

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENJEKTÖR PARAMETRELERİNİN MOTOR EGZOZ
EMİSYONLARINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Evren ERDÖL

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Otomotiv

HAZİRAN 2007

**ENJEKTÖR PARAMETRELERİNİN MOTOR EGZOZ
EMİSYONLARINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh.Evren ERDÖL

503041721

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Metin ERGENEMAN
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Cem SORUŞBAY (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Orhan DENİZ (Y.T.Ü.)**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Öncelikle çalışma süresince desteğini esirgemeyen ve bu projenin ortaya çıkmasında büyük emeği olan başta tez danışmanım Prof. Dr. Metin Ergeneman'a, Prof. Dr. Cem Soruşbay'a, Prof. Dr. Ertuğrul Arslan'a, laboratuvar çalışmalarında her türlü yardımı yapan Dr. Hikmet Aslan'a, Makine Müh. Mustafa Kavitaş'a ve Faruk Arslan'a; başta Sn. Efkan Şişman olmak üzere bizden desteğini esirgemeyen Bosch San. ve Tic A.Ş'ye, Ford Otosan ve değerli çalışanları Göktürk Demiröz ve Göktan Kurnaz'a, projenin her aşamasında yanımda olup desteğini esirgemeyen Makine Mühendisi Barış Doğru'ya, gösterdiği işbirliği nedeniyle Makine Mühendisi Özcan Gül'e ve Y. Makine Mühendisi Süleyman Ejder'e; çalışmanın gerçekleşmesindeki maddi ve manevi katkılarından ötürü Ahmet Erdöl, Volkan Barutçu, Bilge Akgün Ürek ve Gürkan Çoban'a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. DİZEL MOTORLARINDA PÜSKÜRTME OLAYININ İNCELENMESİ. 3	
2.1 Püskürtme.....	3
2.2 Yanma	4
2.2.1 Tutuşma Gecikmesi.....	5
2.2.2 Ani Yanma	5
2.2.3 Kontrollü Yanma.....	7
2.3 Common Rail Püskürtme Sistemi	7
2.3.1 Common Rail Sisteminin Tanımı	7
2.3.2 Common Rail Sisteminin Çalışması	8
2.3.2.1 Düşük Basınç Devresi Elemanları	9
2.3.2.2 Yüksek Basınç Devresi Elemanları.....	11
2.3.2.3 Geri Akış	19
2.3.2.4 Sensörler.....	20
2.3.2.5 Common Rail Sisteminin Avantajları	21
2.4 Yakıt Enjeksiyon Sistemi Üreticilerindeki Gelişmeler	22
3. ENJEKTÖR.....	24
3.1 Delikli Tip Enjektörler	24
3.2 Çubuklu Tip Enjektörler	25
3.3 Enjektör Geometrisinin Demet Şekline Etkisi	27
3.3.1 Enjektör Meme Delik Sayısının Etkisi.....	27

3.3.2	Enjektör Meme Delik Çapının Etkisi.....	27
3.3.3	Enjektör Meme Kanal Uzunluğunun Etkisi	28
3.3.4	Meme Kanalı Giriş Yuvarlaklığı.....	28
3.3.5	Meme Kanal Yuvarlaklığı.....	28
4.	EGZOZ EMİSYONLARI	30
4.1	Karbonmonoksit (CO).....	30
4.1.1	Karbonmonoksitin Tanımı	30
4.1.2	Karbonmonoksit Emisyonları	31
4.2	Hidrokarbonlar (HC).....	32
4.2.1	Hidrokarbonların Tanımı	32
4.2.2	Hidrokarbon Emisyonları.....	32
4.3	Azotoksitler (NO _x)	36
4.3.1	Azotoksitlerin Tanımı	36
4.3.2	NO _x Emisyonları	37
4.4	İs ve partiküller	40
4.4.1	İs ve partiküllerin tanımı	40
4.4.2	Partikül Emisyonları	41
4.5	Dizel Motor Tasarım ve İşletme Parametrelerinin Emisyonlara Etkileri... 48	
4.5.1	Tasarım Parametrelerinin Etkileri	48
4.5.2	Enjektör Memesi	48
4.5.3	Yanma Odası Biçimi	49
4.5.4	Manifold Tasarımı.....	51
4.5.5	Sıkıştırma Oranı	51
4.5.6	Püskürtme Açısı	53
4.5.7	Püskürtme Avansı	53
4.5.8	Emme Havası Giriş Basıncı ve Sıcaklığı	54
4.5.9	Püskürtme Basıncı.....	55

4.5.10	Aşırı Doldurma	55
4.5.11	Hava Hareketleri	56
4.5.12	Yakıt Özelliklerinin Emisyonlara Etkileri	56
4.5.12.1	Setan Sayısı	57
4.5.12.2	Yakıt Yoğunluğu	59
4.5.12.3	Aromatik Yüzdesi	59
4.5.12.4	Kükürt Oranının Etkisi	59
4.6	Dizel Motorlarında Egzoz Emisyonu Kontrol Yöntemleri	60
4.6.1	HC ve CO Emisyonlarının Kontrolü	60
4.6.2	NO _x Emisyonlarının Kontrolü	62
4.6.2.1	Yakıt Püskürtme Sistemi Özellikleri	62
4.6.2.2	Egzoz Gazları Resürkilasyonu (EGR)	62
4.6.2.3	Yakıt Kalitesi	67
4.6.2.4	Oksijen Konsantrasyonu	68
4.6.3	Partikül Emisyonlarının Kontrolü	68
4.6.3.1	Dizel Partikül Filtreleri	69
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	73
5.1	Dizel Motorlarında Enjektör Meme Geometrisinin ve Püskürtme Basıncının Emisyonlara ve Performansa Etkisi	73
5.1.1	Deney Düzeneği	75
5.1.2	%75 yük durumu	77
5.1.2.1	Püskürtme Basıncının Etkisi	77
5.1.2.2	Meme Geometrisinin Etkisi	80
5.1.2.3	Koni Açısının Etkisi	83
5.1.3	%25 Yük Durumu	84
5.1.3.1	Püskürtme Basıncının Etkisi	84
5.1.3.2	Meme Geometrisi	85
5.1.4	Sonuçlar	85
5.1.4.1	%75 Yük Durumu	85
5.1.4.2	%25 Yük Durumu	86
5.2	Enjektör Meme Geometrisinin Common Rail Dizel Yakıt Demetine Etkisi ..	86
5.2.1	Çift Yaylı Mekanik Pompalı Enjektörler	87
5.2.1.1	Demet Modeli	87
5.2.1.2	Nüfuz Derinliği	88
5.2.1.3	Demet Açısı	89
5.2.2	CR Elektro Enjektörler	90
5.2.2.1	Demet Modeli	90

5.2.2.2 Nüfuz Derinliği	93
5.2.2.3 Demet Açısı.....	96
5.2.3 Sonuçlar.....	96
6. DENEYSEL YÖNTEMLERLE FARKLI GEOMETRİYE SAHİP ENJEKTÖR MEMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	98
6.1 Deneyin amacı.....	98
6.2 Deney düzeneği	98
6.3 Deney yapılış şekli	104
6.4 Deney Verileri.....	107
6.4.1 Isı Ölçümleri.....	107
6.4.1.1 Delik Çapının Isı Emisyonlarına Etkisi.....	108
6.4.1.2 Meme Kanal Konikliğinin (K) Isı Emisyonlarına Etkisi	109
6.4.1.3 Meme Kanal Uzunluğunun Isı Emisyonlarına Etkisi.....	110
6.4.1.4 Delik Sayısının Isı Emisyonlarına Etkisi	111
6.4.2 NO _x Ölçümleri	111
6.5 Sonuçlar ve öneriler	112
KAYNAKLAR	114
EK_A Dünyadaki Egzoz Emisyonu Regülasyonları	115
ÖZGEÇMİŞ.....	118

KISALTMALAR

ÜÖN	: Üst ölü nokta
AÖN	: Alt ölü nokta
max	: Maksimum
min	: Minimum
CR	: Common–Rail
ECU	: Elektronik kontrol ünitesi
UIS	: Birim enjektör sistemi
UPS	: Birim pompa sistemi
BG	: Beygir gücü
HP	: Beygir gücü
BSFC	: Özgöl yakıt tüketimi
ATDC	: Üst ölü noktadan sonra
BTDC	: Üst ölü noktadan önce
dB	: Desibel ses birimi
TDC	: Üst ölü nokta
ppm	: Milyonda parçacık sayısı
PS	: Beygir gücü (Pferde Starke)
DPF	: Dizel parçacık filtresi
CRT	: Sürekli rejenerasyon teknolojisi
TG	: Tutuşma gecikmesi
KMA	: Krank mili açısı
EGR	: Egzoz gazı resirkülasyonu
RP	: Rail Basıncı
MAK	: Maksimum atmosfer konsantrasyonu
MİK	: Minimum işyeri konsantrasyonu
DTK	: Doğrudan tehlike sınırı
HFK	: Hava fazlalık katsayısı
PM	: Partikül madde

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Kirletici gazların sağlık açısından tehlike sınırları.....	30
Tablo 4.2. Partikül emisyonlarının bileşenleri.....	41
Tablo 4.3. Dizel motorlarından çıkan katı, sıvı ve gaz emisyonları.....	46
Tablo 4.4. Enjektör meme tasarımının yanma karakteristiklerine etkisi.....	49
Tablo 4.5. Motorun filtreli ve filtresiz durumlarında elde edilen ortalama genel karakteristik değerler.....	72
Tablo 5.1 Deney Motorunun özellikleri.....	75
Tablo 5.2 Enjektörlerin teknik özellikleri.....	76
Tablo 6.1 Deney motoru teknik özellikleri.....	99
Tablo 6.2 Deney enjektörlerinin yapısal özellikleri.....	107
Tablo A.1 Amerika ve Kanada ağır taşıtlar dizel emisyon sınırlamaları.....	115
Tablo A.2 Kaliforniya eyaleti ağır taşıtlar emisyon sınırlamaları.....	115
Tablo A.3 Avrupa Birliği Emisyon regülasyonları.....	116
Tablo A.4 Japonya Ağır taşıtlar emisyon regülasyonları.....	117

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1: Bölünmüş yanma odalı ve direk püskürtmeli dizel motorlarında püskürtme...	3
Şekil 2.2: Dizel motorlarında yanma prosesi.....	5
Şekil 2.3: Direk püskürtmeli bir dizel motorunda yakıtın püskürtülmesi	6
Şekil 2.4: Dizel motorunda krank mili açısına bağlı olarak silindir içi basıncı değişimi..	6
Şekil 2.5: Common rail sistemi devre elemanları.....	8
Şekil 2.6: CRS alçak basınç devresi.....	9
Şekil 2.7: Besleme pompası kesiti.....	10
Şekil 2.8: Besleme pompası iç elemanları	10
Şekil 2.9: Yüksek basınç devresi.....	12
Şekil 2.10: Yüksek basınç pompası iç elemanları	12
Şekil 2.11: Yüksek basınç pompası.....	13
Şekil 2.12: Yüksek Basınç Pompası Kesiti	14
Şekil 2.13: Yakıt Basınç Ayar Supabı Kesiti.....	14
Şekil 2.14: Yakıt Basınç Ayar Supabı	15
Şekil 2.15: Ortak Hat	16
Şekil 2.16: Enjektörün Yapısı	16
Şekil 2.17: Enjektör Meme Yapısı	18
Şekil 2.18: Geri akış devresi elemanları	19
Şekil 2.19: Isı Eşanjörü Kesiti	19
Şekil 2.20: Sensörler.....	20
Şekil 2.21: Dünya’da Üretilen Püskürtme Sistemlerinin Yıllara Göre Dağılımı	22
Şekil 2.22: Bosch Firması Tarafından Yıllara Göre Üretilen CR ve Birim Enjektör Adetleri.....	23
Şekil 3.1: Enjektör Memesinin Yapısı	24
Şekil 3.2: Delikli Tip Enjektörün Yapısı	25
Şekil 3.3: Çubuklu Tip Enjektörün Yapısı	26
Şekil 3.4: Delikli ve Çubuklu Tip Enjektörlerle Püskürtme Yapıldığı Halde Demet Yapısı.....	26
Şekil 3.5: Çok ve Tek Delikli Enjektörlerle Püskürtme Yapıldığı Halde Demet Yapısı..	27
Şekil 3.6: Delik çapının demet açısına etkisi.....	27
Şekil 3.7: L/d oranının Sauter ortalama çapına etkisi.....	28
Şekil 3.8: Meme Kanal Konikliği.....	29
Şekil 3.9: Kanal konikliğinin demet nüfuz derinliğine etkisi.....	29
Şekil 3.10: Kanal konikliğinin demet nüfuz derinliğine ve demet açısına etkisi.....	29
Şekil 4.1: Tutuşma Gecikmesi Peryodunda Püskürtülen Yakıtın HC Mekanizmasının Şematik Görünüşü	34

Şekil 4.2:	Yanma Sırasında Püskürtülen Yakıtın HC Oluşum Mekanizması Şematik Resmi	35
Şekil 4.3:	HC Emisyonlarının Hava Fazlalık Katsayısı İle Değişimi.....	36
Şekil 4.4:	Emisyonların Krank Açısına Göre Değişimi	38
Şekil 4.5:	Eşdeğerlik Oranına Bağlı Olarak NO ve NO _x Emisyonlarının Değişimi	39
Şekil 4.6:	NO _x ve Partikül Emisyonları Arasındaki Etkileşim.....	40
Şekil 4.7:	Egzoz Partikülünün Kimyasal Yapısı	42
Şekil 4.8:	Karbon Partikülünün Yapısı	43
Şekil 4.9:	Silindir İçerisindeki Partikül Oluşumunun Şematik Gösterilişi	43
Şekil 4.10:	Türbülans Yayılmalı Alevde Kurumun Oluşumu ve Oksidasyonu	44
Şekil 4.11:	Partikül Bileşimindeki Elementlerin Ağırlık Oranları	45
Şekil 4.12:	Partikül Çekirdeklerinin Katılaşma Süreci	47
Şekil 4.13:	Egzoz Gazının Silindirden Atmosfere Kadar Almış Olduğu Yolda Partikül Oluşumu.....	47
Şekil 4.14:	Direk Püskürtmeli Dizel Motorunda Egzoz Gazı Kirletici Konsantrasyonları	48
Şekil 4.15:	Direk Püskürtmeli ve Ön Yanma Odalı Dizel Motorlarının Kesit Resimleri ..	50
Şekil 4.16:	Sıkıştırma Oranının Duman Emisyonlarına Etkisi.....	52
Şekil 4.17:	Sıkıştırma Oranının NO Emisyonlarına Etkisi	53
Şekil 4.18:	Püskürtme Avansının NO _x ve Yakıt Tüketimine Etkisi	54
Şekil 4.19:	Püskürtme Basıncına Bağlı Olarak Damlacık Çapı Değişimi	55
Şekil 4.20:	Setan Sayısının Tutuşma Gecikmesine Etkisi	58
Şekil 4.21:	Setan Sayısının Partikül Emisyonlarına Etkisi	58
Şekil 4.22:	CO ve HC Emisyonlarının Egzoz Gazı Sıcaklığına Göre Değişimi	61
Şekil 4.23:	Oksidasyon Katalizörü	61
Şekil 4.24:	EGR Şematik Görünüşü	63
Şekil 4.25:	EGR Oranına Bağlı Olarak NO _x Değişimi	64
Şekil 4.26:	Değişik EGR Oranlarının Motor Performansına Etkisi	65
Şekil 4.27:	Değişik EGR Oranlarının Ortalama Efektif Basınca Etkisi.....	65
Şekil 4.28:	EGR' nin Özgül Yakıt Tüketimine Etkisi.....	66
Şekil 4.29:	EGR' nin Duman Emisyonlarına Etkisi	66
Şekil 4.30:	EGR' nin NO Emisyonlarına Etkisi	67
Şekil 4.31:	Setan Sayısının NO Emisyonlarına Etkisi	67
Şekil 4.32:	NO _x Emisyonu Kontrol Yöntemlerinin Etkisi	69
Şekil 4.33:	Elektrikli Isıtıcı Tip İlk DPF	70
Şekil 4.34:	CRT partikül filtresi	71
Şekil 5.1:	Püskürtme basıncı ve debinin KMA' ya göre değişimi	77
Şekil 5.2:	Farklı meme şekillerinde püskürtme basınçlarının NO _x ve partikül emisyonlarına etkisi	78
Şekil 5.3:	Farklı püskürtme basınçlarının NO _x emisyonu sabit tutulduğu durumda farklı geometrilere sahip memelerde verdiği fren özgül yakıt tüketimi ve partikül emisyonları	79
Şekil 5.4:	125° koni açısına sahip enjektör memesinde sabit 4g/hph NO _x miktarı için silindir basıncı, ısı çıkışı, debi ve püskürtme basınçları	79
Şekil 5.5:	Yuvarlatılmış kenarlı memeler için basınç, debi ve ısı çıkışının KMA ile değişimi.....	80

