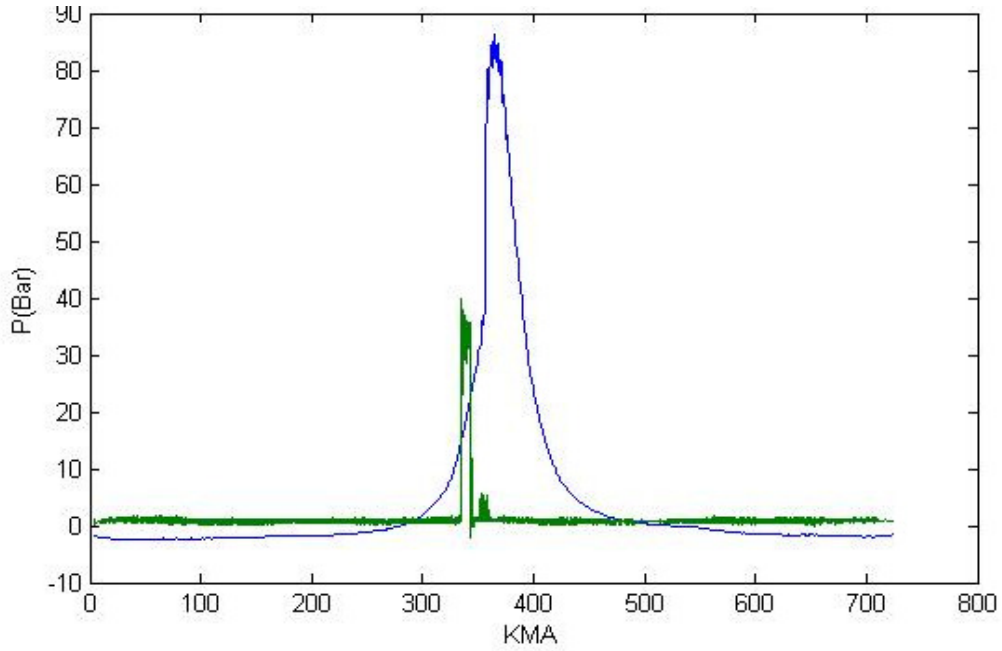


Şekil 5.22 25 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

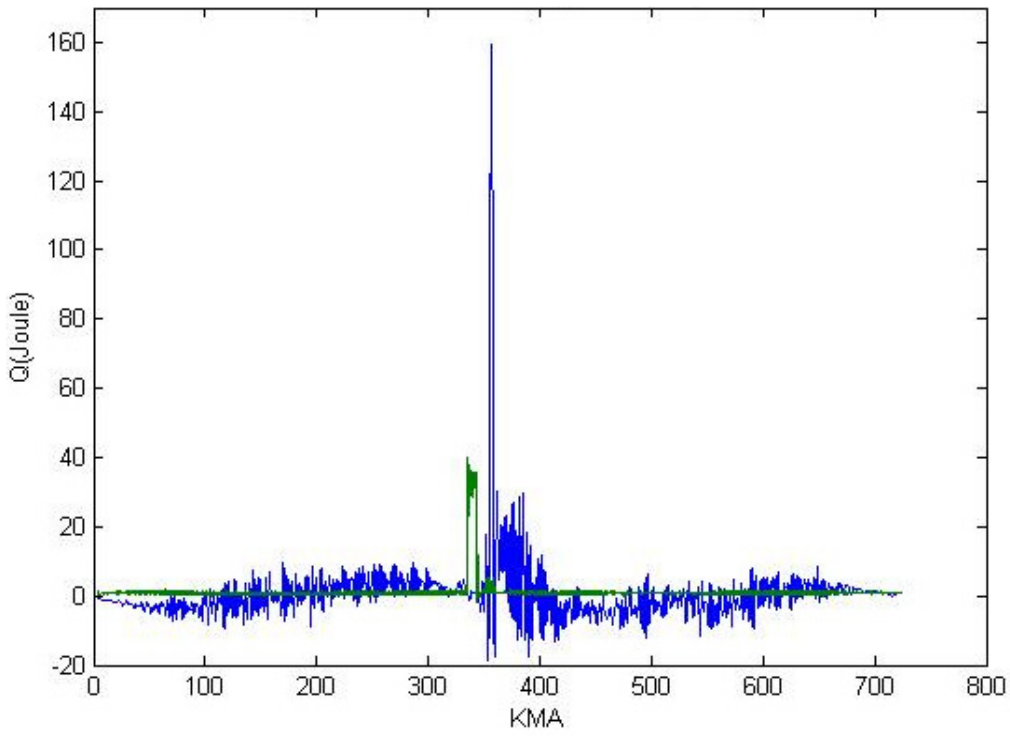


Şekil 5.23 25 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.24 de 30 derece avansta 3000 devirde diesel püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.25 de 30 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi gözükmemektedir.

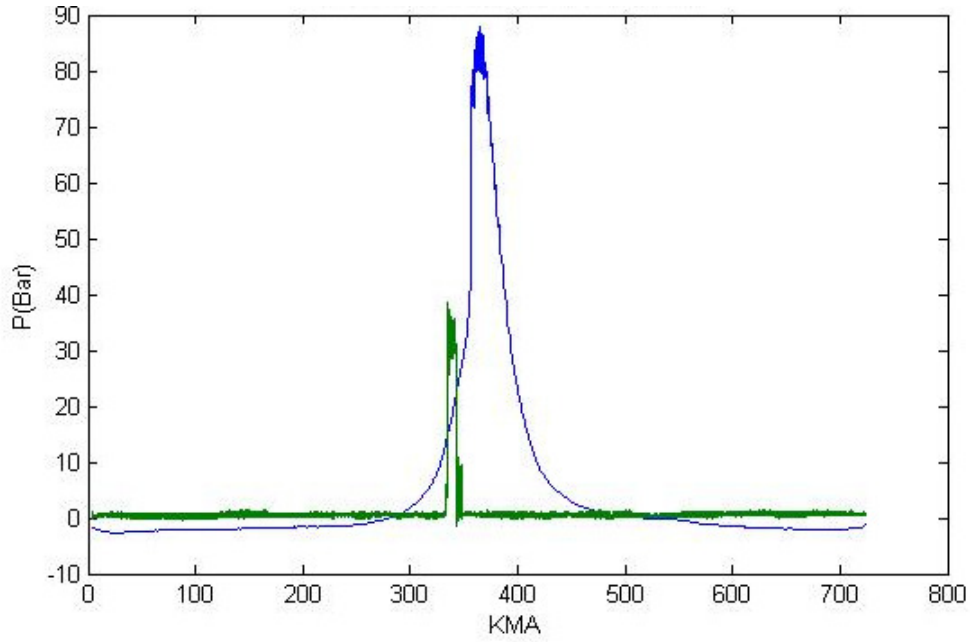


Şekil 5.24 30 Derece Avansta Diesel Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

