

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİZEL MOTORLARDA PÜSKÜRTME STRATEJİSİNİN PERFORMANS VE  
EMİSYONLARA ETKİSİ

HASAN YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ENERJİ PROGRAMI

DANIŞMAN  
PROF. DR. MUAMMER ÖZKAN

İSTANBUL, 2019

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

**DİZEL MOTORLARDA PÜSKÜRTME STRATEJİSİNİN**  
**PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ**

Hasan YILMAZ tarafından hazırlanan tez çalışması 02.01.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi O. Akın KUTLAR  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER  
Yıldız Teknik Üniversitesi

İçten yanmalı motorların kullanımındaki artış ve çevresel etkisi göz önünde bulundurulduğunda gelecek nesillere daha sağlıklı bir çevre bırakabilmek ve kısıtlı petrol rezervlerini daha uzun süre kullanılması amacı ile uluslar arası standartlar ile egzoz gaz emisyon limitleri oldukça düşürülmüştür. İçten yanmalı motorlardan çıkan egzoz emisyonlarını düşürme yöntemlerinden en etkili olanı yanmayı iyileştirmektir. Ancak yanmayı iyileştirmek için ek yakıt tüketilmesi gerekmektedir. Petrol rezervlerindeki azalma ile birlikte tüm bu gereksinim ve şartlar daha gelişmiş sistemlere sahip motorların üretilmesinimini doğurmuştur. Özellikle yakıt enjeksiyon sistemlerindeki gelişme ile birlikte yanma daha kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Uygulanan yeni sistemler gelişmiş olduğu kadar motor üzerinde ek EKÜ kalibrasyon çalışması gereksinimi doğurmuştur. Yapılan EKÜ kalibrasyonunda uluslar arası emisyon regülasyonları tutturulması gerektiği gibi motorun çalışması sırasında minimum yakıt tüketimi ve maksimum güç elde edilmesi hedeflenmektedir.

Dizel motorlarda enjeksiyon basıncının ve ön enjeksiyonlu yanmada ön enjeksiyon avansının motor performansına ve emisyonlarına etkisinin deneysel olarak araştırılması konulu yüksek lisans tez çalışmamın gerçekleşmesinde büyük katkısı olan değerli hocam Prof. Dr. Muammer ÖZKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde yardımlarını esirgemeyen değerli hocam, Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER'e de şükranlarımı bir borç bilirim.

Tezin hazırlanmasında bana yardımcı olan tüm arkadaşlarıma, desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2019

Hasan YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Tezin Amacı.....	9
1.3 Hipotez.....	10
BÖLÜM 2	
DİZEL MOTORLARDA YANMA.....	11
2.1 Yanma Olayının Safhaları.....	13
2.1.1 Tutuşma Gecikmesi (TG).....	13
2.1.2 Kontrolsüz Yanma.....	14
2.1.3 Difüzyon Kontrollü Yanma.....	14
2.1.4 Art Yanma .....	15
2.2 Dizel Motorlarda Egzoz Emisyonlarının Oluşumu.....	15
2.2.1 Karbon Monoksit (CO) .....	16
2.2.2 Hidrokarbon (HC) .....	17
2.2.3 Azotoksitler (NO <sub>x</sub> ) .....	18
2.2.4 İs ve Partikül.....	19

2.2.5 Kükürtdioksit (SO <sub>2</sub> ).....	20
2.3 Dizel Motorda Emisyonu Etkileyen Parametreler .....	20
2.3.1 Sıkıştırma Oranı .....	20
2.3.2 Aşırı Doldurma.....	21
2.3.3 Motor Devri.....	21
2.3.4 Yanma Odasının Şekli.....	22
2.3.5 Emme Havası Hareketi.....	22
2.3.6 Karışımdaki Oksijen Yüzdesi.....	22
2.3.7 Emme Havası Giriş Sıcaklık ve Basıncı .....	23
2.3.8 Yakıt Demeti Açısı.....	23
2.3.9 Yakıt Püskürtme Avansı.....	23
2.3.10 Yakıt Püskürtme Basıncı.....	24
2.3.11 Yakıt Özellikleri.....	24
<b>BÖLÜM 3</b>	
<b>COMMON RAIL DİREK ENJEKSİYON SİSTEMİ .....</b>	<b>25</b>
3.1 Common Rail Direk Enjeksiyon Sistemlerine Duyulan İhtiyaç .....	25
3.2 Common Rail Direk Enjeksiyon Sistemleri (CDI) .....	25
<b>BÖLÜM 4</b>	
<b>MOTOR TEST DÜZENEGİ .....</b>	<b>29</b>
4.1 Deney Şartları .....	29
4.2 Test Düzeneginin Özellikleri .....	29
4.2.1 Test Motorunun Teknik Özellikleri.....	29
4.2.2 Dinamometre .....	31
4.2.3 Gaz Emisyon Ölçüm Cihazı.....	32
4.2.4 İS Emisyonu Ölçüm Cihazı .....	37
4.2.5 Yakıt Tüketimi Ölçüm ve Şartlandırma Cihazı.....	38
4.2.6 Silindir İçin Basınç Ölçüm Sistemi .....	40
4.2.6.1 Silindir İçin Basınç Sensörü .....	41
4.2.6.2 Motor Devri Ölçüm Sensörü .....	42
4.2.7 Motor Giriş Havası Debi Ölçümü .....	42
4.2.8 Motor Kontrol Yazılımı .....	43
4.2.8 Test Odası Kontrol Yazılımı .....	44
4.3 Deneyin Yapılışı .....	45

## BÖLÜM 5

TEST SONUÇLARI .....	48
5.1 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının ve Avansının Emisyon ile Motor Gücüne Etkisi.....	48
5.1.1 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının NO <sub>x</sub> Emisyonlarına Etkisi .....	48
5.1.2 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının CO Emisyonlarına Etkisi .....	52
5.1.3 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının HC Emisyonlarına Etkisi .....	54
5.1.4 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının İS Emisyonlarına Etkisi .....	56
5.1.5 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının CO <sub>2</sub> Emisyonlarına Etkisi .....	58
5.1.6 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının Yanma Basıncına Etkisi .....	61
5.1.7 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının Motor Gücüne Etkisi .....	63
5.1.8 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının Özgül Yakıt Tüketimine Etkisi.....	65
5.2 Farklı Püskürtme Basıncı, Ön Püskürtme Avansı ve Ön Püskürtme Miktarı Değerleri İçin Silindir İçi Basınç Değişimleri ve Isı Açığa Çıkış Oranları .	67

## BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR .....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	83

## SİMGE LİSTESİ

---

CO	Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	Karbon dioksit
fs	Tam ölçek
HC	Hidrokarbon
H <sub>2</sub> O	Su
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sülfürik asit
N <sub>2</sub>	Azot
NO	Azot oksit
NO <sub>2</sub>	Azot dioksit
N <sub>2</sub> O	Azot protoksit
NO <sub>x</sub>	Azot oksit bileşikleri
O <sub>2</sub>	Oksijen
P	Basınç
PM	Partikül madde
SO <sub>2</sub>	Kükürt dioksit
THC	Toplam hidrokarbon
V	Hacim

## KISALTMA LİSTESİ

---

AÖN	Alt ölü nokta
ATDC	Üst ölü noktadan sonra
DI	Direkt püskürtmeli
DOC	Dizel oxidation catalyst
DPF	Dizel partikül filtresi
FÖYT	Fren özgül yakıt tüketimi
FSN	Filtre is numarası
HRR	Isı açığa çıkış oranı
IDI	İndirekt püskürtmeli
KMA	Krank mili açısı
LNT	Lean NO <sub>x</sub> trap (fakir NO <sub>x</sub> kapanı)
ÖYT	Özgül yakıt tüketimi
Pmax	Silindir içi maksimum basınç
SRC	Selective catalytic reduction
ÜÖN	Üst ölü nokta

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Dizel motorlu ticari araçların emisyon limitleri..... 3
Şekil 2.1	Püskürtme demetindeki emisyon oluşum bölgeleri ..... 12
Şekil 2.2	Dizel motorda bir delikli enjektörden püskürtülen yakıtın tutuşma anı fotoğrafı..... 12
Şekil 2.3	Bir dizel motora ait basınç-krank açısı ve püskürtme stratejisi diyagramı..... 13
Şekil 2.4	CO emisyonunun BMEP'ye bağlı değişimi ..... 17
Şekil 2.5	HC emisyonlarının HFK'na bağlı değişim grafiği ..... 18
Şekil 2.6	Motorun çalışma rejimine bağlı HC emisyonlarında değişim ..... 18
Şekil 3.1	Common Rail Sistemi ..... 27
Şekil 4.1	Deney motorunun güç-moment eğrisi..... 30
Şekil 4.2	Dinamometre ..... 31
Şekil 4.3	Hobira Mexa 7100 DEGR emisyon cihazı..... 32
Şekil 4.4	AVL 415S is ölçüm cihazı ..... 37
Şekil 4.5	AVL 735S yakıt tüketim ölçüm cihazı, AVL 753C yakıt şartlandırıcı... 39
Şekil 4.6	AVL Indiset 620 basınç ölçüm ve analiz sistemi ..... 40
Şekil 4.7	AVL GH14P silindir için basınç ölçüm sensörü..... 41
Şekil 4.8	AVL Optical Encoder 365CC devir ölçüm sensörü..... 42
Şekil 4.9	ABB SensyFlow-P hava debisi ölçüm sensörü..... 43
Şekil 4.10	ATI Vision ECU kontrol programı ..... 44
Şekil 4.11	AVL Puma OPEN 1.5.3 test odası kontrol programı..... 44
Şekil 5.1	120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının NO <sub>x</sub> emisyonlarına etkisi ..... 49
Şekil 5.2	130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının NO <sub>x</sub> emisyonlarına etkisi ..... 50
Şekil 5.3	140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının NO <sub>x</sub> emisyonlarına etkisi ..... 51

Şekil 5.4	120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO emisyonlarına etkisi .....	52
Şekil 5.5	130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO emisyonlarına etkisi .....	53
Şekil 5.6	140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO emisyonlarına etkisi .....	54
Şekil 5.7	120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının HC emisyonlarına etkisi .....	54
Şekil 5.8	130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının HC emisyonlarına etkisi .....	55
Şekil 5.9	140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının HC emisyonlarına etkisi .....	55
Şekil 5.10	120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının is emisyonlarına etkisi .....	56
Şekil 5.11	130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının is emisyonlarına etkisi .....	57
Şekil 5.12	140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının is emisyonlarına etkisi .....	57
Şekil 5.13	120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO <sub>2</sub> emisyonlarına etkisi .....	58
Şekil 5.14	130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO <sub>2</sub> emisyonlarına etkisi .....	59
Şekil 5.15	140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO <sub>2</sub> emisyonlarına etkisi .....	60
Şekil 5.16	120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının maksimum yanma basıncına etkisi.....	61
Şekil 5.17	130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının maksimum yanma basıncına etkisi.....	61
Şekil 5.18	140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının maksimum yanma basıncına etkisi.....	62
Şekil 5.19	120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının motor gücüne etkisi.....	63
Şekil 5.20	130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının motor gücüne etkisi.....	64
Şekil 5.21	140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının motor gücüne etkisi.....	64
Şekil 5.22	120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının ÖYT'ne etkisi.....	65
Şekil 5.23	130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının ÖYT'ne etkisi.....	65

Şekil 5.24	140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının ÖYT'ne etkisi.....	66
Şekil 5.25	Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 120 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	67
Şekil 5.26	Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 120 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	67
Şekil 5.27	Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 120 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	68
Şekil 5.28	Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 120 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	68
Şekil 5.29	Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 120 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	69
Şekil 5.30	Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 120 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	69
Şekil 5.31	Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	70
Şekil 5.32	Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	70
Şekil 5.33	Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	71
Şekil 5.34	Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	71
Şekil 5.35	Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	72
Şekil 5.36	Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	72
Şekil 5.37	Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 140 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	73
Şekil 5.38	Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 140 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	73
Şekil 5.39	Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 140 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	74
Şekil 5.40	Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 140 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	74
Şekil 5.41	Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 140 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı .....	75
Şekil 5.42	Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 140 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi.....	75

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 4.1	Deney motorunun teknik özellikleri..... 30
Çizelge 4.2	Dinamometrenin teknik özellikleri ..... 31
Çizelge 4.3	Mexa 7100 DEGR analizörlerinin ölçüm gazları ve ölçüm aralıkları .... 33
Çizelge 4.4	IRD analizörlerinin teknik özellikleri ile Euro 5 emisyon regülasyonu (715/2007/EC) limit karşılaştırması ..... 34
Çizelge 4.5	CLD analizörlerinin teknik özellikleri ile Euro 5 emisyon regülasyonu (715/2007/EC) limit karşılaştırması ..... 35
Çizelge 4.6	FID analizörlerinin teknik özellikleri ile Euro 5 emisyon regülasyonu (715/2007/EC) limit karşılaştırması ..... 36
Çizelge 4.7	MPD analizörlerinin teknik özellikleri ile Euro 5 emisyon regülasyonu (715/2007/EC) limit karşılaştırması ..... 37
Çizelge 4.8	AVL 415S is ölçer cihazın teknik özellikleri ..... 38
Çizelge 4.9	AVL 735S ve 753C cihazlarının teknik özellikleri..... 39
Çizelge 4.10	AVL AVL Indiset 620 basınç ölçüm cihazlarının teknik özellikleri ..... 41
Çizelge 4.11	AVL GH14P silindir için basınç ölçüm sensörü teknik özellikleri..... 41
Çizelge 4.12	AVL Optical Encoder 365CC devir ölçüm sensörü teknik özellikleri.... 42
Çizelge 4.13	AVL Optical Encoder 365CC devir ölçüm sensörü teknik özellikleri.... 43
Çizelge 4.14	Test sırasında sabit tutulan parametreler ..... 45
Çizelge 4.15	Deney noktaları ..... 46

# DİZEL MOTORLARDA PÜSKÜRTME STRATEJİSİNİN PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ

Hasan YILMAZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Dizel motorlarda emisyon regülasyon limitlerini sağlayabilmek ve müşterinin talep ettiği minimum yakıt sarfiyatı ile maksimum güç hedefini tutturabilmek için ECU aracılığı ile motorun çalışma parametreleri üzerinde değişiklik yapılması gerekmektedir. Bu parametrelerden üzerinde en çok çalışılanları ise yakıt enjeksiyon sistemi ve enjeksiyonun motor çalışma koşullarına göre haritalandırıldığı ECU kalibrasyonudur.

Yapılan bu deneysel çalışmada; yakıt püskürtme basıncı değiştirilmiştir. Ayrıca enjeksiyon ikiye bölünerek ana yanmayı kolaylaştırma, emisyonları düşürmek için ön enjeksiyon zamanlamasının ve miktarının emisyon ve motor gücüne etkisi araştırılmıştır. Deneyde dört silindirli, dört zamanlı, common rail sistemi ile direk enjeksiyonun yapıldığı turboşarjlı 1.8 litrelik bir motor kullanılmıştır. Çalışma sırasında motor, 2500 dev/dak'lık sabit hızda %50 pedal pozisyonunda çalıştırılarak 120, 130 ve 140 MPa'lık basınç ile yakıt püskürtülmüştür. Aynı zamanda püskürtülen yakıt miktarı sabit tutularak iki faza ayrılıp ön enjeksiyonlu yanma gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön enjeksiyon miktarı toplam püskürtülen yakıtın %5, %10 ve %15'i olacak şekilde belirlenmiştir. Ön enjeksiyon zamanlamasının etkisini de görebilmek için ön enjeksiyon avansı ÜÖN'dan 10, 15 ve 20 KMA° olacak şekilde püskürtmeler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak ise yapılan değişikliklerin NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC, is emisyonlarıyla birlikte motor gücüne, silindir için maksimum yanma basıncına etkileri araştırılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, püskürtme basıncının arttırılmasıyla Pmax, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, ÖYT artmış, CO, HC, is ve motor gücü ise azalmıştır. Ön enjeksiyon püskürtme avansının arttırılması ile ise NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, ÖYT, Pmax artmış, CO, HC ve motor gücü düşmüştür

**Anahtar Kelimeler:** İçten yanmalı motor, Dizel motor, püskürtme basıncı, püskürtme avansı, performans, egzoz emisyonları, ön enjeksiyon, enjeksiyon fazlaması, ön enjeksiyon avansı.



**FUEL INJECTION STRATEGY EFFECTS ON DIZEL ENGINE  
PERFORMANCE AND EMISSIONS**

Hasan YILMAZ

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

To achieve the exhaust emission regulation limits and to provide the customer's maximum power with minimum fuel consumption request it is necessary to tune up the combustion parameters on dizel engines. Injection system and injection parameters which are set in ECU are the most studied fields to optimize the combustion.

In this experimental study fuel injection pressure is variated with pre injection quantity and timing. Main injection is splited in to the two parts. One of them is pre injection other one is main injection. Effect of this variation on the emission and engine power. Four stroke, 1.8 liter dizel engine with 4 cylinder, common rail direct injection system and turbo charger with variable geometry is used for this study. Injection pressure is variated between 120, 130, 140 MPa at 2500 rpm and %50 pedal position. At the same time injection is splited in to the two phase. Pre injection quantity is determined as %5, %10 and %15 of total injected fuel. To be able to see the effect of pre injection advance start of pre injection is variated between 10, 15, 20 crank shaft angel. At the end of the study the effects of the variation on NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC, smoke, engine power and combustion pressure is invertigated.

Test results are show us that by increasing the injection pressure NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, specific fuel consumption and combustion pressures are increased and CO, HC, engine power and smoke is decreased. By increasing the pre injection advange NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, specific fuel consumption, combustion pressures is increased and CO, HC, engine power is decreased.

**Key Words:** Internal combustion engines, Dizel engine, injection pressure, injection advance, power, exhaust emissions, pre injection, injection splitting, pre injection advance



---

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

#### 1.1 Literatür Özeti

Dizel motorların çalışma prensibi ilk olarak 1824 yılında Fransız mühendis Nicolas Leonard Sadi Carnot tarafından ortaya atılmıştır. Carnot çevrimi olarak da bilinen bu çevrim daha sonra 1893 tarihinde Rudolph Dizel tarafından içten yanmalı motorlara uyarlanarak çevrim ‘Dizel Çevrimi’ olarak adlandırılmıştır. Çevrim dört ana bölümden oluşmaktadır.

İlk bölümde yanma gazı hacim daralması ile sıkıştırılır. İkinci bölüm ise sabit basınçta sisteme ısı sokulmasını içerir. Üçüncü bölümde ise hacim genişlemesi ve basınç düşümü meydana gelirken son bölümde sabit hacimde sistemden dışarı ısı atımı gerçekleşir. Bu çevrim dizel motorların temel çevrimi olarak nitelendirilse de sistem kayıplarını ve bazı gerçek fiziksel olayları içermemektedir.

1893 tarihinden itibaren, çağın gereksinimleri ve ihtiyaçları doğrultusunda dizel motor üzerinde bir çok çalışma gerçekleştirildi. Dizel motorların verimlerinin Otto motorlarından yüksek olması avantajı ile birlikte günümüzde giderek daha yaygın hale gelmeye başlamıştır.

İçten yanmalı motorların, 20 yüzyıl başlarından itibaren yaygınlaşmasıyla birlikte sınırlı bir kaynak olan fosil yakıtlar, ekonomi üzerine giderek artan bir baskı oluşturmaya başlamıştır. Oluşturulan baskı ve kirlenici etkilerin yanında açığa çıkan emisyonlar küresel ısınmaya da sebep olmaktadır. İçten yanmalı motorlarda fosil yakıt kullanımı sonucu oluşan emisyonlar, sorunun bölgesel olmadan çıkararak küresel bir sorun haline getirmektedir. Fosil yakıt kullanımı ile birlikte atmosferdeki karbondioksit miktarında ciddi seviyede artış oluşmuş, bu da küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir.

İçten yanmalı motorlarda yakılan fosil yakıt sebebiyle her yıl milyonlarca ton karbondioksit atmosfere salınmaktadır. Atmosferdeki karbondioksit oranının artışıyla oksijen miktarı azalmaktadır.

Fosil yakıtların kullanıldığı içten yanmalı motorlardan salınan emisyonların en önemlileri karbon monoksit, hidrokarbon, azot oksit gazlarıdır. Bu emisyonların açığa çıkma sebepleri temelde eksik yanma, yüksek ısı açığa çıkış eğrisi, yakıt içerisindeki kükürt ve atık maddelerdir. Bu emisyonlar yanma öncesi, yanma sırasında ve yanma sonrasında alınan tedbirler ile azaltılmaya çalışılmaktadır.

Fosil yakıt kullanan içten yanmalı motorların kullanımı yüksek bir ivme ile artmaktadır. Bu da çevreyi kirletici etkilerinin günden güne artması anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmada, gelişen motor teknolojisinin sunduğu enjeksiyon sisteminde varyasyon yapma olanağını kullanarak dizel motorların emisyon salınım değerlerinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Çalışmada 120, 130 ve 140 MPa'lık enjeksiyon basınçları ile yapılan ön enjeksiyonlu yanmalarda oluşan emisyon salınımı değerlendirilmiştir. Ayrıca ön enjeksiyon ile ana enjeksiyonun kütle oranları değiştirilerek motor gücünün, NO<sub>x</sub>-CO-HC-is emisyon salınımlarının bundan nasıl etkilendiği incelenmiştir.

Günümüzde kullanılan içten yanmalı pistonlu motorların temelleri 1867 yılında atılmıştır ve 1876 yılında da ilk prototip motor üretilerek çalışır hale getirilmiştir. İlk prototipten sonra 14 yıl içerisinde 50.000 adet üretilerek Avrupa ve Amerika'da satışı gerçekleştirilmiştir. Bu motorlar benzinli motorlar olup 1894 yılına kadar çalışma verimliliği %25'lere kadar yükseltilmiştir. Günümüze kadar yapılan iyileştirme ve geliştirme çalışmaları ile bu motorun efektif verimliliği %37 mertebelerine ulaşmıştır. Bu geliştirmelerin tamamı fosil yakıtlardan üretilen sıvı yakıtlar üzerine yapılmıştır. İlk motorların kullanımında yüksek yakıt tüketimleri varken, 1920 yılı itibari ile motorlu taşıt sayısındaki artış ile daha verimli motorların geliştirilme ihtiyacı oluşmuştur. Böylelikle motor verimliliğinin artışı üzerine ilk çalışmalar başlamıştır.

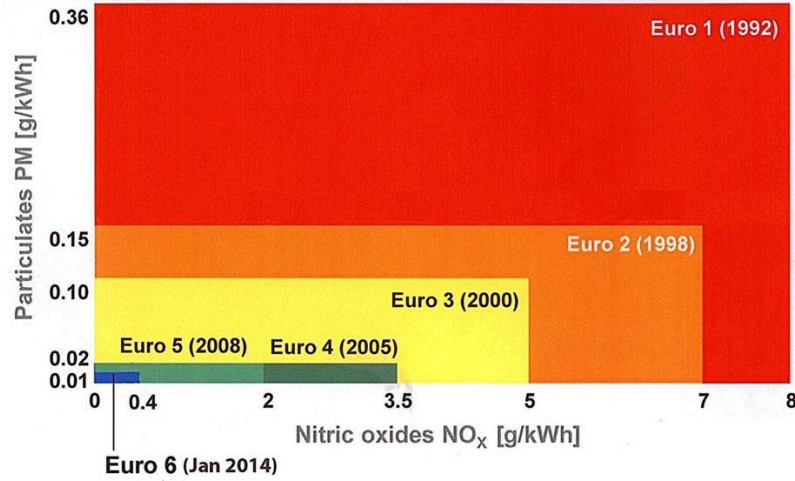
İçten yanmalı motorların kullanımları arttıkça, salınan emisyonlar da artarak çevre kirliliğinde çok büyük artışa sebep olmaktadır. Bu artış ülkelerin çevre bakanlıklarınca kontrol altına alınması için çözümlerin araştırılmasını doğurmuştur. Böylece ilk egzoz emisyonları standartlarının oluşumu gündeme gelmiştir. Bu standartlar ile her bir aracın çevreye saldığı emisyonlara bir limit getirilmesine karar verilmiştir. Ancak araç artışları devam ettiği için bu limitler her geçen gün daha da daraltılmaya başlanmıştır.

Çevre kirliliğinin kontrol altına alınması hedefi ile oluşturulan Kyoto Protokolü bir çok ülke tarafından kabul edilerek uygulanmaya başlanmıştır. Bu protokole göre hava kirliliğinin azaltılması amaçlanmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu azot, oksijen, su buharı, karbondioksit, karbonmonoksit, kükürtdioksit ve hidrokarbon bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Bu bileşenlerden en önemlileri karbonmonoksit, azotoksit ve hidrokarbondur. İçten yanmalı bir motorun kirletici etkisine örnek vermek gerekirse; bir insanın günlük temiz hava ihtiyacını içten yanmalı bir motor 10 dakika içerisinde kirletebilmektedir. Avrupa Birliği ülkelerince emisyonların azaltılması için Avrupa Emisyon Standartları belirlenmiştir. Bu standart sistematik olarak emisyonların azaltılması için her yıl daralmaktadır. Yıllara göre emisyon limitlerindeki azalma Şekil 1.1’de verilmiştir.

## EU Emissions Standards

Exhaust emissions Euro 1–6



Şekil 1.1 Dizel motorlu ticari araçların emisyon limitleri

Babu vd. [1] tek püskürtme, ana püskürtme + art püskürtme etkisini püskürtme avansını ve püskürtme basıncını değiştirerek egzoz emisyonuna ve motor performansına olan etkisini deneysel olarak incelemiştir. İlk olarak tek enjeksiyonun etkilerini araştırmıştır. Enjeksiyon miktarı sabit tutularak enjeksiyon basıncı 200 ile 600 bar arasında ve enjeksiyon açısı 19 – 27 °KMA arasında değiştirilmiştir. Bu denemelerde en düşük özgül yakıt tüketimini 500bar’lık yakıt enjeksiyon basıncında ve 25 °KMA’nda ulaşmıştır. Çalışmanın bir sonraki adımında ana ve art enjeksiyon yaparak etkilerini araştırmıştır.

Ana enjeksiyon zamanı 19 -25 °KMA ve art enjeksiyon zamanı -5 °KMA bTDC – 5 °KMA aTDC arasında değiştirilmiştir. Aynı zamanda art enjeksiyon miktarı toplam püskürtülen yakıtın %10 – 25 arasında değiştirilmiştir. Bu çalışma sonunda en düşük özgül yakıt tüketiminin %10'luk art enjeksiyon miktarında gerçekleştiğini görmüştür. En düşük THC ve FSN değerine ise %25'lik art enjeksiyon miktarında ulaşıldığına ulaşmıştır. Çalışma sonucunda aynı zamanda yakıt enjeksiyon basıncının artışı ile THC ve FSN emisyonunda düştüğü gözlemiştir. Ancak yakıt basıncının artışının NOx emisyonunun arttırdığı görülmüştür.

Park vd. [2] çoklu enjeksiyon stratejisinin motor performansına ve egzoz emisyonuna etkisini araştırmıştır. Deneysel çalışma için 510.7 cm<sup>3</sup> silindir hacmine, 17.1:1 sıkıştırma oranına sahip tek silindirli motor kullanılmıştır. Çalışma sırasında püskürtülen toplam yakıt miktarı 14mg/strok olarak, yakıt püskürtme basıncı da 500 bar olarak sabit tutulmuştur. Öncelikli olarak tekli enjeksiyon karakteri incelenmiştir. Bu incelemede enjeksiyon ÜÖN'dan önce 27 – 0 °KMA aralığında değiştirilmiştir. Sonuçlara göre NOx emisyonunda sürekli bir düşüş görülürken THC, CO FSN emisyonlarının 15 °KMA'nda minimum seviyede olduğu görülmüştür. Bu noktada daha önce ve sonra yapılan enjeksiyonlarda THC, CO ve FSN emisyonlarının arttığı görüşmüştür. Özgül yakıt tüketiminin ise 0 °KMA'da minimum seviyede olduğu, enjeksiyonun öne veya arkaya alınması durumunda arttığı görülmüştür. HRR'in ise yakıt püskürtme basıncının artışıyla arttığı gözlenmiştir. Ana enjeksiyon ve art enjeksiyon yapıldığında ise ana enjeksiyon ile art enjeksiyon arasındaki °KMA arttıkça özgül yakıt tüketiminin arttığı görülmüştür. Ön enjeksiyon ve ana enjeksiyon yapılması durumunda ise ön enjeksiyonun ÜÖN'ya yaklaştıkça özgül yakıt tüketiminin düştüğü görülmüştür.

Raeie vd. [3] enjeksiyon zamanlamasının ve basıncının emisyon ve motor gücüne etkisini incelemiştir. İnceleme için 3990 cm<sup>3</sup> silindir hacmine, 17.5:1 sıkıştırma oranına sahip 4 silindirli sıralı bir dizel motor kullanılmıştır. Enjeksiyon zamanı ve miktarı sabit tutularak enjeksiyon basıncı arttırıldığında silindir için basıncın arttığı ve özgül yakıt tüketiminin düştüğü görülmüştür. Aynı zamanda FSN emisyonu düşerken NOx emisyonunun arttığı görülmüştür. Enjeksiyon miktarı sabit tutularak enjeksiyon zamanı ÜÖN'dan 6 °KMA önce ile ÜÖN'dan 5.5 °KMA sonra arasında değiştirildiğinde ise NOx emisyonunda artış, SFN emisyonunda azalma gözlenmiştir.