Şekil 5.6:	Yuvarlatılmış (R) ve keskin kenarlı (S) memelerin farklı püskürtme basınçlarında verdiği debiler.....	81
Şekil 5.7:	NO _x emisyonlarının 4g/hph sabit tutulduğu durumda partikül miktarının düzeltilmiş ortalama püskürtme hızı ile değişimi	81
Şekil 5.8:	Aynı püskürtme basıncı için yuvarlak ve keskin kenarlı memelerin partikül ve NO _x emisyonlarının karşılaştırılması	82
Şekil 5.9:	Koni açısının NO _x ve partikül emisyonlarına etkisi.....	83
Şekil 5.10:	Değişik püskürtme basınçlarında 125° koni açısına sahip keskin kenarlı memenin debisinin KMA ile değişimi.....	84
Şekil 5.11:	NO _x ve partikül emisyonlarının farklı püskürtme basınçları ile değişimi	85
Şekil 5.12:	125° koni açısına sahip keskin ve yuvarlatılmış kenarlı memelerin debilerinin KMA ile değişimi	85
Şekil 5.13:	VCO ve keseli meme kesit resmi	87
Şekil 5.14:	Memenin her bir deliğinden çıkan demet şekilleri	88
Şekil 5.15:	VCO memenin her bir deliğinden çıkan demetlerin nüfuz derinlikleri.....	88
Şekil 5.16:	Farklı basınçtaki ortamlara püskürtme yapılması durumunda demet açısının değişimi.....	89
Şekil 5.17:	Sivrilik oranı.....	90
Şekil 5.18:	VCO meme ile püskürtmede ortamdaki gazın yoğunluğu ile demetin değişimi.....	91
Şekil 5.19:	Keseli meme ile püskürtmede ortamdaki gazın yoğunluğu ile demetin değişimi.....	92
Şekil 5.20:	Debiye göre ortalama püskürtme hızı.....	93
Şekil 5.21:	Farklı püskürtme basınçlarının demet nüfuz derinliğine etkisi.....	93
Şekil 5.22:	Demet nüfuz derinliğinin püskürtme basıncı ile değişimi.....	94
Şekil 5.23:	Püskürtme başlangıç anındaki demet nüfuz derinliği.....	95
Şekil 5.24:	Keseli ve VCO memelerin demet nüfuz derinliklerinin karşılaştırılması	95
Şekil 5.25:	K oranının demet nüfuz derinliğine etkisi	95
Şekil 5.26:	K oranının demet açısına etkisi.....	96
Şekil 6.1:	Deney motoru.....	98
Şekil 6.2:	Motor karakteristikleri.....	100
Şekil 6.3:	Schenck marka elektromanyetik fren.....	100
Şekil 6.4:	Elektromanyetik fren kumanda paneli.....	101
Şekil 6.5:	Eşanjör.....	101
Şekil 6.6:	Egzoz numunesi toplama borusu.....	102
Şekil 6.7:	Kızdırıcılı hatlı HC analizörü.....	102
Şekil 6.8:	NO, CO ve CO ₂ analizörleri.....	103
Şekil 6.9:	Partikül ölçüm cihazı.....	103
Şekil 6.10:	Enjektörler.....	104
Şekil 6.11:	Enjektör memesi, bağlantı somunu, gövde.....	105
Şekil 6.12:	Filtrelerin enjektörlerden sökülmesi.....	105
Şekil 6.13:	Enjektör kilit mekanizmasının sökülmesi.....	106
Şekil 6.14:	Enjektör tepe somunun sökülmesi.....	106
Şekil 6.15:	İs ölçüm sonuçları.....	107
Şekil 6.16:	Delik çapının is emisyonlarına etkisi.....	108
Şekil 6.17:	Meme kanal konikliğinin is emisyonlarına etkisi.....	109

Şekil 6.18	Meme kanal uzunluğunun is emisyonlarına etkisi.....	110
Şekil 6.19	Delik çapı ve sayısının is emisyonlarına etkisi.....	111
Şekil 6.20	NO _x emisyonları.....	112

SEMBOL LİSTESİ

m³	: Metreküp
%	: Yüzde oranı
CO	: Karbonmonoksit
SO₂	: Kükürtdioksit
NO_x	: Azotoksitler
HC	: Hidrokarbon
°C	: Santigrad derece
dp/dt	: Basınç yükselme hızı
mm	: Milimetre
Nm	: Newtonmetre
d/d	: Dakikadaki devir sayısı
MPa	: Megapaskal
H₂SO₄	: Sülfürik Asit
SO₃	: Kükürttrioksit
H₂O	: Su buharı
kW	: Kilowatt
g / kWh	: Gram / Kilowatt saat
atm	: Atmosfer basıncı
mm Hg	: Milimetreciva
P_{me}	: Ortalama efektif basınç
P_{max}	: Maksimum basınç
K	: Kelvin
t	: Zaman
ρ	: Yoğunluk
N_i	: İndike güç
N_e	: Efektif güç
kcal	: Kilokalori
Be	: Özgül yakıt tüketimi
η	: Verim

η_m	: Mekanik verim
D	: Damlacık çapı
v	: Havanın hızı
μ_e	: Dinamik viskozite
L	: Enjektör memesi kanal uzunluğu
d	: Enjektör memesi delik çapı
α	: Demet açısı / Enjektör meme koni açısı
CD	: Deşarj Katsayısı
ρ_L	: Sıvı yoğunluğu
ρ_G	: Gaz yoğunluğu
ms	: Milisaniye
μs	: Mikrosaniye
rpm	: Dakikadaki devir sayısı

ÖZET

Püskürtme sisteminin en önemli parçalarından biri de enjektörlerdir. Enjektörlerde yapısal veya işletme şartlarında değişikliklere gidilerek egzoz emisyonlarında farklı değerlere ulaşılabilir. Bu tezde enjektörün yapısal farklılıklarının egzoz emisyonlarına etkisi araştırılacaktır. Enjektörlerin yapısal özelliklerinden bahsedilirken, enjektör meme delik sayısı, meme delik çapı, koni açısı, iğne ile gövde arasındaki tolerans, püskürtme kanalı başlangıcının keskin veya yuvarlatılmış olması, püskürtme kanalının pürüzlülüğü gibi özellikler kastedilmektedir. Bu yapısal özelliklerin farklılıklar gösterdiği enjektörlerle yapılmış olan deneylerin sonuçları irdelenerek, sonuçlar ve sebepleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki emisyonlar enjektör meme geometrisinden büyük oranda etkilenmektedir. Meme geometrisi yakıt demetini ve atomizasyonu şekillendirmekte, sonuçta yanma karakteristiği etkilenmektedir. Daha homojen ve verimli bir yanma sonucu düşük is emisyonları elde edilmektedir. Meme geometrisinde yapılan değişikliklerle yanmanın optimizasyonu sağlanmaya çalışılmaktadır. Enjektör memelerinin testlerinde Ford Ecotorq ağır hizmet taşıtı kullanılmış, motorun egzoz borusundan alınan numuneler Horiba marka egzoz gazı analizörleri vasıtası ile ölçüme tabi tutulmuştur. Testler her set enjektör memesi için dört farklı motor devir sayısında gerçekleştirilmiş, elde edilen değerler akışkanlar mekaniği bilimiyle de ilişkilendirilerek sebepleri irdelenmiştir. Keskin kenarlı giriş kanalına sahip enjektör memelerinin girişteki ani kısılma ile birlikte meme kanalının içerisinde türbülansa düştüğü ve meme cidarlarından akışın ayrıldığı tahmin edilmektedir. bunun sonucunda meme kanalında kavitasyon sonucu aşınmalar oluşabilir. Meme giriş kanalının yuvarlatılması durumunda akışın daha düzenli olduğu ve debinin arttığı tahmin edilmektedir. Delik çaplarının düşürülmesi pülvarizasyonu artırır ve dolayısıyla atomizasyon ve yanma da daha iyi sonuçlar alınmasını sağlar. Püskürtme basıncın arttırmak da damlacık çapını küçültmek amacıyla yapılabilecek bir işlem olabilmektedir; fakat maliyeti arttırması ve malzeme mukavemeti kısıtlamaları nedeniyle püskürtme basıncı fazla arttırılamamaktadır. K sivrilik oranının da demet oluşumuna ve dolayısıyla emisyonlara önemli ölçüde etki ettiği görülmüştür.

SUMMARY

The main part of an injection system is injectors. By changing the nozzle geometry and engine injections conditions we can decrease diesel emissions. This study was performed to show the effects of injections pressure and nozzle geometry on diesel emissions. The nozzle geometry means that nozzle hole number, nozzle hole diameter, nozzle hole inlet conditions (sharp or rounded), cone angle and the K ratio. As the results show the nozzle geometry is very important to determine the emissions. Nozzle geometry affect to the shape of the fuel spray, and to the combustion period. Nozzle hole diameter determine the diameter of fuel droplets. The smaller droplets size is better for the pulverization and more effective combustion process. Tests were conducted on a fully instrumented Ford Ecotorq heavy duty diesel truck engine. The different injector nozzles were provided by Bosch which is an important injector and fuel pump producer. To test the engine a 230kW electromagnetic Schenck dynamometer were used. The emissions analyzers are Horiba. The engine was tested at four different engine speed for all the nozzle set. All the analyzer were calibrated before the emissions measure. The results are analyzed to reach the cause. So small nozzle hole diameter has a better atomization and combustion period. The sharp edge nozzles has a small discharge coefficient so small injection rate. To increase the rate, it must increase the injection pressure. Also sharp edge nozzle can be damaged because of the cavitation. The rounded edge nozzle has more regular fuel flow. Its discharge coefficient is higher than the sharp edges nozzles. So it has same rate of injection at smaller injection pressure. High level injection pressure increase costs and is limited by the strength of the material.. The K ratio is a parameter to determine the spray angle and combustion too.

1. GİRİŞ

İnsanlığa hizmet etme, insanlara daha iyi ürünler sunabilme amacıyla sürdürülen teknolojik çalışmalar, geçmiş dönemlerde doğa bilincinin yeterince gelişmemiş olması nedeniyle, hem kaynak israfına hem de doğal dengenin bundan olumsuz yönde etkilenmesine yol açmıştır. Sanayileşme aşamasında ihmal edilen doğal dengenin korunması konusu, günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan bir çok ülkenin üzerinde titizlikle durduğu, ciddi bir konu haline gelmiştir.

Havanın ve toprağın bileşimini değiştiren her türlü etken kirlilik olarak tanımlanmaktadır. Hava kirliliği havayı oluşturan maddelerin miktarlarının değişimi ve bu yapıya is, duman, toz ve atomize haldeki kimyasal maddelerin girmesidir. Bu kirleticiler, insan sağlığını bozucu, hayvan, bitki ve eşyalara zarar verici özelliktedir.

Endüstriyel gelişme ile birlikte, şehirlerin büyümesi ve motorlu taşıtların hızla çoğalması sonucu ortaya çıkan kirlenme, doğal kirlenmenin çok üzerinde olmaktadır. Hızlı nüfus artışı, buna paralel olarak büyük şehirlerde nüfus yoğunlaşması, şehirleşmede uygun olmayan arazilerin seçilmesi, motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirliliğin giderek artan boyutlarda insan sağlığını tehdit eder hale gelmesine sebep olmuştur. Yakıtların uygun olmayan koşullarda yakılması, birçok kimyasal maddenin üretimi, buharlaşması ve benzeri işlemler sırasında is, toz ve havada asılı kalan kurum partikülleri ve partikül içerisinde kanserojen etkiye sahip hidrokarbonlar havaya geçerek çevreyi kirletir. Hava kirliliği modern hayatın getirdiği en önemli problemlerden biri olup, esas kaynağı yanmadır. Dünyada kullanılan enerjinin %30'u akarsu ve barajlardan geri kalan %70'lik bölümü ise kömür, petrol, gaz veya bunların türevlerinden elde edilmektedir.

Kirlenmenin başlıca kaynaklarından birisi de motorlu taşıtlardır. Motorlu taşıtların egzozlarından kaynaklanan hava ve çevre kirliliği son yıllarda en önemli problemlerden birisi olarak gündemdeki yerini korumaktadır. Çağın gereği olarak artan tüketim, enerji ve ulaşım ihtiyaçları ile birlikte bu problem daha da artmaktadır.

Motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticilerin en önemlileri azot oksitler (NO_x), karbonmonoksit (CO), hidrokarbonlar (HC) ve partiküller olarak sıralanabilir. .çevre ve insan sağlığına zararlı olan bu kirleticiler egzoz gazlarının hacimsel olarak %1'ini oluşturmakta olup motorun çalışma şartlarına bağlı olarak değişik davranışlar gösterebilirler.

Egzoz emisyonlarının toksin niteliği yanında atmosferdeki ömrünün uzun süreli olması, fotokimyasal ve azot yağmurlarına sebep oluşu ve ayrıca mevsim koşullarına bağlı olmaksızın sürekli olarak üretilmesi bu emisyonları diğer emisyon kaynaklarına göre daha önemli kılmaktadır.

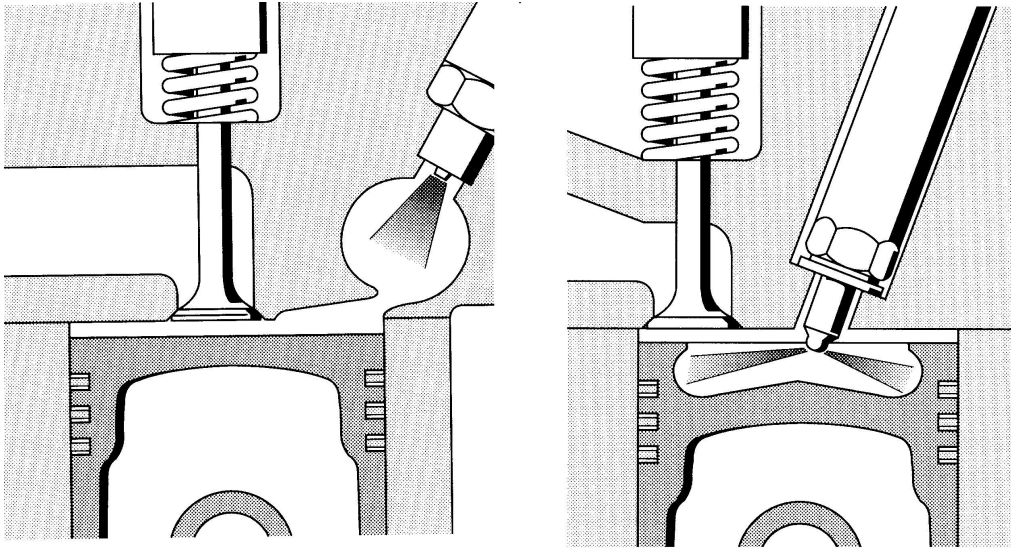
Dizel motorlarında benzin motorlarından farklı olarak havaya karışan büyük miktardaki partikül emisyonları insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Günümüzde partikül emisyonlarının büyük miktarda atmosfere karıştığı ve önlem alınmazsa çevre sağlığı için ciddi bir tehdit olacağı bilinmektedir. Dizel motorlarındaki yanma koşullarının iyileştirilmesi ve egzoz sisteminde kullanılan bazı emisyon azaltma teknikleri ile CO, HC, NO_x ve partikül emisyonları önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Bu önlemlerin bir kısmı işletme şartlarına yönelik olmakla birlikte, bir kısmı da konstrüktif değişikliklere gidilerek alınmaktadır. Bu tezde amaçlanan dizel motorlarının yakıt püskürtme sisteminin en önemli elemanlarından olan enjektörün konstrüktif özelliklerinin egzoz emisyonlarına olan etkisini gözlemlemektir. BOSCH firmasının desteği ile bu firmadan temin edilen farklı enjektör meme delik sayısı, çapı, kanal geometrisi gibi özelliklere sahip enjektörler, Ford firmasından sağlanan bir kamyon motoru üzerinde deneye tabi tutulacak ve yapısal özelliklerin emisyonları nasıl değiştirdiği ve bunun nedenlerinin araştırılacaktır.