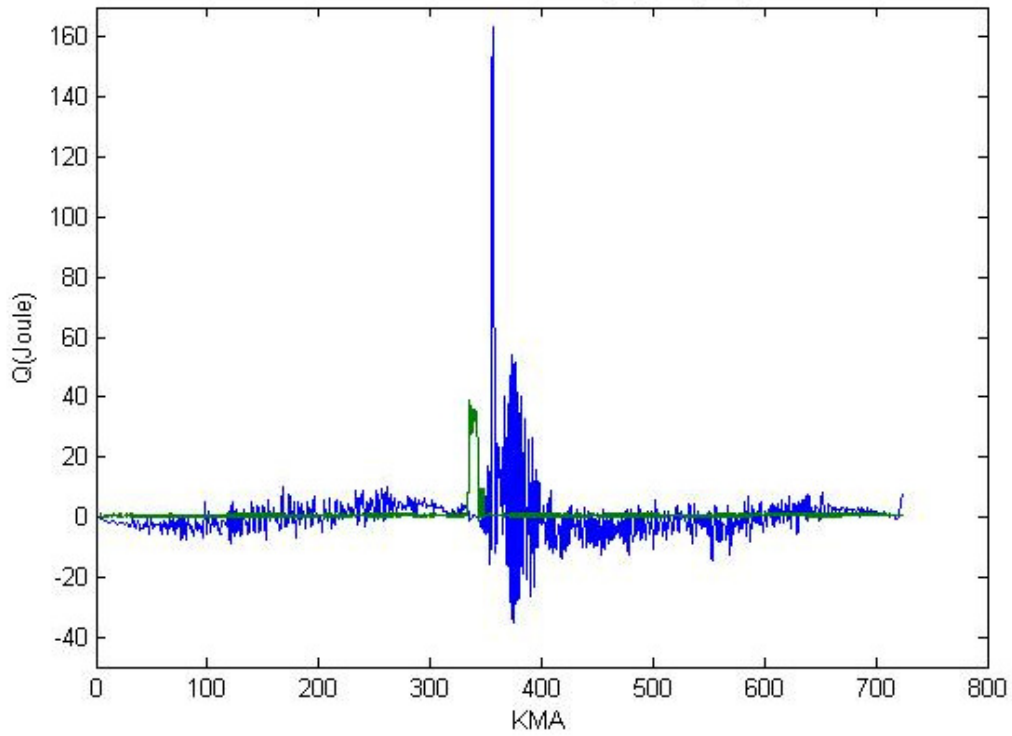


Şekil 5.25 30 Derece Avansta Diesel Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.26 de 30 derece avansta 3000 devirde diesel+benzin püskürtülmesiyle motorun basınç grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.27 de 30 derece avans ve 3000 devirde yanma sırasında ısı meydana gelen ısı yayının eğrisi gözükmektedir.

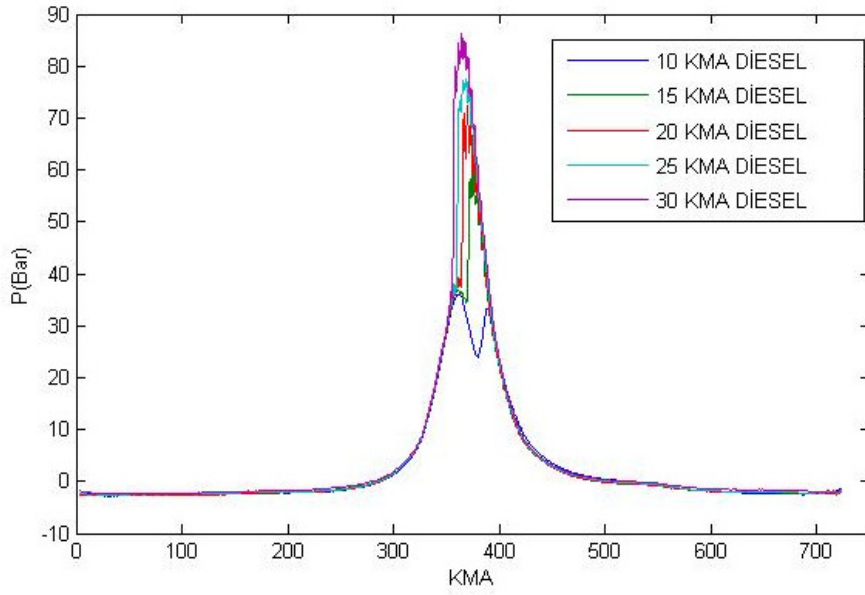


Şekil 5.26 30 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Yanma Basınç Grafiği