Sindhu vd. [4] çoklu enjeksiyonun NO<sub>x</sub> emisyonuna etkisini incelemiştir. İlk olarak tek enjeksiyon yaparak çalışmasına başlamıştır. Bu çalışmada enjeksiyon ÜÖN'dan 20 KMA öncesi ile ÜÖN arasında yapılarak enjeksiyonun ÜÖN'ya yaklaşması ile silindir için basıncın arttığı, NO<sub>x</sub> emisyonunun arttığı ve FSN emisyonunun azaldığı görülmüştür. Daha sonra toplam püskürtülen yakıtın %25'ini ana enjeksiyondan 8 °KMA önce yaparak incelemelerde bulunmuştur. Bu durumda NO<sub>x</sub> emisyonunda %55 düşüş, FSN emisyonunda %20 düşüş, silindir için basınçta da %25 düşüş gözlemlenmiştir. Son olarak ise toplam püskürtülen yakıtın %25'ini art enjeksiyon olarak gerçekleştirmiştir ve NO<sub>x</sub> emisyonunda %20 düşüş, FSN emisyonunda %25 düşüş, silindir için basınçta da %25 düşüş gözlemlenmiştir.

Wamankar vd. [5] enjeksiyon zamanlamasının dizel motorlarda etkisini incelemiştir. Deneysel çalışması sırasında carbodizel yakıt kullanmıştır. Çalışmasında tek enjeksiyon ile ÜÖN'dan önce 26 – 10 °KMA aralığında enjeksiyonlar gerçekleştirmiştir. Sonuçlarında enjeksiyon açısı ÜÖN'ya yaklaştığında silindir için basıncın arttığını, özgül yakıt tüketiminin azaldığını, NO<sub>x</sub> emisyonunun azaldığını ölçmüştür. THC ve CO emisyonlarının ise ÜÖN'dan 21.5 °KMA öncesine kadar arttığını, ÜÖN'dan 20 °KMA önce yapılan enjeksiyonda ise tekrar azaldığını gözlemlenmiştir.

Lee vd. [6] çoklu enjeksiyon stratejisinin emisyon ve yanma karakterine etkisini incelemiştir. Deneysel çalışma 17:1 sıkıştırma oranına sahip, 1800 bar'lık yakıt enjeksiyon sistemine sahip tek silindirli motor üzerinde yapılmıştır. Denede motor devri 1200 dev/dak sabit tutulmuştur. Püskürtülen yakıt miktarı da 60 mg/strok olarak belirlenmiştir. Dene varyasyonu ana enjeksiyon ÜÖN'dan 28 °KMA öncesinden başlayarak ÜÖN'dan 4 °KMA sonrasına kadar olacak şekilde belirlenmiştir. 300 bar'lık yakıt püskürtme basıncı sabit tutularak pilot enjeksiyon miktarı ve zamanı değiştirilerek NO<sub>x</sub> ve FSN emisyonu incelenmiştir. Çalışma sırasında ana enjeksiyon ÜÖN'dan 20 °KMA önce yapılmıştır. Çalışma sırasında ana enjeksiyondan 20 KMA öncesine kadar yapılan ön enjeksiyonlarda ön enjeksiyon miktarı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonunun arttığı görülmüştür. Ana enjeksiyondan 20 ila 40 °KMA öncesinde yapılan ön enjeksiyonlarda NO<sub>x</sub> emisyonunun düştüğü gözlenmiştir. Bu durum J. Lee vd. tarafından şöyle açıklanmıştır; ön enjeksiyon, ön karışimli yanmayı azalttığı için ısı açığa çıkış hızı ve silindir için basıncı azalmıştır. Böylece NO<sub>x</sub> emisyonlarında düşme gözlenmiştir. Ancak asıl NO<sub>x</sub> emisyonunun yüksek oranda düşüşü ön enjeksiyonun ana enjeksiyondan 40 °KMA daha önce yapıldığında gözlenmiştir. Ana enjeksiyondan 40 °KMA önce yapılan

ön enjeksiyonun ayrıca FSN emisyonunu da düşürdüğü görüşmüştür. NO<sub>x</sub> ve FSN emisyonunun düştüğü bu durumda THC emisyonunun ise arttığı ölçülmüştür. Bunun sebebi olarak ise püskürtülen yakıtın silindir duvarlarına teması sonrasında THC emisyonunun artmasıdır.

Abdullah vd. [7] enjeksiyon basıncının V6 dizel motor üzerine etkilerini incelemiştir. Deney sırasında 2720 cm<sup>3</sup> silindir hacmine sahip, 152 kW gücünde, 17.3:1 sıkıştırma oranında dizel motor kullanmıştır. 2000 dev/dak motor devrinde püskürtülen yakıt basıncı 300 bar'dan 700 bar'a arttırıldığında silindir için basıncın arttığını görülmüştür. Silindir için basıncın artışı ile ısı açığa çıkış eğrisinde de artış gözlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışma sonucunda ön enjeksiyonun NO<sub>x</sub>, FSN emisyonlarını düşürdüğü ve motor gürültüsünü azalttığı görülmüştür. Çoklu enjeksiyonla yanmada meydana getirilebilecek kontrollü basınç artışları ile THC ve CO emisyonlarının da düşürüleceği gözlenmiştir.

Diez vd [8] tek silindirli optik motorda ön enjeksiyonlu püskürtmenin dizel motorlardaki etkisini incelemiştir. Tek silindirli motor 499 cm<sup>3</sup> silindir hacmine, 16:1 sıkıştırma oranına sahiptir. Deneysel çalışma 2000 dev/dak motor hızında ve 1200 bar'lık yakıt püskürtme basıncında gerçekleştirilmiş olup EGR açıklık pozisyonu %60 olarak sabitlenmiştir. Deney sırasında ön enjeksiyon ile ana enjeksiyon arasındaki fark 8 °KMA olarak belirlenmiştir. Ön enjeksiyon zamanlaması ÜÖN'dan önce 19 °KMA ile ÜÖN'dan 11 °KMA arasında değiştirilmiştir. Ön enjeksiyon zamanı ÜÖN'ya yaklaştıkça ortalama etkili basıncın arttığı, NO<sub>x</sub> emisyonlarının düştüğü ve is emisyonunun arttığı gözlenmiştir. Is emisyonunun artışına paralel olarak THC emisyonunda da artış görülmüştür.

Zhang vd. [9] dizel motorlarda farklı pilot enjeksiyon gerçekleştirerek emisyonlara etkisini incelemiştir. Deneysel çalışma 2198 cm<sup>3</sup> silindir hacmine, 16.6:1 sıkıştırma oranına, 96 kW'lık güce sahip dizel motor üzerinde yapılmıştır. Deney, motorun 3 farklı çalışma noktasında yapılmıştır; 800 dev/dak (rölenti devri), 1800 dev/dak, 2500 dev/dak. Çalışma iki bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde pilot enjeksiyon ve ana enjeksiyon yapılmıştır. İkinci bölümünde ise ön enjeksiyon, ana enjeksiyon ve art enjeksiyon yapılmıştır. Ön enjeksiyon ve ana enjeksiyon yapıldığı durumda ana enjeksiyon ÜÖN'dan önce 2.69 °KMA'nda sabit tutulmuştur. Ön enjeksiyon ise ÜÖN'dan önce 22.45 °KMA ile ÜÖN'dan önce 12.8 °KMA arasında değiştirilmiştir. 3 motor çalışma noktasında ön enjeksiyon yapıldığı durumlarda NO<sub>x</sub> emisyonunun düştüğü ancak is

emisyonunun arttığı gözlenmiştir. İkinci deneme olarak ise pilot püskürtme ana enjeksiyondan 5 °KMA önce sonra olacak şekilde yapılmıştır. Bu deneme 1.5 ve 3mm<sup>3</sup>/strok'luk pilot püskürtmelerle yapılmıştır. 1.5mm<sup>3</sup>/strok ön enjeksiyon yapıldığında is ve NOx emisyonlarının düştüğü görülmüştür. 1.5mm<sup>3</sup>/strok art enjeksiyon yapıldığında ise NOx emisyonunun arttığı, is emisyonunun 800 dev/dak'da arttığı, 1800 ve 2500 dev/dak'da azaldığı görülmüştür. Pilot enjeksiyon miktarı 3mm<sup>3</sup>/strok olarak yapıldığında ise ön enjeksiyonda NOx ve is emisyonunda düşme, art enjeksiyon olarak yapıldığında iki emisyonun da arttığı görülmüştür. Genel olarak çalışma sonucuna bakıldığında, ön enjeksiyonun ana tutuşma gecikmesini arttırdığı için is emisyonunu düşürdüğü görülmüştür. Buna rağmen düşük pilot enjeksiyonunda ve pilot enjeksiyonun ana enjeksiyondan çok önce yapılması durumunda is emisyonunun arttığı da görülmüştür. NOx emisyonu ise pilot enjeksiyon ile ana enjeksiyon arasındaki süre arttıkça azaldığı görülmüştür.

Cheng vd. [10] çoklu enjeksiyonun püskürtme etkisini ağır ticari araç motorunda incelemiştir. Deneysel çalışmada 16.4:1 sıkıştırma oranına ve 303 kW güce sahip dizel motor kullanılmıştır. Deney sırasında motor devri 1270 dev/dak'da, yakıt püskürtme basıncı 1000bar'da ve püskürtülen yakıt miktarı 60.5 mg/stok'da sabit tutulmuştur. Pilot enjeksiyon açısı ve pilot enjeksiyonun toplam yakıt enjeksiyon miktarına oranı değiştirilerek emisyonlara olan etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda ön enjeksiyon ile ana enjeksiyon arasındaki süre arttıkça silindir içinde oluşan en yüksek basınç değerinin düştüğü görülmüştür. Yine ön enjeksiyon ile ana enjeksiyon arasındaki süre arttıkça kümülatif ısı açığa çıkış miktarı ile ortalama sıcaklığın düştüğü, özgül yakıt tüketiminin arttığı ve termodinamik verimin düştüğü görülmüştür. Aynı zamanda NOx emisyonlarında düşme ve THC ile CO emisyonlarında artış gözlenmiştir. Ön enjeksiyon miktarı arttığında ise ortalama sıcaklığın ve maksimum silindir için basıncın arttığı görülmüştür. Buna bağlı olarak özgül yakıt tüketimi düşmüştür. Emisyonlara etkisi ise NOx ile THC'de artış, CO ve is emisyonunda düşüş olarak gözlenmiştir.

Cha vd. [11] dizel motorlarda püskürtme basıncının ve çoklu enjeksiyonun emisyonlara ve yakıt ekonomisine etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmasında 510 cm<sup>3</sup> silindir hacminde, 17:1 sıkıştırma oranına sahip tek silindirli motor kullanmıştır. 3 farklı konfigürasyonda denemeler gerçekleştirmiştir; tek enjeksiyon, ön enjeksiyon + ana enjeksiyon ve 2 ön enjeksiyon + ana enjeksiyon. Yakıt püskürtme basıncı 300 bar ile 1600 bar arasında değiştirildiğinde ön enjeksiyonun NOx emisyonunu azalttığı, is emisyonunu

arttırdığı görülmüştür. Ancak 1600 - 1800 bar aralığında yakıt püskürtme basıncında ön enjeksiyonun NO<sub>x</sub> emisyonlarını arttırdığı, is emisyonuna etkisinin olmadığı ölçülmüştür. 1600 bar'lık yakıt püskürtme basıncının altındaki basınçlarda, yanma süresi uzadığı için özgül yakıt tüketiminin düştüğü gözlenmiştir. Yine 1600 bar'lık yakıt püskürtme basıncının altındaki çalışmalarda, ön enjeksiyonun ısı açığa çıkış eğrisini düşürdüğü gözlenmiştir, 1600 bar üzerindeki basınçlarda ise tekli enjeksiyona yakın ısı açığa çıkış eğrileri görülmüştür. Bunun sebebi ise ön enjeksiyonun toplam yanmaya olan etkisinin azalması olarak değerlendirilmiştir. Ön enjeksiyonla birlikte is emisyonunun arttığı ancak püskürtme basıncı arttıkça is emisyonundaki artışın daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. 1600 bar üzerinde yakıt püskürtüldüğünde ön enjeksiyonun is emisyonuna etkisinin azaldığı gözlenmiştir.

Curlucci vd. [12] ön enjeksiyonun emisyon ve motor performansına etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışmada 2000 cm<sup>3</sup> silindir hacmine sahip 4 silindirli sıralı bir motor kullanılmıştır. Çalışmalar 1400 ve 2000 dev/dak motor hızlarında gerçekleştirilmiştir. Farklı motor torklarında yapılan bu çalışma sonucunda ön enjeksiyon avansı artırıldığında ısı açığa çıkış eğrisinin yükseldiği görülmüştür. Ön enjeksiyon avansının azaltılması ile ise ısı açığa çıkış eğrisinin düştüğü görülmüştür.

Hountalas vd. [13] yakıt püskürtme basıncının emisyonlara ve motor performansına etkilerini incelemiştir. Tek silindirli bir motorda yapılan bu çalışmada püskürtme basıncı arttıkça düşük ve yüksek motor gücü çıkışlarında NO<sub>x</sub> emisyonunun arttığı, is emisyonunun ise azaldığı gözlemlenmiştir. Kısmi yüklerde ise is emisyonundaki azalma daha yüksek oranlarda gerçekleşmiştir. Püskürtme basıncının artması, yanma süresini kısalttığı ve ısı açığa çıkış hızını arttırdığı görülmüştür. Püskürtme basıncının artışı ile özgül yakıt tüketiminde azalma gözlemlenmiştir.

Karra vd. [14] ön enjeksiyon avansının, miktarının ve yakıt püskürtme basıncının emisyonlara etkisini incelemiştir. Deney sırasında 4 silindirli, 4.5 L silindir hacmine sahip 129 kW'lık dizel motor kullanmıştır. Deney sırasında EGR kapalı tutularak ön enjeksiyon ÜÖN'dan 40 – 15 KMA aralığında değiştirilmiş, ön enjeksiyon miktarı da %15, %25 ve %40 olarak değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. Deney sırasında toplam püskürtülen yakıt 50mg/strok olarak sabit tutulmuştur. Ana enjeksiyon basıncı 1000 bar'dan 2000 bar'a çıkarıldığında Nox emisyonlarının lineere yakın bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ana enjeksiyon zamanlaması ÜÖN'dan 20 °KMA önce ile ÜÖN'dan 4 °KMA açısı

sonrası arasında değiştirildiğinde is emisyonunun ÜÖN'dan 10 °KMA öncesinde en yüksek değere ulaştığı ve öncesi ile sonrasında yapılan enjeksiyonlarda düştüğü gözlenmiştir. Yakıt püskürtme basıncı arttırıldığında da ısı açığa çıkış hızının arttığı görülmüştür. Ön enjeksiyonun ise NOx emisyonunu %70 mertebesinde düşürdüğü ölçülmüştür.

Vanegas vd. [15] deneysel çalışma ile ön enjeksiyonun, püskürtme başlangıç açısı değişiminin emisyonlara etkisi araştırmıştır. Çalışma sırasında 4 silindirli, değişken geometrili turboya sahip, egzoz gazı geri dönüşüm sistemli, silindir başına 4 sübaplı Euro 4 emisyon sertifikasına sahip 1.9 litrelik silindir hacminde dizel motor kullanılmıştır. Test, 2000 dev/dak'lık motor hızında, orta yüklerde, toplam 15 mg/strok'luk yakıt tüketimde, EGR tam kapalı olarak, 700 bar'lık ray basıncında gerçekleştirilmiştir. Püskürtülen yakıt ikiye bölünerek toplam püskürtülen yakıtın 1/8'i ön enjeksiyonla püskürtülmüştür. Ön enjeksiyon yapıldı her durumda tek enjeksiyonlu çalışmaya göre NOx emisyonlarının düştüğü gözlenmiştir. En düşük NOx emisyonu ise ön enjeksiyonun ana enjeksiyondan 22 °KMA önce yapıldığı durumda ölçülmüştür. Ancak bu noktada CO, THC ve is emisyonlarının arttığı da gözlenmiştir.

## 1.2 Tezin Amacı

Araçların regülatif emisyon limitleri her geçen gün azalmaktadır. Tezin ana amacı da bu limitler dahilinde motor geliştirebilmek için alternatif emisyon düşürücü yöntemleri araştırılmaktır. Emisyon oluşumu yanma sırasında gerçekleştiği için yanmayı en çok etkileyen püskürtme zamanlaması, miktarı ve ön enjeksiyon parametreleri üzerine optimizasyon yaparak emisyonların düşürülmesi hedeflenmiştir.

İçten yanmalı dizel motorların emisyonlarını düşürme yöntemlerinden biri de egzoz hattında emisyon düşürücü sistemlerin kullanılmasıdır. Bunlara örnek olarak SCR, DPF, LNT, DOC verilebilir. Ancak bu sistemlerin maliyetleri yüksek olduğu için daha düşük maliyetli emisyon düşürme yöntemlerinin bulunması hedeflenmiştir. Yakıt enjeksiyon parametrelerinin optimizasyonu ile güncel emisyon regülasyon limitlerini yakalamak mümkün değildir yine de bu optimizasyon ile egzoz hattı emisyon düşürme sistemleri yatırım maliyetlerinin azaltılması tezin amacı dahilindedir.

Tezin amacı, ön enjeksiyon ile NOx, CO, THC ve is emisyonunu düşürmek olduğu kadar bunu sağlarken özgül yakıt tüketiminin ve motor gücünün kabul edilebilir mertebelerde kalmasının sağlanmasıdır. Bu hedef dahilinde ön enjeksiyonun avansı,, miktarı ve basıncı

değiştirilerek emisyonlara, motor gücüne ve özgül yakıt tüketimine etkisi değerlendirilecektir.

### **1.3 Hipotez**

Her geçen yıl araçların emisyon normları değişmekte ve izin verilen emisyon salınım miktarları giderek azalmaktadır. Düşürülen emisyon limitlerinin sağlanabilmesi için motorların imalat ve işletim maliyetleri yükselmektedir. Buna paralel olarak motor teknolojileri de yüksek bir ivme ile gelişmektedir. Özellikle yakıt enjeksiyon sistemindeki gelişmeler ile bir yanma çevriminde birden fazla yakıt enjeksiyonu imkanı sağlanmaktadır. Gelişen yakıt sistemi ile oluşturulacak enjeksiyon stratejisinin optimizasyonu ile motor emisyonları azaltılabilmektedir. Yanma sonucu oluşan emisyonların azaltılması ile birlikte egzoz hattında kullanılan ve yüksek maliyetli emisyon azaltma sistemlerinin de maliyetleri azaltılacaktır. Yapılan tez çalışması, ön enjeksiyon yapmanın emisyonlara ve motor performansına olan etkisini görmemizi sağlamıştır.

## BÖLÜM 2

### DİZEL MOTORLARDA YANMA

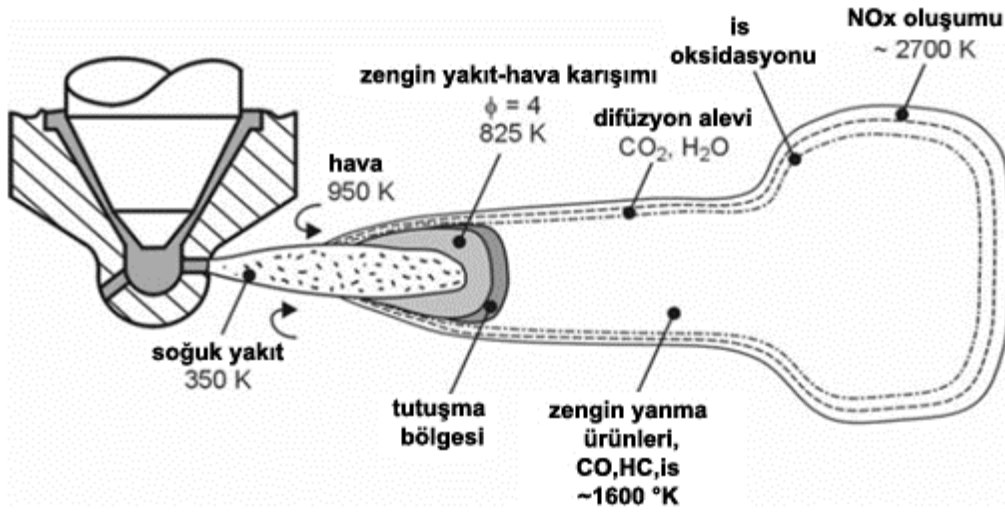
Dizel motorlarda pürkültülen yakıt ile havanın yanması ile karbondioksit, su buharı, kükürtdioksit, oksijen, azot açığa çıkar. Ancak yakıt ideal yanma çevriminden farklı bir şekilde yanmış veya tam olarak yanmamışsa karbonmonoksit, hidrokarbon ve azotoksit gibi kirletici emisyonlar oluşur.

Motorda meydana gelen yanmanın nasıl gerçekleşeceği yanma odasına giren hava miktarına, motor devrine, enjeksiyon stratejisine, silindir içi sıcaklığa, enjeksiyon sistene bağlıdır. Tam yanmanın gerçekleşme şartı olarak pürkürtülecek yakıt miktarı, yanma odasına giren hava miktarına bağlı olarak belirlenir.

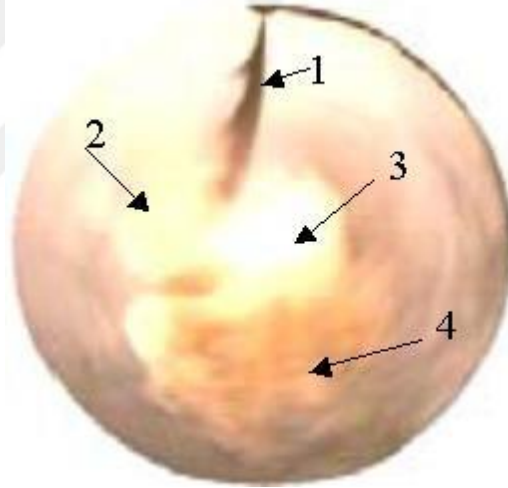
Dizel motorlarda yanma süreci, silindir içerisine yakıtın pürkürtülmesi ile başlayıp egzoz stroğunun başladığı ana kadar gerçekleşen karmaşık bir fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar bütünüdür. Dizel motorlarda homojen bir yanma gerçekleşmez. Yüksek sıcaklık ve basınçtaki ortama pürkürtülen yakıtın buharlaşmaya başlaması ile birlikte reaksiyonlar da oluşmaya başlamaktadır. Ancak başlangıçta, bu reaksiyonların hızları çok düşük olduğundan, basınçta belirgin bir artış görülmez. Tutuşma gecikmesi süresi sonunda, yanma odasındaki alev gözlenebilir ve P-V diyagramında basınç artışı belirgin hale gelir.

Dizel motorlarda yanmayı etkileyen ve devamını sağlayan temel parametreler silindir içerisindeki basınç, sıcaklık, oksijen miktarı ve yakıt hava karışım oranıdır. Bu parametrelere ek olarak, yanma bölgesine olan ısı transferi ve yanma odasındaki hava hareketleri yanmayı etkilemektedir. Piston ÜÖN'ya yaklaştığında yakıt enjektör ile silindir içerisine pürkürtülür. Yakıt pürkürtme etkisiyle demet halinde ilerlemeye başlar ve pülverize olarak buharlaşmaya başlar. Havanın karşı basıncı ile yakıt damlacıklarının hızı yavaşlar, küçük damlacıklar yakıt demetinin dış bölgesine doğru yönelir. İlk olarak

bu küçük damlacıkların olduğu bölgede uygun yakıt-hava karışımı oluşturarak yanma başlar (Sekil 2.1).



Şekil 2.1 Püskürtme demetindeki emisyon oluşum bölgeleri



Şekil 2.2 Dizel motorda bir delikli enjektörden püskürtülen yakıtın tutuşma anı fotoğrafı

Püskürtme ile oluşan yakıt demetindeki küçük damlacıkların kütlesine oranla hava ile temasları daha fazla olduğu için bu damlacıklar daha hızlı buharlaşır. Buna bağlı olarak yanma ilk olarak bu küçük damlacıkların olduğu bölgede başlar. Şekil 2.2'de püskürtülen yakıtın ilk yanması görülmektedir. 1 numaralı bölgede yakıt demeti sıvı haldedir, 2 numaralı bölge buhar halinde, 3 numaralı bölgede ise buharlaşmanın başlamasıyla birlikte alevlenmenin başladığını ve 4 numaralı bölgede alev bölgesinde oluşan is bölgesi görülmektedir. Dizel motorlarda genel olarak yanma bu şekilde 4 bölgede incelenebilmektedir.



Yukarıda değinildiği gibi yakıt damlacıklarının buharlaşması belirli bir süre almaktadır. Ancak püskürtmenin hemen sonrasında damlacıkların etrafında bir buhar tabakası oluşmakta ve yanma da bu buhar bölgesinde başlamaktadır. Yanmanın hızı bu damlacıklardaki yakıtın buharlaşma hızı ile doğru orantılıdır.

### **2.1.2 Kontrolsüz Yanma**

Tutuşma gecikmesi boyunca silindir içersine yakıt girmeye devam etmekte ve buharlaşmaya başlamaktadır. Püskürtme basıncının etkisiyle püskürtülen yakıt pülverize olarak küçük damlacıklara bölünür ve hava ile daha hızlı karışır. Yanma sırasında ise buharlaşan yakıt oksijen ile reaksiyona girerek yüksek bir hızla yanar. Yanmanın bu hızı silindir içersinde oluşan basıncın artış eğrisini de tayin etmektedir. Çok hızlı şekilde basınç artışı motor mekanik aksamına anlık yüksek kuvvetler uygulamaktadır. Ayrıca basınç artış eğrisi daha dik hale geldikçe yanma gürültüsü artar ve dizel vuruntusu başlar. Basıncın artış eğrisi şu parametrelerden etkilenmektedir:

- a) Yakıt enjeksiyon sisteminin teknik özelliklerine bağlı olarak yakıtın püskürtüldükten sonra ne kadar pülverize olduğuna bağlıdır.
- b) Tutuşma gecikmesi sırasında püskürtülen yakıt miktarının artması ile dizel vuruntusu artar.
- c) Tutuşma gecikmesi boyunca yakıtın ne kadar buharlaştığı ve hava ile ne kadar homojen bir şekilde karıştığı kontrolsüz yanmayı etkilemektedir.
- d) Tutuşma gecikmesi boyunca silindir içersine püskürtülen yakıt miktarı arttıkça silindirin içersinde oluşan basıncın artışı daha hızlı olmaktadır.

### **2.1.3 Difüzyon Kontrollü Yanma**

Difüzyon kontrollü yanma, silindir içindeki yanma basıncının en yüksek olduğu an ile yanmanın büyük oranda tamamlandığı an arasındaki sürede gerçekleşmektedir. Bu sürecin sonunda silindir içindeki basınç ve sıcaklık çok yüksek mertebelere çıktığı için bu sürecin sonrasında püskürtülen yakıt oksijenle buluşur buluşmaz yanmaktadır. Difüzyon kontrollü yanma sırasında oluşan basınç artışı aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- a) Yakıtın püskürtme basıncına; silindir içinde yeterli miktarda oksijen varsa bu parametre çok etkilidir.

b) Yakıt ile oksijenin temasını arttıracak şekilde, türbülanslı hava hareketi, motor hızı ve yanma odası şekli silindir içi basınç eğrisini oldukça etkiler.

c) Enjeksiyon zamanlaması ve pistonun konumuna bağlıdır. Eğer kontrollü yanmanın başlangıcı pistonun ÜÖN' dan uzaklaştığı bir zaman denk gelirse basınç artışı ciddi derecede düşürmektedir.

Yanma veriminin yüksek olması için yanmanın ÜÖN'da tamamlanması gerekmektedir. Ayrıca verimin yüksek olması hava yakıt karışım oranının yüksek olmasına ve hava yakıt karışımının homojen olması gerekmektedir.

#### **2.1.4 Art Yanma**

Motor veriminin yüksek olması için kısa sürmesi istenen bir safhadır. Ana yanma süreci sonrasında silindir için sıcaklığı maksimum seviyeye çıkmaktadır ve sonrasında art yanma başlar. Bu safhada yakıt oranının yüksek olduğu yanmalarda eksik yanmış yakıt yanmaktadır.

Art yanma genişleme zamanında gerçekleşmektedir. Bu süreç ÜÖN'dan 70-80 °KMA sonrasına kadar devam eder. Ana yanmada yanma fırsatı bulamayan yakıt genişleme sürecinde oksijenle temas ettikçe yanmaya devam eder. Yüksek verim için yanmanın egzoz zamanından önce tamamlanması gerekmektedir. Art yanma süresi arttıkça yanma odası yüzeylerinin sıcaklığını artmaktadır. Bu da motor mekaniğinin zarar görmesine sebep olmaktadır.