2. DİZEL MOTORLARINDA PÜSKÜRTME OLAYININ İNCELENMESİ

2.1 Püskürtme

Dizel motorlarında, motorun dönme sayısı ve yük durumuna göre miktarı belirlenen yakıt, püskürtme pompası tarafından, sıkıştırma zamanının sonlarına doğru, enjektöre gönderilerek yanma odası içerisine püskürtülmektedir. Böylece emme zamanında silindir içerisine giren hava ile püskürtülen yakıtın karışımı silindir içerisinde sağlanmaktadır. Yakıtın püskürtülmesindeki amaç, küçük damlacıklara ayrılarak hava ile temas eden yüzeyinin artırılmasıdır. Yakıtın atomizasyonu sonucu yanmanın kontrollü olarak ve kısa sürede gerçekleşmesi sağlanır.



Şekil 2.1: Bölünmüş yanma odalı ve direk püskürtmeli dizel motorlarında püskürtme

Emme zamanı boyunca yanma odasına emilen havanın sıkıştırma zamanı sonunda basıncı 3- 5 MPa ve sıcaklığı 900 – 1200 K değerlerine ulaşmaktadır. Böylece sıkıştırma zamanı sonlarına doğru bu ortam içerisine püskürtülen yakıt kendi kendine tutuşarak yanar. Karışımın oluşturulması, dizel motorlarında, yakıtın yanma odasına püskürtülmesi ile başlar; ancak püskürtülen yakıt kütlesinin miktarı ve püskürtme zamanlaması, püskürtme kanununa bağlı olarak püskürtme sisteminin bütünü tarafından belirlenmektedir. Bu bakımdan, motordan istenilen performansın alınabilmesi için püskürtme sisteminin bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir:

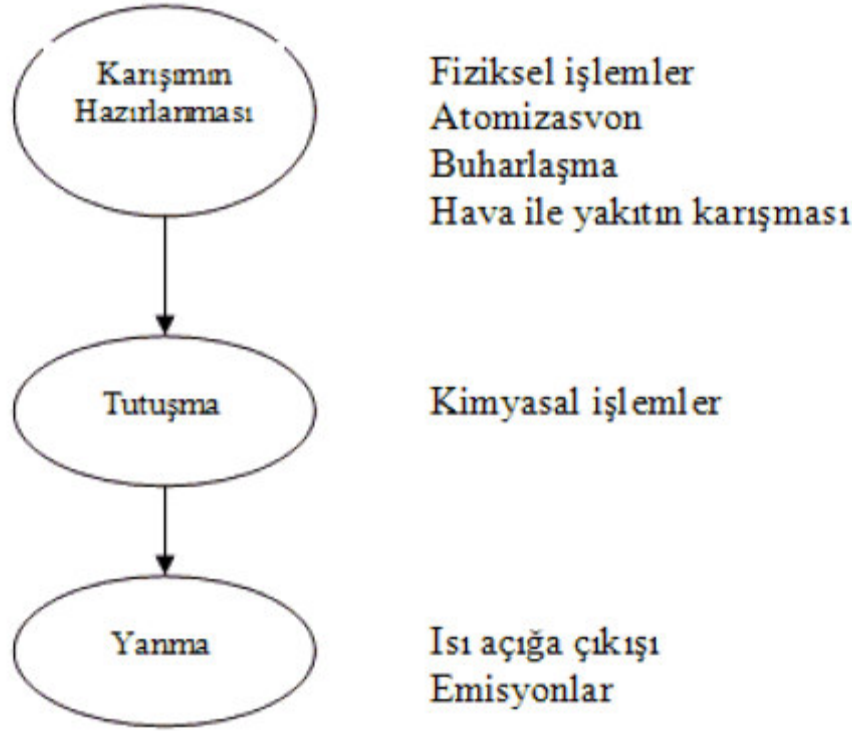
- Püskürtme sistemi motorun yük durumuna göre, çevrim başına yanma odasına gönderilen yakıt miktarını hassas olarak ayarlayabilmelidir,
- Yakıt püskürtme işlemi gereken zamanda başlatılmalı, birim zamanda püskürtülen yakıt miktarı ve toplam püskürtme süresi hassas olarak ayarlanabilmelidir,
- Yakıtın parçalanması ve dağılımı yanma odası geometrisine uyum sağlayacak şekilde oluşturulmalıdır,
- Motorun düşük dönme sayılarında yanma stabilitesinin bozulmasına ve yüksek dönme sayılarında da art püskürtme olayına izin verilmemelidir,
- Karışım oluşturulması olayının çok silindirli motorlarda kararlı ve düzgün bir şekilde gerçekleşmesi için, püskürtme sistemi elemanlarında hidrodinamik benzerlik bulunmalıdır.

Püskürtme olayının süresi ve püskürtülen yakıt miktarının zamana göre değişimi, karışım oluşturma yöntemi ve yanma odası şekline bağlı olarak saptanmaktadır. Ancak genelde amaç, yanma veriminin en yüksek düzeyde ve egzoz gazları içerisindeki is miktarının da en düşük düzeyde olabilmesi için yanma odasına gönderilen yakıtın tümünün yakılabilmesidir. Bu da farklı motorlarda, farklı özellikteki püskürtme sistemlerinin kullanımı ile sağlanmaktadır.

2.2 Yanma

Dizel motorlarında hava, emme zamanında herhangi bir kısılmaya maruz bırakılmadan silindirlere tam olarak doldurulur. Sıkıştırma oranı yüksek olduğundan sıkıştırma zamanının sonuna doğru silindirdeki gaz sıcaklığı oldukça yüksektir. Üst ölü noktadan hemen önce yakıt püskürtülmeye başlanır ve yüksek sıcaklık nedeniyle tutuşur ve yanar.

Ricardo yanma olayının üç ayrı safha halinde incelenebileceğini öne sürmüştür. Bunlar; tutuşma gecikmesi, ani yanma ve kontrollü yanma safhalarıdır.



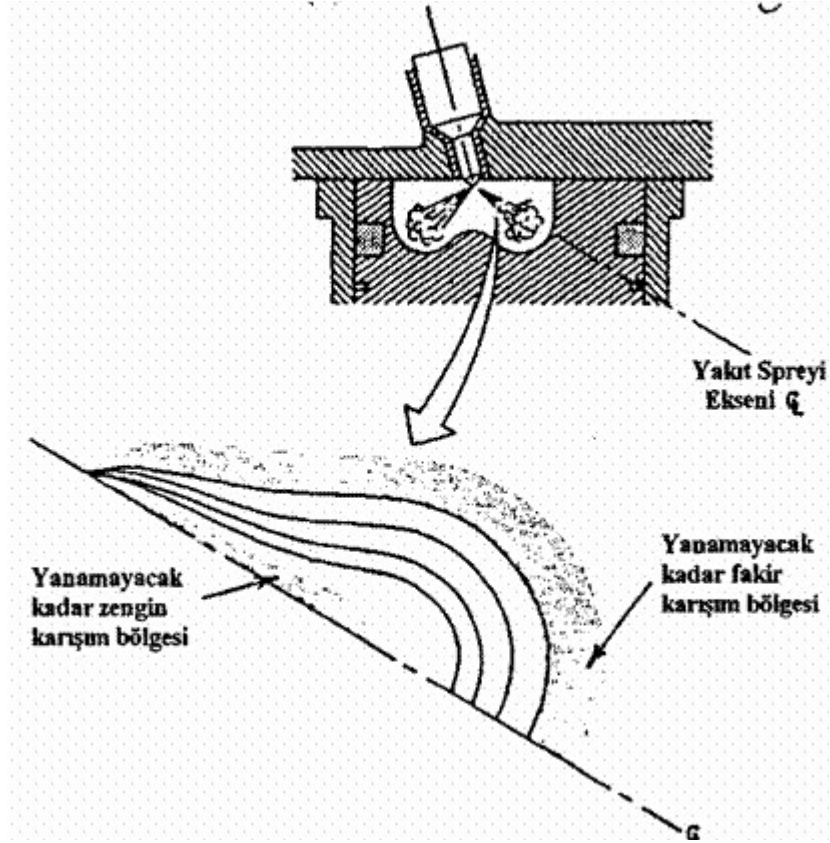
Şekil 2. 2 Dizel Motorlarında Yanma Prosesi

2.2.1 Tutuşma Gecikmesi

Yakıtın püskürtülmeye başladığı an ile yanmaya başladığı an arasındaki safhadır. Püskürtülen yakıtın damlacıklarının buharlaşması belli bir süre almaktadır. Damlacıkların etrafında püskürtmenin hemen ardından bir buhar tabakası oluşmakta ve yanma bu buhar tabakasında başlamaktadır. Buhar fazındaki yakıtın yanma hızı buhar tabakasını çevreleyen havanın oksijen konsantrasyonu ile orantılıdır. Tutuşma gecikmesini etkileyen en önemli faktörler yakıt kalitesi, basınç ve sıcaklıktır. Yüksek basınç ve sıcaklık tutuşma gecikmesi süresini kısaltır. Tutuşma süresi boyunca püskürtülen yakıt miktarı tutuşma gecikmesi süresini etkilemez. Yakıt tutuşma gecikmesi süresi boyunca silindirlere girer ve tutuşma başlayıncaya kadar birikir.

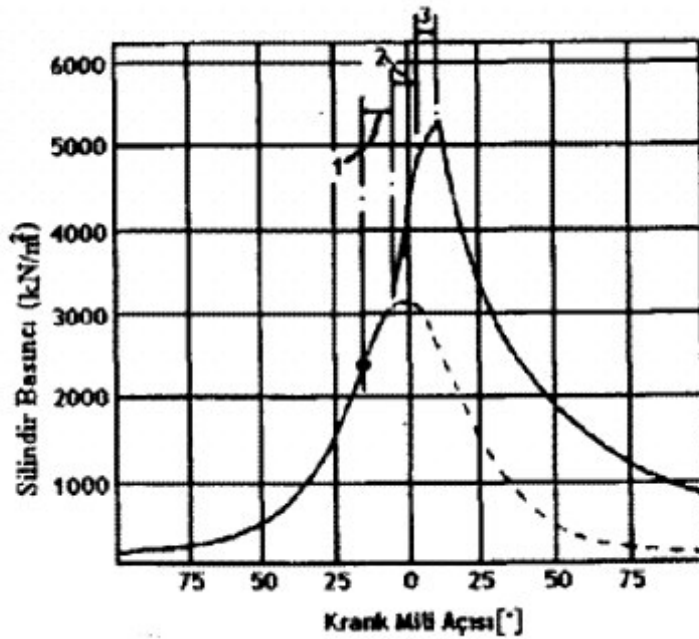
2.2.2 Ani Yanma

Tutuşma gecikmesi süresince yakıt silindirlere girmekte ve buharlaşmaktadır. Gene bu süre içerisinde damlacıklar daha küçük parçacıklara bölünerek hava ile daha iyi karışma olanağı bulmaktadır. Yanma başladığı zaman ise yakıt büyük bir hızla yanar. Bu yanma hızı silindir içerisindeki basınç yükselme hızını da belirler.



Şekil 2. 3 Direk Püskürtmeli Bir Dizel Motorunda Yakıtın Püskürtülmesi

Basınç yükselme miktarı esas olarak püskürtülen yakıt miktarına bağlıdır. Yanmanın söz konusu safhası tutuşma gecikmesi süresine oranla oldukça kısa olduğundan yakıtın büyük bir kısmı tutuşma gecikmesi süresince püskürtülmektedir. Dolayısıyla maksimum basıncın tayin edildiği safha da tutuşma gecikmesi safhasıdır.



Şekil 2. 4 Dizel motorunda krank mili açısına bağlı olarak silindir içi basıncı

2.2.3 Kontrollü Yanma

Tutuşma gecikmesinde püskürtülen yakıtın tamamen yanması ile bu safhaya geçilir. Ani yanma sonundaki basınç ve sıcaklık çok yüksek olduğundan bu safhayı takiben püskürtülen yakıt oksijen ile birleşip daha hızlı bir şekilde yanar. Bu safhada yanmanın hızı yakıtın buharı ile havanın karışmasına bağlıdır.

2.3 Common Rail Püskürtme Sistemi

2.3.1 Common Rail Sisteminin Tanımı

Common Rail dizel motorlarda kullanılan bir yakıt püskürtme sistemidir. Bugüne kadar kullanılan aynı türdeki sistemlere göre yakıt sarfiyatı, egzoz gazı emisyonu, çalışma sistemi ve gürültü oluşumu gibi olumsuzları minimuma indiren, daha üstün bir sistemdir. Direkt tahrik edilen blok veya münferit pompalı sistemlerden farklı olarak Common Rail’de basınç oluşumu ve püskürtme ayrılmaktadır. Geleneksel dizel direkt püskürtücüleri yaklaşık 900 bar mertebesinde basınç ile çalışırken, Common Rail sisteminde yakıtı 1800 bar’a kadar yükselen bir basınç ile ortak hat üzerinden enjektörlere dağıtmak mümkündür.

Püskürtmeyi enjektörler üzerinde bulunan ve süratle anahtarlanabilen manyetik supaplar sağlamaktadır. Bu da püskürtmenin şekillendirilmesi, püskürtme miktarının ölçülmesi ve yakıt püskürtülmesi bakımından yeni imkanlar sağlamaktadır. Ayrıca yine bu imkanlar sayesinde yeni sistemin bir avantajı olan pilot püskürtme ve art püskürtme yapılabilmektedir.

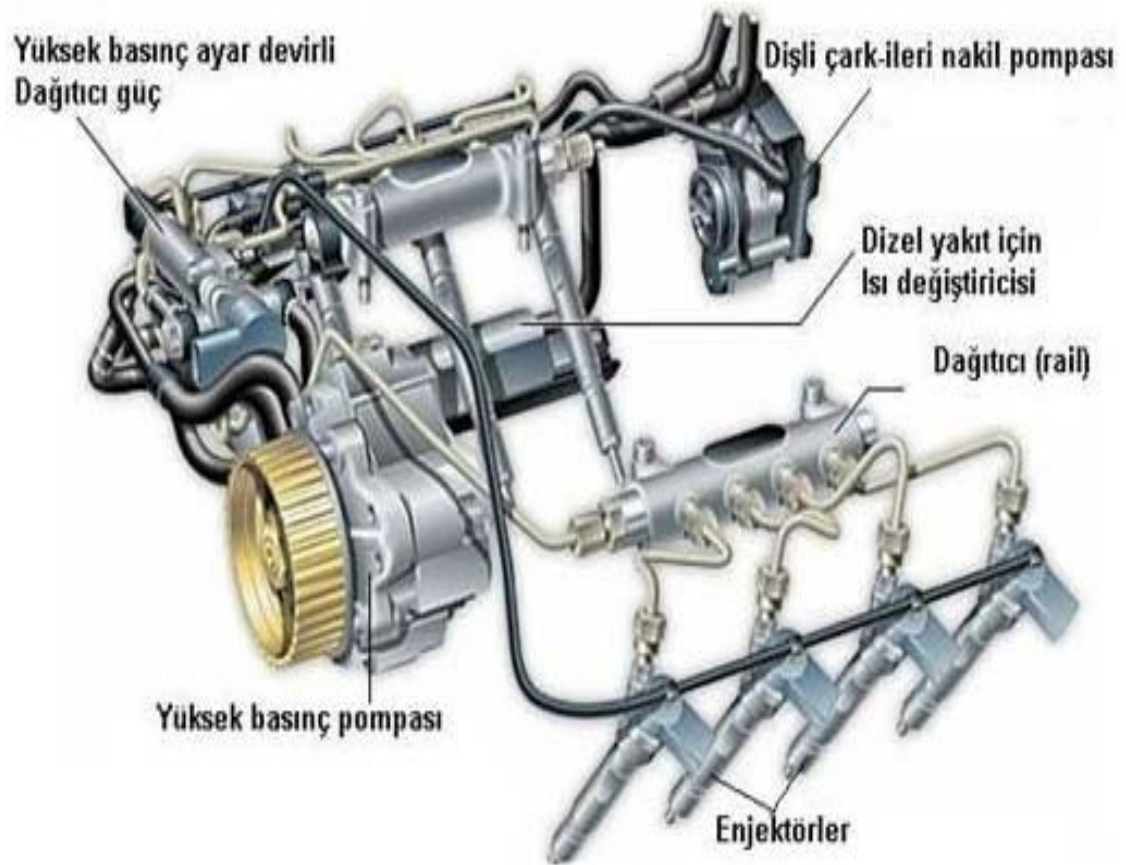
Pilot püskürtme, esas ana püskürtmeden önce oluşturularak yakıtın yanmasına ilişkin oranları iyileştirmektedir. Ön veya çoklu püskürtme, süratli manyetik supaplarına çok kere kumanda edilmesi ile oluşturulur. Böylece hem zararlı madde ve gürültü emisyonu hem de motorun sarfiyat değerleri azaltılabilmektedir. Common Rail sistemi motorda büyük değişiklikler yapılmadan mevcut sistemin yerine takılabilmektedir.