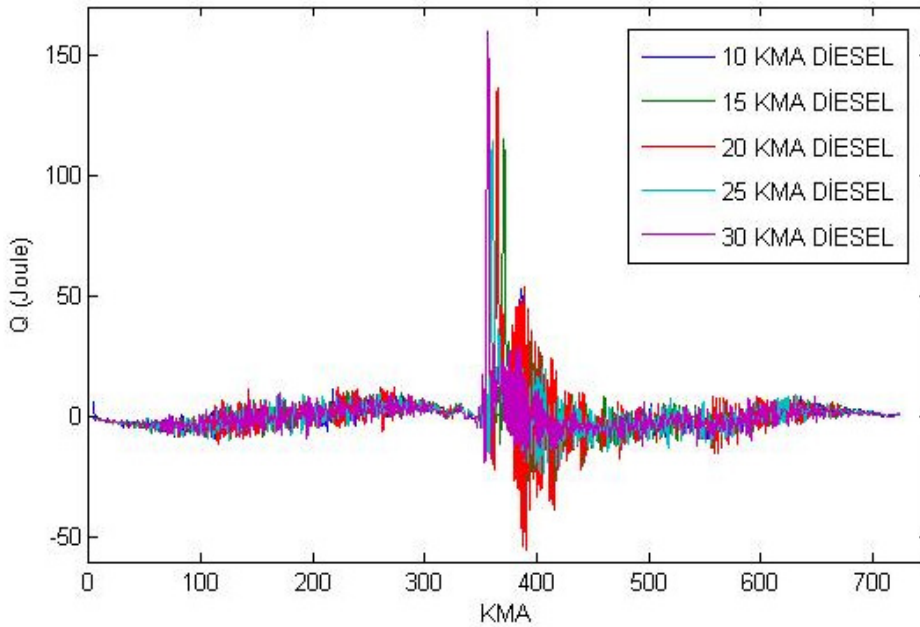


Şekil 5.27 30 Derece Avansta Diesel+Benzin Püskürtme Isı Yayınım Grafiği

Şekil 5.28 de değişik avanslarda 3000 devirde diesel püskürtmesiyle motorun basıncı grafikleri gözükmektedir . Şekil 5.29 da değişik avanslarda diesel püskürtmesiyle motorun ısı yayılımı grafikleri gözükmektedir.