#### **2.2 Dizel Motorlarda Egzoz Emisyonlarının Oluşumu**

Dizel motorda yanıcı olarak hidrokarbon kökenli yakıt kullanılmaktadır. Yakıtın ideal koşullarda yanması sonucu karbon dioksit ( $CO_2$ ), azot ( $N_2$ ) ve su buharı ( $H_2O$ ) oluşmaktadır. Bunlardan su buharının ( $H_2O$ ) kirletici ve çevreye zararlı bir etkisi bulunmamaktadır. Karbon dioksit ( $CO_2$ ) emisyonunun ise doğrudan çevreye veya insan sağlığına zararlı etkisi bulunmamasına rağmen oluşan karbon dioksidin yüksek bir oranı atmosferde birikmektedir. Bu birikim "Sera Etkisi" olarak bilinen atmosferin giderek ısınması sebep olmaktadır.

Gerçek hayatta tam yanmanın olmaması ve yanma odası koşullarına bağlı olarak bazı kimyasal parçalanmalar oluşması nedeni ile farklı kirleticiler de oluşur. Yanma sonucu  $CO_2$  veya  $H_2O$  yanında CO ve HC oluşmaktadır. Yanmaya katılan hava gerekli miktarda

olsa bile, yanma odasında yakıt ile havanın iyi karışmaması nedeniyle zengin ve fakir karışım bölgeleri oluşabilmekte ve tam yanma gerçekleşmemektedir. Her türlü ideal yanma koşulları sağlansa bile yanmanın kimyası gereği, bir miktar kirletici özelliğe sahip bileşenler (özellikle  $\text{NO}_x$  ve  $\text{CO}$ ) oluşmaktadır. Ayrıca hidrokarbon yakıtlar içinde bulunan farklı oranlardaki kükürt ve yakıtta çeşitli nedenlerle eklenen katkı maddeleri de yanma sonucunda kirletici madde olarak ortaya çıkmaktadır.

Dizel motorlarında yanma başlamadan önce silindir içerisine yakıt püskürtülmesi nedeni ile yakıtın dağılımı homojen olmamaktadır. Heterojen dağılım nedeni ile silindir içerisinde de basınç ve sıcaklık dalgalanmaları ve farklı karışım bölgeleri meydana gelir. Meydana gelen farklılıklar yanmanın düzgün olmamasına neden olur. Yanmanın kötüleşmesi de kirletici emisyonların oluşmasına neden olmaktadır.

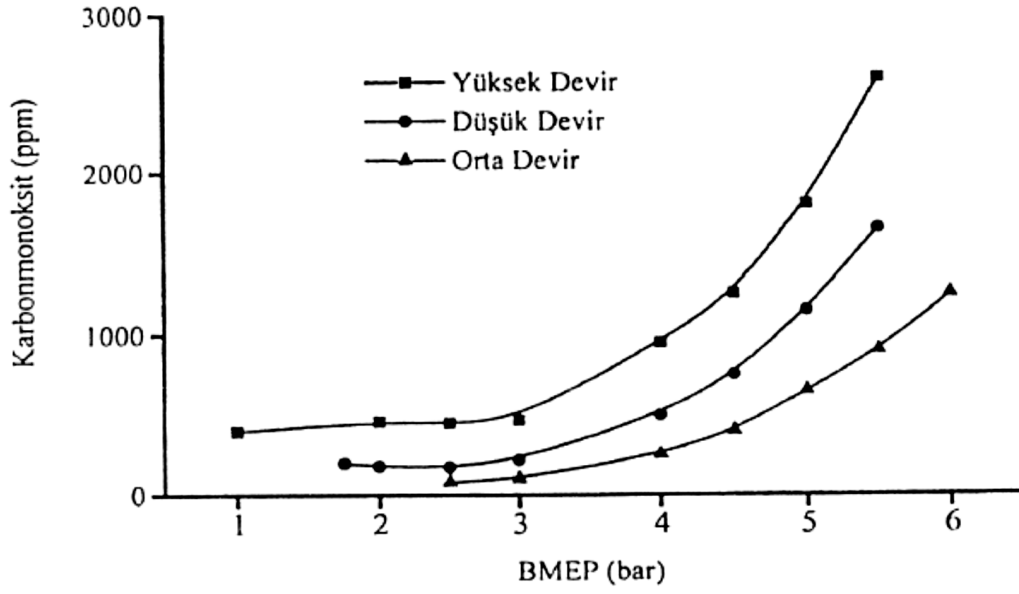
Dizel motorlarında oluşan yanma ürünlerine bakıldığında egzozdan çıkan gazların %99,82'si su, azot, oksijen, karbondioksit gibi zararsız gazlardan oluşmaktadır. Çevre ve insan sağlığına zararlı bileşikler ise %0,2 civarındadır.

Dizel motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını beş grupta toplamak mümkündür. Bunlar; karbon monoksitler, hidrokarbonlar, azot oksitler, is, kükürtlü bileşenlerdir.

### **2.2.1 Karbon Monoksit (CO)**

Dizel motorlarda karışım oranı, motorun yük durumuna göre değiştirilmekte ve genellikle fakir karışım oranlarında çalıştırılmaktadır. Bu durumda yanma olayının ara kademelerinde oluşan  $\text{CO}$ , ortamda yeterli  $\text{O}_2$  mevcut olduğu için  $\text{CO}_2$ 'ye dönüşmektedir. Egzoz emisyonunda  $\text{CO}$ 'nun bulunmasının nedeni oksijenin ( $\text{O}_2$ ) yetersiz olmasıdır. 1 kg dizel yakıtının tam yanması için yaklaşık 14,5 kg hava gereklidir. Eğer hava fazlalık katsayısı 1'den küçük ise, yani yakıt hava karışımı içinde gerekenden daha az hava var ise yanma yetersiz oksijen ortamı içinde olacak ve yakıtın karbonunun tümü  $\text{CO}_2$ 'ye dönüşemeyerek  $\text{CO}$  olarak kalmaktadır.

Motor silindirlerinde karbon monoksit oluşmasının sebeplerinden birisi de "Ayrışma" olayıdır. Yüksek yanma sıcaklıklarında yanma ürünleri veya son ürünler olan  $\text{CO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  parçalanarak, element durumlarına dönüşürler, karbondioksitin ayrışması sırasında  $\text{CO}$  ve  $\text{O}$ , su buharının ayrışması sırasında da  $\text{H}$  ve  $\text{O}$  meydana gelir. Bu ayrışma olayı yüksek sıcaklıklarda artar. Şekil 2.4'de  $\text{CO}$  emisyonunun (BMEP)'e bağlı değişimi görülmektedir.



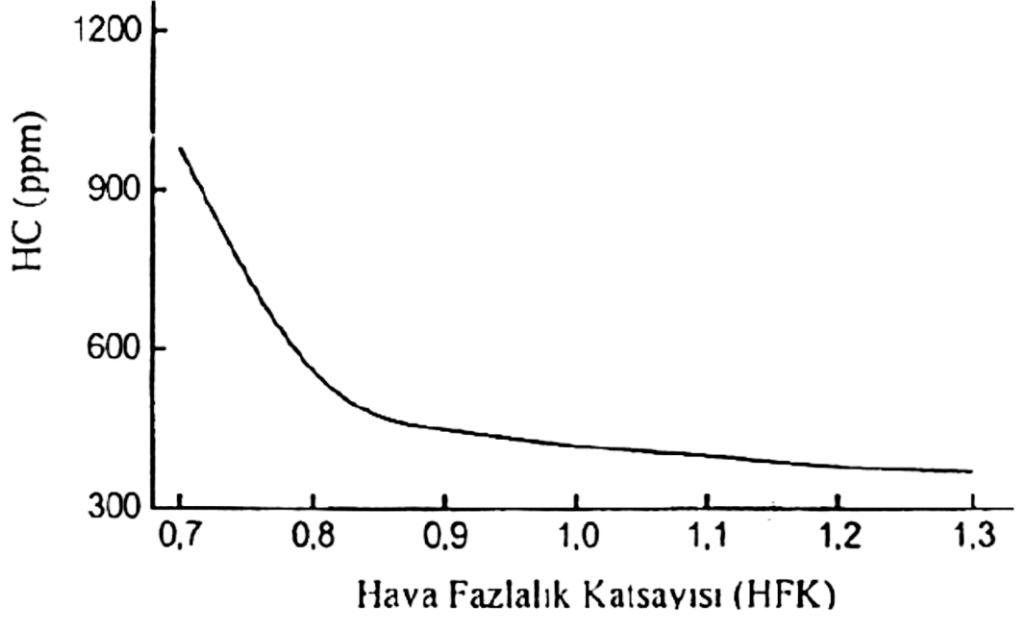
Şekil 2.4 CO emisyonunun BMEP'ye bağlı değişimi

Silindir içindeki basınç yükseldikçe CO oluşum oranı da artar. CO özellikle yakıt damlacıklarının çekirdek kısmında yüksek oranda oluşur. Hava yakıt oranının yüksek seviyede tutulduğunda CO emisyonu azaltılabilir. Dizel motorlarda CO emisyonları benzinli motorlara nazaran daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

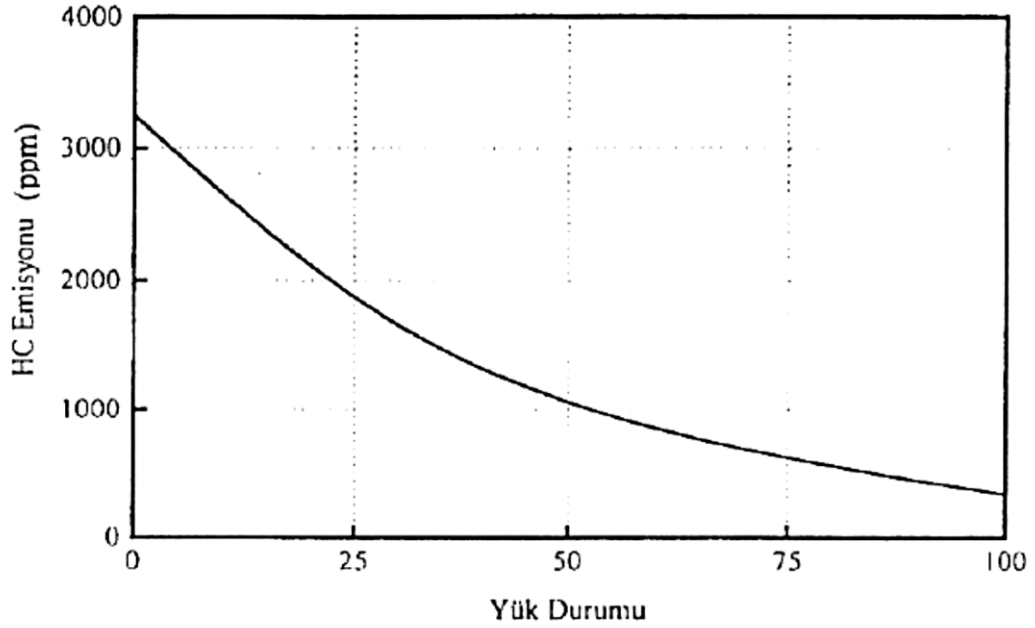
### 2.2.2 Hidrokarbon (HC)

Hava yakıt karışım oranı hidrokarbon emisyonlarını etkilemektedir. Hava/yakıt oranı 1,1 civarında olması durumunda HC emisyonları minimum seviyede olmaktadır. Bu orandan uzaklaşıldıkça hidrokarbon emisyonları artmaktadır. Hava yakıt oranı yüksek olduğunda yanma sıcaklıkları düşer ve hidrokarbon emisyonları artar. Hava yakıt oranının düşük olması durumunda ise yanma sırasında yeterli oksijen olmadığı için hidrokarbon emisyonları yine artış gösterir. Motordaki HC emisyonu ağırlıklı olarak yanmanın tam olarak gerçekleşmediği bölgelerde oluşmaktadır. HC salınımı hava yakıt oranına, motor yüküne, enjeksiyon stratejisine ve yanma odası geometrisine bağlıdır.

Şekil 2.5'de HC emisyonlarının HFK'na bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Şekil 2.6'de ise HC emisyonlarının motor yüküne bağlı değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 2.5 HC emisyonlarının HFK'na bağlı değişim grafiği



Şekil 2.6 Motorun çalışma rejimine bağlı HC emisyonlarında değişim

### 2.2.3 Azotoksitler (NO<sub>x</sub>)

Yakıt, piston üst ölü noktaya varmadan önce püskürtülür ve üst ölü noktadan önce hızlı yanma denen periyotta ani bir basınç ve sıcaklık yükselmesiyle, silindir içerisine püskürtülen yakıt ve emilen hava bir anda yüksek sıcaklığa maruz kalır. Yanma odası sıcaklığı 2000 °C'nin üzerine çıkabilmektedir. 1500 °C'den sonra özellikle 1727 °C

dolaylarında yüksek sıcaklığın ve basıncın etkisiyle havadaki azotun bir kısmı oksijenle birleşerek NO, NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O olarak bilinen, genel olarak da NO<sub>x</sub> diye adlandırılan azot oksitlerin oluşmasına neden olurlar.

NO<sub>x</sub> oluşum mekanizması “Zeldovich mekanizması” olarak bilinen reaksiyon formülü ile gösterilmektedir.



Reaksiyon zinciri, oksijen moleküllerinin yüksek sıcaklıklarda oksijen atomlarına dönüşmesiyle başlar. NO<sub>x</sub> emisyonun düşürmek için pik yanma sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir.

#### 2.2.4 İs ve Partikül

Dizel motorda silindir içerisinde sıvı halde bulunan yakıt damlasının içindeki H<sub>2</sub> molekülleri, hızlı bir şekilde reaksiyona girmekte (oksijenle birleşmekte) ve geriye kalan C molekülü yeterli O<sub>2</sub> bulamadığından yanamayıp is partikülleri halinde dışarı atılmaktadır. İs oluşumunun nedenleri dizel yakıtının cinsine göre değişmekle birlikte genellikle silindir içinde yeterli hava bulunmaması dolayısıyla yakıtın yeterli hava ile karışmamasıdır. Ayrıca sıvı yakıt damlacığının buharlaşmaması da diğer is ve partikül emisyonunun

Dizel motorlarının özelliği partikül atıklarının benzin motorlarına göre çok olmasıdır. Dizel motorlarında, heterojen yanma olayının ara fazında oluşan katı karbon tanecikleri, yanma için yeterli zamanın tanınmadığı durumlarda is emisyonuna neden olmaktadır.

Silindir içerisinde is oluşumu, difüzyon kontrollü yanma ile başlar ve püskürtmenin devam ettiği süre boyunca hızla artar. Püskürtme tamamlandığında ise maksimum seviyesine ulaşır. Daha sonra ise oksitlenerek düşmeye başlar. Ancak yanma sıcaklığı düşmeye başladığından oksidasyon yavaşlar ve 1400 °C'nin altında sona erer. Bu seviyedeki is silindir dışına emisyon olarak atılır.

Dizel motorlarında değişik işletme şartlarından kaynaklanan dört tip partikül emisyonuna rastlanmaktadır. Bunlar;

- a) Beyaz İs: Soğuk havalarda görülen genellikle su buharıdır. Bu kirletici değildir.
- b) Mavi İs: Tam yanmamış yakıt veya bilhassa aşınmış motorlarda yağ zerreciklerinin oluşturduğu istir.
- c) Siyah İs: İs karbon parçacıklarının oluşturduğu istir. Tam yükte veya düşük hava/yakıt oranlarında ortaya çıkar.
- d) Diğer Parçacıklar: Sülfatlar, yağlama yağı ve yakıt içindeki katkılardan gelen parçacıklardır.

### **2.2.5 Kükürtdioksit (SO<sub>2</sub>)**

Dizel motorlarda SO<sub>x</sub> emisyonu, püskürtülen yakıtın içerisindeki kükürt tarafından belirlenmektedir. Yanma sırasında kükürt hızlı bir şekilde oksijen ile reaksiyona girerek SO<sub>2</sub> emisyonunu oluşturmaktadır. Kalan oksijen yakıtın diğer bileşenleri ile reaksiyona girerek yanmayı gerçekleştirir.

Yanma sonucu yüksek oranda su buharı oluşmaktadır. Su buharı oluşan SO<sub>2</sub> ile birleşerek sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) oluşmaktadır veya atmosfere salınan SO<sub>2</sub> gazı havadaki su buharı ile birleşerek sülfürik aside dönüşmektedir. Bu da asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Oluşan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çevreye ve motor parçalarına ciddi zararlar vermektedir.

## **2.3 Dizel Motorda Emisyonu Etkileyen Parametreler**

Gelişen teknoloji ile içten yanmalı motorlarda düşük hacimden yüksek güç, düşük yakıt tüketimi ile yüksek performans hedefleri ön plana çıkmıştır. Ancak dizel motorlardan beklentiler arttıkça motor emisyon salınım limitleri de aşağıya çekilmektedir. Günümüzde motor gücünün artışı ile birlikte yanmayı ideal koşullara yaklaştırmak ve egzoz emisyon salınımını minimum seviyeye indirmek, dizel motorlarda en önemli çalışma alanı haline gelmiştir. Bu amaçla sıkıştırma oranları, yakıt püskürtme zamanlamaları ve basınçları, yanma odası geometrisi, enjeksiyon açısı, enjektör yapısı, delik sayısı ve motorun mekanik tasarımı üzerine detaylı çalışmalar yürütülmektedir.

### **2.3.1 Sıkıştırma Oranı**

Sıkıştırma oranının artması, sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklığının yükselmesine neden olur. Yüksek sıkıştırma oranında, maksimum basınç daha erken ve daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Sıkıştırma oranının artışıyla is emisyonlarında da bir artış gözlenmektedir. Bunun sebebi sıkıştırma oranının artışıyla silindir içi hava hareketleri azalmakta, buna bağlı olarak da hava-yakıt karışımının homojenliği azalmaktadır.

Püskürtme avansı sabit tutularak, sıkıştırma oranının azaltılması tutuşma gecikmesini uzatmaktadır. Dolayısıyla bu süre boyunca püskürtülen yakıt miktarı artacağından silindir içi maksimum sıcaklık yükselecek ve buna bağlı olarak NO oluşumu artacaktır. Sıkıştırma oranının artırılması ile tutuşma gecikmesi kısılacığından NO oluşumu azalacaktır.

### **2.3.2 Aşırı Doldurma**

İçten yanmalı bir motor tarafından üretilen güç, yaklaşık olarak motor silindirleri içerisinde yakılan yakıt ve bu yakıtı yakabilmek için gerekli olan hava miktarı ile orantılıdır. Normal emişli bir motorda silindir içerisine alınan hava miktarı, silindir hacmine bağlı olarak değişmektedir. Silindir içerisine bir çevrimde alınan hava miktarını arttırabilmek için harici bir kaynağa ihtiyaç vardır. Bu amaçla; mekanik aşırı doldurma, egzoz turbo kompresörü ve basınç dalga etkili aşırı doldurma yöntemleriyle silindire alınan hava miktarı, normal emişli motorlara göre arttırılır. Normal emişli motora göre, aşırı doldurma uygulaması yapılan motorda silindirlere gönderilen hava miktarının arttırılmasıyla silindir içerisine daha fazla yakıt püskürtülerek; silindir içi ortalama efektif basıncı ve motor gücü arttırılır. Egzoz gazlarının sahip olduğu enerjiden yararlanan aşırı doldurma sistemlerinin kullanımı, sıcaklık seviyelerinde artış sağladığı için genelde HC emisyonlarını azaltıcı, diğer taraftan NO<sub>x</sub> emisyonlarını da artırıcı doğrultuda etki etmektedir. Yanma odasındaki sıcaklık seviyesi ile birlikte, egzoz gazları sıcaklıkları da arttığı için bu süreç içindeki oksidasyon reaksiyonları da artış gösterecektir. Ayrıca silindirdeki karışım oluşumunun da iyileşmesi yanma olayı üzerinde olumlu etki yapacaktır. Sonuçta HC emisyonları önemli ölçüde azalır. NO<sub>x</sub> emisyonları ise özellikle yüksek güçte çalışma bölgesinde, sıcaklıktaki artışa paralel olarak artmaktadır.

### **2.3.3 Motor Devri**

Düşük motor devirlerinde TG süresince daha az yakıt birikeceğinden basınç artış hızı ve miktarı düşük olmaktadır. Yüksek ve düşük devirlerde TG süresi aynı olmasına rağmen iyi bir türbülans sağlayan motorda yüksek devirlerde yakıt-hava karışımının daha iyi olması mümkün olduğundan yanmada iyileşme sağlanabilmektedir.

### **2.3.4 Yanma Odasının Şekli**

Yüksek devirli motorlarda havaya girdap hareketi vermek veya havayı dar bir yanma odası hacmine sıkıştırarak hareketlendirmek suretiyle karışıma katkıda bulunmak önem arz etmektedir.

Direkt püskürtmeli motorlarda pistonun ÜÖN' ya yaklaşması ile piston üst yüzeyinden çanak içine doğru bir hava hareketi sağlanmaktadır. Bu da sıvı olarak püskürtülmüş olan yakıt demetinin daha kolay parçalanmasını ve daha küçük damlacıklara ayrılmasını sağlayarak is oluşumunun azalmasını sağlar. Bu şekilde oluşan hava hareketinin hızı, piston ÜÖN'ya geldiği anda, pistonun en üst yüzeyi ile motor silindir kafası arasında kalan boşluk azaldıkça artmaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi, direkt püskürtmeli motorlar piston üst yüzeyi ile motor silindir kafası arasında kalan boşluk mümkün olduğu kadar az olacak şekilde imal edilerek yanma iyileştirilebilir.

### **2.3.5 Emme Havası Hareketi**

Direkt püskürtmeli motorlarda, yanma odasına püskürtülen yakıtın hava ile karışımını iyileştirebilmek için emilen hava, emme kanalına verilen kavisli şekil sayesinde silindir içine bir dönme hareketi (swirl) ile girmektedir. Havanın bu dönme hareketi motorda bellik çalışma aralıklarında daha iyi bir yakıt hava karışımı oluşmasını sağlar. Ayrıca bu dönme hareketinden dolayı yüksek hızlarda motorun volümetrik verimi düşerek güçte bir azalma meydana gelmektedir. Bu güç düşüşünü azaltmak için yakıtı daha pülverize şekilde püskürtebilen enjektörler kullanılmaktadır. Pülverize olarak püskürtülen yakıt hem hava hızını düşürmekte hem de buharlaşması daha hızlı olacağından daha iyi bir karışım sağlanabilmektedir. Böylece özellikle yüksek motor devirlerinde güç artarken motor verimi de yükselmektedir. Ayrıca bu tip motorlar yukarıda sözü geçen nedenlerle havanın dönme hızına bağımlı olmadıklarından motorun bütün hız aralıklarında is (partikül) emisyonu düşük seviyelerde tutulabilmektedir.

### **2.3.6 Karışımdaki Oksijen Yüzdesi**

Hava yerine saf oksijen kullanımı birim hacim başına açığa çıkan enerji miktarını yaklaşık beş kat artırır. Yakıt-hava karışımında artan oksijen yüzdesi enerji açığa çıkma hızını arttırarak tutuşma gecikmesini azaltır.

Oksijen oranı arttıkça silindir içerisinde meydana gelen yanmanın stokiyometrik oranla gerçekleşme oranı artacağından yanma sıcaklığının ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının yükseldiği görülür.

### **2.3.7 Emme Havası Giriş Sıcaklık ve Basıncı**

Giriş hava basıncındaki artış tutuşma gecikmesini azaltmaktadır. Giriş basıncı arttıkça dolgu miktarı da artacağından daha fazla yakıt enjekte edilerek motor gücü artırılabilir.

Motor soğutma suyu sıcaklığı ve hava giriş sıcaklığının fazla olduğu durumlarda TG'si ve dp/dt oranı azalmaktadır. Ancak, hava miktarında da azalma olacağından maksimum güç düşmektedir.

### **2.3.8 Yakıt Demeti Açısı**

Yanma odası içerisindeki basıncı yüksek havanın içerisine enjekte edilen yakıtın oda içerisinde eşit dağılım yaparak oksijenle teması önemlidir. Çünkü oluşacak alev çekirdeğinin yanma odası içerisindeki yakıt-hava karışımının tümünü kavraması bakımından homojen bir yanma hızının olması ve bu yanmaya bağlı olarak titreşimsiz bir basınç etkisinin gerçekleşmesi gerekmektedir.

Yakıt demetinin açısı, yanma odası içinde yakıtın radyal ve aksel doğrultulardaki yayılımını belirlemektedir. Bu nedenle karışımın iyiliği, demetin cidarlara çarpma durumu ve sonuç olarak yanma performansı demet açısıyla değişim göstermektedir. Püskürtmenin yapıldığı gaz ortamının yoğunluğu veya karşı basıncı, demet açısını önemli ölçüde etkilenmektedir. Tüm bu etkiler optimize edilerek emisyon seviyeleri düşürülebilir.

### **2.3.9 Yakıt Püskürtme Avansı**

Püskürtme geç olursa yakıtın tutuşması da geç olacağından, basınç yükselme hızı (dp/dt) yüksek olmasına rağmen maksimum ve ortalama efektif basınçlar düşük olur. Tutuşmanın daha da gecikmesi durumunda, basınç yükselme hızı ve ortalama basınç da düşük olacaktır. Bu durumda, yanma oldukça kötü, verim de çok düşük olur ve emisyonları artar.

Yakıtın ÜÖN'dan önce püskürtülmesi durumunda sıkıştırma sonu sıcaklığı ve basıncı düşük olmaktadır. Bunun nedenlerinden biri; TG'nin uzaması ve buna bağlı olarak sıkıştırma işinin artmasıdır. Diğer bir neden ise, giriş havası (emme) basıncının azalmasıdır.

### **2.3.10 Yakıt Püskürtme Basıncı**

Enjeksiyon basıncı, yakıtın pülverizasyonuna, dolayısıyla karışım formasyonuna etki eden faktörlerden birisidir. Enjeksiyon basıncı arttıkça yakıt daha iyi parçalanarak, damlacık çapı küçülmektedir. Yakıt pülverizasyonu arttıkça yanma iyileşmektedir. Emisyonlara etkisi ise CO, HC ve is emisyonlarını düşürücü ancak yanma sıcaklığı artacağından NOx emisyonlarını arttırıcı şekilde olmaktadır.

### **2.3.11 Yakıt Özellikleri**

Dizel yakıtında en önemli özellik setan sayısıdır. Setan sayısı yakıtın dizel motorunda sıkıştırma sonucu ısınan havanın içinde kendi kendine tutuşma özelliğini belirleyen bir sayıdır. Setan sayısının fazla olması tutuşma gecikmesini azaltmakta ve yanma odasında biriken yakıtın ani yanması ile oluşan hızlı basınç artışını önlemektedir. Yakıt daha erken tutuşarak yanmaya başlayacaktır. Fakat bu sırada sıkıştırma devam ettiği için silindir içi sıcaklık ve buna bağlı olarak NOx oluşumu artacaktır. Bu yüzden yanma başlamadan önce daha az yakıt püskürtülmelidir. Böylece üst ölü nokta (ÜÖN) civarında yanan yakıt miktarı azalacağından maksimum yanma sıcaklığı düşecektir.

Yakıtın yoğunluğu ise partikül ve NOx emisyonlarının oluşmasında en önemli faktörlerden birdir. Özellikle geçiş şartlarında yapılan deneylerde bu etki daha net görülmektedir. Yoğunluğun fiziksel etkisi detaylı olarak incelendiğinde, daha yüksek yoğunluktaki dizel yakıtının daha fazla miktarda yakıt püskürtülmesine neden olduğu görülmüştür.

### COMMON RAIL DİREK ENJEKSİYON SİSTEMİ

#### 3.1 Common Rail Direk Enjeksiyon Sistemlerine Duyulan İhtiyaç

Günümüzde taşıtların tahrikinde kullanılmakta olan dizel motorları yüz yılı aşan bir geçmişe sahiptir. Bu süreç içerisinde benzin motorlarının sağladığı yüksek performans özelliklerini, dizel motorlarının özellikle kısmi yüklerdeki yüksek verim özellikleri ile bir araya getirebilecek bir motor tasarımının gerçekleştirilmesimotor üreticilerinin üzerinde durduğu bir konu olmuştur. Taşıtların yakıt tüketiminin azaltılması ve çevre kirliliğine neden olan yanma ürünlerinin kontrol altına alınabilmesi konusundaki güncel çabalar, motor teknolojisinde yenilik arayışlarını son dönemde hızkazanmıştır. Dizel mortorlarda enjeksiyon özelliklerini iyileştirerek daha yüksek enjeksiyon basınçlarını sağlayıp yakıtın pülverizasyon oranını yükseltmek amacı ile common rail direk enjeksiyon sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem sayesinde motorda ilk hareket kolaylığı, motorun hızlı cevap verme yeteneğinin yükseltilmesi, düşük egzoz gaz emisyonları, vuruşu direncinin artması, yüksek volümetrik verim gibi üstünlükler sağlanmaktadır. Kısmi yüklerde yanmamış hidrokarbon (HC) emsiyonlarındaki artış ve genelde azot oksit (NOX) emisyonlarının yüksek oluşu direkt püskürtmeli dizel motorlarının geliştirilmeye açık olan sorunları arasında yer almaktadır [17].