Basınç oluşumunun ve püskürtmenin ayrılmasına ilişkin tek şart, bir dağıtıcı boru ve enjektörlere giden borulardan oluşan, yüksek basınç tutucusudur. Sistemin çekirdek parçası manyetik supap kumandalı enjektördür. Püskürtme olayı elektronik kontrol ünitesinden manyetik supaba giden bir sinyal ile başlatılır. Bu arada püskürtülen miktar hem manyetik supabın açık kalma süresine hem de sistem basıncına bağlıdır. Sistem basıncını yüksek basınçlı, pistonlu pompa sağlamaktadır. Adı geçen pompa,

düşük tahrikli dönme momentleri ile çalışır. Dolayısıyla motora binen pompa tahrik yükü konvansiyonel sistemlere göre daha azdır. Common Rail sistemi ile motor gürültü seviyeleri hissedilir derece de azaltılmış, bunun yanı sıra egzoz emisyonlarında da düşüş gözlemlenmiştir.

2.3.2 Common Rail Sisteminin Çalışması

Common Rail sisteminde yakıt depodan pompalanır ve filtreden geçirildikten sonra distribütörlü püskürtme sistemine benzer bir şekilde yüksek basınçlı besleme bölümüne iletilir. Basınç üretilmesi ve yakıt püskürtülmesi distribütörlü tip sistemlerden farklı olarak common rail sistemlerinde birbirlerinden ayrılmışlardır.



Şekil 2. 5 Common Rail Sistemi Devre Elemanları

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi silindir gövdesinin iç V kısmında bulunan bir yüksek basınç pompası sürekli olarak yüksek basınç üretir. Bu basınç dağıtıcı bir eşik ve iki rail elemanı tarafından korunur. Kısa püskürtme boruları içerisinde tüm enjektörlere iletilir. Püskürtme miktarı ve anı, elektronik kontrol ünitesi tarafından, enjektörün manyetik supaplarına kumanda edilerek belirlenir. İhtiyaç fazlası yakıt, eşanjörde soğutulur ve geri dönüş kanalı üzerinden tekrar depoya gönderilir.

2.3.2.1 Düşük Basınç Devresi Elemanları

Yakıt besleme sistemi, bir düşük basınç devresi ve bir de yüksek basınç devresi olmak üzere iki bölümden meydana gelir.

Düşük basınç devresi aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır:

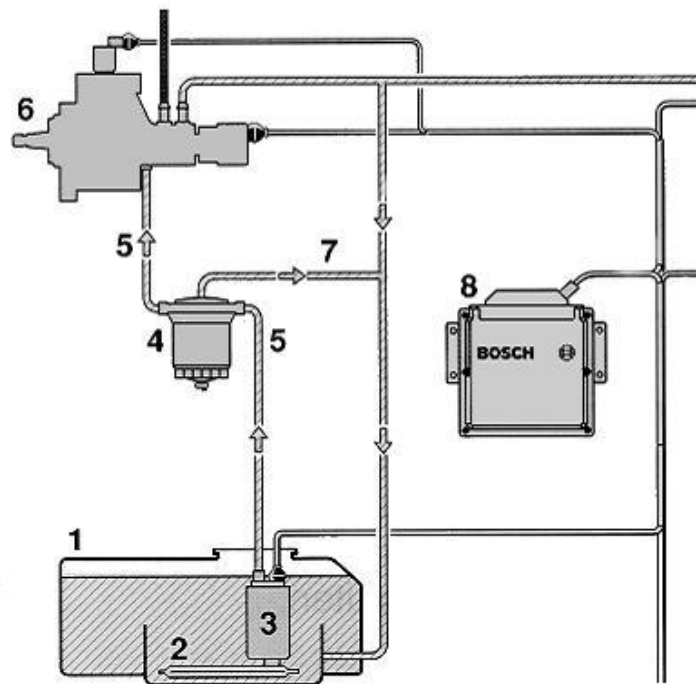
- Yakıt deposu
- Besleme pompası
- Yakıt filtresi

Dizel yakıtı depodan, 12V ile çalışan elektrikli bir besleme pompası ile emilir. Bu pompa radyal pistonlu pompanın yağlanması için gerekli debiyi de sağlamaktadır. Dizel filtresi, elektrikli pompa ile radyal pistonlu pompa arasına yerleştirilmiştir.

Yüksek basınç hidrolik bağlantıları, iç çapı 2mm, dış çapı ise 6mm olan çelik borular vasıtası ile yapılmıştır. Pompanın sirküle ettiği yakıt, tek bir boruda toplandıktan sonra yine depoya gönderilen enjektör sirkülasyonundan ayrı olarak depoya gönderilmelidir.

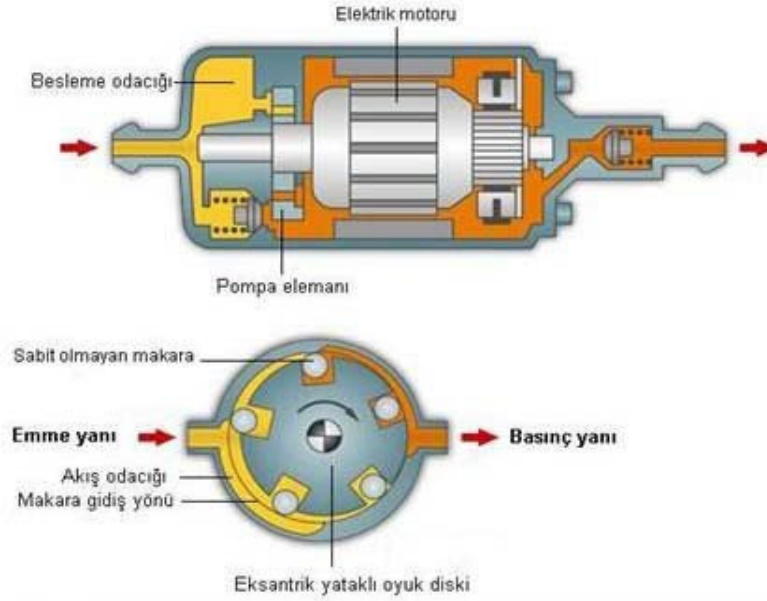
DÜŞÜK BASINÇ DEVRESİ

1. Yakıt deposu
2. Ön filtre
3. Ön besleme pompası
4. Yakıt filtresi
5. Düşük basınç kanalları
6. Yüksek basınç pompasının düşük basınç kesimi
7. Geri dönüş kanalı
8. ECU



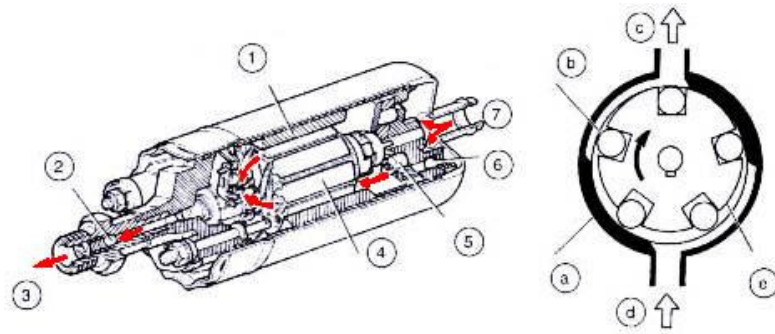
Şekil 2. 6 CRS Alçak Basınç Devresi

a) Besleme Pompası ve Çalışması



Şekil 2.7 Besleme pompası kesiti

Elektrikli pompa hacimsel silindirli tiptedir. Sürekli mıknatıslı bir motora sahiptir. Motor tarafından döndürülen çark, emme kanalından besleme kanalına doğru değişen hacimler oluşturur. Pompanın iki adet supabı mevcuttur. Bu supaplardan birisi pompa çalışmıyorken yakıt devresinin boşaltılmasını önler. Diğer supap ise basıncın 5 bar değerini geçmesi durumunda yakıtın sirkülasyonunu sağlayan yüksek basınç emniyet supabıdır.



Besleme pompası 1-mıknatıs 2-tek yönlü supap 3-çıkış 4-armatür 5-pompa 6-boşaltma supabı 7-giriş
a-muhafaza b-silindir c-çıkış d-giriş e-rotor

Şekil 2. 8 Besleme pompası iç elemanları

Elektrik motoru makaralı hücre pompası elemanını çalıştırarak emme tarafındaki odacığın yakıtla dolmasını sağlar. Pompa elemanında bir oyuk içindeki yatağa eksantrik olarak bir disk yerleştirilmiştir. Diskte sabit olmayan makaralar bulunur. Yakıt emme tarafında, odacığın tabanı ve makaralar arasına akar. Dönme hareketi ve yakıtın basıncı ile makaralar dönüş yönüne bastırılırlar. Bu şekilde yakıtın basma tarafındaki çıkışa ulaşması sağlanır.

b) Yakıt Filtresi

Kartuş tipindeki yakıt filtresi, kağıt disklerden yapılmış, filtreleme yüzey alanı 5300cm^2 ve filtreleme derecesi $4 - 5\mu\text{m}$ olan bir filtre elemanını içerir. Filtrede, filtre üzerine monte edilmiş olan termik bir anahtar tarafından kumanda edilen bir ön ısıtma tertibatı mevcuttur. Dizel yakıtının sıcaklığı 6°C 'nin altına düştüğü zaman bir direnç yakıtı püskürtme pompasına göndermeden önce 15°C 'ye kadar ısıtır. Filtre kartuşunun tabanında, filtrede yoğunlaşan suyun boşaltılması için bir tapa mevcuttur.

c) Düşük Basınç Ayar Supabı

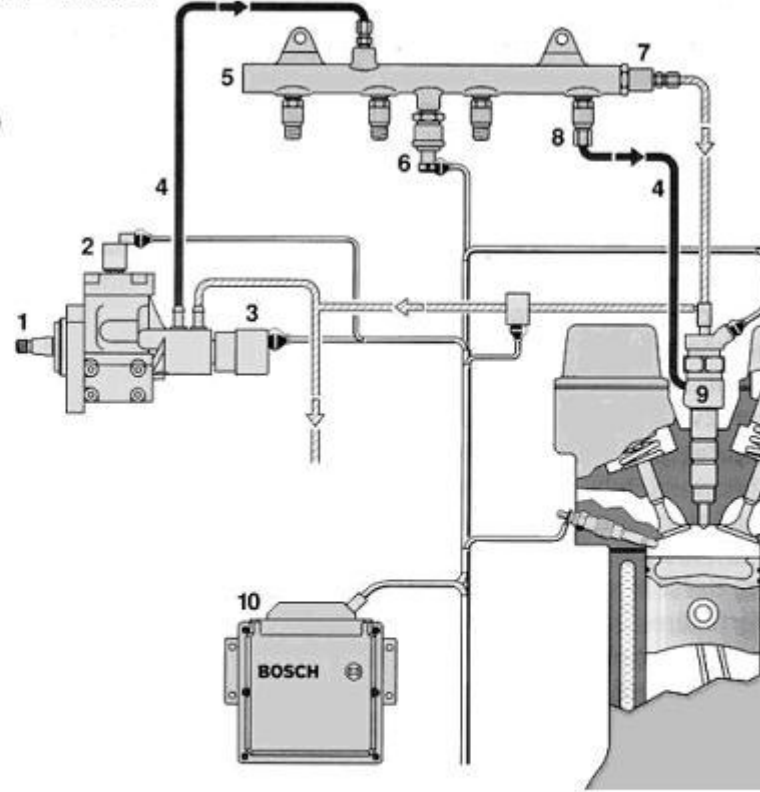
Bu supap yakıt filtresi üzerinde yer alır ve üzerine kalibre bir yayın etki ettiği bir bilyeden oluşur. Bilye üzerine etki eden yakıt besleme basıncı, yay kuvvetini yendiği zaman yakıtın bir kısmı geri dönüş borusu üzerinden yakıt deposuna gönderilir.

2.3.2.2 Yüksek Basınç Devresi Elemanları

Common rail sisteminin yapısına toplu bakışta bahsedildiği gibi yüksek basınç dolaşımının elemanları, yakıtın sıkıştırılmasını ve yanma işlemine iletilmesini sağlarlar. Yüksek basınç pompası 1350 bar mertebesinde azami basınç üreterek, sıkıştırılmış yakıtın yeterli bir miktarını dağıtıcı eşiğine, diğer bir deyişle rail basınç ayar ünitesine iletir. Yüksek basınç ayar devresinin dağıtıcı eşiği yakıt beslemesinde merkezi bir işlev görür. Bunun dışında dağıtıcı eşiğinde basıncın kontrol ve ayarı işlevini gören değişik elemanlar bulunur. Bunlar basınç sensörü ve yakıt basıncı ayar supabıdır. Yakıt dağıtıcı eşiği üzerinden (V motorlar için) rail elemanlarına dağıtılır. Enjektörler bu rail elemanlarından kısa hatlar vasıtası ile yanma işlemi için gereken yakıtı alırlar.