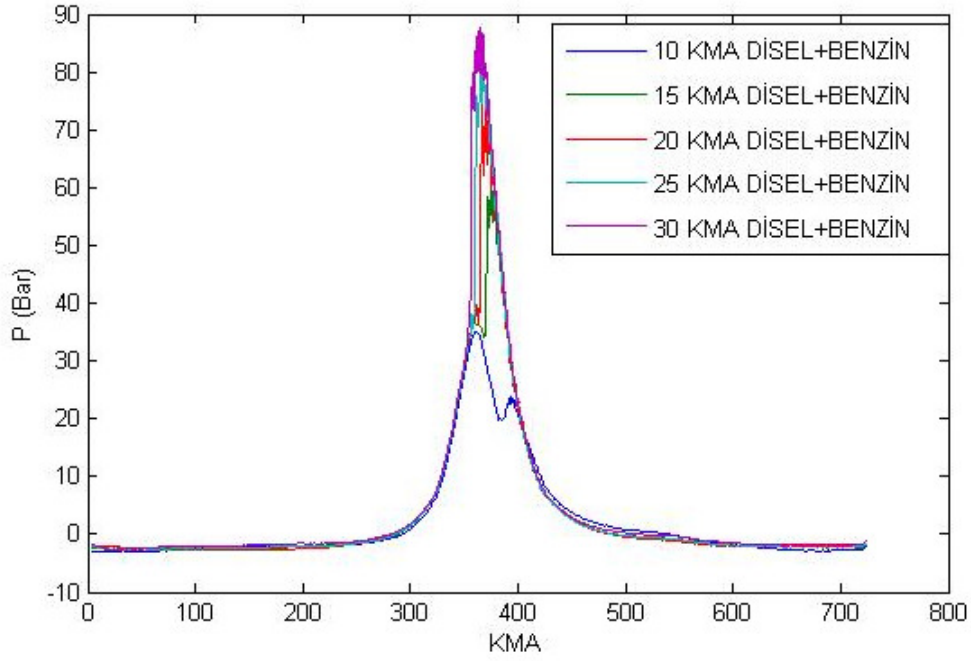


Şekil 5.28 Diesel püskürtmesi ile oluşan avanslara göre basınç grafikleri

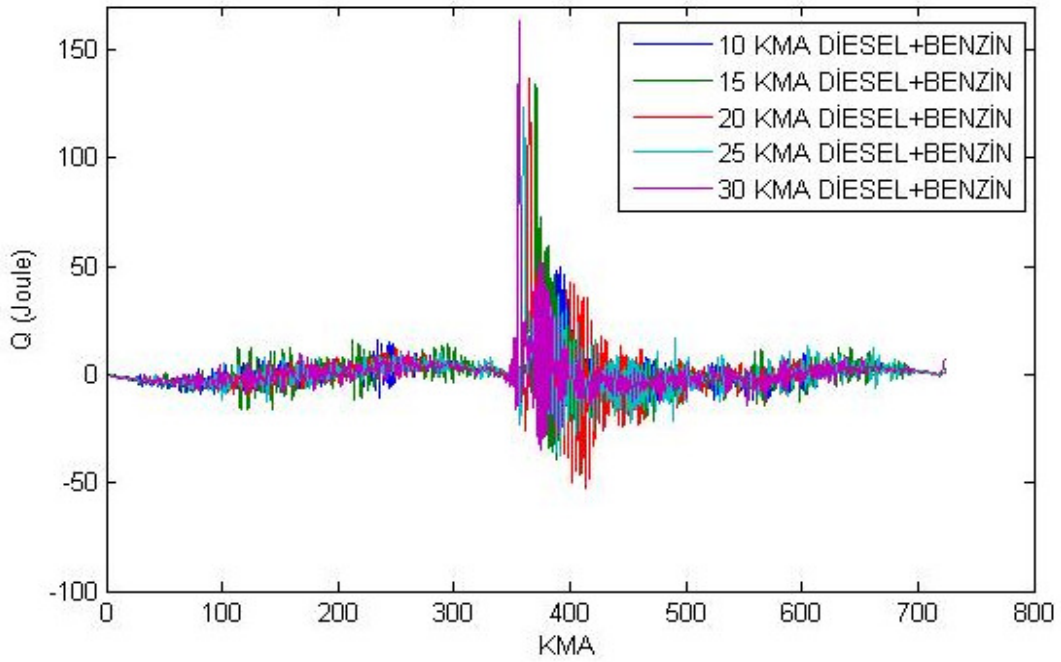


Şekil 5.29 Diesel püskürtmesi ile oluşan avanslara göre ısı yayılımı grafikleri

Şekil 5.30 de değişik avanslarda 3000 devirde diesel püskürtmesiyle motorun basınç grafikleri gözükmetedir . Şekil 5.31 da değişik avanslarda diesel püskürtmesiyle motorun ısı yayılım grafikleri gözükmetedir



Şekil 5.30 Diesel+benzin püskürtmesi ile oluşan avanslara göre basınç grafikleri



Şekil 5.31 Diesel+benzin püskürtmesi ile avanslara göre ısı yayılım grafikleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada DI bir diesel motoru, ön karışimli benzin yakıtı ile kısmi HCCI modunda çalıştırılmıştır. Ön karışimli benzin yakıtı düşük basınçlı port tipi bir yakıt enjeksiyon sistemi ile emme portuna püskürtülmüş, pilot diesel yakıt enjeksiyonu ise motor üzerindeki mevcut diesel yakıt enjeksiyon sistemi ile silindir içerisine püskürtülmüştür. Motor testleri, 10-15-20-25-30 derece avanslarla diesel ve diesel+benzin püskürtülerek 3000 d/d momentinde yapılmış aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Klasik diesele göre emme portuna benzin püskürtüldüğünde NOx emisyonunda %2 lik bir artış meydana gelmiştir. Doğal emişli bir motorda silindir içerisine yüksek basınçla kısa sürede yakıt sevki,yüksek sıcaklığı tetiklemekte ve NOx emisyonlarını arttırmaktadır. Buna ek olarak deney motorunun hava soğutmalı olması artan sıcaklığın etkisini arttırır niteliktedir. Gerçekleştirilen deneyde benzin buharlaştırmak için gerekli ısı ihtiyacını motorun cidarından karşılandığı ve bu durumun iç ortam sıcaklığını düşürmediği dolayısıyla ek yakıtın NOx emisyonlarına pozitif etkisi yerine arttırıcı yönde negatif etkisi olduğu görülmüştür.
- Yakıt ve havanın homojen olarak hazırlanıp sıkıştırılması sırasında silindir duvarlarının ıslanması, piston tepesinde ve silindir ile segmanlar arasında dolgunun birikmesine yol açarak HC emisyonlarının artışına neden olmaktadır. Klasik diesele göre emme portuna benzin püskürtüldüğünde HC emisyonunda %20 mertebesinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Avansın azaltılmasıyla bozulan yanma neticesinde HC emisyonlarında artış daha belirgin hale gelmiştir.