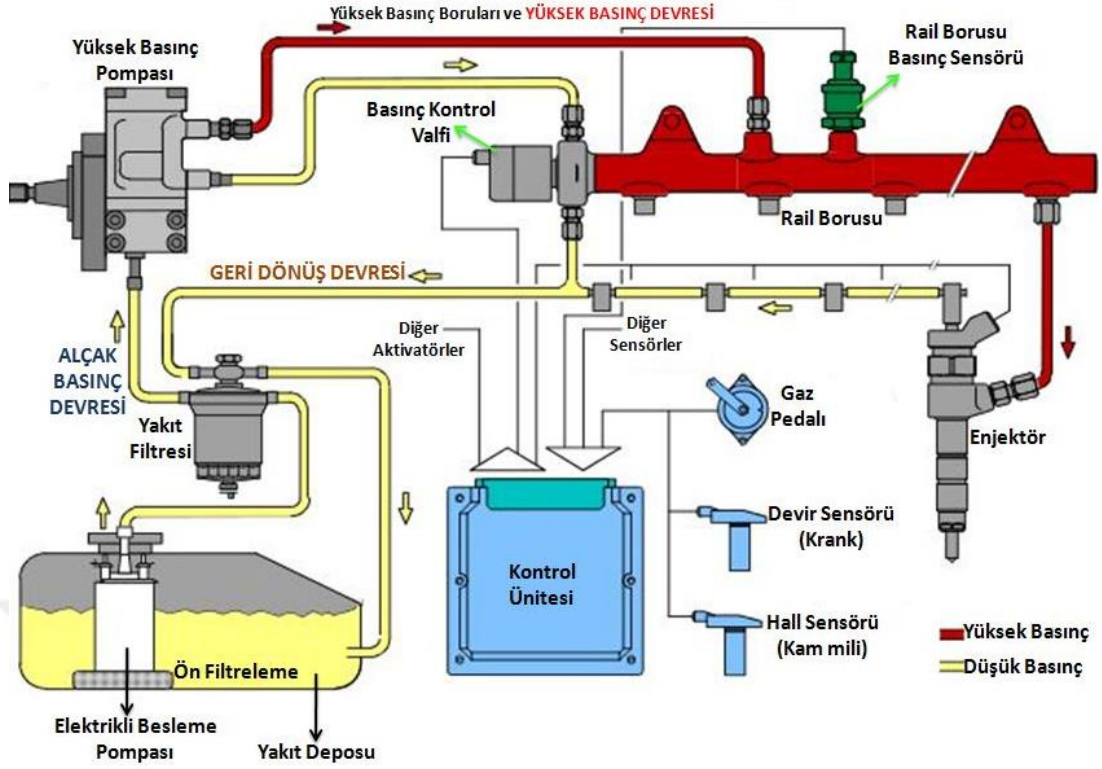
#### 3.2 Common Rail Direk Enjeksiyon Sistemleri (CDI)

Common-Rail sisteminde yüksek basınç üretimi ve püskürtme miktarı ayarı, ayrı iki kısımda bulunmaktadırlar. Püskürtme basıncının çalışma alanında neredeyse tamamen ayarlanabilme olanağı vardır. Düşük devir ve kısmi yük altında da üretilen yüksek basınç ön, ana ve art püskürtmeleri yaparak, püskürtme stratejisinin esnek olmasına imkan sağlar. Püskürtme olanaklarının tamamen esnek olması, dizel yakıt sisteminin en

yüksek performansı göstermesine ve egzoz gazı işleme sistemlerini, en iyi şekilde entegre etmeye olanak sağlar.

Direkt tahrik edilen blok veya tek pompalı sistemlerden farklı olarak Common Rail'de basınç oluşumu ve püskürtme ayrılmaktadır. Geleneksel dizel direkt püskürtücüleri yaklaşık 900 bar'lık basınç ile çalışırken, Common Rail Sistemi yakıtı, 2500 bar'a kadar yükselen bir basınç ile ortak bir boru üzerinden enjektörlere dağıtır. Elektronik motor kumandası, bu yüksek basıncı, motorun devrine ve yüküne bağlı olarak ayarlar. Püskürtmeyi, enjektörler üzerinde bulunan ve süratle anahtarlanabilen manyetik supaplar sağlamaktadır. Bu da yine püskürtme olayının şekillendirilmesini, püskürtme miktarının ölçülmesini sağlamaktadır. Ayrıca yine bu imkanlar sayesinde yeni sistemin mükemmel bir avantajı olan pilot (ön) ve art püskürtme ortaya çıkmaktadır. Ön veya çoklu püskürtme, bir yanma çevriminde birden fazla yakıt enjeksiyonu ile oluşturulur. Böylece hem zararlı madde ve gürültü emisyonu hem de dizel motorlarının yakıt tüketim değerleri daha da azaltılmaktadır.

Basınç oluşumunun ve püskürtmenin ayrılmasına ilişkin tek şart, bir dağıtıcı boru (rail) ve enjektörlere giden borulardan oluşan, yüksek basınç tutucusudur. Sistemin çekirdek parçası, manyetik supap kumandalı enjektördür. Püskürtme olayı, ECU'dan manyetik supaba giden bir sinyal ile başlatılır. Püskürtülen yakıt miktarı, hem manyetik supabın açılma süresine hem de sistem basıncına bağlıdır. Sistem basıncını, yüksek basınçlı, pistonlu pompa oluşturmaktadır. Adı geçen pompa, düşük tahrik dönme momentleri ile çalışır, bu da pompa tahrikinin yükünü azaltmış olur. Basınç oluşumu için, binek otomobillerde distribütör tipi pompalar; ticari araçlarda ise sıra tipi pompalar öngörülmüştür.



Şekil 3.1 Common Rail Sistemi

Sistemde bulunan bir yüksek basınç pompası, sürekli olarak yüksek basınç üretir. Bu basınç, rail elemanı tarafından saklanır. Kısa püskürtme boruları üzerinden silindir kafasına bağlı enjektörlere iletilir. Püskürtme miktarı ve anı, ECU üzerine yazılan haritalar aracılığı ile basınç ayarlayıcı, enjektör içerisinde bulunan manyetik subaplar tarafından düzenlenir. İhtiyaç fazlası yakıt, dizel yakıt geri dönüş kanalı üzerinden tekrar depoya gönderilir.

CRI sisteminin başlıca avantajlarını özetlemek gerekirse;

- Püskürtme ve basınçlandırma işlemlerinin birbirinden ayrı olması nedeniyle istenilen zamanda, istenilen süreyle, istenilen basınçta püskürtme kabiliyeti sunmaktadır.
- Püskürtme basıncının motor hızından ve püskürtme miktarından bağımsız olması sağlanarak istenilen basıncın diğer sistem parametrelerinden etkilenmesi engellenmektedir. Düşük hızlarda bile yüksek püskürtme basıncı sağlayarak CRI sistemi ile yüksek torklara ulaşılabilir.
- Değişken püskürtme zamanlamasının solenoid valf ile veya piezo elektrik eleman ile hassas kontrolü sağlanmakta ve emisyon sınırları korunmaktadır.

- Motor çevrimi boyunca çoklu püskürtmenin yapılabilmesi emisyon standartlarını karşılama olanağı sağlamaktadır.
- Ortak hatta basınç değişimi sağlayarak değişken püskürtme basınçları uygulanabilmektedir.



### MOTOR TEST DÜZENEGİ

#### 4.1 Deney Şartları

Bu çalışmanın amacı püskürtme basıncının, ön enjeksiyon yapmanın, ön enjeksiyon avansının ve ön enjeksiyon ile ana enjeksiyon oranının dizel motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin araştırılmasıdır. 2500 d/d sabit motor devrinde, strok başına sabit 28 mg yakıt püskürtümüştür. Enjeksiyon basıncı 120-130-140 MPa aralığında, ön enjeksiyon açısı -15, -10, -5 °KMA aralığında ve ön enjeksiyonda püskürtülen yakıtın toplam püskürtülen yakıtı oranı %10, %15, %20 olacak şekilde yapılan deney varyasyonunun performans ve egzoz emisyonlarındaki değişimler belirlenip analiz edilmiştir. Ayrıca silindir içi basınç ve ısı yayınımları incelenmiştir.

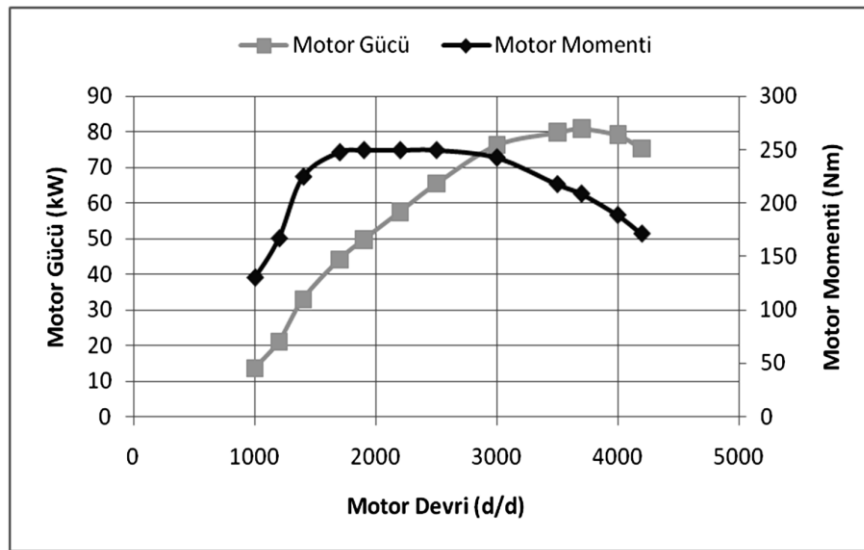
#### 4.2 Test Düzeneginin Özellikleri

##### 4.2.1 Test Motorunun Teknik Özellikleri

Çalışmada 4 zamanlı, 4 silindirli, 1.8 litre, değişken geometrili turbo ve EGR sistemine sahip bir binek araç dizel motoru kullanılmıştır. Motor maksimum torkuna olan 250 Nm değerini 1700-2500 d/d motor devirleri arasında sağlamaktadır. Motorun yakıt püskürtme sistemi Siemens firması tarafından üretilmiş olan bir common rail yakıt püskürtme sistemidir. Motorun teknik özellikleri Çizelge 6.1'de, motorun karakteristik güç ve moment grafiği Şekil 6.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1 Deney motorunun teknik özellikleri

Tipi	Lynx 110 BG
Silindir hacmi (cm <sup>3</sup> )	1753
Emisyon Seviyesi	Euro 5
Silindir sayısı (adet)	4
Silindir çapı (mm)	82.5
Strok (mm)	82
Sıkıştırma oranı	18.5:1
Motor devri (dev/dak)	3750
Motor gücü (kW)	81
Maksimum tork (Nm)	250 Nm @ 1700-2500 d/dak
Püskürtme sistemi	Common rail (Siemens)
Supap adedi	16
Motorun Ataleti (kgm <sup>2</sup> )	0.2168
Ateşleme Başlangıç devri (dev/dak)	180



Şekil 4.1 Deney motorunun güç-moment eğrisi

#### 4.2.2 Dinamometre

Deneyde Şekil 4.2’de verilen asenkron motor test dinamometresi kullanılmıştır. Dinamometrenin teknik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Dinamometre

Çizelge 4.2 Dinamometrenin teknik özellikleri

Tipi	AVL DynoExactAPa 204/8
Moment	934 Nm @ 0-4000 dev/dak
Güç	220 kW (295hP)@4000-9000 dev/dak
Frenleyici Tipi	Asenkron
Kontrol Şekli	Aktif-Pasif
Tork Ölçüm Frekansı	1kHz-4kHz
Tork Tepkisi	<3ms
Harmonikler	<%4,5
Koruma Sınıfı	IP 23
Soğutma Tipi	Fanlı-Cebri
Yatak Sıcaklığı Ölçüm Tipi	PT100

Çizelge 4.2 Dinamometrenin teknik özellikleri (devamı)

İç Sıcaklık ölçüm Tipi	PTC Rezistör
Hız Ölçümü	1024 Pulse /Optik Enkoder
Çalışma Sıcaklık Aralığı	+5 /+40 °C
Çalışma Nem Aralığı	max. %95 (yoğunlaşmamış)
Aşırı Yükleme Kapasitesi	%25 (15 dak.da 1 dak.)
Yük hücresi (Tork Ölçümü için)	< %0,008
Toplam Sistem Hassasiyeti	% 0,3 fs
Atalet	0.67 kgm2

#### 4.2.3 Gaz Emisyon Ölçüm Cihazı

Gaz emisyon ölçümü için Horiba MEXA 7100 DEGR cihazı kullanılmıştır. Test sırasında CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC ve NO<sub>x</sub> ölçümleri bu cihazla alınmış olup sistemin genel görünüşü Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Hobira Mexa 7100 DEGR emisyon cihazı

CO, CO<sub>2</sub>, ve O<sub>2</sub> ölçümleri, NDIR ölçüm prensibi ile çalışan IRD analizörleri tarafından yapılmıştır. IRD analizöründe ölçümler, gazların farklı dalga boylarına olan ışık geçirgenliklerinin farklı olmasından faydalanılarak yapılmaktadır. HC ölçümünün yapıldığı FID analizörleri ise; HC'nin bir alev içerisinde geçirilmesi sonucu iyonize olmasına bağlı olarak elektrik geçirgenlik oranının değişmesi prensibine göre çalışmaktadır. NO<sub>x</sub> ölçümlerinin yapıldığı CLD analizörleri ise NO gazının NO<sub>2</sub>'ye dönüşmesi sırasında ışık yayınımlı gerçekleşmesi ve bu ışığın ölçülmesi prensibine bağlı olarak çalışmaktadır. Egzoz gazından alınan numune ilk olarak NO<sub>x</sub> çevirici bir ünite içerisinde geçirilerek NO'ya dönüştürülür. Çevirici içerisinde oluşan reaksiyon (4.2) denkemindeki gibigerçekleşir.



Oksijen ölçümü ise PMD analizörü ile ölçülmüştür. Bu analizör oksijenin manyetik alan karşısında, hareket yönünü değiştirmesi prensibine dayanarak ölçüm gerçekleştirmektedir.

Analizörlerin ölçüm limitleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Çizelge 4.4'de ise analizörlerin hassasiyet değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.3 Mexa 7100 DEGR analizörlerinin ölçüm gazları ve ölçüm aralıkları

Ölçülen Gaz	Kullanılan Analizör	Ölçüm Aralığı
CO (L)	IRD	0-2000 ppm
CO (H)	IRD	2000-15000 ppm
CO <sub>2</sub>	IRD	% 0-20 hacim
NO / NO <sub>x</sub>	CLD	0-15000 ppm
THC	FID	0-15000 ppm

Çizelge 4.4 IRD analizörlerinin teknik özellikleri ile Euro 5 emisyon regülasyonu  
(715/2007/EC) limit karşılaştırması

IRD			
Tanım	İlgili Regülasyon Bölümü	Regülasyon Limiti	Cihaz Limiti
Toplam Hata	AnnIII App 4, 3.1	%2	%2
Tekrarlanabilirlik	AnnIII App 4, 3.1.2	155 ppm altı %1 155 ppm üstü %2	%0.50
Gürültü	AnnIII App 4, 3.1.3	10 saniyede %2 altı fs	5 saniyede %1 altı fs
Sıfır Kayması	AnnIII App 4, 3.1.4	1 saatte %2 fs	1 saatte %1 fs
Span Kayması	AnnIII App 4, 3.1.4	1 saatte %2 fs	1 saatte %1 fs
Yoğuşan Suya Tepkisi	AnnIII App 5, 1.9.1	< %1	< %1

Çizelge 4.5 CLD analizörlerinin teknik özellikleri ile Euro 5 emisyon regülasyonu  
(715/2007/EC) limit karşılaştırması

Tanım	İlgili Regülasyon Bölümü	Regülasyon Limiti	Cihaz Limiti
Toplam Hata	AnnIII App 4, 3.1	%2	%2
Tekrarlanabilirlik	AnnIII App 4, 3.1.2	155 ppm altı %1	%0.50
Gürültü	AnnIII App 4, 3.1.3	10 saniyede %2 altı fs	10 saniyede %2 altı fs
Sıfır Kayması	AnnIII App 4, 3.1.4	1 saatte %2 fs	1 saatte %1 fs
Span Kayması	AnnIII App 4, 3.1.4	1 saatte %2 fs	1 saatte %1 fs
NOx Çevirici Kontrolü	AnnIII App 5, 1.7	>%95	>%95
CO <sub>2</sub> Yoğuşma Etkisi	AnnIII App 5, 1.9.2	<%3 fs	<%1 fs
Kondens Etkisi	AnnIII App 5, 1.9.2	<%3 fs	<%2 fs

Çizelge 4.6 FID analizörlerinin teknik özellikleri ile Euro 5 emisyon regülasyonu  
(715/2007/EC) limit karşılaştırması

FID			
Tanım	İlgili Regülasyon Bölümü	Regülasyon Limiti	Cihaz Limiti
Toplam Hata	AnnIII App 4, 3.1	%2	2%
Tekrarlanabilirlik	AnnIII App 4, 3.1.2	155 ppm altı %1 155 ppm üstü %2	0.50%
Gürültü	AnnIII App 4, 3.1.3	10 saniyede %2 altı fs	5 saniyede %1 altı fs
Sıfır Kayması	AnnIII App 4, 3.1.4	1 saatte %2 fs	1 saatte %1 fs
Span Kayması	AnnIII App 4, 3.1.4	1 saatte %2 fs	1 saatte %1 fs
CO Interference check	AnnIII App 5, 1.9.1	< %1	< %1
O2 interference check	AnnIII App 5, 1.8.1	±%5	±%2

Çizelge 4.7 MPD analizörlerinin teknik özellikleri ile Euro 5 emisyon regülasyonu (715/2007/EC) limit karşılaştırması

MPD			
Tanım	İlgili Regülasyon Bölümü	Regülasyon Limiti	Cihaz Limiti
Toplam Hata	Limit Tanımı Yok	-	%2
Tekrarlanabilirlik	Limit Tanımı Yok	-	0.50%
Gürültü	Limit Tanımı Yok	-	<%5
Sıfır Kayması	Limit Tanımı Yok	-	1 saatte %1 fs
Span Kayması	Limit Tanımı Yok	-	1 saatte %1 fs

#### 4.2.4 İs Emisyonu Ölçüm Cihazı

İs ölçümünde, AVL firmasının geliştirdiği 415S model is ölçer cihaz kullanılmıştır. Cihaz egzozdan aldığı numuneyi filtre kağıdından geçirir, daha sonra filitre kağıdı ışık ile taranır ve filtrenin ışık geçirgenlik oranına göre ölçüm değeri saptanır.



Şekil 4.4 AVL 415S is ölçüm cihazı

Çizelge 4.8 AVL 415S is ölçer cihazın teknik özellikleri

415S Is Ölçer	Ölçüm Aralığı	İs değeri	0...10 FSN
		Kirlilik Yüzdesi	0...100 %
	Çalışma Sıcaklığı		5...55 °C
	Hassasiyet		0.01 FSN - 0.01 mg/m <sup>3</sup>
	Tekrarlanabilirlik		≥ 0.05 FSN
	Çalışma Nem Aralığı		≤ %95 with no condensation
	Egzoz Gaz Basıncı		-100...+400 mbar
	Örnekleme noktasındaki Egzoz Sıcaklığı		600 °C

#### 4.2.5 Yakıt Tüketimi Ölçüm ve Şartlandırma Cihazı

Yakıt tüketim miktarının ölçülmesi için AVL 735S, yakıtı istenilen sıcaklıkta tutmak için ise AVL 753C cihazları kullanılmıştır. Cihazların teknik özellikleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.5 AVL 735S yakıt tüketim ölçüm cihazı, AVL 753C yakıt şartlandırıcı

Çizelge 4.9 AVL 735S ve 753C cihazlarının teknik özellikleri

735S Yakıt Ölçüm Cihazı	Ölçüm aralığı	0...125 kg/h	
	Çalışma Nem Aralığı	$\leq \%80 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\leq \%50 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	Çalışma Sıcaklığı	5...55 $^{\circ}\text{C}$	
	Yoğunluk Ölçüm Sapması	$\pm 0.5\text{ kg/m}^3$	
	Standart Sapma	0.1 s	% 0.01
		1 s	% 0.004
		5 s	% 0.0025
		10 s	% 0.002
T90		230 ms	
	T10-90	125 ms	
Ölçüm Frekansı	20 Hz		

Çizelge 4.9 AVL 735S ve 753C cihazlarının teknik özellikleri

753C Yakıt Sıcaklık Şarjlandırıcısı	Soğutma Kapasitesi	200 kW
	Isıtma Kapasitesi	18 kW
	Sıcaklık Kontrol Aralığı	10...80 °C
	Standart Sapma	max. ±1 °C
	Motor Dönüş Sıcaklığı	max. 90 °C
	Motor Besleme Sıcaklığı	10...30 °C
	Çalışma Sıcaklığı	5 °C...40 °C
	Yakıt Yoğunluğu	> 0.7 g/cm <sup>3</sup>

#### 4.2.6 Silindir İçin Basınç Ölçüm Sistemi

Deney sırasında silindir içinde oluşan basıncın ölçülmesinde AVL Indiset 620 basınç ölçüm ve analiz sistemi kullanılmıştır. Kullanılan ölçüm sisteminin teknik özellikleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.6 AVL Indiset 620 basınç ölçüm ve analiz sistemi

Çizelge 4.10 AVL AVL Indiset 620 basınç ölçüm cihazlarının teknik özellikleri

Voltaj Ölçüm Kanalı Sayısı	8 adet
Voltaj Ölçüm Aralığı	$\pm 10V$
Direnç Ölçüm Kanalı Sayısı	4 adet
Direnç Ölçüm Aralığı	100 kOhm
Ölçüm Hassasiyeti	0.1 °KMA
Ölçüm Frekansı	1.2 GHz

#### 4.2.6.1 Silindir İçin Basınç Sensörü

Silindir için basınç ölçümü için AVL'in GH14P kodlu sensörü kullanılmıştır. Sensörün teknik özellikleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.



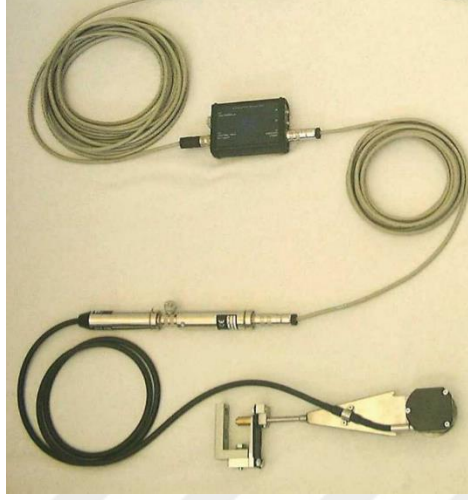
Şekil 4.7 AVL GH14P silindir için basınç ölçüm sensörü

Çizelge 4.11 AVL GH14P silindir için basınç ölçüm sensörü teknik özellikleri

Ölçüm Aralığı	0 - 200 bar
Aşırı Yükleme Basıncı	250 bar
Hassasiyet	$> 2pC/bar$
Lineerizasyon	$< \pm \%0.5$
Doğan Frekansı	$> 250 kHz$
Ölçüm Sıcaklığı	max. 400 °C

#### 4.2.6.2 Motor Devri Ölçüm Sensörü

Deney sırasında motor devri AVL Optical Encoder 365CC ile ölçülmüştür. Kullanılan sensörün teknik özellikleri Çizelge 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.8 AVL Optical Encoder 365CC devir ölçüm sensörü

Çizelge 4.12 AVL Optical Encoder 365CC devir ölçüm sensörü teknik özellikleri

Ölçüm Aralığı	50 - 20000 dev/dak
Sensör Tipi	Optik
Hassasiyet	0.1 °KMA
Sinyal Sayısı	720 sinyal/devir
Çalışma Sıcaklığı	- 40 - +70 °C
Dönme Ataleti	3.8 x 10 <sup>-5</sup> kgm <sup>2</sup>
Koruma Sınıfı	IP 54

#### 4.2.7 Motor Giriş Havaşı Debi Ölçümü

Deney sırasında motora giren havanın kütleli debisinin ölçümünde ABB SensyFlow-P ölçüm sensörü kullanılmıştır.



Şekil 4.9 ABB SensyFlow-P hava debisi ölçüm sensörü

Çizelge 4.13 AVL Optical Encoder 365CC devir ölçüm sensörü teknik özellikleri

Ölçüm Aralığı	0 - 1200 kg/saat
Ölçüm Hassasiyeti	$< \pm \%1$
Tekrarlanabilirlik	$< \pm \%0.25$
Çalışma Basıncı	0 - 2.5 bar
Çalışma Sıcaklığı	- 25 - +80 °C
Koruma Sınıfı	IP 54

#### 4.2.8 Motor Kontrol Yazılımı

Deney sırasında motoru ve enjeksiyon parametrelerini kontrol etmek ve değiştirmek için ATI Vision proframı kullanılmıştır. Bu program ile ECU'ya deney değişkenlerinin girilmesi ve diğer parametrelerin sabitlenmesi sağlanmıştır.



### 4.3 Deneyin Yapılışı

Enjeksiyon parametrelerinin emisyonlara ve motor gücüne etkisinin araştırıldığı bu çalışmada toplanan verilerin karşılaştırılabilir olması için bu parametreleri etkileyebilecek diğer tüm dış etkenleri sabit tutulması gerekmektedir. Bu yüzden deney sırasında Çizelge 4.14’de verilen parametreler sabit tutulmuştur.

Deney çalışma noktaları Çizelge 4.15’de verilmiştir. Tüm deney noktalarında ana enjeksiyon ÜÖN’den 5 °KMA önce yapılmıştır.

Çizelge 4.14 Test sırasında sabit tutulan parametreler

Sabit Tutulan Parametre	Değer
Oda sıcaklığı	27 °C
Yakıt Sıcaklığı	30 °C
İntercooler Çıkış Sıcaklığı	40 °C
EGR Pozisyonu	%15
Motor Soğutma Suyu Sıcaklığı	90 °C
Moto Giriş Havaşı Debisi	228 kg/saat
Emme Manifold Basıncı	1800 mbar
Motor Giriş Havaşı Nemi	%35
Egzoz Karşı Basıncı	105 mbar

Çizelge 4.15 Deney noktaları

Ana Enjeksiyon Açısı (°KMA)	Ön Enjeksiyon Açısı (°KMA)	Ön Enjeksiyon Miktarı / Toplam Enjeksiyon Miktarı Oranı (%)	Enjeksiyon Basıncı (MPa)
-5	-10	%5	120
-5	-10	%10	120
-5	-10	%15	120
-5	-15	%5	120
-5	-15	%10	120
-5	-15	%15	120
-5	-20	%5	120
-5	-20	%10	120
-5	-20	%15	120
-5	-10	%5	130
-5	-10	%10	130
-5	-10	%15	130
-5	-15	%5	130
-5	-15	%10	130
-5	-15	%15	130
-5	-20	%5	130

Çizelge 4.15 Deney noktaları (devamı)

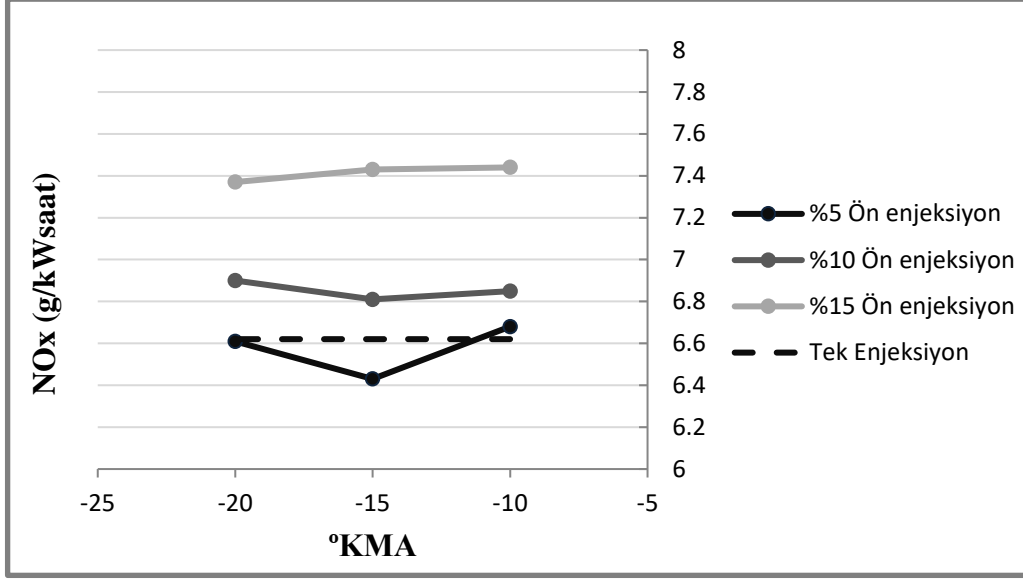
Ana Enjeksiyon Açısı (°KMA)	Ön Enjeksiyon Açısı (°KMA)	Ön Enjeksiyon Miktarı / Toplam Enjeksiyon Miktarı Oranı (%)	Enjeksiyon Basıncı (MPa)
-5	-20	%10	130
-5	-20	%15	130
-5	-10	%5	140
-5	-10	%10	140
-5	-10	%15	140
-5	-15	%5	140
-5	-15	%10	140
-5	-15	%15	140
-5	-20	%5	140
-5	-20	%10	140
-5	-20	%15	140

### TEST SONUÇLARI

Çalışma 2500 dev/dak'lık sabit devir ve %50 sabit pedal açısında ve toplam 28 mg/strok yakıt enjeksiyonunda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yakıt enjeksiyon basınçları sabit tutularak ön enjeksiyon avansı -10, -15, -20 °KMA olacak şekilde sabit tutularak 'pilot püskürtme / toplam püskürtme' oranında incelemeler yapılmıştır. Daha sonra ön enjeksiyon avansı sabit kalacak şekilde 'pilot püskürtme/toplam püskürtme' oranı %5, %10, %15 olacak şekilde inceleme çalışması gerçekleştirilmiştir.