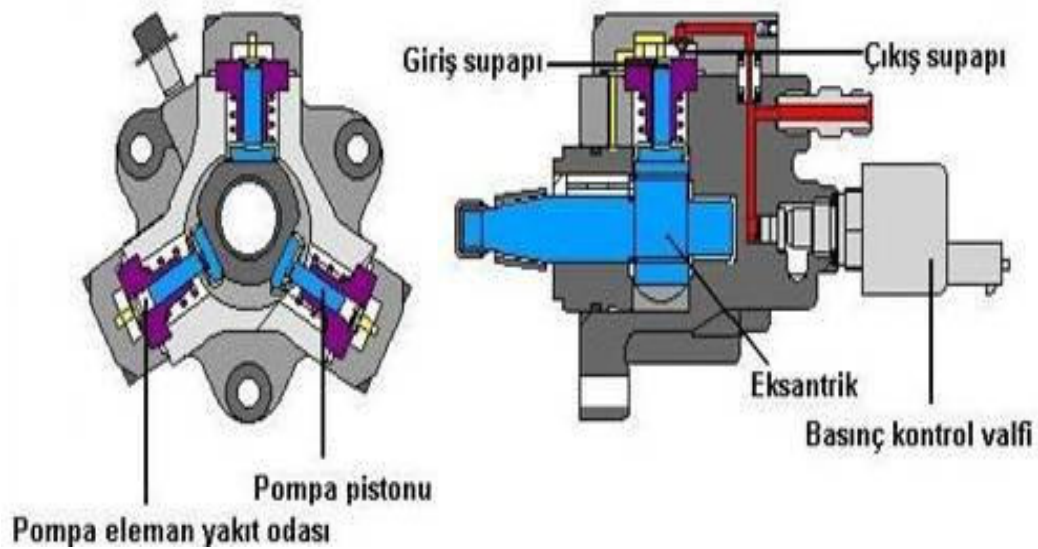
YÜKSEK BASINÇ DEVRESİ

- 1 Yüksek Basınç Pompası
- 2 Eleman Kapatma Valfi
- 3 Basınç Kontrol Valfi
- 4 Yüksek Basınç Yakıt Hattı
- 5 Yüksek Basınç Haznesi (Rail)
- 6 Rail Basınç Sensörü
- 7 Basınç Sınırlama Valfi
- 8 Akış Sınırlayıcı
- 9 Enjektör
- 10 Elektronik Kontrol Ünitesi



Şekil 2. 9: Yüksek basınç devresi

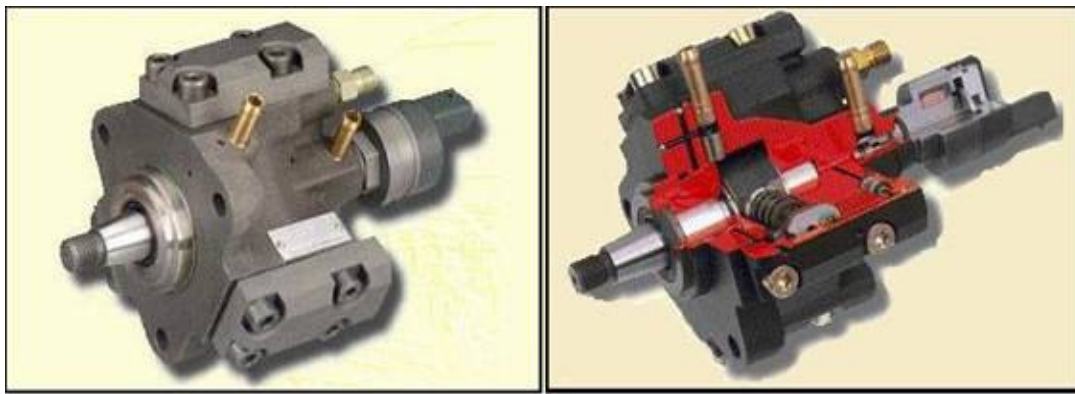
a) Yüksek Basınç Pompası



Şekil 2. 10: Yüksek basınç pompası iç elemanları

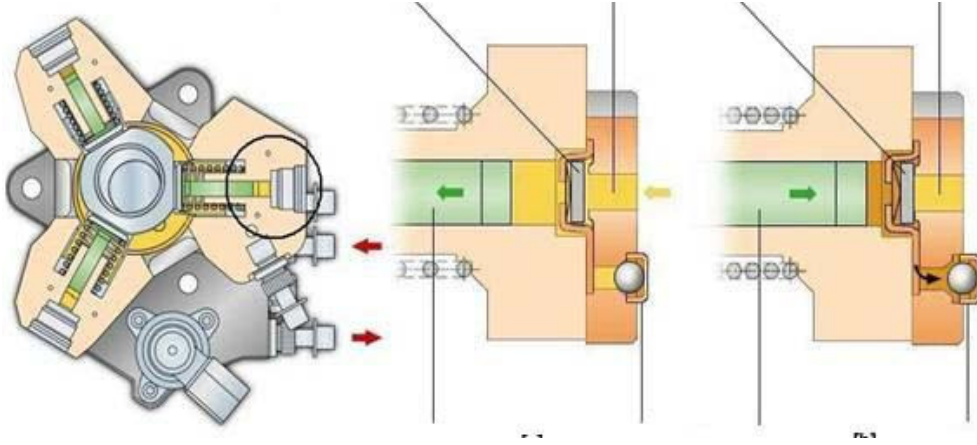
Yüksek basınç pompası üç radyal pistonu olan radyal pistonlu tipte bir pompadır. Pompaya senkronizasyon gerektirmeyen triger kayışı tarafından kumanda edilir. Pompa uygunluk sebebi ile yani klasik sistemlere montajı motor ile senkronize edilmesi gerekmeden, motorun dönme hızının yarısına eşit bir hızda döner. Yüksek

basınç pompası alçak basınç ve yüksek basınç arasındaki beslemeyi sağlar. Bu esnada yakıt üç pompa elemanı tarafından sıkıştırılır. Pompa elemanlarının arasında eksantrik ve eksantrik mili bulunur. Eksantriğin hareketi 120° aralıklı yerleştirilen pistonların aşağı – yukarı hareketine yol açar. Pompa uygun kanallar üzerinden, içinde dolaşan dizel yakıtı ile yağlanır ve soğutulur. Pompa uygun şekilde soğutma sağlanabilmesi için, düşük basınçta en az 0,5bar ile ve besleme debisinden en az 0,5l/dak. Daha fazla bir debi ile beslenmelidir. Basınç ayar supabı tarafından çekilen yakıt ile pompanın soğutulması ve yağlanması için kullanılan yakıt, atmosfer basıncındaki depoya gönderilir.



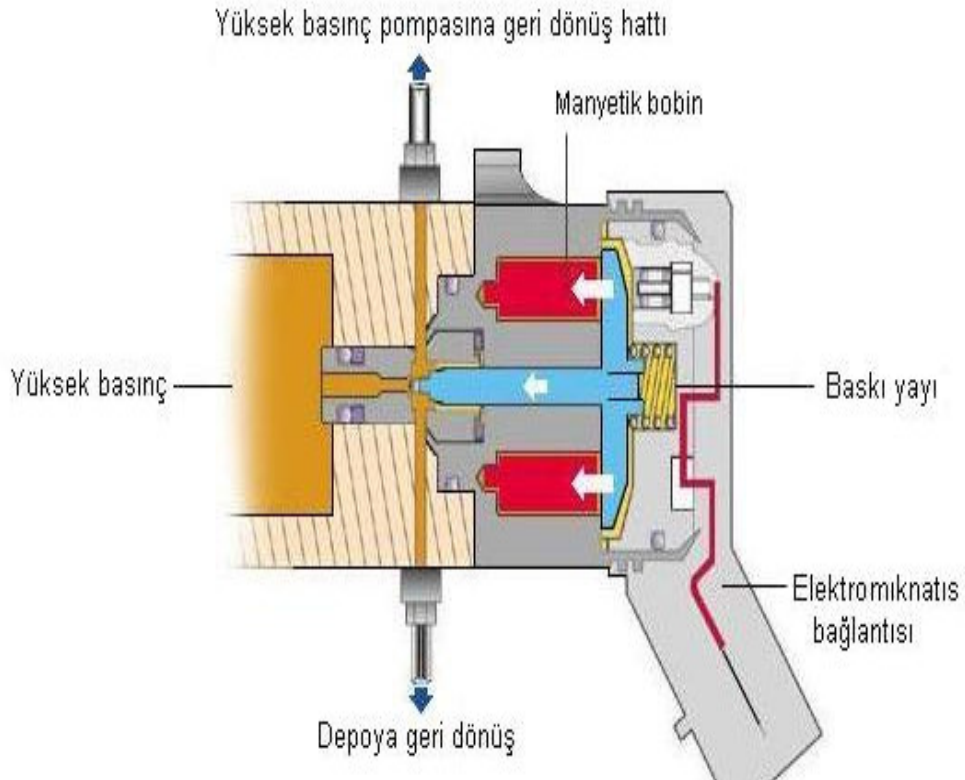
Şekil 2. 11: Yüksek basınç pompası

Her pompa elemanın üstünde birer giriş ve çıkış supabı bulunur. Pompa elemanlarının bir tanesinin pistonunun aşağıya doğru hareketi, besleme pompasından yakıt akışı için gerekli basıncın giriş supabının açılma basıncından daha yüksek olmasına yol açar. Yakıt, pompa elemanın boş bölmesine emilir. Piston alt ölü noktaya geldiğinde basıncın düşmesinden dolayı giriş supabı kapanır ve yakıt akışı durur. Tekrar yukarıya doğru hareket eden bir pompa pistonu, yakıtı sıkıştırmaya başlar. Pompa elemanında rail sisteminde mevcut olan basınca ulaşıldığında çıkış supabı açılır. Yüksek oranda sıkışmış yakıt piston üst ölü noktaya gelinceye kadar yüksek basınç devresine girer. Bundan sonra tekrar basınç düştüğü için çıkış supabı kapanır ve bu süreç tekrar başlar.



Şekil 2. 12: Yüksek basınç pompası kesiti

b) Yakıt Basınç Ayar Supabı

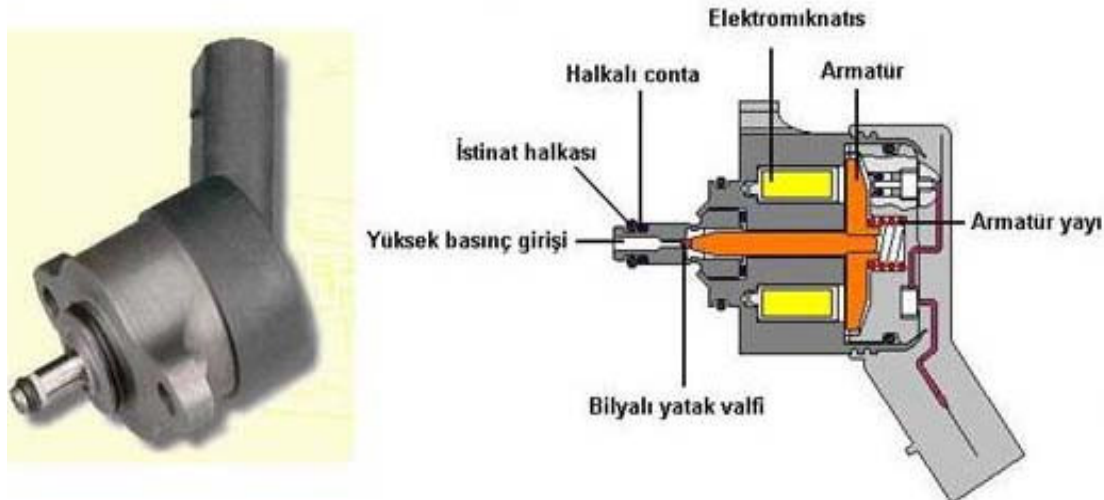


Şekil 2. 13: Yakıt Basınç Ayar Supabı Kesiti

Ayar supabının görevi; motorun çalışma durumuna bağlı olarak rail sisteminin yüksek basınç dolaşımının sabit olmasını sağlamaktadır. Yük altında elektronik kontrol ünitesinin belirlediği basınç değerini sağlar. Motor çalışmadığı zamanlarda manyetik bobinden akım geçmez. Bu durumda rail basıncı ile baskı yayı arasında basınç mekanik olarak dengelenir. 100 bar'lık bir rail basıncı oluşur. Basınç dengelenmesinden dolayı dışarı verilen yakıt depoya veya yüksek basınç pompasına

iletilir. Motor çalıştığında ve yüksek basınç pompası ile rail sisteminde uygun basınç oluştuğunda supabın manyetik bobinine akım gider.

Basıncı yükseltmek için devrenin geri dönüş hattı ile bağlantısının kesilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, bilye bir baskı yayı ve elektronik kontrol ünitesi tarafından beslenen bir bobin yardımıyla kapalı tutulur.



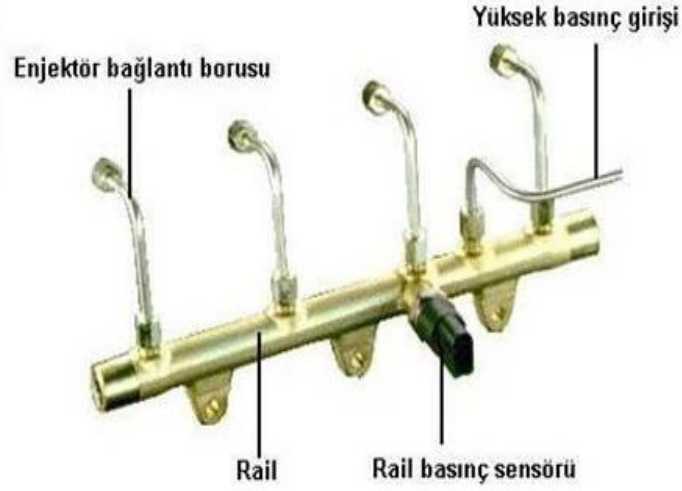
Şekil 2. 14: Yakıt basınç ayar supabı

Basıncı düzenlemek için elektronik kontrol ünitesi belirlenen basıncı elde edebilmek için bobinin besleme gerilimini değiştirir. Bu sayede devrenin basıncı bobinin ve yayın kuvvetini yenebilir. Bilye yerinden kalkarak geri dönüş kanalını açar ve böylece basıncın düşürülmesi sağlanır.

Kısaca özetlememiş gerekirse; motor çalışmadığı zaman basınç supabı devre dışı kalır. Yüksek basınç gücü, yay gücünden fazla olduğundan ayar supabı açılır. Motor çalıştığında basınç supabı devreye girer. Ayar supabı kapanınca bir taraftan yüksek basınç, diğer taraftan manyetik ve yay baskı gücü bir güç dengesi oluşturur.

c) Dağıtıcı Boru (Rail):

Yüksek basınç dağıtıcı borusu her pompa devrinde üç pompa stroğunun ve enjektörlerin açılmalarının sebep olduğu basınç farklılıklarını sönümler. Dağıtıcının iç hacmi, geçici çalışma dönemlerinde basınç adaptasyonunda gecikmelere izin vermeden ve dağıtıcının dizel yakıtı ile doldurulması gereken marşa basma safhasını engellemeden bu ani basınç darbelerini sönümleyecek şekilde dizayn edilmiştir. Dağıtıcı yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanıklı çelikten imal edilmiştir. Dağıtıcı üzerinde motora bağlanabilmesi için çeşitli delikler mevcuttur.



Şekil 2. 15: Ortak hat

d) Enjektörler

Tüm püskürtme sistemlerinde olduğu gibi common rail püskürtme sisteminde de en önemli parçalar enjektörlerdir.

Bağlantılar ve yakıt kanalları

- 1-Yakıt deposuna yakıt geri dönüşü
- 2-Elektrikli bağlantı manyetik valfi
- 3-Yakıt beslemesi-yay yüksek basınç
- 4-Enjektöre giriş kanalı

Çok delikli (6) iğneli enjektör

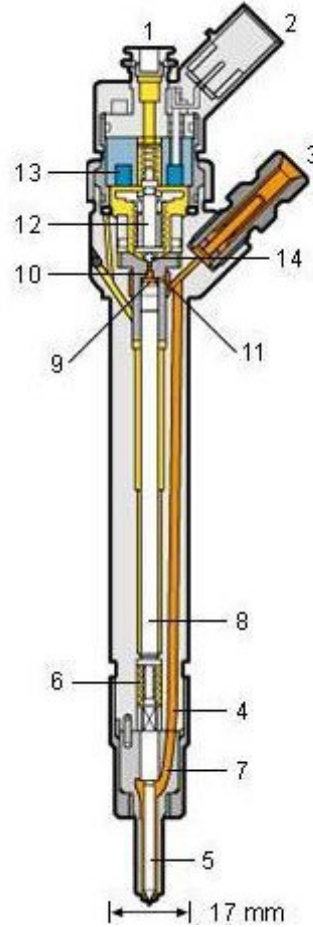
- 5-Enjektör iğnesi

Hidrolik kontrol sistemi

- 6-Enjektör yayı
- 7-Odacık hacmi
- 8-Valf kontrol pistonu
- 9-Valf kontrol bölmesi
- 10-Akma regülatörü
- 11-Besleme

Manyetik valf

- 12-Geri ayar yayı ile armatür
- 13-Elektromıknatis
- 14-Valf bilyesi



Şekil 2. 16: Enjektörün yapısı

Common rail sistemi için üretilen elektromanyetik kumandalı özel enjektörler, yüksek bir hassasiyete ve çok dar tolerans limitlerine sahiptir. Bilinen dizel püskürtme sistemlerinde olduğu gibi olduğu gibi burada da enjektörler silindir başlıklarına sıkıştırma plakaları ile tespit edilir. Böylece mevcut dizel motorlarına monte edilebilirler. Silindir başlığında yer aldığından dolayı enjektörler çok küçük çapta üretilirler. Günümüzde üretilen enjektörlerin çapları 17mm civarındadır.