- Genellikle HCCI motorlarında CO ve HC emisyonları yüksek olmaktadır. Ön karışimli benzin yakıtının CO ve HC emisyonlarına etkileri görülmektedir. Emme zamanında alınan ön karışimli dolgunun, sıkıştırma zamanı boyunca silindir cidar bölgelerinde birikmesi neticesinde HC emisyonları artış göstermektedir. Bununla birlikte, yanma esnasında ve sonrasında soğuk silindir cidar bölgelerinde bulunan gazların sıcaklıkları cidar sıcaklığına yaklaşarak yoğunlukları artmaktadır. HCCI yanma prensibinde, klasik dizel yanmasına göre genel olarak yanma sıcaklıkları daha düşük olduğundan CO'nun CO₂'ye oksidasyonunun tam olarak tamamlanamamasına yol açabilmektedir. Litaretüre paralel olarak gerçekleştirilen deneylerde emme portuna benzin püskürtüldüğünde CO emisyonunda %10 mertebesinde bir artış gözlemlenmiştir.
- Diesel motorunda benzinin püskürtüldüğü durumda motor gücünde %5 mertebesinde bir düşüş meydana gelmiştir. Silindir içi basınç grafikleri incelendiğinde her ne kadar pik basınç değerleri anlık olarak yüksek görülsede vuruntulu sert bir çalışma gözlemlendiğinden ölçülen motor gücünde düşüş meydana gelmiştir.
- Püskürtme avansının 30 derece olduğu şartta maksimum motor gücü gözlenmiş, bununla birlikte NOx emisyonu da maksimum değeri almıştır. Emisyon değerleri ve motordan elde edilen maksimum güç değerleri beraber irdelendiğinde, üst ölü noktadan 20 derece önce yapılan püskürtme şartında daha yumuşak bir çalışma gözlenmiş , NOx emisyonları da yarı yarıya düşmüştür. Avansın daha da küçültülmesiyle motorun maksimum silindir içi basıncının ve motor gücünün düştüğü gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Zhao, H.,(2002), "Performance and analysis of a four-stroke multi- cylinder gasoline engine with CAI combustion", SAE Technical Paper, 10:25-30.
- [2] Iwashiro, Y.,(2002),"Fuel consumption improvement and operation range expansion in HCCI by direct water injection", SAE Technical Paper, 15:58-69.
- [3] Hiraya, K., (2002), " A Study of Gasoline Fueling (Fueled) Compression Ignition Engine", JSAE Technical Paper , 25:45-60.
- [4] Tsurushima, T.,Harada, A., Iwashiro, Y., Enomoto, Y., Asaumi, Y. ve Aoyagi, Y.,(2001), "Thermodynamic characteristics of premixed compression ignition combustions", SAE Technical Paper, 120:19-30.
- [5] Ishii, H., Koike, N., Suzuki, H. ve Odaka, M., (1997), "Exhaust purification of diesel engines by homogeneous charge with compression ignition Part 2: Analysis of combustion phenomena and NOx formation by numerical simulation with experiment", SAE Technical Paper, 170:52-65.
- [6] Lavy, J., (2001), "Towards a Better Understanding of Controlled Auto-Ignition (CAI) Combustion Process From 2-Stroke Engine Results Analyses", SAE Technical Paper, 3:12-24.
- [7] Olsson, J., (2001), "A Turbocharged Dual Fuel HCCI Engine", SAE Technical Paper, 16:12-20
- [8] Noguchi, M., (1979), "A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products During Combustion", SAE Technical Paper, 21:47-55.
- [9] Nishijima, Y., Asaumi, Y. ve Aoyagi, Y.,(2001), "Premixed lean diesel combustion (PREDIC) using impingement spray system", SAE Technical Paper, 14:60-80.
- [10] Cracknell, R., (2002), "Safety Considerations in Retailing Hydrojen", SAE Technical Paper, 126:78-89.
- [11] Chen, Z., (2000), "Experimental Study of CI Natural-Gas/DME Homogeneous Charge Engine", SAE Technical Paper, 35:47-55.