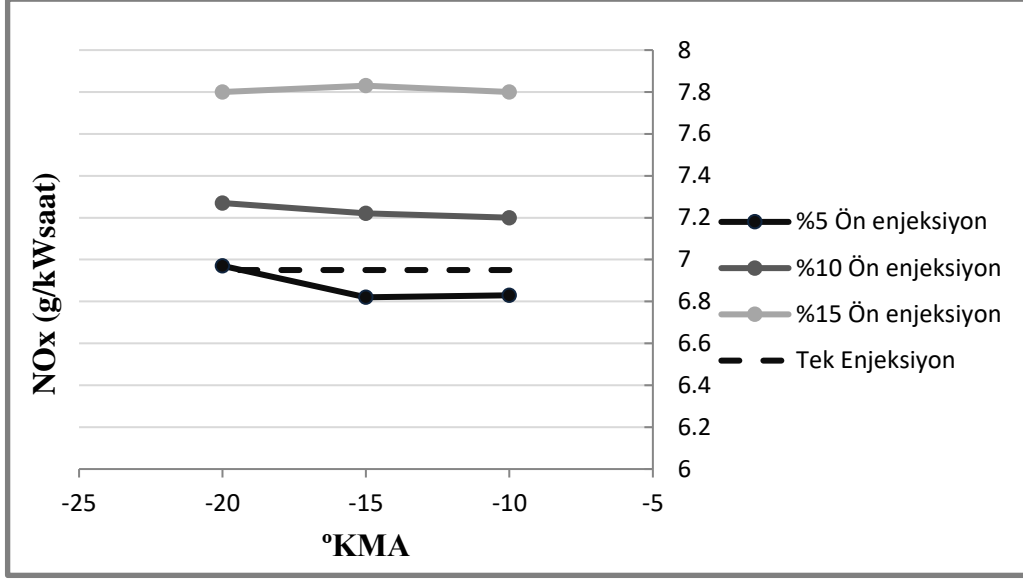
#### **5.1 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının ve Avansının Emisyon ile Motor Gücüne Etkisi**

##### **5.1.1 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının NO<sub>x</sub> Emisyonlarına Etkisi**



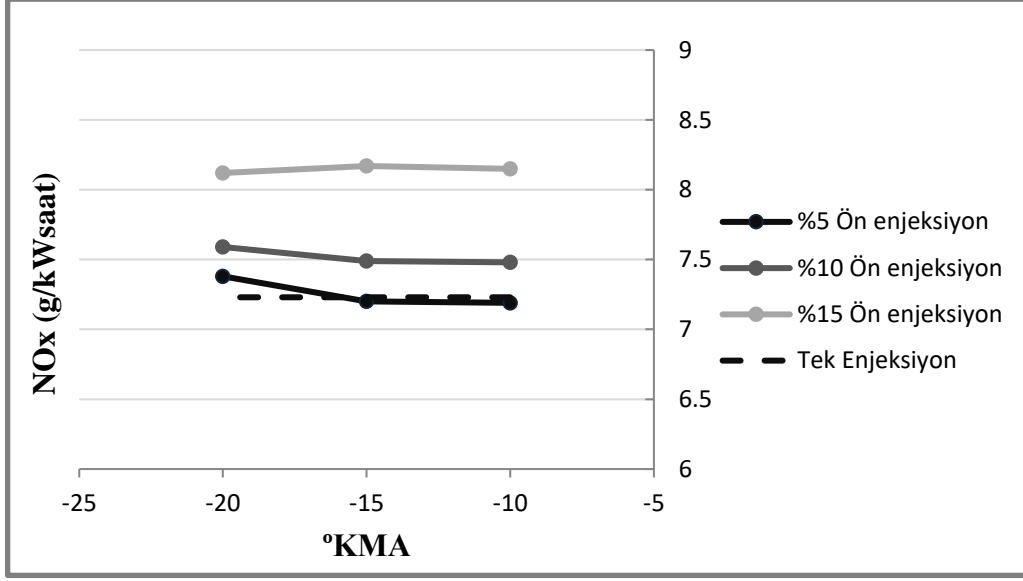
Şekil 5.1 120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının NO<sub>x</sub> emisyonlarına etkisi

Şekil 5.1’de sabit 120 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında NO<sub>x</sub> emisyonunun değişim grafiği verilmiştir. Deney sonuçlarına göre ön enjeksiyon avansı sabit tutulup püskürtülen yakıt miktarının artırılması ile NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinin arttığı görülmüştür. Buna durum yanma sıcaklığının arttığını göstermektedir. En yüksek NO<sub>x</sub> emisyon değeri ‘ön enjeksiyon yakıt miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %15 olduğu durumda meydana geldiği görülmüştür. HRR eğrilerinin eğimlerine bakıldığında ‘ön enjeksiyon yakıt miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının artışı ile eğim artmış ve daha hızlı bir ısı açığa çıkışı gözlemlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonunun artışına etki eden bu faktör daha kısa sürede daha fazla yakıtın yanması ile alev içerisinde oluşan NO<sub>x</sub> miktarını arttırmıştır. Sadece -15 °KMA’da yapılan %5’lik ön enjeksiyonun NO<sub>x</sub> emisyonlarını düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 5.2 130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının NO<sub>x</sub> emisyonlarına etkisi

Şekil 5.2’de sabit 130 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında NO<sub>x</sub> emisyonunun değişim grafiği verilmiştir. Deney sonuçlarına göre ön enjeksiyon avansı sabit tutulup püskürtülen yakıt miktarının artırılması ile NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinin arttığı görülmüştür. Sadece %5 ön enjeksiyon miktarının -10 °KMA’da ve -15 °KMA’da NO<sub>x</sub> emisyonlarını düşürdüğü görülmüştür. %5’lik ön enjeksiyonun -20 °KMA’nda püskürtülmesi durumunda ise tek enjeksiyonlu durumla aynı miktarda NO<sub>x</sub> salınımının olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.3 140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının NO<sub>x</sub> emisyonlarına etkisi

Şekil 5.3’de sabit 140 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında NO<sub>x</sub> emisyonunun değişim grafiği verilmiştir.

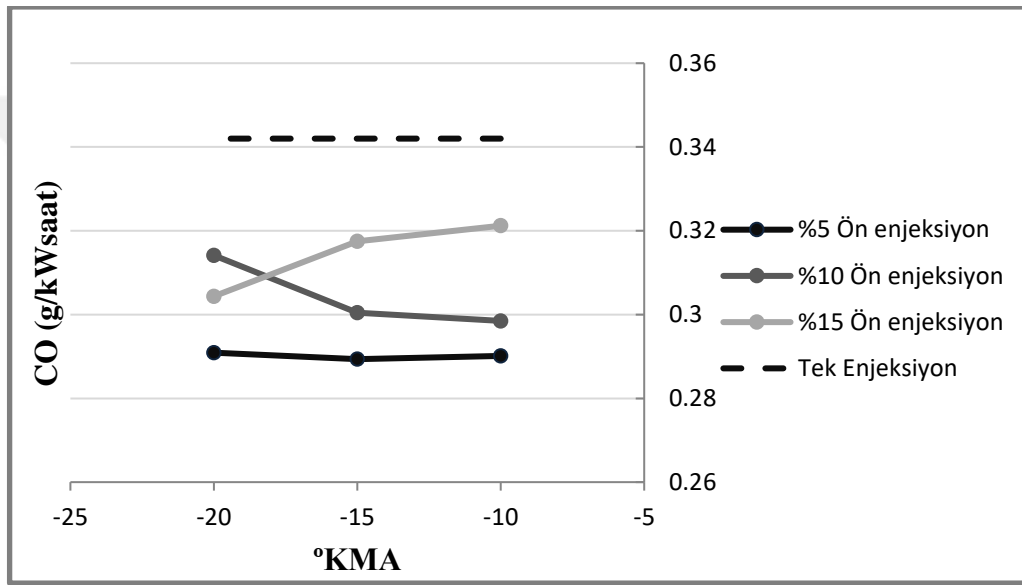
Tüm enjeksiyon basıncı varyasyonlarına bakıldığında deney sonuçlarına göre ön enjeksiyon avansı sabit tutulup püskürtülen yakıt miktarının artırılması ile NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinin arttığı görülmüştür. Sabit ‘ön enjeksiyon yakıt miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranında, ön enjeksiyon avansının NO<sub>x</sub> emisyonlarına etkisine bakıldığında ise etkinin ‘ön enjeksiyon yakıt miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının etkisi kadar büyük olmadığı görülmüştür.

Püskürtme basıncının artırılması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının her durum için arttığı görülmüştür. Bu ısı açığa çıkış hızı enjeksiyon basıncı arttığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla ulaşılan daha yüksek yanma sıcaklıkları daha yüksek NO<sub>x</sub> salınımının oluşmasına sebep olmaktadır. Ön enjeksiyon miktarının sabit olması durumunda NO<sub>x</sub> emisyonunun ön enjeksiyon avansında fazla etkilenmediği görülmüştür.

%5 ve %10 ön enjeksiyon miktarlarında ön enjeksiyon avansının artmasıyla NO<sub>x</sub> emisyonunun arttığı görülmüştür. %15 ön enjeksiyon miktarında ise NO<sub>x</sub> emisyonlarının tüm ön enjeksiyon avanslarında bir birine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Tüm püskürtme basıncı varyasyonları incelendiğinde, maksimum NO<sub>x</sub> salınımının %20 ön enjeksiyon miktarı ve -10 °KMA enjeksiyon avansında olduğu görülmüştür. En yüksek seviyeye 140 MPa'lık basınç ile enjeksiyon yapıldığı durumda 8.17 g/kWsaat ile ulaşılmıştır. En düşük seviyeye ise 6.43 g/kWsaat ile %5'lik ön enjeksiyon miktarı ve -15 KMA° ön enjeksiyon avansında gözlenmiştir. Bu da doğru strateji ile ön enjeksiyon yapılarak NO<sub>x</sub> emisyon salınımının azaltılabildiği görülmüştür.

### 5.1.2 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının CO Emisyonlarına Etkisi

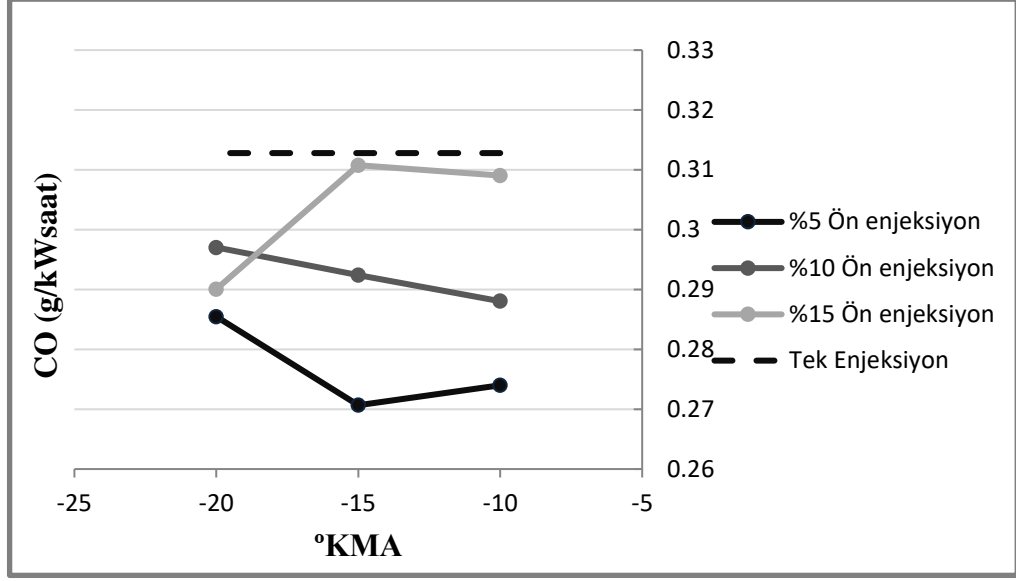


Şekil 5.4 120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO emisyonlarına etkisi

Şekil 5.4'de sabit 120 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve 'ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı' oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında CO emisyonunun değişim grafiği verilmiştir.

En yüksek CO değeri, %15 ön enjeksiyon miktarı ve -10 °KMA ön enjeksiyon avansında 0,32 g/kWsaat olarak görülmüştür. En düşük değerine ise %5 ön enjeksiyon miktarı ve -10 °KMA ön enjeksiyon avansında 0,29 g/kWsaat olarak ulaşılmıştır.

Tek enjeksiyonlu yanma ile ön enjeksiyonlu yanma karşılaştırıldığında; tüm ön enjeksiyonlu yanmalarda CO emisyonunun azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.5 130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO emisyonlarına etkisi

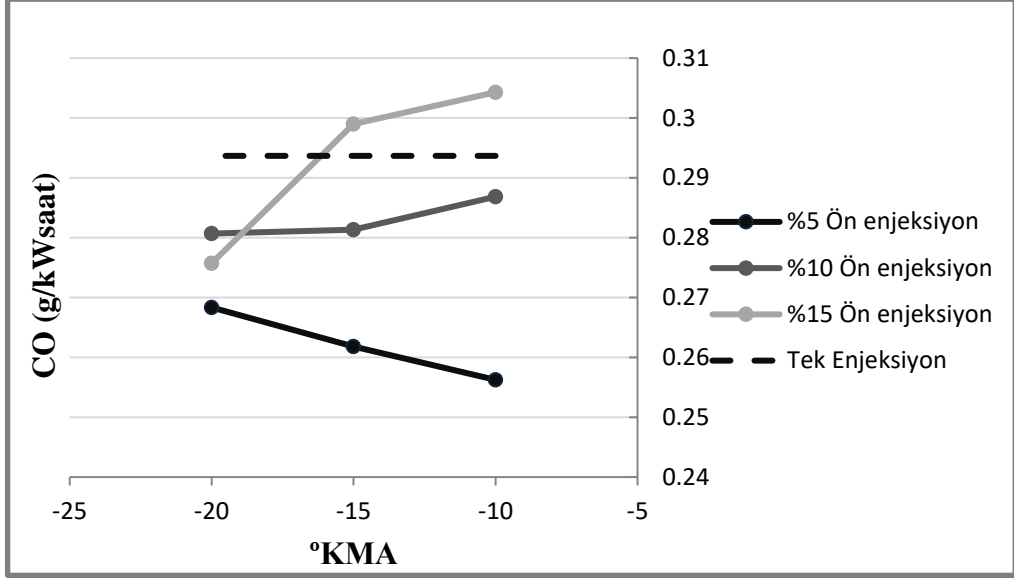
Şekil 5.5’de sabit 130 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında CO emisyonunun değişim grafiği verilmiştir.

En yüksek CO değeri, %15 ön enjeksiyon miktarı ve -15 °KMA ön enjeksiyon avansında 0,31 g/kWsaat olarak görülmüştür. En düşük değerine ise %5 ön enjeksiyon miktarı ve -15 °KMA ön enjeksiyon avansında 0,27 g/kWsaat olarak ulaşılmıştır.

Şekil 5.6’da sabit 140 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında CO emisyonunun değişim grafiği verilmiştir.

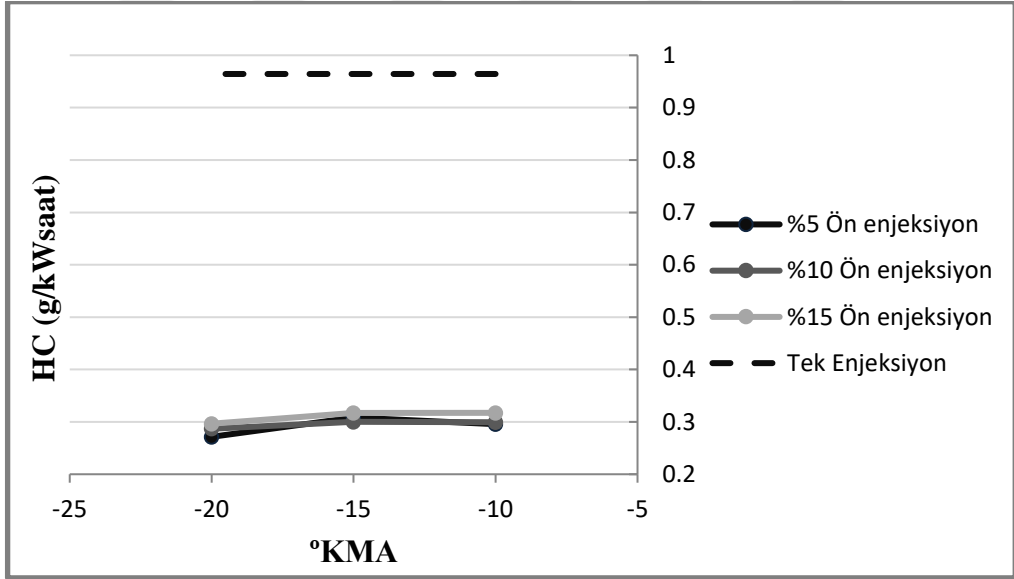
En yüksek CO değeri, %15 ön enjeksiyon miktarı ve -10 °KMA ön enjeksiyon avansında 0,30 g/kWsaat olarak görülmüştür. En düşük değerine ise %5 ön enjeksiyon miktarı ve -10 °KMA ön enjeksiyon avansında 0,26 g/kWsaat olarak ulaşılmıştır.

Yakıt enjeksiyon basıncının artırılması ile CO emisyonların düşmüştür. Püskürtme basıncının artırılmasıyla tanecik çapı küçülen yakıt parçacıklarının hava ile daha iyi karışarak yanmanın hızlanmasıyla CO emisyonu değeri azalmıştır. Ancak püskürtme basıncının artırılmasıyla, ön enjeksiyonlu yanmanın tek enjeksiyonlu yanmaya olan avantajı giderek azalmıştır.

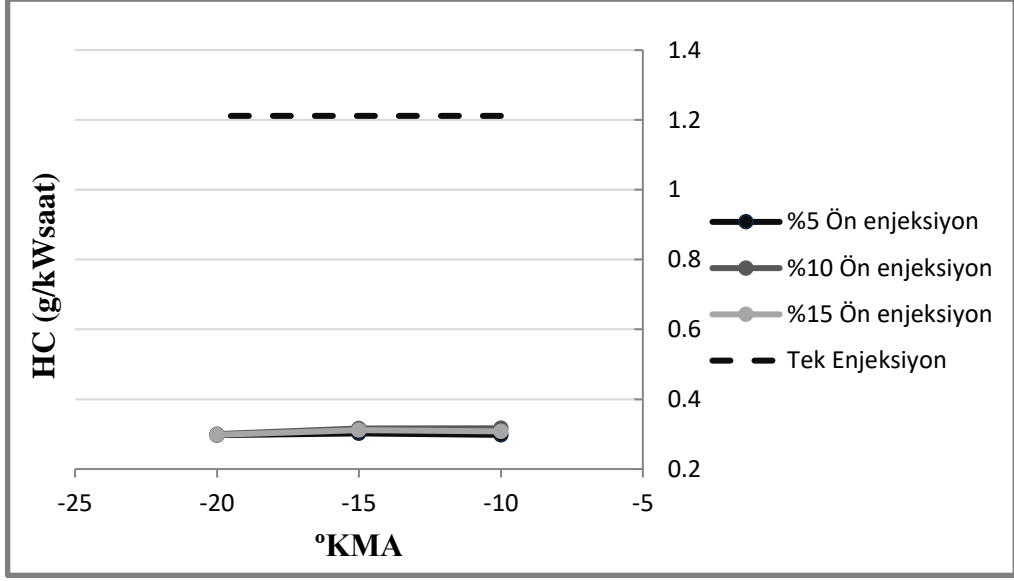


Şekil 5.6 140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO emisyonlarına etkisi

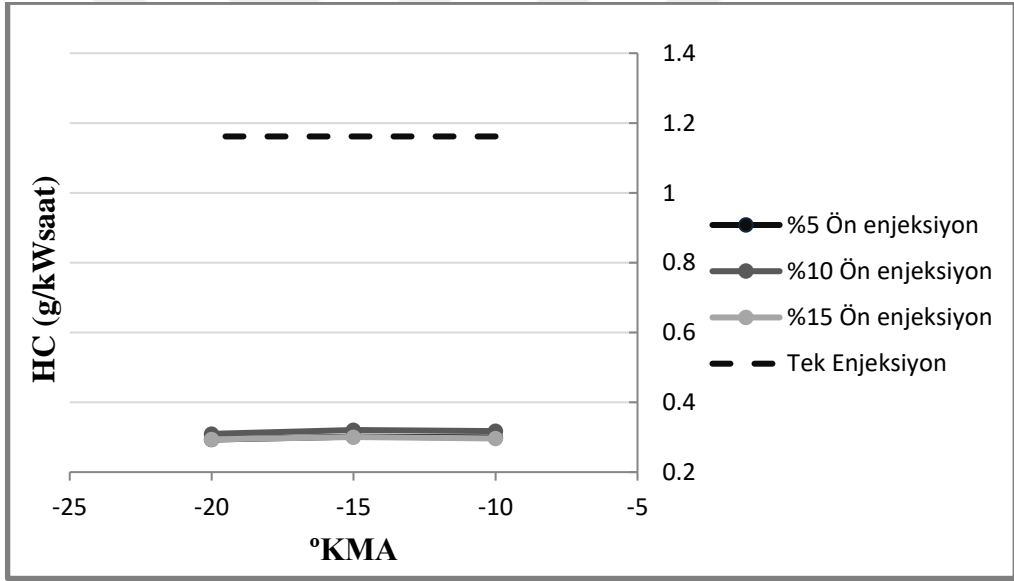
### 5.1.3 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının HC Emisyonlarına Etkisi



Şekil 5.7 120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının HC emisyonlarına etkisi



Şekil 5.8 130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının HC emisyonlarına etkisi



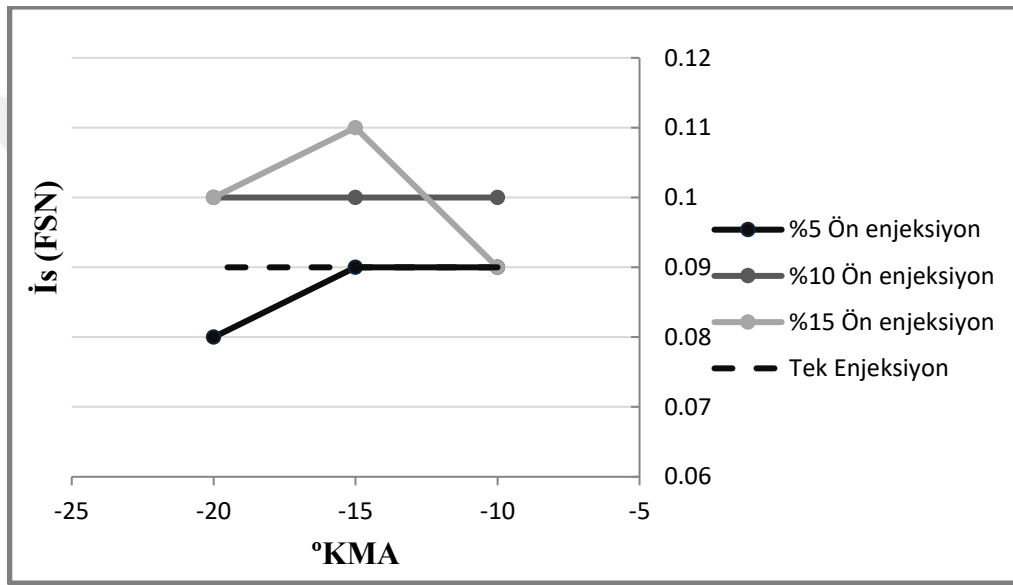
Şekil 5.9 140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının HC emisyonlarına etkisi

Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'dan görüleceği gibi tek enjeksiyonlu yanmada püskürtme basıncının yükseltilmesi ile HC emisyonları azalmıştır. Ön enjeksiyonlu yanmanın tüm varyasyonlarında püskürtme basıncının artırılması ile HC emisyonlarında büyük düşüş gözlenmiştir.

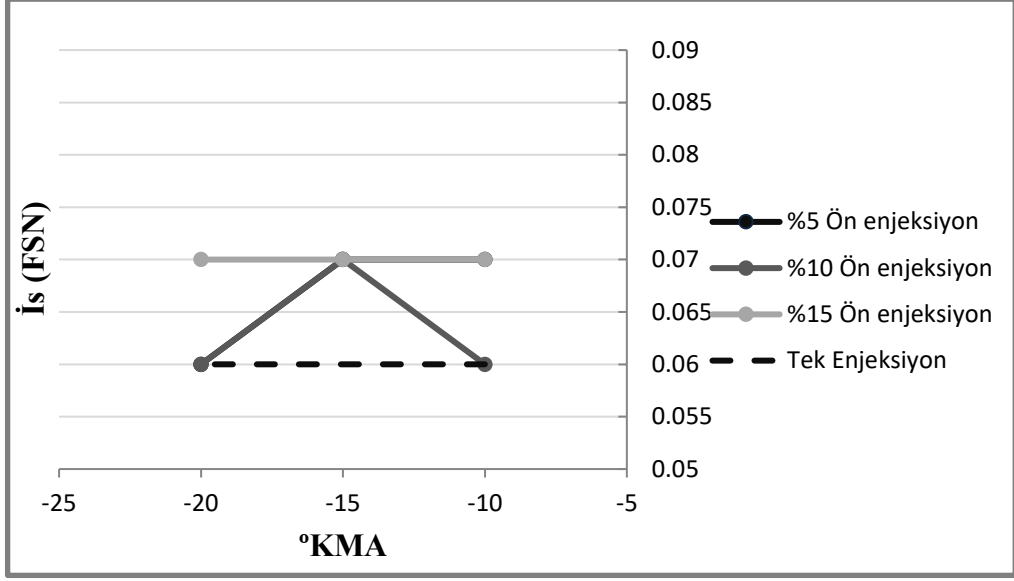
120, 130 ve 140 MPa'lık enjeksiyon basıncının uygulandığı durumlarda ön enjeksiyonda, ön enjeksiyon miktarının ve ön enjeksiyon avansının HC emisyonuna etkisinin olmadığı

görülmüştür. Yani HC emisyonundaki iyileşmenin tek kaynağı ön enjeksiyon yapmak olduğu görülmüştür. Ön enjeksiyonlu yanmada püskürtme basıncı, ön enjeksiyon miktarı ve ön enjeksiyon avansı üzerine yapılan varyasyonların HC emisyonunu etkilemediği görülmüştür. Ön enjeksiyon yapıldığı yanmalarda, ön enjeksiyonun ana yanma için homojen bir yanma ortamı sağladığı dolayısıyla daha üniform bir yanma sağlandığı görülmüştür.