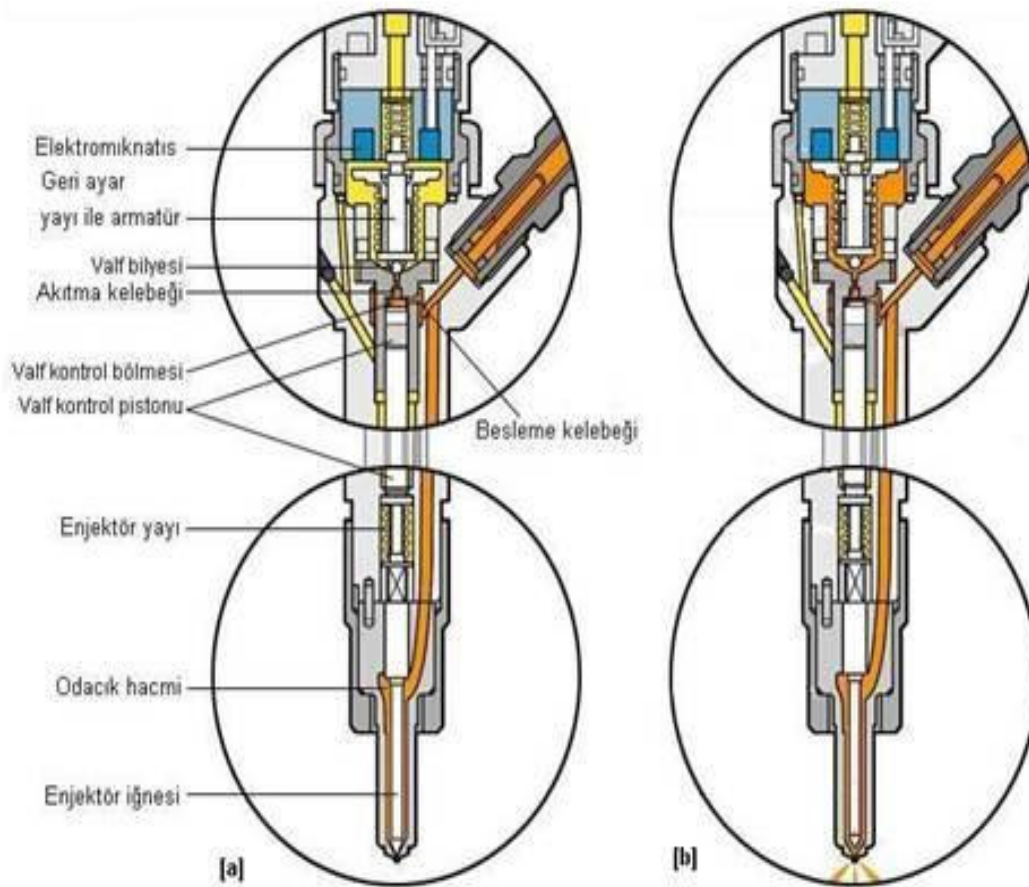
Enjektörleri işlev bakımından dört bölüme ayırabiliriz. Bu bölümler; yakıt kanal bağlantıları, hidrolik kontrol sistemi, iğneli ve delikli enjektör memesi ve manyetik supaptır.

Enjektörün çalışması ise çok karmaşık bir süreci kapsar. Adım adım incelersek; enjektör serbest konumda iken elektromıknatısa akım gelmez ve kılavuz iğne kapalı konumdadır. Giriş deliği üzerinden beslenen kumanda odasındaki basınç hattaki basınca eşittir. Dolayısı ile basınç çubuğu ve pim grubuna etki eden kuvvetler açılma kuvvetini yener. Püskürtme sürecinin önemli parçalarından bir tanesi enjektör memesi iğnesidir. Enjektör memesi iğnesi enjektör memesi yayı tarafından yuvasına bastırılır. Sürekli olarak yakıtla dolu olan enjektör kapalı durur. Enjektör memesi iğnesinin üst tarafındaki odacıkta rail basıncı altında olan yakıt bulunur. Rail basıncının enjektör başlığı yayını kaldırıp sürekli bir püskürtme olmaması için kontrol pistonu tarafından aksi yönde bir basınç oluşturulur. Manyetik supap devre dışıdır. Supap bilyesi baskı yayı tarafından yuvadaki yerine bastırılmaktadır. Supap kontrol bölmesine yakıt akar ve railin yüksek basıncı oluşur. Supap kontrol pistonundaki rail basıncı ve enjektör memesi yayının baskı kuvveti, enjektör iğnesini kapalı tutarlar. Püskürtme başlangıcında elektromıknatıstan akım geçmeye başladığında kılavuz iğne yukarıya doğru hareket eder ve kesit alanı giriş deliğinden daha büyük olan çıkış deliği açılır. Sonuç olarak giriş deliği üzerinden yeterli miktarda akış olmadığından kumanda odasında mevcut olan dizel yakıtı boşaltılır ve basınç düşer. Basınç çubuğunun üst kısmına etki eden kuvvet azalır ve açma kuvveti değerinin üzerine çıktığında, püskürtücü açılmaya başlar. Sürekli olarak basınç borusu tarafından doldurulan besleme odasından gelen dizel yakıtı enjektörden silindirlere gönderilir. Manyetik supap devreye alındığında veya elektromıknatısın gücü bastırma yayının kuvvetini yendiğinde çıkış kanalı açılır.

Çıkış kanalı açıldığında yakıt, supap kontrol bölümünden üstte boşluk vasıtası ile yakıt geri iletme elemanı üzerinden depoya gider. Supap kontrol bölmesindeki basınç

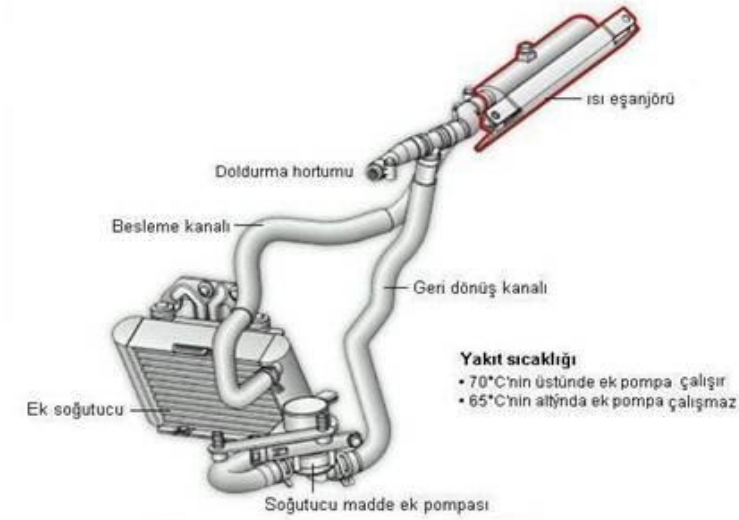
düŖer ve kontrol pistonu yukarı doğru hareket eder. Supap kontrol bölmesinin basıncı odacık basıncından az olduğu için supap kontrol pistonu yukarı doğru itilir ve enjektör yayı bastırılır. Kontrol pistonu üst konumda olduğu zaman enjektör iğnesi tamamen açıktır. İğnenin açılması ile püskürtme süreci başlar.

Püskürtme sonunda elektromıknatısın üzerinden akım geçişinin kesilmesi, çıkış deliğinin kapanmasına sebep olur. Bu olayı takiben kumanda odasındaki basınç hızla artarak başlangıç değerine ulaşır. Sonuçta basınç çubuğu pimine etki eden kuvvetler tekrar dengelenirler. Kuvvetlerin dengelenmesi sonucunda, basınç çubuğu ve pimi tekrar aşağıya doğru hareket eder. Enjektöre püskürtme memesine yakıt akışı durur ve püskürtme sona erer. Manyetik supap devre dışı kaldığında armatür, baskı yayı vasıtası ile aşağıya doğru itilir. Akıtma tıkcacının kapanması ile supap kontrol bölümünde yine railde olduğu gibi basınç oluşur. Supap kontrol bölümü ile enjektör yayının gücü, odacıktaki basınç kuvvetinin üzerine çıktığında enjektör iğnesi kapanır ve püskürtme sona erer.



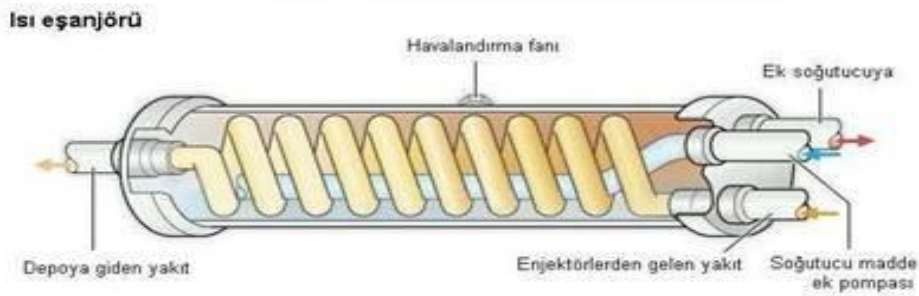
Şekil 2. 17: Enjektör Meme Yapısı

2.3.2.3 Geri Akış



Şekil 2. 18: Geri akış devresi elemanları

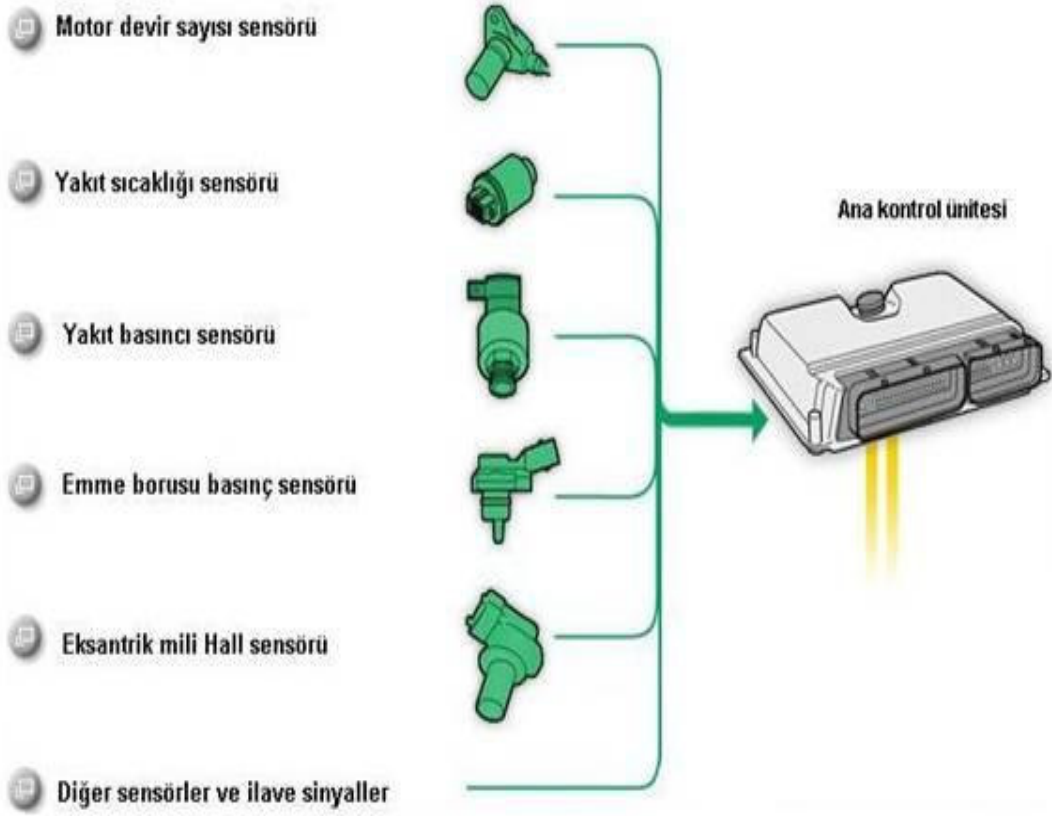
Yanmaya iletilmeyen yakıt alçak basınç beslemesinden geri dönüş kanalı vasıtasıyla geri taşınır. Yakıtın geri taşınması için geri dönüş kanalında çeşitli elemanlara ihtiyaç vardır. Yakıt soğutma maddesi dolaşımına entegre edilmiştir. Yakıt yüksek basınçlı besleme esnasındaki sıkıştırmadan dolayı ısındığı için soğutulduktan sonra geri dönüş kanalına varması gerekir. Dizel yakıtı ısı eşanjörü soğutma sıvısı dolaşımının geri dönüş kanalına entegre edilmiştir. Yakıtın yükselmiş ısısı dolaşan soğutma maddesine verilir. Elektrikli soğutma maddesi ek pompası ısınmış soğutma maddesini ek bir soğutucudan geçirerek ısı eşanjörüne geri götürür. Bu durum yakıt sıcaklığı 70°C' yi bulunca devreye girer, yakıt sıcaklığı 65°C' yi aşınca devreden çıkar.



2. 19: Isı eşanjörü kesiti

Şekil

2.3.2.4 Sensörler



Şekil 2. 20: Sensörler

Sensörler geçerli olan çalışma durumunu belirlerler ve bunu yaparken örneğin yakıt sıcaklığı, motor devir sayısı veya yük durumu gibi çeşitli fiziki değerleri elektrik sinyallerine dönüştürerek bu sinyalleri elektronik kontrol ünitesine iletirler. Common rail en önemli sensörler; motor devir sayısı sensörü, yakıt sıcaklığı sensörü, rail basınç sensörü, emme borusu basınç sensörü ve eksantrik mili sensörüdür.

a) Motor Devir Sensörü

Motor üzerine bağlanmıştır. Volan üzerine monte edilmiş sinyal dişlisinden okuma yapar. Bu sensörün görevi motorun devrini ve açısal konumunu tespit etmektir. Sinyal dişlisinin 60 adet dişi vardır. Bunların iki tanesi referans oluşturmak amacıyla çıkartılmıştır. Böylece bir dişin geçişi 6°' lik açığa karşılık gelir. Eksik iki dişin oluşturduğu boşluğu takip eden ilk dişin sonu senkronizasyon noktası olarak algılanır.

b) Yakıt Sıcaklık Sensörü

Yakıt geri dönüş manifoldu üzerine monte edilmiştir. Sensörün aktif kısmı negatif sıcaklık katsayılı, sinterizasyon yolu ile elde edilmiş bir dirençtir. Sensörün çalışma aralığı 40 ile 140°C arasındadır.

c) EGR Elektrovanası Konum Sensörü

EGR elektrovanası emme borusu üzerine yerleştirilmiştir. Konum algılayıcısı ise EGR elektrovanasının içine entegre edilmiştir. Bir potansiyometredir.

d) Kam Mili Sensörü

Silindir kapağının üzerinde, kam mili kasnağına yakın bir yere yerleştirilmiştir. Manyetik algılayıcı tiptedir. Kam mili kasnağının üzerine algılayıcının elektronik kontrol ünitesine göndereceği kare sinyali üretmesi için bir işaret noktası konulmuştur. Elektronik kontrol ünitesi bu bilgiyi püskürtme sırasını belirlemede kullanır.

e) Rail Basınç Sensörü

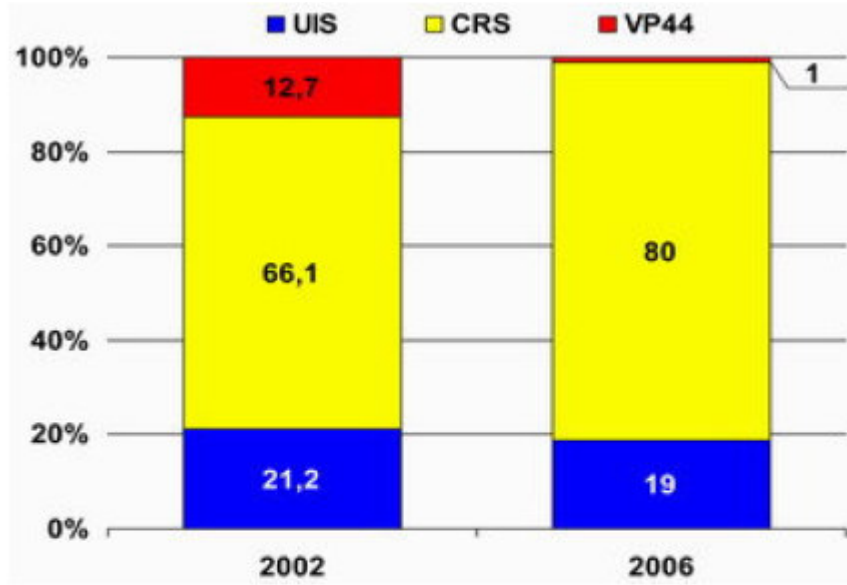
Rail üzerine tespit edilmiştir. Piezoelektrik prensibine göre çalışır. Rail içerisinde bulunan yakıtın basıncına göre değişen bir gerilim üretir. Elektronik kontrol ünitesi bu bilgiyi yakıt basınç regülatörüne kumanda etmek için kullanır.

f) Emme Basınç Sensörü

Piezoelektrik prensibine göre çalışır. Hava emme borusuna bağlıdır. Emme basıncına bağlı olarak değişen bir gerilim üretir. Elektronik beyin bu bilgiyi turbo basıncı düzenleme elektrovanasına kumanda etmek için kullanır.