- [12] Tang, X., (2002), "Ford P2000 Hydrogen Engine Dynamometer Development", SAE Technical Paper, 30:369-380.
- [13] Chapman, E.,(2001), "Emissions Characteristics of a Navistar 7.3L Turbodiesel Fueled with Blends of Dimethyl Ether and Diesel Fuel", SAE Technical Paper, 12:56-80.
- [14] Edgar, B., (1997), "Auto-ignition of Dimethyl Ether and Dimethoxy Methane Sprays at High Pressures, SAE Technical Paper, 2:47-60.
- [15] Kaneko, N., Ando, H., Ogawa, H. ve Miyamoto, N., (2002), "Expansion of the operating range with in-cylinder water injection in a premixed charge compression ignition engine", SAE Technical Paper, 3:14-20.
- [16] Suzuki, H., Koike, N. ve Odaka, M., (1998), "Combustion control method of homogeneous charge diesel engines", SAE Technical Paper, 5:82-90.
- [17] Cheng, A. S., (1999), "Emissions Performance of Oxygenate-in-Diesel Blend and Fischer-Tropsch Diesel in a Compression Ignition Engine", SAE Technical Paper,3:52-60.
- [18] Christensen, M., (2002b), "The effect of in-cylinder flow and turbulence on HCCI operation", SAE Technical Paper, 6:128-140.
- [19] Lavy, J., (2000), "Innovative Ultra-low NOx Controlled Auto-Ignition Combustion Process for Gasoline Engines: The 4-Space Project, SAE Technical Paper, 1:536-550.
- [20] Ryan III, T. W. ve Callahan, T. J., (1996), "Homogeneous charge compression ignition of diesel fuel", SAE Technical Paper, 65:19-31.
- [21] Al-Rubaie, M. A. R., (1991), "Some Observation on the Effectiveness of Additives for Reducing the Ignition Delay Period of Diesel Fuels", SAE Technical Paper, 86:92-101.
- [22] Schwab, S. D., (1999), "The Effects of 2-Ethylhexyl Nitrate and Di-Tertiary- Butyl Peroxide on the Exhaust Emissions From a Heavy-Duty Diesel Engine", SAE Technical Paper, 72:62-79.
- [23] Suzuki, T., Kakegawa, T., Hikino, K. ve Obata, A., (1997b), "Development of Diesel Combustion for Commercial Vehicles", SAE Technical Paper, 63:50-60.
- [24] Goto, S., (1999), "Development of an LPG DI Diesel Engine Using Cetane Number Enhancing Additives", SAE Technical Paper, 32:1-15.
- [25] Najt, P. M. ve Foster, D. E., (1983), "Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion", SAE Technical Paper, 322:1-19.
- [26] Bailey, B., (1997), "Diethyl Ether (DEE) as a Renewable Diesel Fuel", SAE Technical Paper, 389:12-28.
- [27] Watson, H. C., (2000) ,"The Systematic Evaluation of Twelve LP Gas Fuels for Emissions and Fuel Consumption", SAE Technical Paper, 67:46-62.
- [28] Olsson, J. O., (2002), "Compression Ratio Influence on Maximum Load of a Natural Gas Fueled HCCI Engine", SAE Technical Paper, 36:89-100.
- [29] Chen, Z., (2001), "Study on Homogeneous Premixed Charge CI Engine Fueled with LPG", JSAE Technical Paper, 258:65-78.

- [30] Stein, Y., (1999), "The auto-ignition Behavior of Surrogate Diesel Fuel Mixtures and the Chemical Effects of 2-Ethylhexyl Nitrate (EHN) Cetane Improver, SAE Technical Paper, 2:58-70.
- [31] Daeyup, L., (1993), "Auto-ignition of Alcohols and Ethers in a Rapid Compression Machine", SAE Technical Paper, 264:6-19.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Ümit TÜRKMEN
Doğum Tarihi ve Yeri :26/11/1986 ŞİŞLİ
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :umitturkmen28@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Pendik Rauf Denктаş Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	Opsan A.Ş	Proje Mühendisi
2008	Kale Altınay Robotik Otomasyon A.Ş	Tasarım Mühendisi