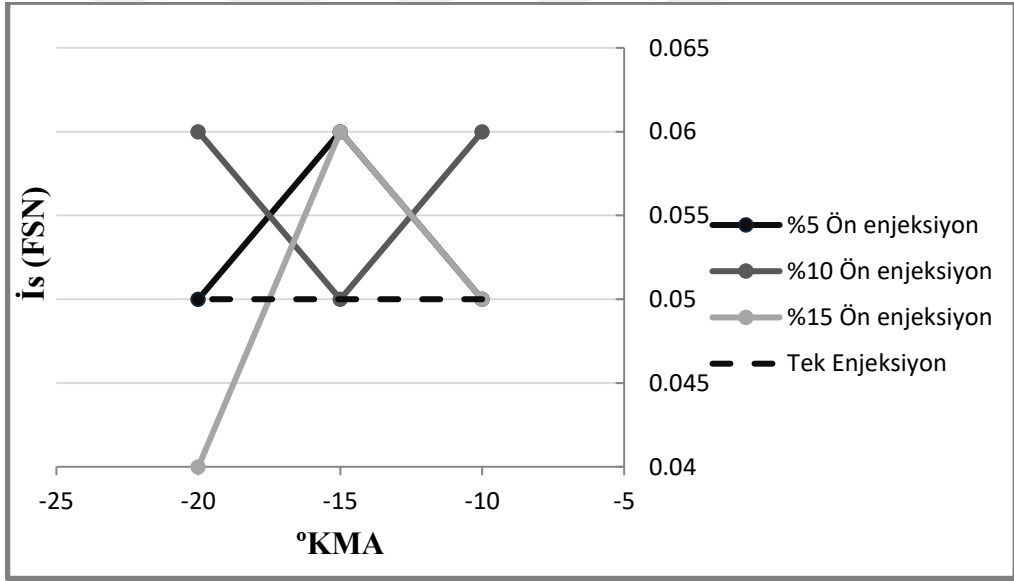
#### 5.1.4 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının İs Emisyonlarına Etkisi



Şekil 5.10 120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının is emisyonlarına etkisi



Şekil 5.11 130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının is emisyonlarına etkisi

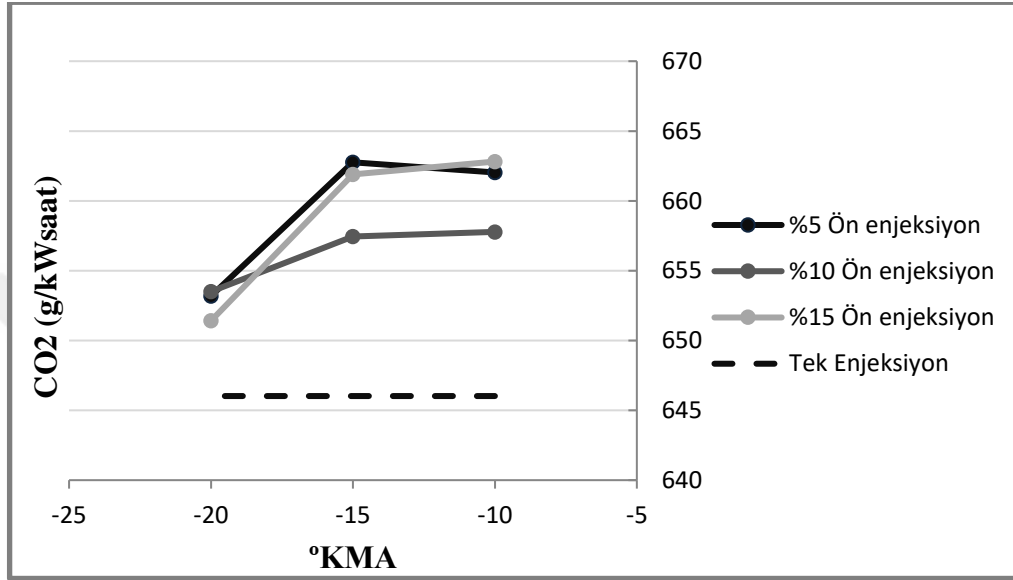


Şekil 5.12 140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının is emisyonlarına etkisi

Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12’de sabit enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında is emisyonunun değişim grafiği verilmiştir.

Tek enjeksiyonlu yanmada enjeksiyon basıncının artırılması ile is emisyonları azalmıştır. Ancak eş basınçlarda yapılan ön enjeksiyonunun, enjeksiyon miktarı ve avansı üzerine yapılan varyasyonların sistematik bir şekil HC emisyonlarını etkilemediği görülmüştür.

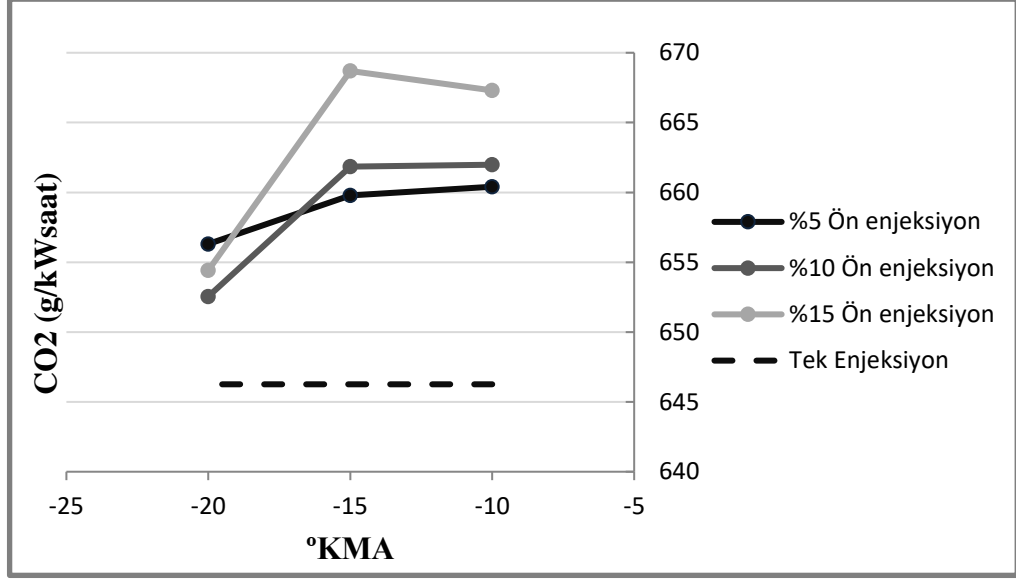
### 5.1.5 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının CO<sub>2</sub> Emisyonlarına Etkisi



Şekil 5.13 120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO<sub>2</sub> emisyonlarına etkisi

Şekil 5.13’de sabit 120 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında CO<sub>2</sub> emisyonunun değişim grafiği verilmiştir. 120 MPa enjeksiyon basıncı ile ön püskürtme yapılması durumundaki tüm varyasyonlarda CO<sub>2</sub> emisyonu tek enjeksiyonlu yanmaya kıyasla artmaktadır.

120MPa’lık enjeksiyon basıncında sabit ön enjeksiyonun avansı için; % 5 ile %15 ön enjeksiyon miktarlı yanmada CO<sub>2</sub> emisyonlarının bir birine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ancak %10 enjeksiyon miktarlı yanmada daha az CO<sub>2</sub> emisyonu olduğu görülmektedir.

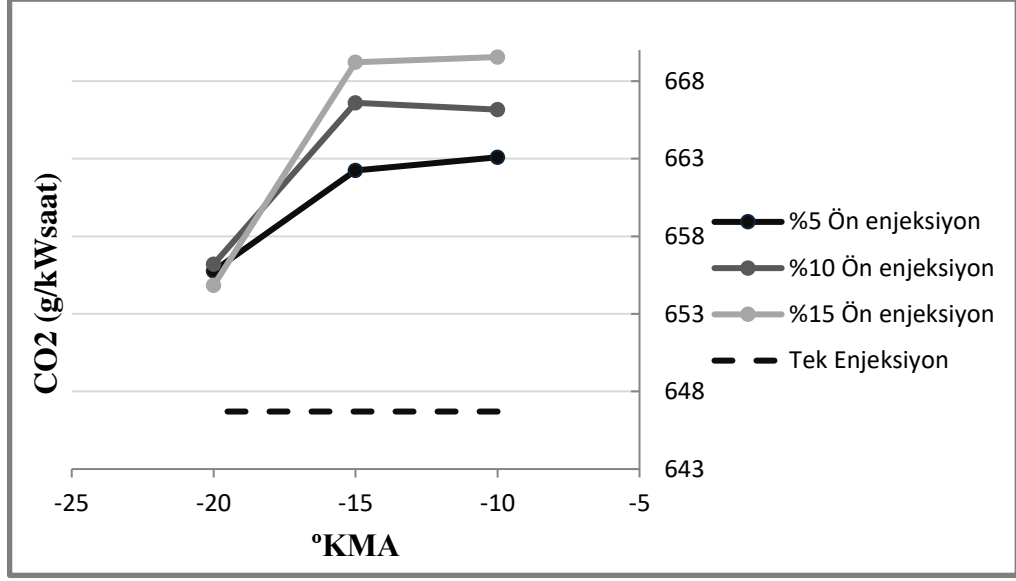


Şekil 5.14 130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO<sub>2</sub> emisyonlarına etkisi

Şekil 5.14’de sabit 130 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında CO<sub>2</sub> emisyonunun değişim grafiği verilmiştir. 130 MPa enjeksiyon basıncı ile ön püskürtme yapılması durumundaki tüm varyasyonlarda CO<sub>2</sub> emisyonu tek enjeksiyonlu yanmaya kıyasla artmaktadır.

Ön enjeksiyon avansı -10 °KMA iken ön enjeksiyon miktarı arttıkça CO<sub>2</sub> emisyonunun arttığı görülmektedir. Bu etki ön enjeksiyon avansı arttıkça azalmakta -20 °KMA’ında ise CO<sub>2</sub> emisyon değerleri bir birine yaklaşmıştır. .

Sabit ön enjeksiyon miktarında ise ön enjeksiyon avansı arttıkça CO<sub>2</sub> emisyonu azalmaktadır.

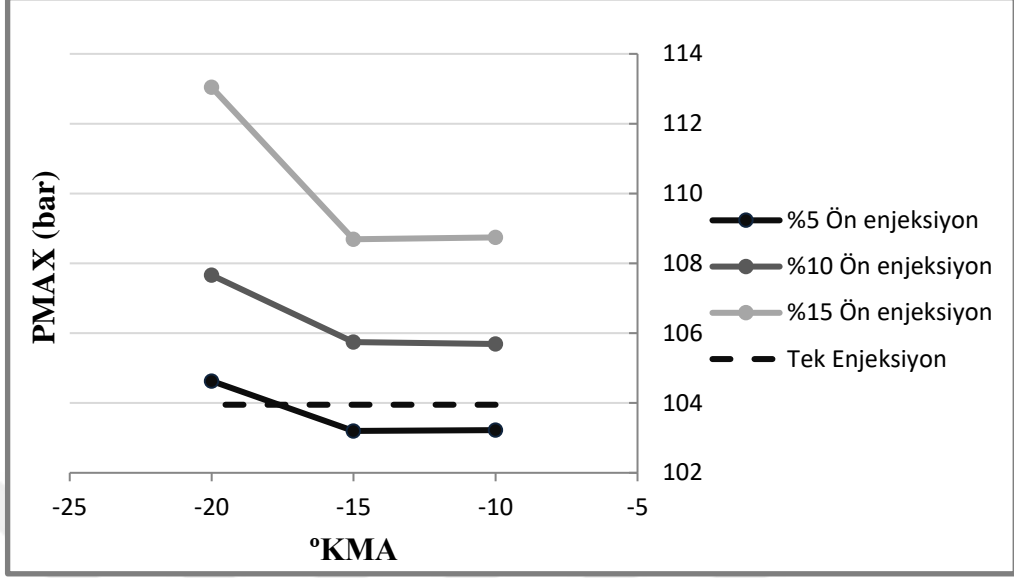


Şekil 5.15 140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının CO<sub>2</sub> emisyonlarına etkisi

Şekil 5.15’de sabit 140 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında CO<sub>2</sub> emisyonunun değişim grafiği verilmiştir. 140 MPa enjeksiyon basıncı ile ön püskürtme yapılması durumundaki tüm varyasyonlarda CO<sub>2</sub> emisyonu tek enjeksiyonlu yanmaya kıyasla artmaktadır.

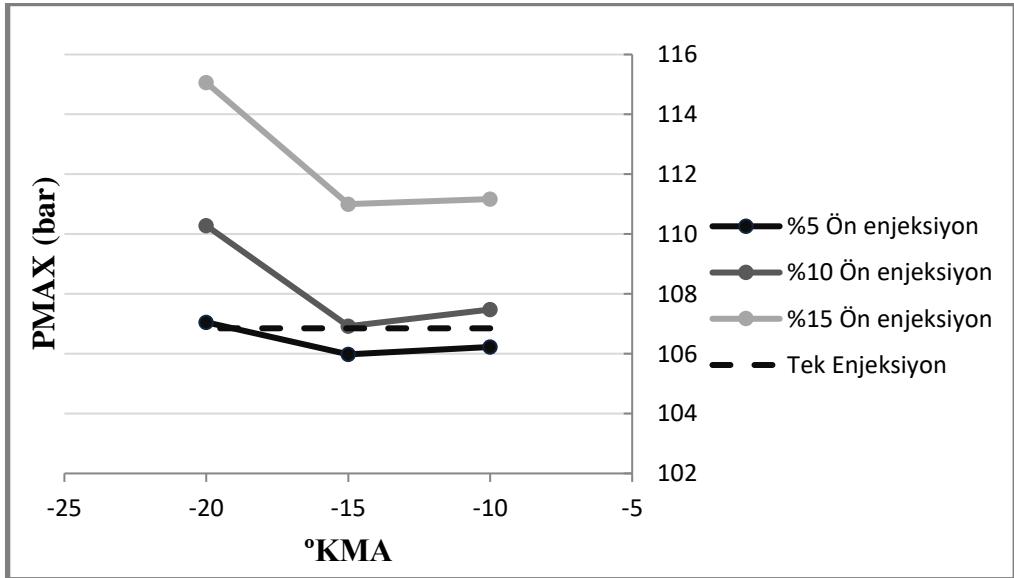
Ön enjeksiyonlu yanmadaki CO<sub>2</sub> emisyon salınımı tek enjeksiyonlu yanmaya göre daha yüksektir. Bu durum artan ÖYT ile ilişkilendirilebilir, zira verilen emisyon değerleri özgül değerler olduğu için giren yakıt miktarının ve gücün fonksiyonu olarak değişim göstermektedirler, CO<sub>2</sub> emisyonu düşük avans değerlerinde artan ÖYT ile doğru orantılı olarak artmıştır.

### 5.1.6 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının Yanma Basıncına Etkisi



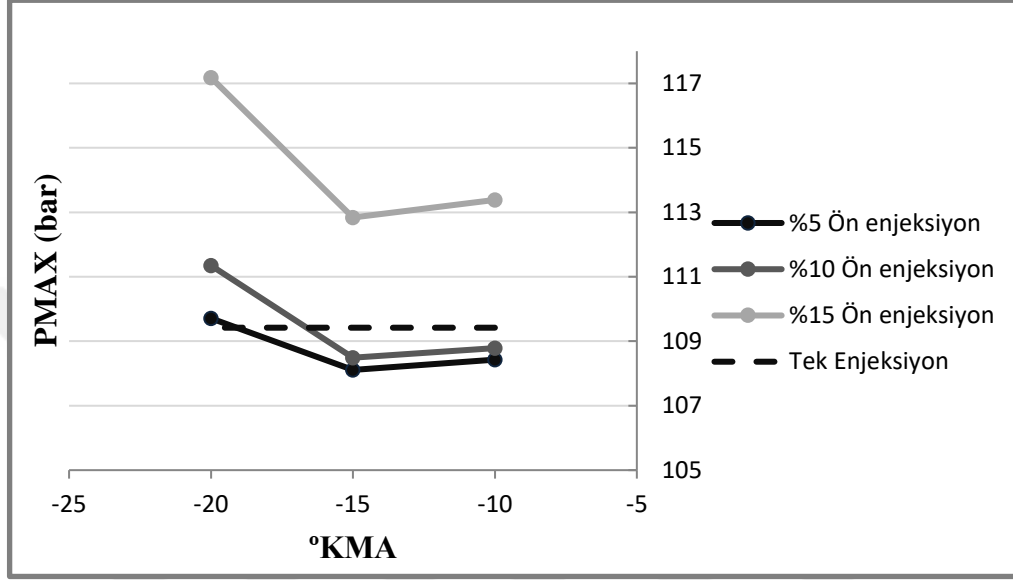
Şekil 5.16 120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının maksimum yanma basıncına etkisi

Şekil 5.16’da sabit 120 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında maksimum yanma basıncı değişim grafiği verilmiştir. Ön enjeksiyon avansı arttırıldıkça basınçta da artış görülmüştür.



Şekil 5.17 130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının maksimum yanma basıncına etkisi

Şekil 5.17’de sabit 130 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında maksimum yanma basıncı değişim grafiği verilmiştir. Ön enjeksiyon avansı arttırıldıkça basınçta da artış görülmüştür.



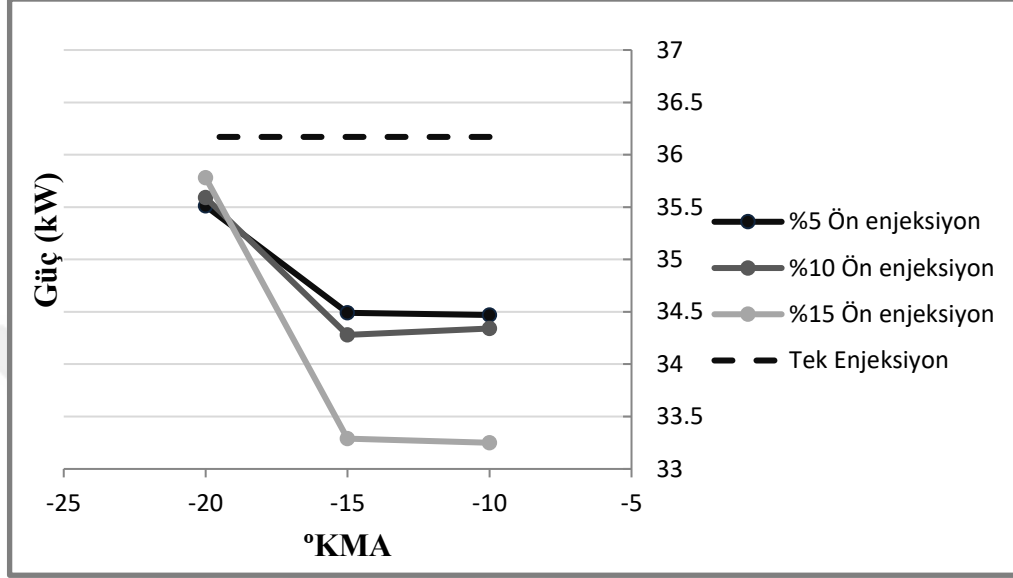
Şekil 5.18 140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının maksimum yanma basıncına etkisi

Şekil 5.18’de sabit 140 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında maksimum yanma basıncı değişim grafiği verilmiştir. Ön enjeksiyon avansı arttırıldıkça basınçta da artış görülmüştür.

Ön enjeksiyon miktarı/toplam yakıt miktarı oranı arttıkça maksimum yanma basıncında artış meydana gelmiştir. 120MPa’lık enjeksiyon basıncında ve %5’lik ön enjeksiyonlu yanmada, silindir içi basıncın -5 °KMA’nda yapılan tek enjeksiyona göre daha düşük oluşmuştur. Yakıt enjeksiyonunun erken gerçekleştirilmesi ile erken başlayan ısı girişi sonucunda yüksek avans değerlerinde silindir içi basınç artmıştır. Eşit avans açısında püskürtme basıncının artışı ile artan silindir içi basıncı tutuşmanın daha erken başladığını göstermektedir.

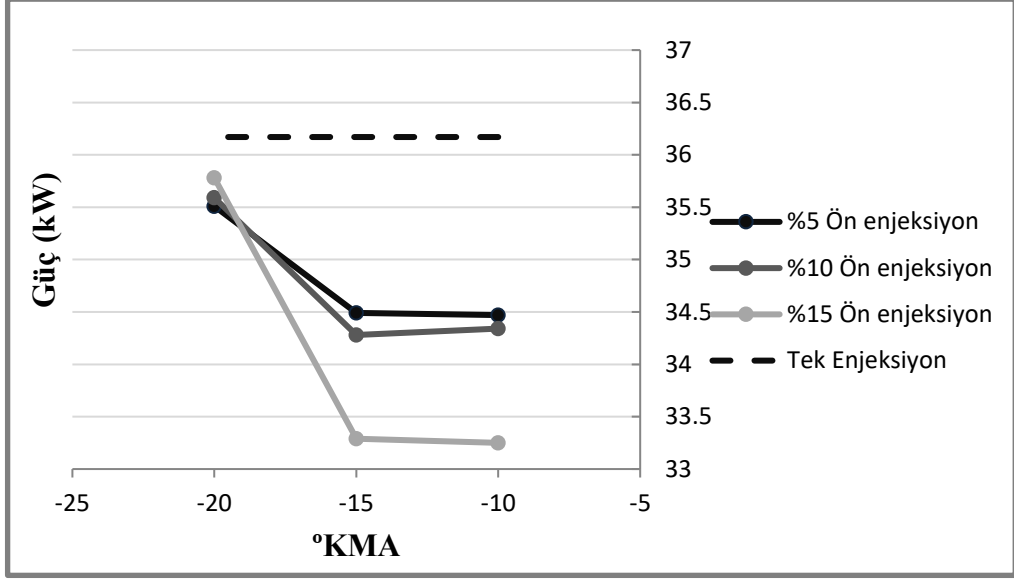
Yakıt enjeksiyon basıncı arttıkça maksimum yanma basıncı artmıştır. Bu durum da yakıt daha iyi pülverize olduğunda tutuşma gecikmesi azalarak yanma daha erken başladığını göstermektedir.

### 5.1.7 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının Motor Gücüne Etkisi

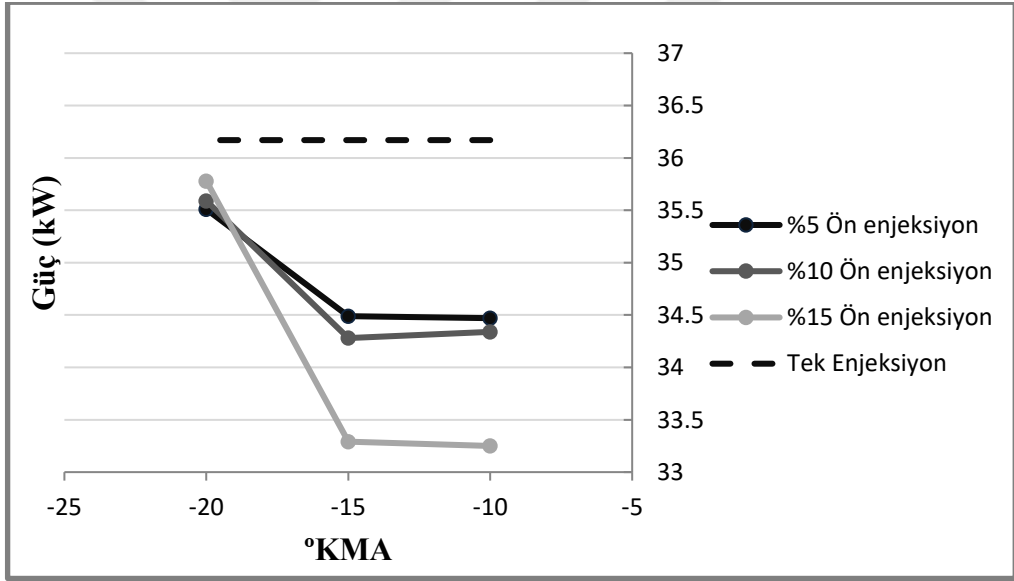


Şekil 5.19 120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının motor gücüne etkisi

Şekil 5.19’de sabit 120 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında motor gücü değişim grafiği verilmiştir. Ön enjeksiyonlu yanmayla ortaya çıkan güç tek enjeksiyonlu yanmaya nazaran daha düşüktür. Ön enjeksiyon miktarı arttıkça güç azalmıştır, ön enjeksiyon avansı arttıkça ise motor gücü artmıştır.



Şekil 5.20 130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının motor gücüne etkisi

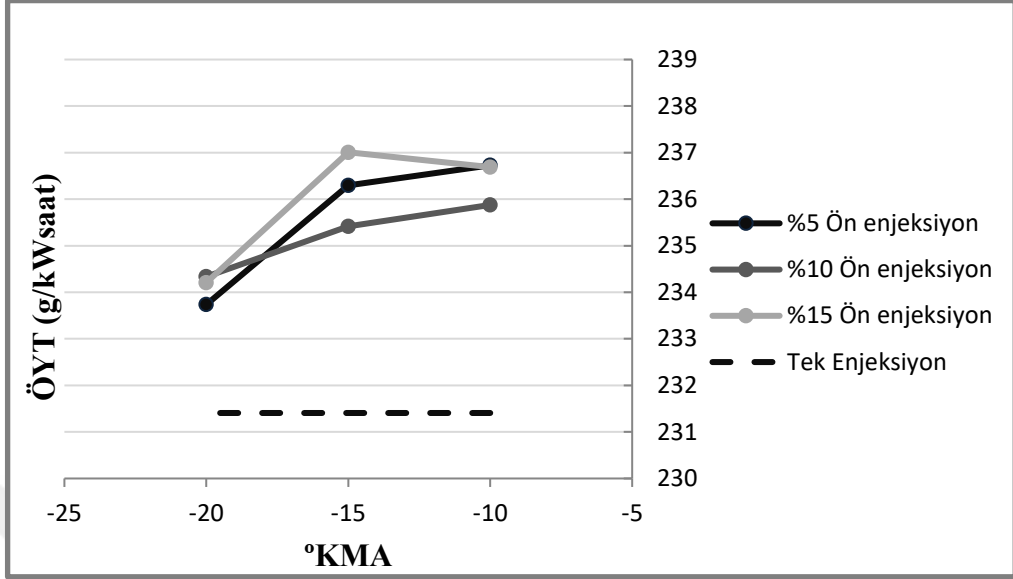


Şekil 5.21 140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının motor gücüne etkisi

Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de sabit 120 ve 130 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında motor gücü değişim grafiği verilmiştir.

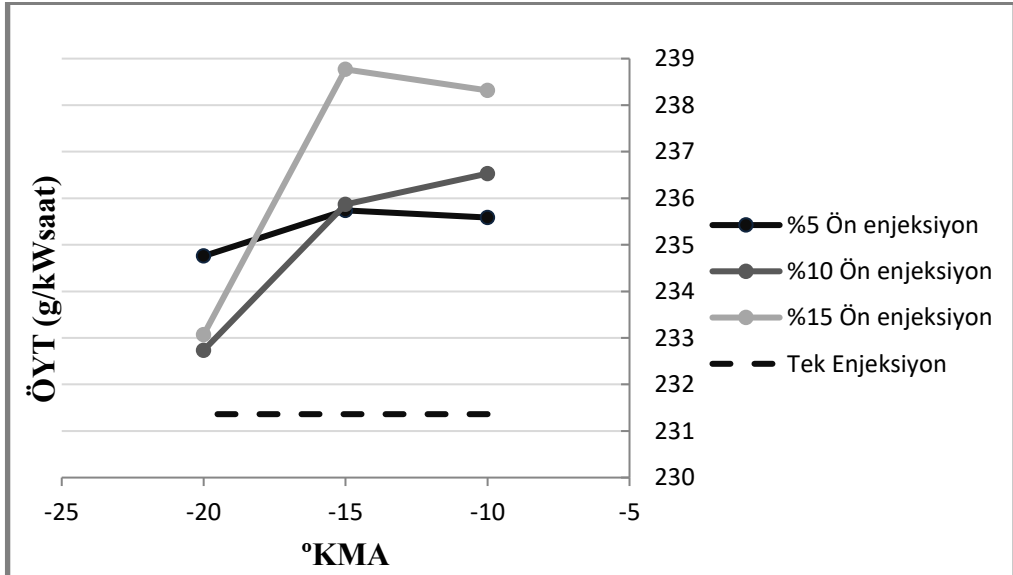
Ön enjeksiyon miktarı arttıkça motor gücü düşmüş, ön enjeksiyon avansı arttıkça ise motor gücü artmıştır.

### 5.1.8 Sabit Enjeksiyon Basıncında Ön Enjeksiyon Miktarının Özgül Yakıt Tüketimine Etkisi



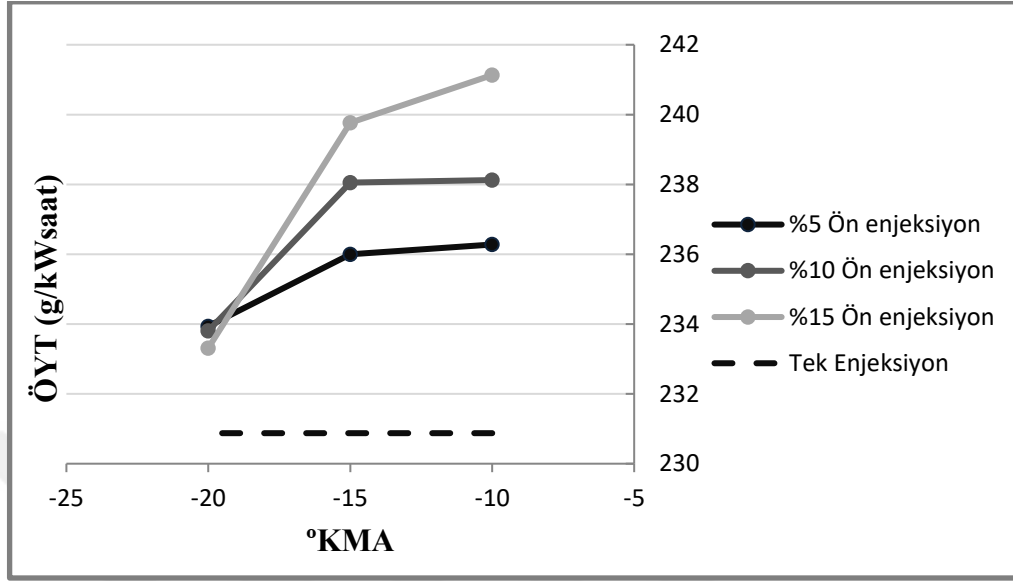
Şekil 5.22 120 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının ÖYT'ne etkisi

Şekil 5.22'de sabit 120 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve 'ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı' oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında ÖYT değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 5.23 130 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının ÖYT'ne etkisi

Şekil 5.23’de sabit 130 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında ÖYT değişim grafiği verilmiştir.