2.3.2.5 Common Rail Sisteminin Avantajları

- Hava – yakıt karışımının oluşumunu iyileştirir
- Enjeksiyon basıncı geniş limitler içerisinde serbestçe seçilebilir
- Yakıt püskürtme başlangıcı ve püskürtülen yakıtın miktarı hassasiyetle belirlenebilir. (100 – 6000d/d aralığında 100mm³/çevrim)
- Çalışma koşullarının değiştiği koşullarda esneklik sağlar
- Yanma ekolojik ve ekonomiktir
- Çalışması için motordan daha az güç çeker
- Modüler ve basit bir sistemdir
- Düşük maliyet ile daha iyi performans sağlar
- Pilot enjeksiyona olanak sağlaması sayesinde motor gürültüsünde azalma sağlanır.



UIS: Birim enjektör sistemi

CRS: Common rail sistemi

VP44: Geliştirilmiş distribütör tipi pompa sistemi

Şekil 2. 21: Dünya’da üretilen püskürtme sistemlerinin yıllara göre dağılımı

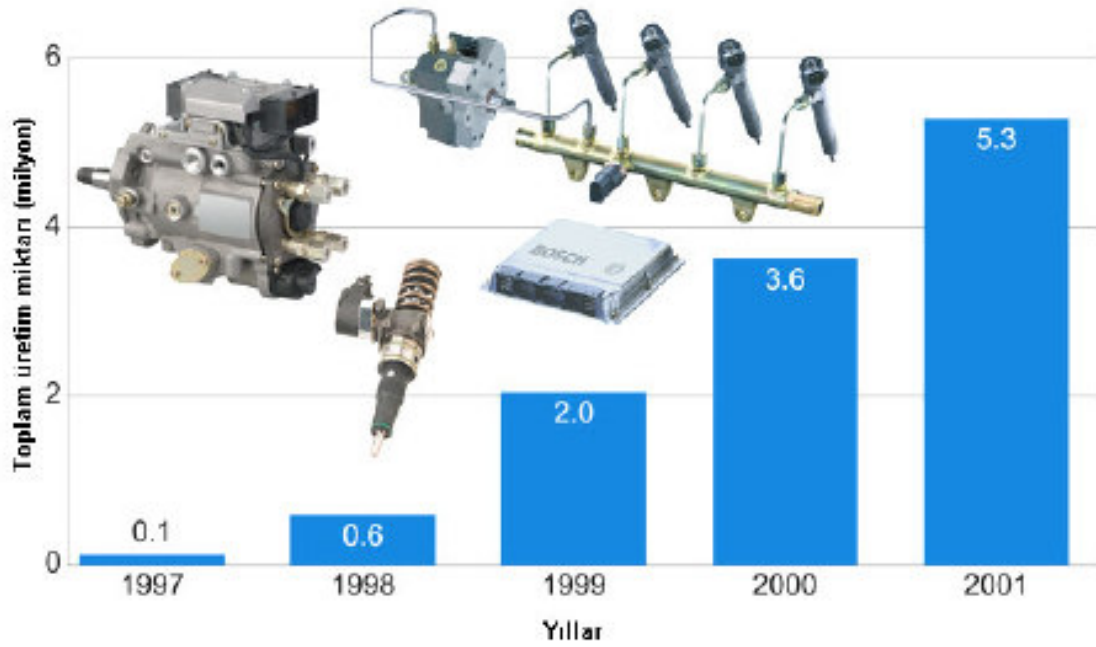
2.4 Yakıt Enjeksiyon Sistemi Üreticilerindeki Gelişmeler

Dizel motor endüstrisinin genelinde CRS püskürtme sisteminin avantajları kabul görmüştür. Birim enjektörün yüksek basınç üretimi ve moment karakteristikleri geliştirilmiş olmasına rağmen sadece bir kaç araç üreticisi dışında Volkswagen firması birim enjektör sistemini kullanmaktadır. Bosch firması VW Lupo TDI ve Audi A2 TDI araçları için birim enjektör sistemi üretmektedir. Her iki araçta da partikül madde emisyonlarına düşük sınırlar koyan Euro 4 emisyon standartlarının yarısı yakalanmıştır. İlk olarak 1997 yılında bazı binek tip modeller için firma common rail püskürtme sistemi üretmeye başlamıştır. Bu firmanın ilk common rail sistemi 1350bar basınca sahip iken ikinci nesil de 1600 bar, üçüncü nesilde 1800 bar değerlerine ulaşılmıştır. Şu anda bu değer 2000-2200 bar değerlerine kadar geliştirilmiştir.

Denso firması ise 1995 yılında ağır taşıtlar için common rail püskürtme sistemi üretmeye başlamıştır. Bir çok ağır hizmet dizel araçta bu sistem kullanılmaktadır. Bu firma günümüzde yanmayı daha iyi kontrol edebilmek ve emisyon oranlarını iyileştirmek için beş kademeli püskürtme sistemi yapmaktadır. Bu sistemde hava yakıt karışımını daha homojen hale getirmek ve ana püskürtme fazındaki tutuşma

gecikmesi süresini azaltmak için iki adet pilot püskürtme yapılmaktadır. İki kademeli pilot püskürtme NO_x emisyonlarını, gürültüyü ve titreşimleri azaltır. Ana püskürtmeden sonra yapılan art püskürtme ile amaçlanan egzoz gazı sıcaklıklarını belirleyerek katalitik egzoz sisteminin verimini yükseltmektir. Bu şekilde DPF kullanılmadan Euro 4 emisyonları sağlanabilmektedir. Bu sisteme mikro delikli ve gözenekli malzemeden üretilen partikül filtresi entegre edilmiştir.

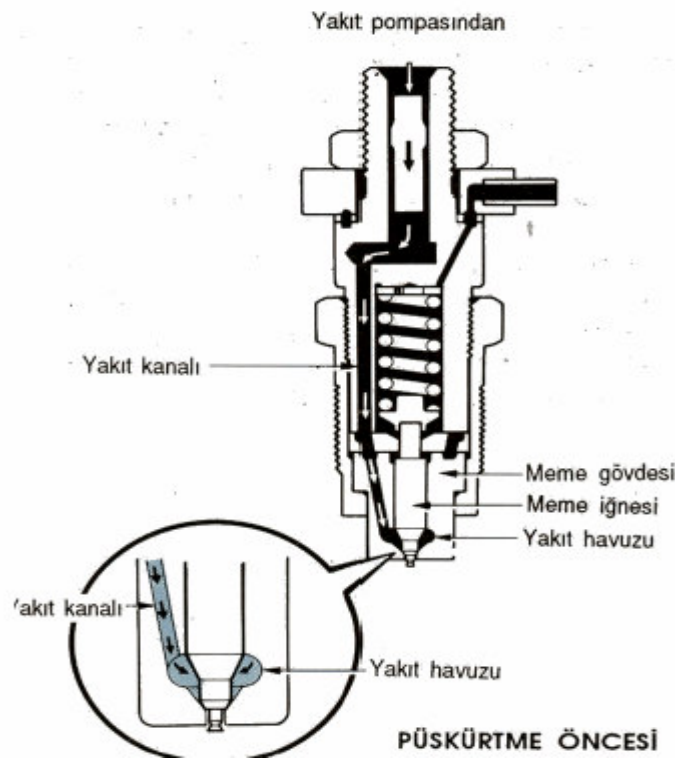
Bunun yanı sıra Bosch firması da elektromanyetik tetiklemeli enjektörlerin yerine piezo kontrollü enjektör sistemlerini geliştirmiştir. Bu sistem sayesinde ana püskürtme süresinin başlaması ile pilot püskürtmenin bitişi arasındaki süreyi 4ms' den 1ms mertebesine indirmeyi başarmışlardır.



Şekil 2. 22: Bosch firması tarafından yıllara göre üretilen CR ve birim enjektör adetleri

3. ENJEKTÖR

Dizel motorları yakıt donanımında bulunan enjektörler temel olarak bir gövde ve içerisinde hareket eden bir iğneden oluşmaktadır. Püskürtme pompası tarafından pompalanan yakıt, enjektör iğnesinin altındaki odacıkta yakıt basıncının artmasına neden olarak iğnenin yukarıya doğru hareketini sağlamak ve açılan enjektör deliğinden yakıt silindir içerisine püskürtülmektedir.

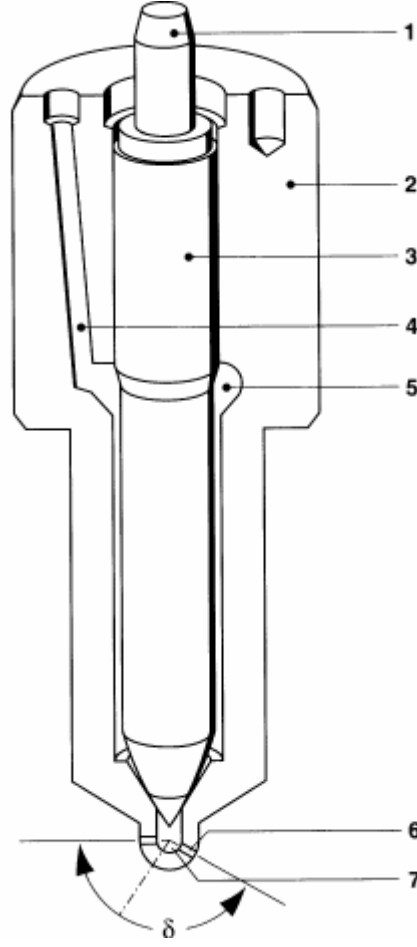


Şekil 3. 1: Enjektör memesinin yapısı

Genelde dizel motorlarında kullanılan enjektörler iki gruba ayrılır.

3.1 Delikli Tip Enjektörler

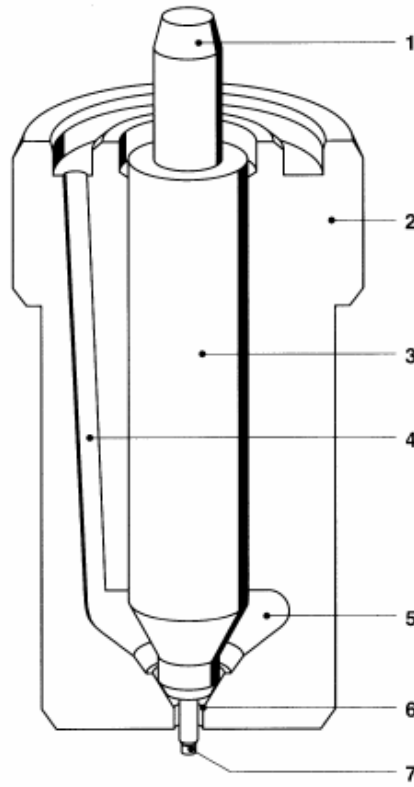
Delikli tip enjektörler genellikle direk püskürtmeli dizel motorlarında kullanılır. Tek delikli ve çok delikli enjektör tipleri bulunmaktadır. Çok delikli enjektörde genelde enjektör eksenine boyunca delikler simetrik olacak şekilde yerleştirilir. Delik sayısı yanma odası özelliklerine göre seçilmekte olup 12 adete kadar çıkabilmektedir. Delik çapları ise genelde 0,2mm ile 1,0mm arasında değişmektedir.



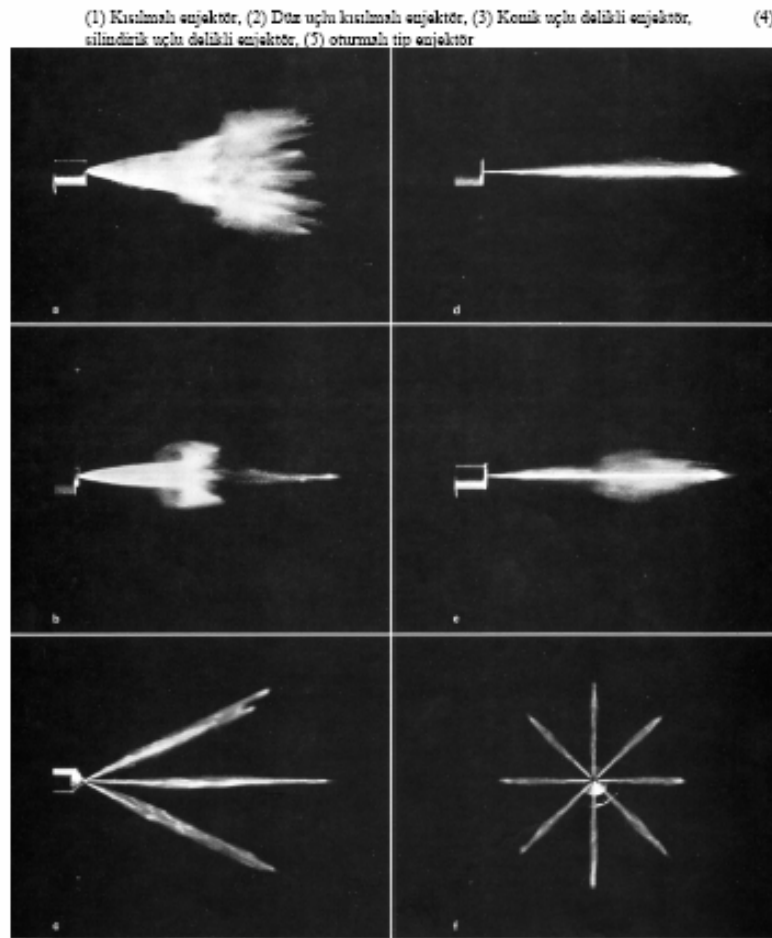
Şekil 3. 2: Delikli tip enjektörün yapısı

3.2 Çubuklu Tip Enjektörler

Genellikle ön yanma odalı ve türbülanslı yanma odalı dizel motorlarında kullanılan çubuklu tip enjektörlerde yakıt demeti içi boş konik olarak şekilde oluşturulmaktadır. Burada enjektör iğnesi, enjektör deliğinden dışarı çıkmakta ve demet şeklini etkilemektedir. Ayrıca kademeli değişen iğne çapına sahip kısılmalı enjektörlerde mevcuttur. Bu tip enjektörlerde yanma odasına giren yakıt debisinin zamana göre ayarlanabilmekte ve tutuşma gecikmesi süresince yanma odasına giren yakıt miktarı sınırlandırılabilir.



Şekil 3. 3: Çubuklu tip enjektörün yapısı



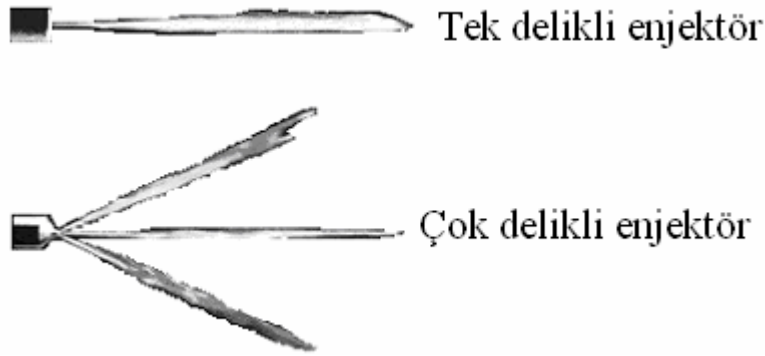
Şekil 3. 4 Delikli ve Çubuklu Tip Enjektörlerle Püskürtme Yapıldığı Halde Demet Yapısı

3.3 Enjektör Geometrisinin Demet Şekline Etkisi

Enjektörün yapısal özellikleri demet şeklini dolayısıyla motor performans ve emisyon değerlerini etkiler. Bu özellikler meme delik sayısı, delik çapı, keskin veya yuvarlak uçlu sevk kanalı, koni açısı gibi yapısal özelliklerdir.