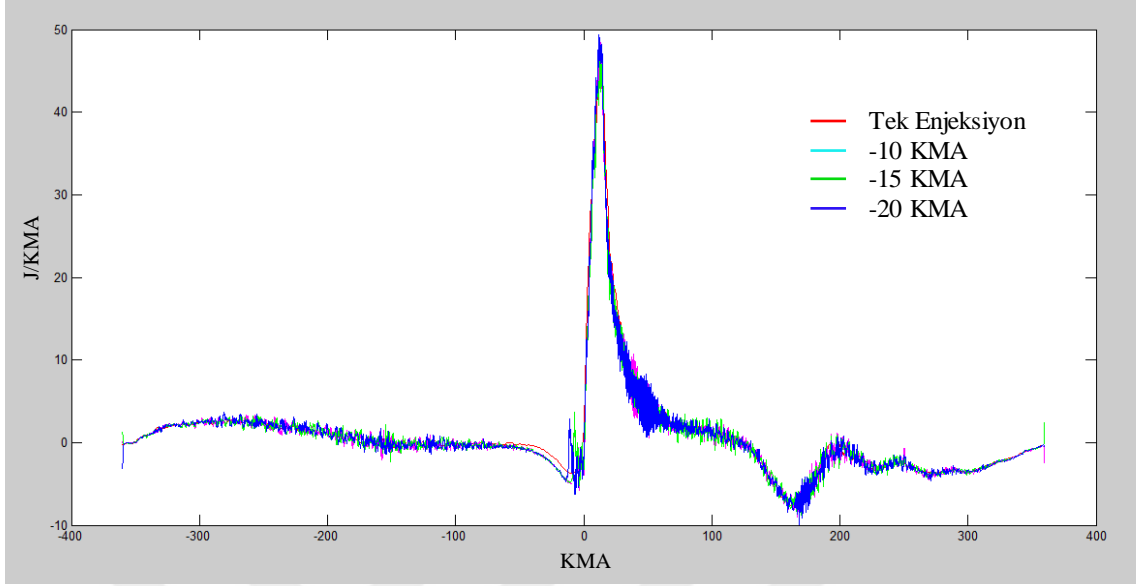


Şekil 5.24 140 MPa enjeksiyon basıncında ön enjeksiyon miktarı ve açısının ÖYT’ne etkisi

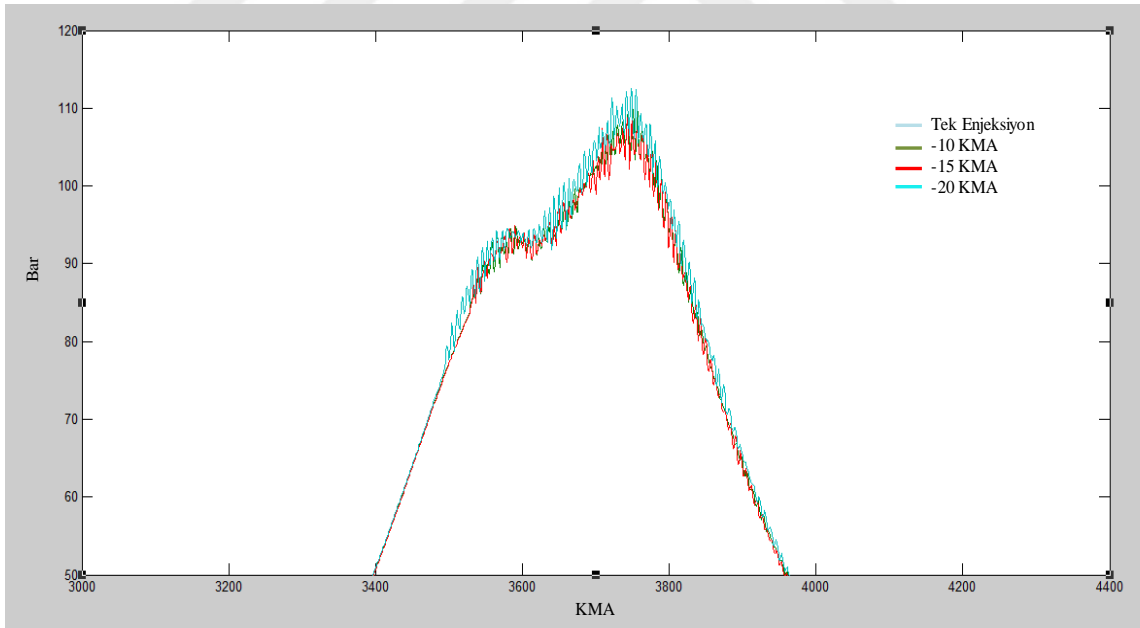
Şekil 5.24’de sabit 130 MPa enjeksiyon basıncında; ön enjeksiyon avansının -10, -15, -20 °KMA ve ‘ön enjeksiyon miktarı/toplam enjeksiyon miktarı’ oranının %5, %10, %15 olduğu deney noktalarında ÖYT değişim grafiği verilmiştir.

Ön enjeksiyonun yapıldığı tüm durumlarda ÖYT artmıştır. Yakıt enjeksiyon basıncı arttıkça ÖYT artmıştır. Sabit enjeksiyon basıncı ve ön enjeksiyon avansında, ön enjeksiyon miktarı arttıkça ÖYT artmıştır. Sabit enjeksiyon basıncı ve ön enjeksiyon miktarında ise ön enjeksiyon avansı arttıkça ÖYT azalmaktadır. Ön enjeksiyon avansı arttıkça ise ön enjeksiyonda püskürtülen yakıt ana enjeksiyon başlangıcına kadar silindir için basınç ve sıcaklığı daha fazla arttırdığı için ana enjeksiyonun tutuşma gecikmesini düşürmektedir. Dolayısıyla daha fazla güç açığa çıktığından ÖYT azalmaktadır.

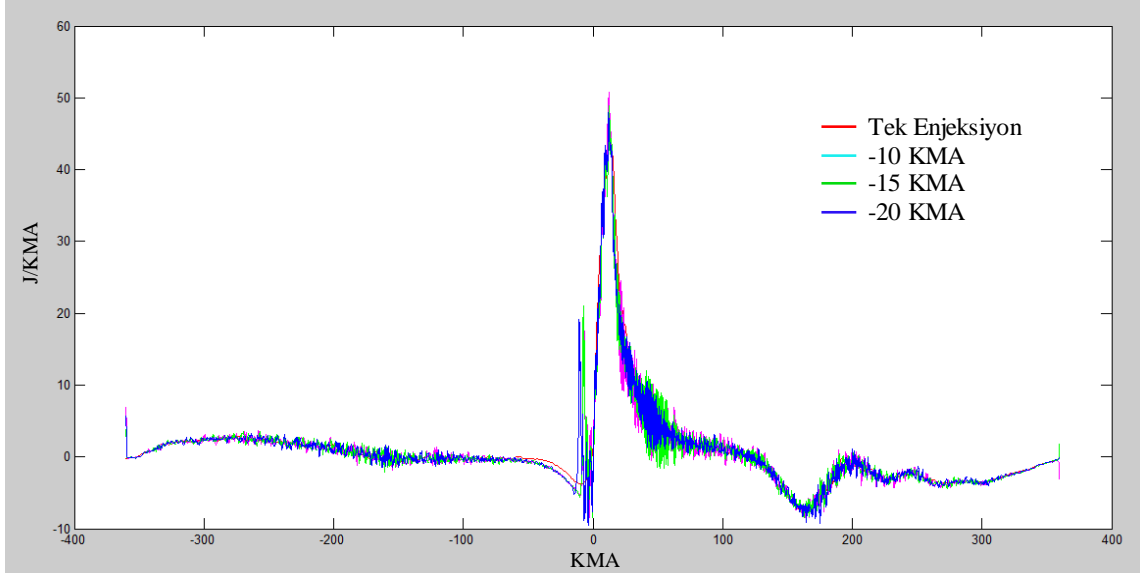
## 5.2 Farklı Püskürtme Basıncı, Ön Püskürtme Avansı ve Ön Püskürtme Miktarı Değerleri İçin Silindir İçi Basınç Değişimleri ve Isı Açığa Çıkış Oranları



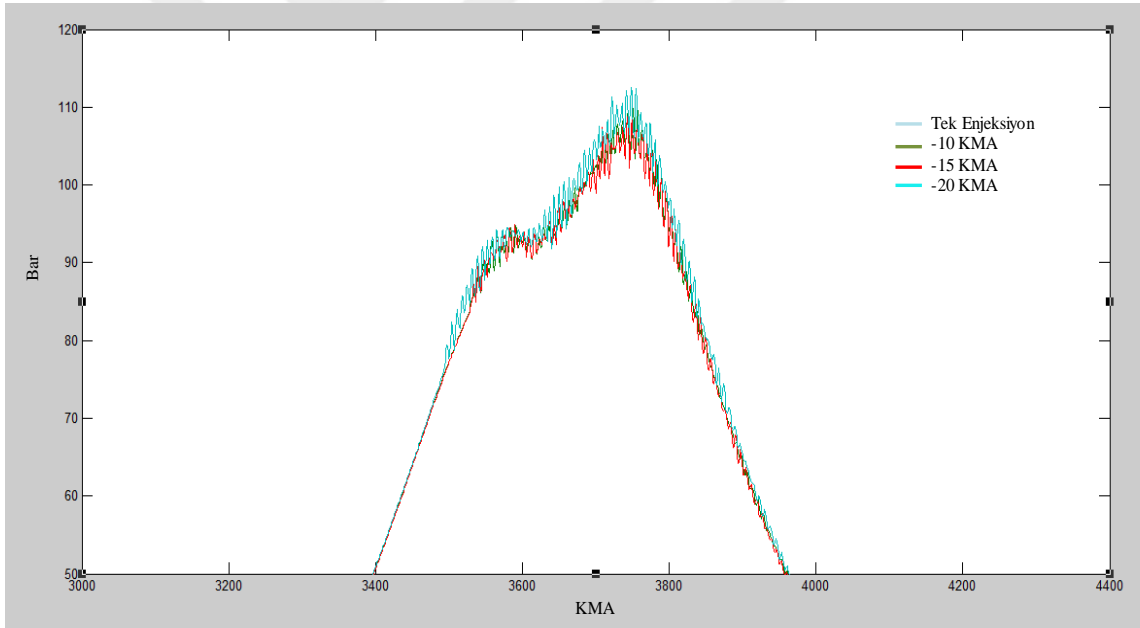
Şekil 5.25 Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 120 MPa’da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



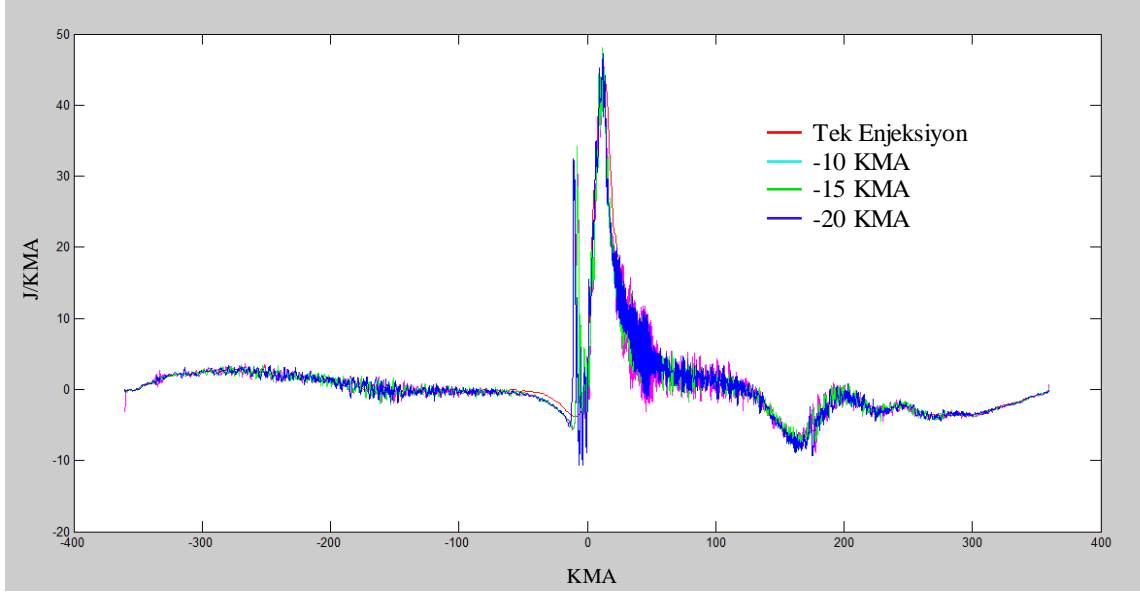
Şekil 5.26 Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 120 MPa’da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi



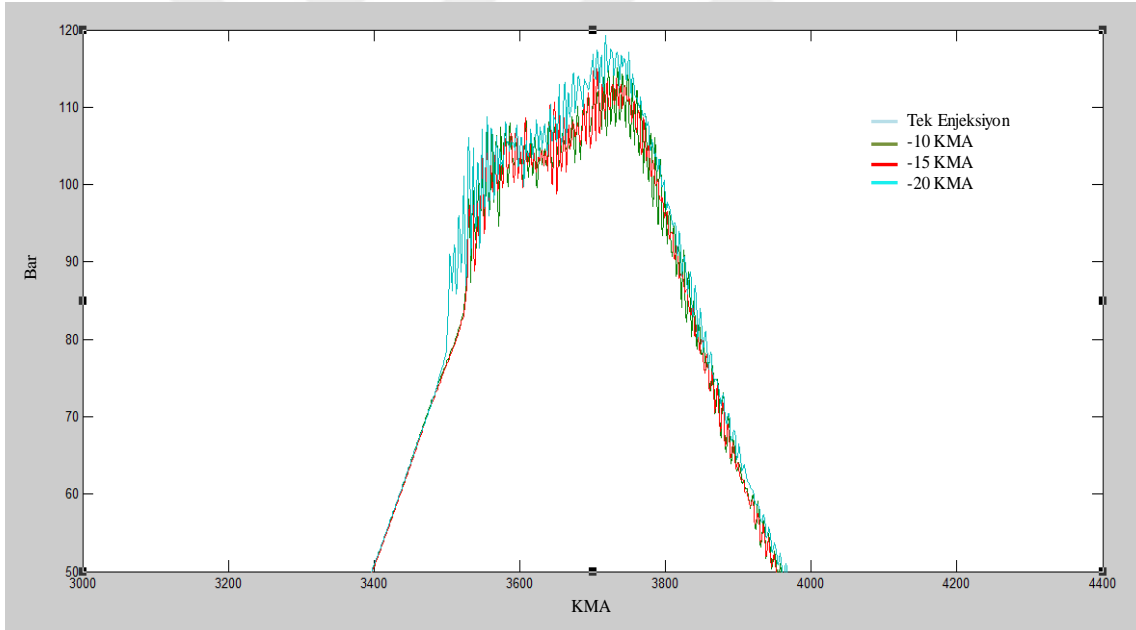
Şekil 5.27 Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 120 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



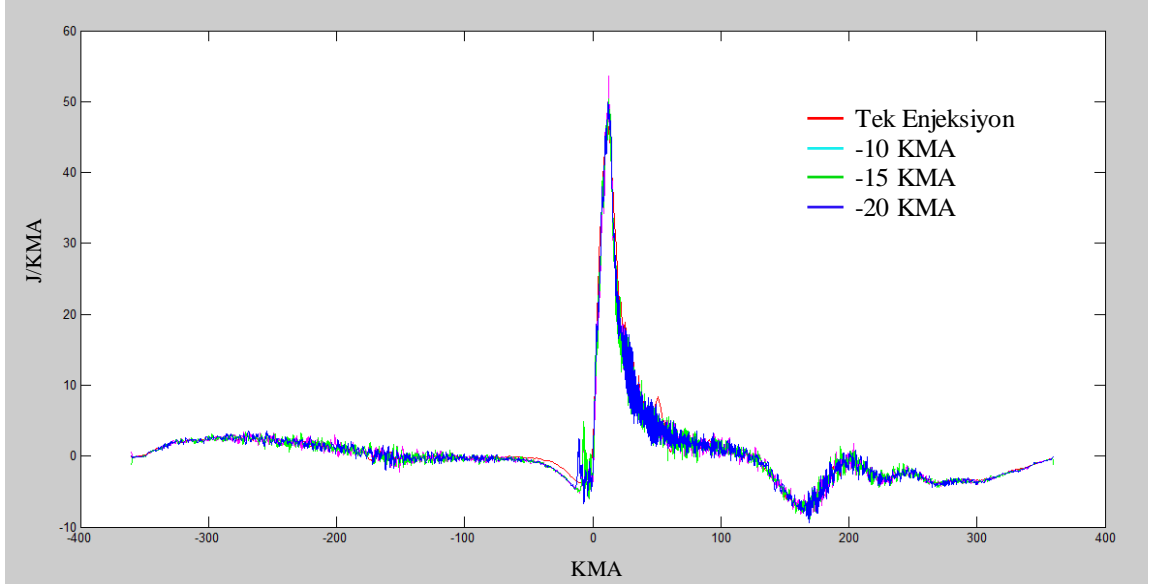
Şekil 5.28 Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 120 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi



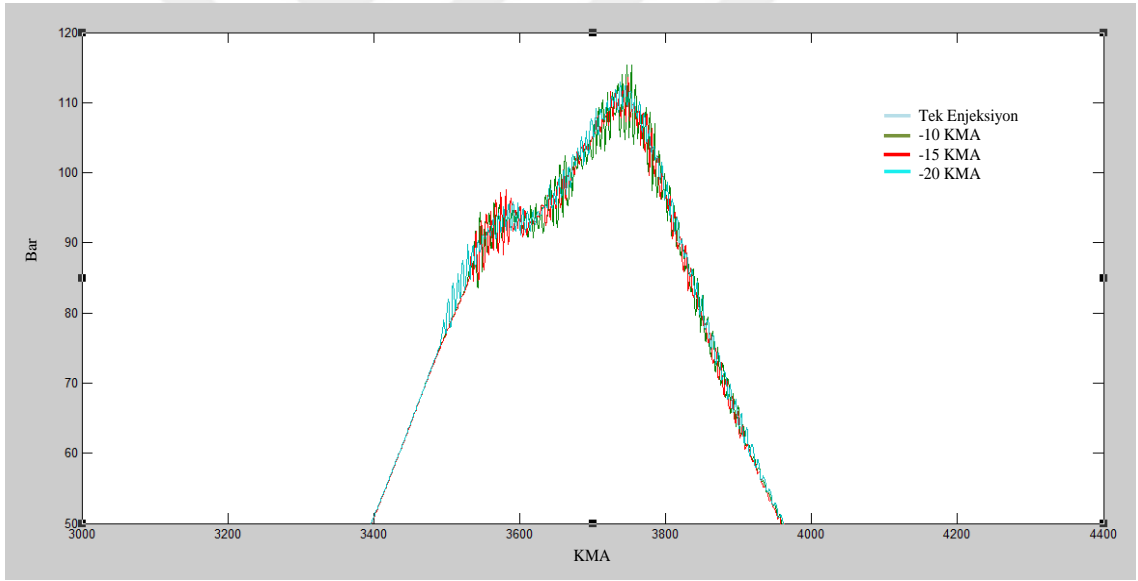
Şekil 5.29 Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 120 MPa’da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



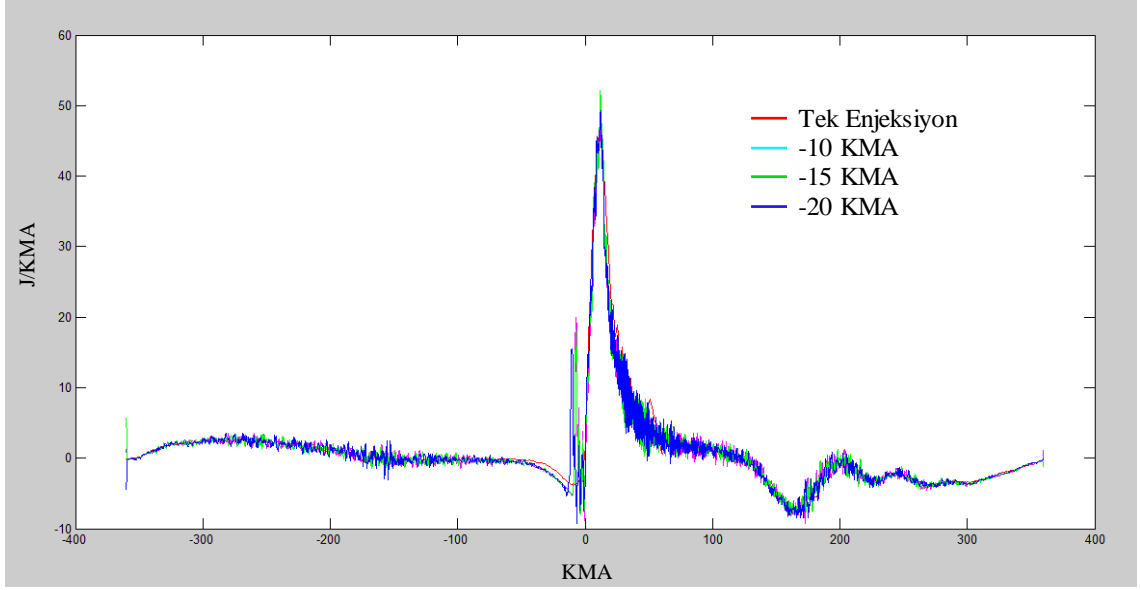
Şekil 5.30 Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 120 MPa’da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi



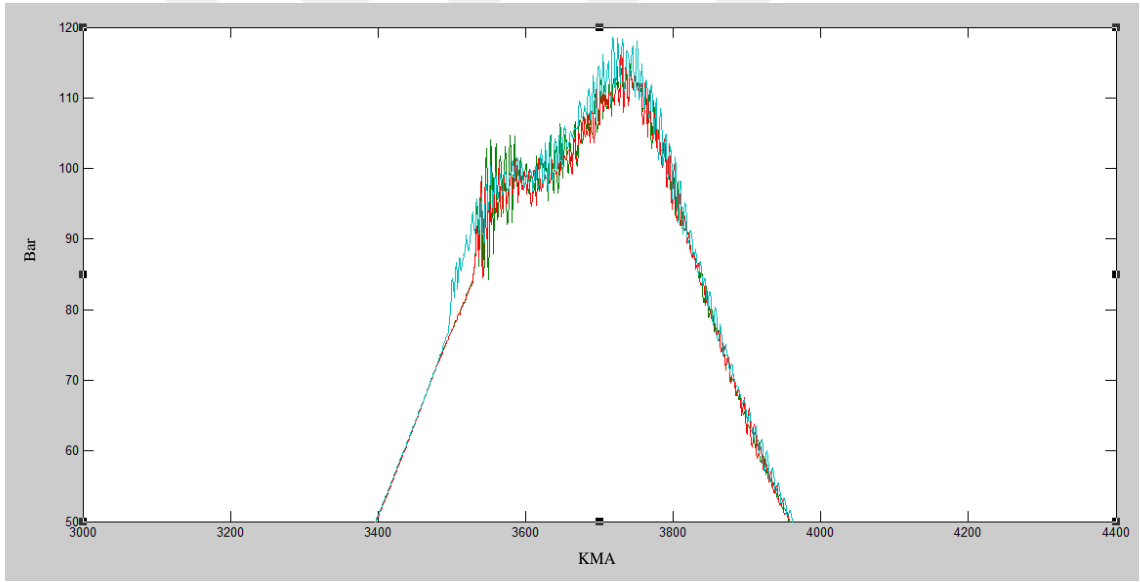
Şekil 5.31 Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



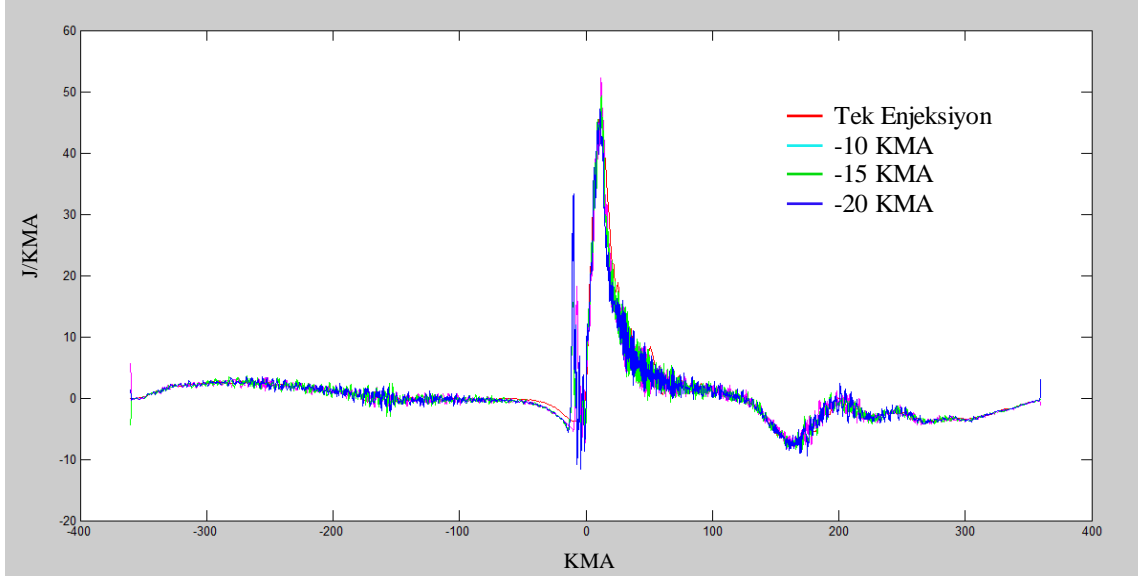
Şekil 5.32 Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi



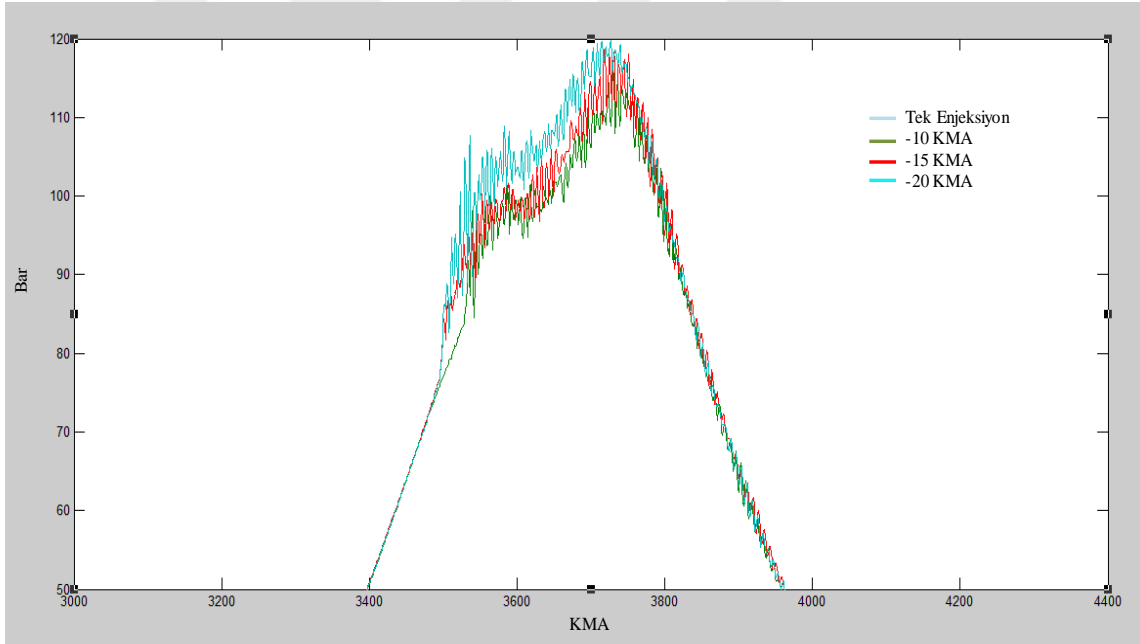
Şekil 5.33 Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 130 MPa’da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



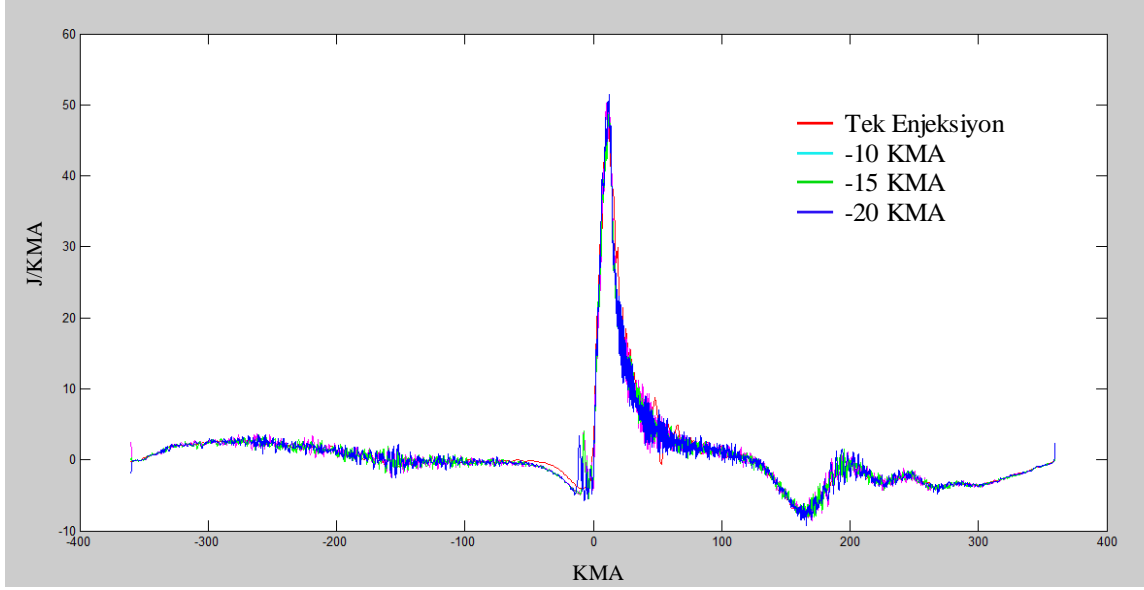
Şekil 5.34 Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 130 MPa’da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi



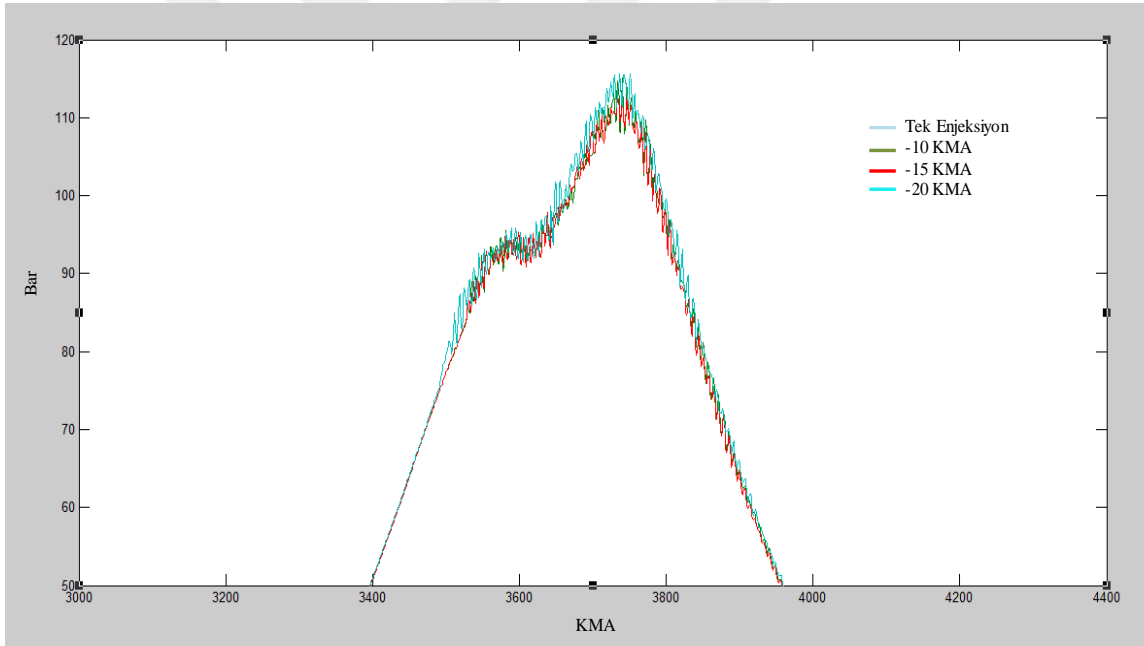
Şekil 5.35 Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



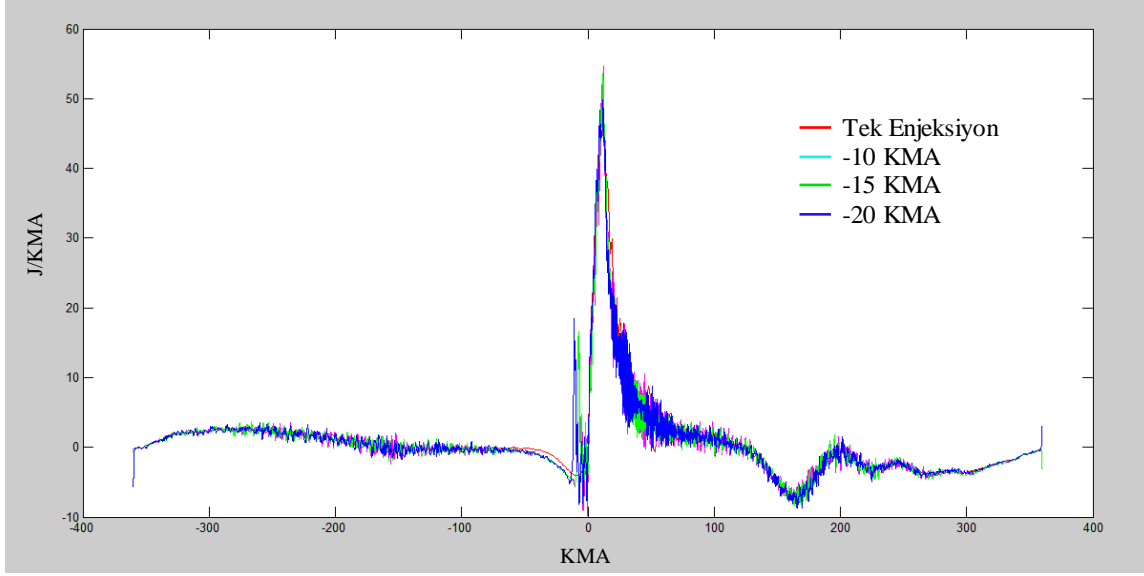
Şekil 5.36 Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 130 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi



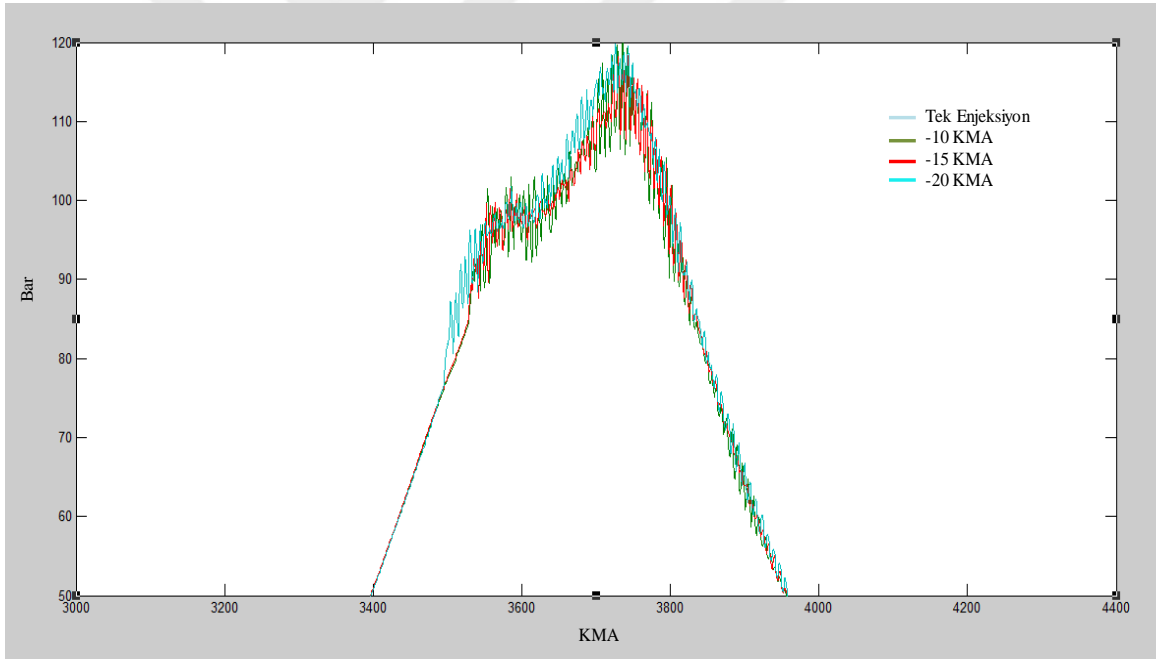
Şekil 5.37 Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 140 MPa’da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



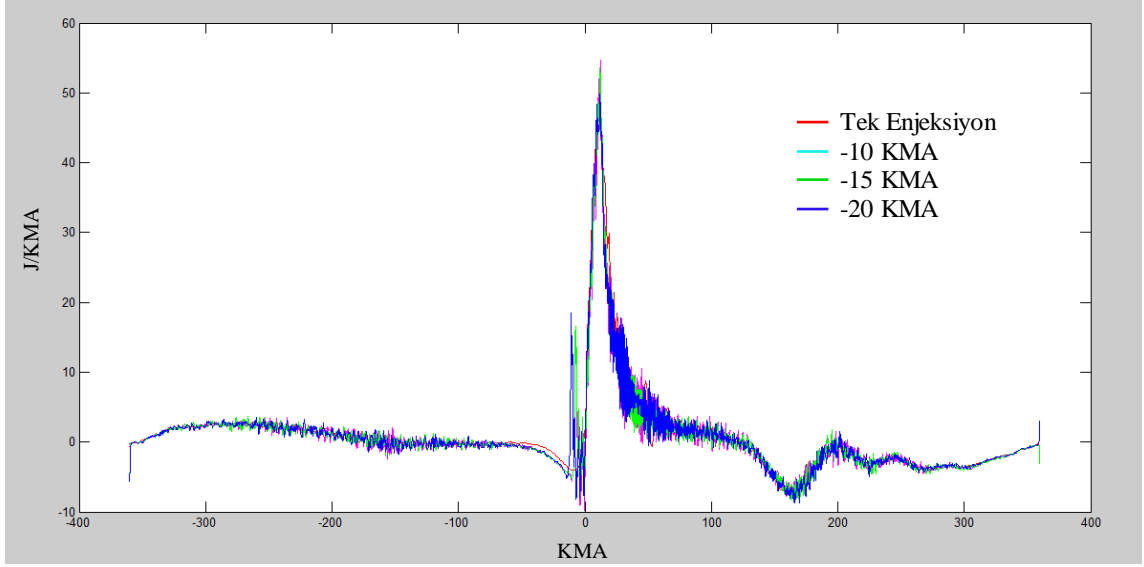
Şekil 5.38 Ön enjeksiyon miktarının %5, yakıt basıncının 140 MPa’da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi



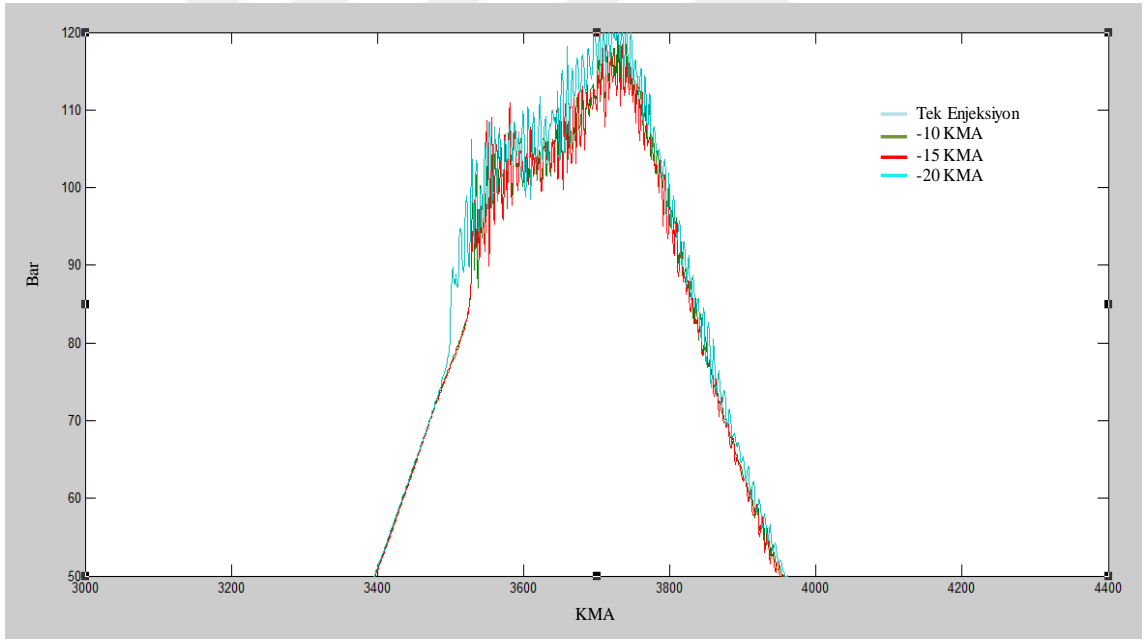
Şekil 5.39 Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 140 MPa’da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



Şekil 5.40 Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 140 MPa’da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi



Şekil 5.41 Ön enjeksiyon miktarının %15, yakıt basıncının 140 MPa'da sabit tutulduğu durum için ısı açığa çıkış oranı



Şekil 5.42 Ön enjeksiyon miktarının %10, yakıt basıncının 140 MPa'da sabit tutulduğu durum için silindir içi basınç eğrisi

Silindir içi basınç ölçümü her bir krank açısında gerçekleştirilmiştir. Termodinamiğin birinci yasasının çözümlenmesiyle elde edilen içten yanmalı motorlar için ısı yayılımı ifadeleri kullanılarak bir MATLAB programı yazılmış ve bu program ile ısı yayılımı analizleri yapılmıştır. Isı yayılımı modellenmesi ile motor gücü, toplam ısı yayılımı, ısı

yayınım dağılımı, silindir içi sıcaklıklar, yanma zamanlaması ve yanma oranı gibi bir içten yanmalı motor performansı hakkında oldukça önemli bilgilere ulaşılabilmektedir. Ayrıca ısı yayılımı analizi sonucunda egzoz emisyonları hakkında da fikir yürütülebilmek de mümkündür.

-15, -10, -5 ve 0 °KMA püskürtme avanslarında silindir içi basınç ve püskürtme sinyali ile elde edilen anlık basınç ve bu basınçlara karşılık gelen krank açıları MATLAB programında yazılan bir kod ile işlenerek anlık ısı yayılımı-krank açısı grafikleri elde edilmiştir. . Bu grafiklerde püskürtme basıncı arttıkça silindir içi basıncın arttığı ve ısı açığa çıkış oranının da arttığı görülmüştür. Ön püskürtme avansının ÜÖN'ye yaklaştırılması silindir içi basınç değerleri azalmıştır. Ön püskürtme avansı ve yakıt basıncı sabit tutulduğunda silindir içi basınçlar, ön enjeksiyon miktarının artması ile artmıştır.

Isı açığa çıkış eğrileri incelendiğinde; sabit yakıt basıncında ön enjeksiyon miktarının artırılması ile ısı açığa çıkış oranının düştüğü görülmüştür. Benzer bir şekilde, diğer parametreler sabit kalacak şekilde ön enjeksiyon miktarının artırılması ile ısı açığa çıkış oranı düşmektedir.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada püskürtme basıncının, ön enjeksiyon yapmanın, yapılan ön enjeksiyon avansının ve ön enjeksiyon ile ana enjeksiyon oranının dizel motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. 2500 d/d sabit motor devrinde, strok başına sabit 28 mg yakıt püskürtmüştür. Enjeksiyon basıncı 120-130-140 MPa aralığında, ön enjeksiyon açısı -15, -10, -5 °KMA aralığında ve ön enjeksiyonda püskürtülen yakıtın toplam püskürtülen yakıtı oranı %10, %15, %20 olacak şekilde yapılan deney varyasyonunun performans ve egzoz emisyonlarındaki değişimler belirlenip analiz edilmiştir. Ayrıca silindir içi basınç ve ısı yayınımları incelenmiştir.

Yakıt enjeksiyon basıncının sabit olduğu durumlarda, ilk olarak sabit ön enjeksiyon avansı kullanılarak ön enjeksiyon miktarının NO<sub>x</sub> salınımlarına etkisi incelenmiştir. Ön enjeksiyon miktarının artması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının arttığı gözlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonlarının artışı yüksek sıcaklığa bağlayabiliriz. Zira ön enjeksiyon ile ana yanma sıcaklığı ve basıncı yükselmiş, yakıt-hava karışımının daha iyi oluşması ve sıcaklık artışı ile birlikte de tutuşma gecikmesinin düştüğü görülmüştür.

Ön enjeksiyon miktarı ve yakıt basıncı sabit tutularak ön enjeksiyon avansının etkisi incelenmiştir. Aynı yakıt basıncı ve miktarı ile farklı avanslarda yapılan ön enjeksiyonda, avans açısının artması ile birlikte NO<sub>x</sub> salınımlarının 10 °KMA avansa kadar azaldığı 15 °KMA avansa ise arttığı görülmüştür. Ön enjeksiyon miktarı ve avansı sabit tutularak yakıt basıncının etkisi incelendiğinde, basınç artışı ile birlikte NO<sub>x</sub> salınımlarının arttığı görülmüştür. Basıncın artması ile yakıtın daha iyi pülverize olması sonucu yakıt, daha küçük damlacıklar halinde yanma odasına püskürtülmüş olur. Bu da yakıtın tutuşma gecikmesini düşürüp ana yanmanın daha erken başlamasını sağlamıştır.

Böylece oluşan yüksek sıcaklık etkisi ile de  $\text{NO}_x$  emisyon salınımlarında artış gözlenmiştir.

Ön enjeksiyon miktarını toplam yakıt oranı %5'i geçtiğinde  $\text{NO}_x$  emisyonları tek enjeksiyonlu yanmadaki seviyenin üstüne çıkmaya başlamıştır.

Ön enjeksiyonlu yanma ile tek enjeksiyonlu yanmayı CO salınımına göre karşılaştırdığımızda, ön enjeksiyonun yapıldığı tüm durumlarda CO emisyonlarının düştüğü gözlenmiştir. Yakıt püskürtme basıncı ve ön enjeksiyon miktarı sabit tutularak ön enjeksiyon avansının etkisi incelendiğinde, avansın artışı ile CO salınımlarında da bir artış olduğunu söyleyebiliriz. Bu durum ön enjeksiyon avansı çok yükseldiği zaman etkisinin bir kısmının ana enjeksiyon fazına kadar ortadan kaldığını göstermektedir.

Püskürtme basıncının artışı ile CO emisyonlarına azalma görülmüştür. Pülverizasyon oranının artışı ile tutuşma gecikmesinin azaltılması sonucu böyle bir etki gözlemlenmiştir. Ön enjeksiyon miktarı arttırıldığında ise CO emisyonlarının da artış eğilimi görülmüştür.

HC emisyonları gözlemlendiğinde; emisyon seviyesinin farklı yakıt basıncı, ön enjeksiyon avansı ve miktarında neredeyse aynı kaldığı görülmüştür. HC emisyonları sadece ön enjeksiyon yapmış olmak ile iyileşmiştir. Test sonuçları, diğer parametrelerin HC salınım miktarına büyük bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

$\text{CO}_2$  emisyonlarını incelediğimizde sabit yakıt basıncı ve ön enjeksiyon miktarında; ön enjeksiyon avansının arttırılması ile birlikte  $\text{CO}_2$  emisyonlarının düştüğü görülmüştür. Bu durum artan ÖYT ile ilişkilendirilebilir.  $\text{CO}_2$  emisyonu, düşük avans değerlerinde artan ÖYT ile doğru orantılı olarak artmıştır. Ayrıca yakıt enjeksiyon basıncının arttırılması ile de  $\text{CO}_2$  emisyonları artmıştır.

İs, eksik yanma ile ortaya çıkan yanmamış karbonların toplanmasıyla oluşan zerreciklerdir. İs oluşumu yanma odasındaki sıcaklığa, oksijen miktarına ve tutuşma gecikmesi zamanına bağlıdır. Yanma sonucunu is miktarına göre değerlendirdiğimizde; is miktarının yakıt basıncının artması ile ciddi anlamda düştüğü görülmüştür. Yakıt basıncının arttırılması ile birlikte yakıtın silindir içerisinde daha iyi pülverize olup damlacık çapları küçüldüğünden is oluşumunu düşürücü etki sağlanmıştır.

Maksimum yanma basıncı değerlerine baktığımızda ise;  $\text{NO}_x$  emisyonun arttığı durumlarda maksimum silindir içi basıncın da arttığı görülmüştür.  $\text{NO}_x$ 'in artışının

yüksek sıcaklıkta gerçekleştiği düşünülürse, maksimum yanma basıncının yükselmesi ile de sıcaklık artışı olacağından bu iki parametre arasında doğrusal bir bağıntı kurulabilir. Diğer parametreler sabit kalması şartıyla maksimum yanma basıncı ön enjeksiyon avansının artışı, ön enjeksiyon miktarının artışı ve yakıt püskürtme basıncının artışı ile artmaktadır.

Motor gücüne bakıldığında ise püskürtme basıncının, ön enjeksiyonda püskürtülen yakıt miktarının ve yakıt basıncının sabit olduğu durumda ön enjeksiyon avansının artışıyla arttığı görülmüştür. Yine diğer tüm parametreler sabit tutulduğunda yakıt enjeksiyon basıncının artırılması ile motor gücü artmaktadır. Benzer şekilde ön enjeksiyon miktarını arttırdığımızda motor gücünün azaldığını gördük. Genel olarak motor gücündeki artış ana yanma öncesi tutuşma gecikmesinin azalmasından, yakıtın daha iyi pülverize olup homojen bir şekilde yanmasından kaynaklanmaktadır. Ancak ön enjeksiyonun yapıldığı tüm varyasyonlarda motor gücü tek enjeksiyonlu yanmadan daha düşük olarak ölçülmüştür.

ÖYT'nin püskürtme basıncının düşürülmesi ile düştüğü görülmüştür. Ön enjeksiyon miktarındaki artış ise ÖYT'nin artmasına sebep olmaktadır. Ön enjeksiyolu yanmanın gerçekleştirildiği bütün durumlarda ÖYT tek enjeksiyolu yanmaya kıyasla yüksektir.

Ön enjeksiyon avansı arttırıldıkça, ÖYT azalarak en düşük seviyesine ulaşmıştır.

-15, -10, -5 ve 0 °KMA püskürtme avanslarında silindir içi basınç ve püskürtme sinyali ile elde edilen anlık basınç ve bu basınçlara karşılık gelen krank açıları MATLAB programında yazılan bir kod ile işlenerek anlık ısı yayını-krank açısı grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerde püskürtme basıncı arttıkça silindir içi basıncın arttığı ve ısı açığa çıkış oranının da arttığı görülmüştür. Ön püskürtme avansının ÜÖN'ye yaklaştırılması silindir içi basınç değerleri azalmıştır. Ön püskürtme avansı ve yakıt basıncı sabit tutulduğunda silindir içi basınçları ön enjeksiyon miktarının artması ile artmıştır.

Isı açığa çıkış eğrileri incelendiğinde; sabit yakıt basıncında ön enjeksiyon miktarının arttırılması ile ısı açığa çıkış oranının düştüğü görülmüştür. Benzer bir şekilde, diğer parametreler sabit kalacak şekilde ön enjeksiyon miktarının arttırılması ile ısı açığa çıkış oranı düşmektedir.

Deney sonuçlarına genel olarak bakıldığında ise doğru bir ön enjeksiyon stratejisi ile NO<sub>x</sub>, CO, THC, is emisyonlarında düşüş sağlanması mümkündür. Bu da egzoz hattına kurulacak emisyon düşürücü sistemlerin yatırım maliyetlerini düşürmede fayda sağlamaktadır. Ön enjeksiyonun bu avantajına rağmen CO<sub>2</sub> emisyonlarında, özgül yakıt tüketiminde artışa sebep olmaktadır, ayrıca motor gücünü de düşürmektedir.



## KAYNAKLAR

---

- [1] Buda, D., Karvembu, R. ve Anand, R., (2018). "Impact of Split Injection Strategy on Combustion, Performance and Emissions Characteristics of Biodizel Fuelled Common Rail Direct Injection Assisted Dizel Engine", *Energy*, 165:577-592.
- [2] Park, S., Kim, H.Y., Shin, D.H., Lee, J.T., (2018). "Effects of Various split Injection Strategies on Combustion and Emissions Characteristics in a Single-Cylinder Dizel Engine", *Applied Thermal Engineering*, 140:422-431.
- [3] Raeie, N., Emami, S., Sadaghiyani, O.K., (2014). "Effects of Injection Timing, Before and After Top Dead Center on the Propulsion and Power in a Dizel Engine", *Propulsion and Power Research*, 3:59-67.
- [4] Sindhu, R., Rao, G.A.P., Murthy, K. M., (2017). "Effective Reduction of NOx Emissions from Dizel Engine Using Split Injections", *Alexandria Engineering Journal*, 57:1379-1392.
- [5] Wamankar, A.K. ve Murugan, S., (2015). "Effect of Injection Timing on a DI Dizel Engine Fuelled with a Synthetic Fuel Blend", *Journal of the Energy Institute*, 88:406-413.
- [6] Lee, J., Jeon, J., Park, J., Bae, C., (2009). "Effect of Multiple Injection Strategies on Emission and Combustion Characteristics in a Single Cylinder Direct-Injection Optical Engine", *Society of Automotive Engineers*, SAE Paper No: 2009-01-1354.
- [7] Abdullah, N.R., Mamat, R., Rounce, P., Tsolakis, A., Wyszynski, M.L., Xu, H.M., (2009). "Effect of Injection Pressure with Split Injection in a V6 Dizel Engine", *Society of Automotive Engineers*, SAE Paper No: 2009-24-0049.
- [8] Diez, A. ve Zhao, H., (2010). "Investigation of Split Injection in a Single Cylinder Optical Dizel Engine", *Society of Automotive Engineers*, SAE Paper No: 2010-01-0605.
- [9] Zhang, J., Zhang, F., Tian, G., Xu, H., Li, Y., Daniel, R., (2010). "The Particle Emission Characteristics of a Light Duty Dizel Engine by Using Different Pilot Injections", *Society of Automotive Engineers*, SAE Paper No: 2010-01-1959.
- [10] Cheng, X., Chen, L., Yan, F., Hong, G., Yin, Y., Liu, H., (2013). "Investigations of Split Injection Strategies for the Improvement of Combustion and Soot Emissions Characteristics Based On the Two-Color Method in a Heavy-Duty Dizel Engine", *Society of Automotive Engineers*, SAE Paper No: 2013-01-2523.

- [11] Cha, J. Yang, S.Y., Naser, N., Ichim, A.I., Chung, S.H., (2015). "High Pressure and Split Injection Strategies for Fuel Efficiency and Emissions in DI Dizel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2015-01-1823.
- [12] Carlucci, P., Ficarella, A., Laforgai, D., (2005). "Effects on Combustion and Emissions of Early and Pilot Fuel Injections in Dizel Engines", International Journal of Engine Research, 6:43-60.
- [13] Hountalas, D.T., Kouremenos, D.A., Binder, K.B., Schwarz. V. Mavropoulos, G.C., (2003). "Effect of Injection Pressure on the Performance and Exhaust Emissions of a Heavy Duty DI Dizel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2003-01-0340.
- [14] Karra, P. ve Kong, S., (2008). "Dizel Emission Characteristics Using High Injection Pressure with Converging Nozzles in a Medium-Duty Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2008-01-1085.
- [15] Vanegas, A., Won, H., Felsch, C., Gauding, M., Peters, N., (2008). "Experimental Investigation of the Effect of Multiple Injections on Pollutant Formation in a Common-Rail DI Dizel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2008-01-1191.
- [16] Baumgarten, C., (2006). Mixture Formation in Internal Combustion Engines (Heat and Mass Transfer) Springer, Munich.
- [17] Barış, H., (2007). Minimum Yakıt Kriterlerine Göre Bir Dizel Motorun Kalibrasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Hasan YILMAZ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 04.06.1986 – Bulgaristan  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : hasanyilm@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Mak. Müh.	YTÜ	2008
Lise	Fen Bilimleri	Orhangazi Anadolu Lisesi	2004

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014 – ...	Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.	Motor Test Merkezi Ekip Lideri
2008 - 2014	Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.	Motor Test Mühendisi