3.3.1 Enjektör Meme Delik Sayısının Etkisi

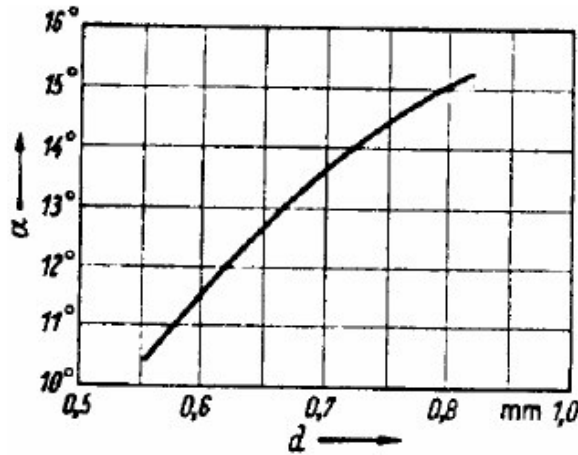
Enjektör memesi delik sayısının artırılması sonucu yakıtın yanma odasına değişik yönlerde göndermek mümkün olmaktadır. Bunun sonucunda daha homojen bir karışım oluşturulması mümkün olmaktadır. Karışım oluşumu süreci hızlandırılmakta dolayısı ile tutuşma gecikmesi süresi kısalmaktadır. P_{me} ve P_{max} değerleri artmakta buna karşın özgül yakıt tüketimi düşme göstermektedir.



Şekil 3. 5: Çok ve tek delikli enjektörlerle püskürtme yapıldığı halde demet yapısı

3.3.2 Enjektör Meme Delik Çapının Etkisi

Püskürtmenin yapıldığı delik çapı küçüldükçe yakıtın parçalanması da artmaktadır. Enjektör meme delik çapı küçüldükçe Sauter ortalama yarıçapı da küçülmekte dolayısıyla yakıtın hava ile karışımı kolaylaşmaktadır.



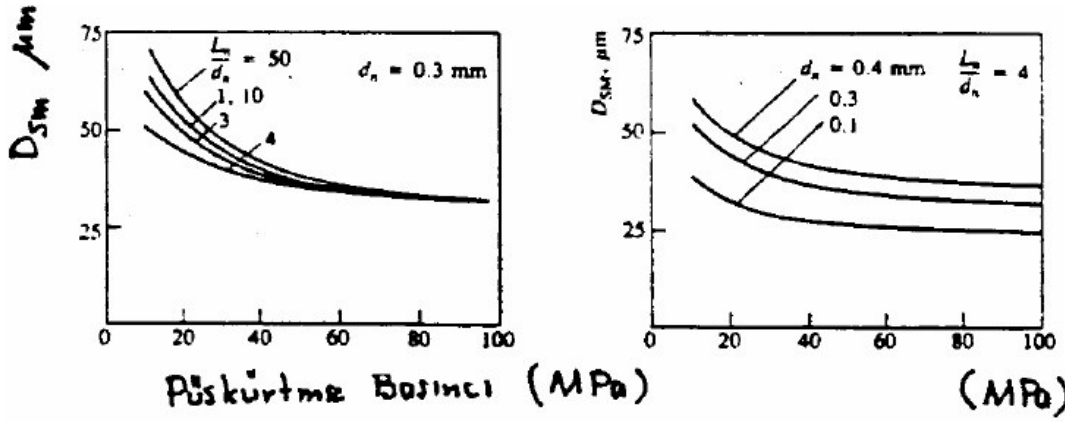
Şekil 3.6: Delik çapının demet açısına etkisi

3.3.3 Enjektör Meme Kanal Uzunluğunun Etkisi

Enjektör memesi sevk kanalının uzunluğunun demet yapısına etkileri genelde tek başına değil meme delik çapı ile oranlanarak incelenmiştir.

L / d oranı 4'e eşit olduğunda demetini oluşturan damlacıkların çapı en küçük değere ulaşmaktadır. Püskürtme basıncının değeri yükseldikçe L/d oranının çap dağılımına etkisi azalmaktadır.

L/d oranının değişimi ile demet açısı da farklılıklar göstermektedir. L/d oranı arttıkça demet açısı artmaktadır. Bu oran 10 değerine kadar arttırıldığında demet açısının da paralel olarak arttığı daha büyük artışlarda ise demet açısının azaldığı gözlenmiştir.



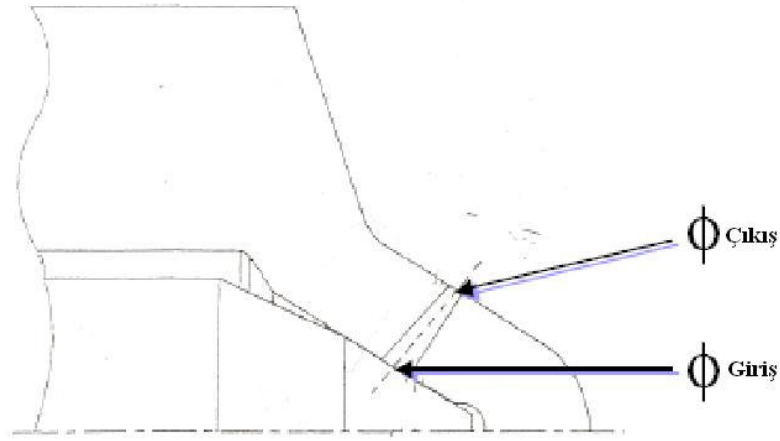
Şekil 3.7: L/d oranının Sauter ortalama çapına etkisi

3.3.4 Meme Kanalı Giriş Yuvarlaklığı

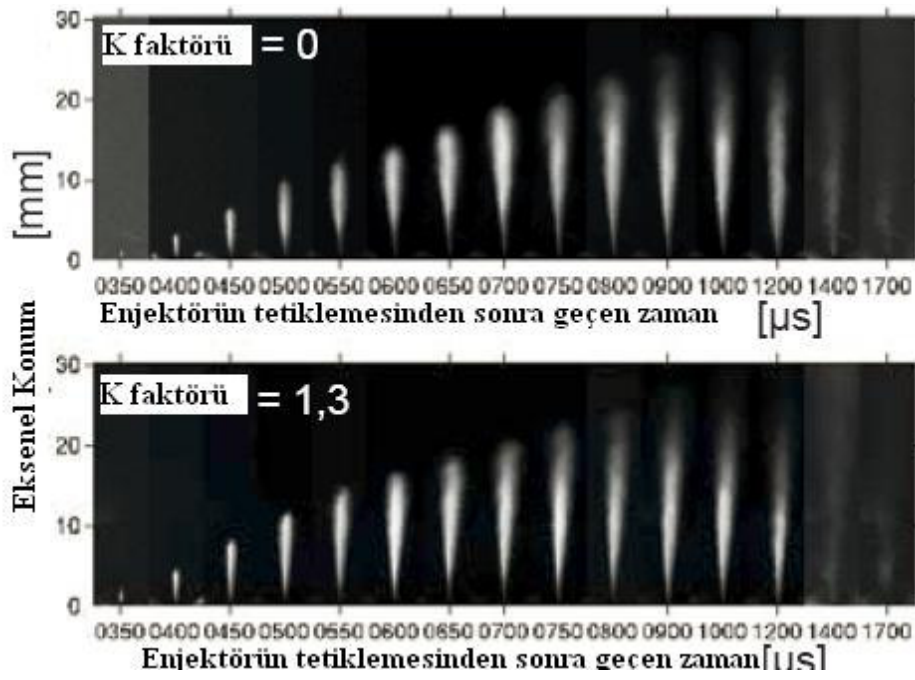
Enjektör meme kanalının giriş kısmı keskin köşeli olabileceği gibi yuvarlatılması da mümkündür. Araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde aynı püskürtme basıncı için yuvarlatılmış kenarlı enjektör memelerinin keskin kenarlılara göre daha yüksek deşarj katsayılarına sahip oldukları dolayısıyla daha yüksek debi verebildikleri ispatlanmıştır. Yuvarlatma sonucu akım daha laminar bir şekle dönüştürülebilmesi ve kanaldaki akış boyunca yakıt filminin meme kanal cidarından ayrılmasının engellenmesi sağlanabilir. Böylece kavitasyonun da azaltıldığı gözlenmiştir.

3.3.5 Meme Kanal Yuvarlaklığı

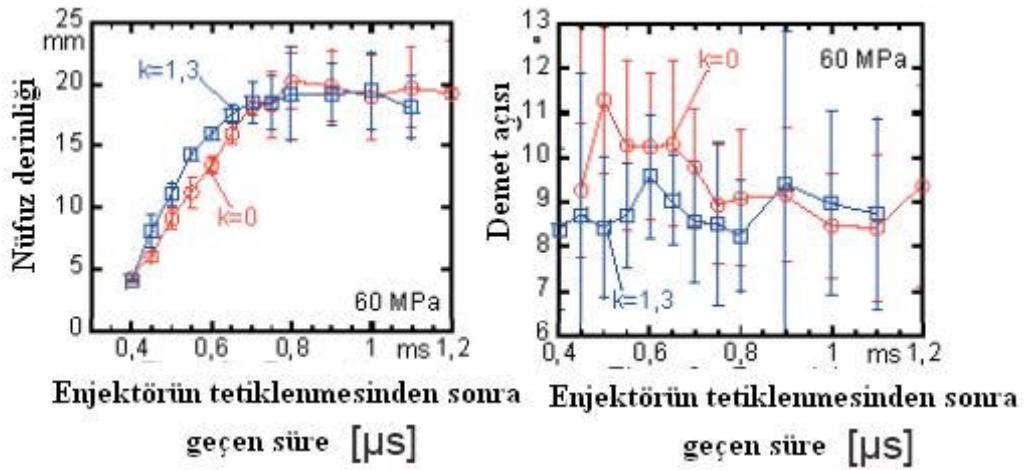
Koniklik yakıt demetinin nüfuz derinliğini etkilememektedir, fakat konikliği fazla olan memelerde maksimum nüfuz derinliğine ulaşma hızı daha fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra koniklik arttıkça yakıt demet açısı azalmaktadır.



Şekil 3.8: Meme Kanal Konikliği



Şekil 3.9: Kanal konikliğinin demet nüfuz derinliğine etkisi



Şekil 3.10: Kanal konikliğinin demet nüfuz derinliğine ve demet açısına etkisi

4. EGZOZ EMİSYONLARI

Dizel motorlarında karbonmonoksit, hidrokarbon, azotoksit ve partikül emisyonları yanma sonucunda meydana gelen zararlı maddelerdir. Yanma ürünü zararlı maddelerin insan sağlığına olumsuz etkileri alınış sürelerine ve alınış miktarlarına göre değişmektedir. Bu bakımdan üç farklı konsantrasyon tanımlamak mümkündür.

- MAK (Maksimum Atmosfer Konsantrasyonu): Sürekli olarak bulunduğu zarar vermeyecek miktar.
- MİK (Maksimum İşyeri Konsantrasyonu): Sekiz saat süreyle bulunduğu zarar vermeyecek miktar.
- DTK (Doğrudan Tehlike Konsantrasyonu): Çok kısa süre bulunduğu tehlike doğuracak miktar.

Bu tanımlara göre insan sağlığı açısından mevcut sınırlar aşağıdaki tablodaki gibi olmaktadır.

Tablo 4. 1 Kirletici Gazların Sağlık Açısından Tehlike Sınırları

Kirletici Maddeler	MAK	MİK	DTK
CO (ppm)	9	50	5000
HC (ppm)	20	300	30000
NO (ppm)	0,15	----	----
NO ₂ (ppm)	0,05	5	200

4.1 Karbonmonoksit (CO)

4.1.1 Karbonmonoksitin Tanımı

Karbonmonoksit, tatsız ve kokusuz bir gazdır. Havadan ağır olduğu için birikinti oluşturma ihtimali yüksektir. En büyük sorun ise kandaki hemoglobine çok yakınlık göstermesi ve onunla birleşmesidir. Bu suretle kanda oksijen taşımakla yükümlü olan hemoglobin bu işlevini yerine getiremez. Kanındaki CO ile birleşmiş hemoglobin %40 mertebesine ulaşan kişi ölüm tehlikesi altına girmiştir. Normal kirlilik düzeylerinde CO' nun etkileri insan organizması tarafından pek hissedilmez. Kanda

muhtemel CO ile birleşen hemoglobinler ise birkaç gün içerisinde normal hücre değişim kanalıyla yok edilirler.

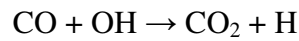
4.1.2 Karbonmonoksit Emisyonları

CO emisyonları içten yanmalı motorlarda hava/yakıt eşdeğer oranı ile ilgilidir. Yanma işlemi sırasında yakıtın olarak yakılmamsından kaynaklanır. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO₂' ye dönüşüm süresinin kısa olmasından dolayı yanmanın tamamlanamaması CO miktarını artırır. Zengin karışımlar için egzozdaki CO, giren yakıt miktarı yükselirken yükselen eşdeğer oranı ile birlikte düzenli olarak yükselir. Fakir karışımlar için egzozdaki CO konsantrasyonu eşdeğer oran ile az miktarda değişmektedir.

CO oluşumu hidrokarbonun yanma mekanizmasında birkaç reaksiyon basamağında meydana gelir.

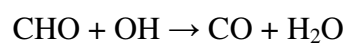
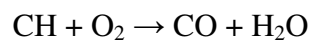
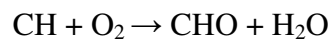


Yukarıdaki denklemde R hidrokarbon kökünü temsil etmektedir. Yanma işleminde oluşan CO oksitlendikten sonra düşük oranda CO₂' ye dönüşür. HC ve havanın yanma reaksiyonu ile CO oksitlenerek CO₂' ye dönüşür.

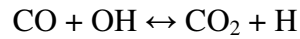
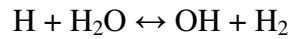


Yüksek sıcaklık ve basınçta karbon, oksijen ve hidrojen kapalı şartlar altında dengelenir. Böylece yanmamış gazlarda CO konsantrasyonu dengesi tamamlanır.

Motorlarda hava yakıt oranı CO üretimini önemli ölçüde etkiler. Bu oranın küçük değerlerinde CO emisyonu maksimum seviyede olmaktadır. Buna karşılık NO emisyonu minimum değerdedir. Hava/yakıt oranının büyük değerlerinde ise bunun tersi görülmektedir. Karbonmonoksit oluşumu karbon ve hidrojen ihtiva eden yakıtların oksijenle oksidasyonundan kaynaklanır. Çıkan ürünlerin parçalanması ile CO oluşmaktadır.



Karbonmonoksitin CO₂' ye dönüşmesinde OH kökü önemli rol oynar. Bu kök aşağıdaki reaksiyon ile oluşur.



Püskürtme sırasında fakir karışımlarda CO₂ oluşumu tamamlandığı halde CO tamamlanmayıp sınırdan kalır. Sıcaklık ve basınç yükseldikçe oksidasyon reaksiyonlarına bağlı olarak CO konsantrasyonları artar. Alevin çekirdek kısmında ise CO yüksek oranda oluşmaktadır. Yakıt hava oranı kontrol altında tutulduğu oranda CO emisyonu azaltılabilir. Dizel motorlarda benzinli motora göre CO emisyonları düşük oranlarda seyretmektedir.

4.2 Hidrokarbonlar (HC)

4.2.1 Hidrokarbonların Tanımı

HC toplam hidrokarbonlar için kullanılan bir kısaltma olup emisyon sınırlamasında da doymuş ve doymamış bütün hidrokarbonları ve aromatikleri temsil eder. Doymuş hidrokarbonlar (parafinler) kokusuz olup narkotik etkisi vardır ve aynı zamanda solunum yolundaki mukozayı tahriş edici özelliğe sahiptirler. Doymamış hidrokarbonlar (olefinler ve asetilenler) hafif kokulu olup bunlar da solunum yolu mukozasını tahriş ederler. Bu HC' lar, insanlar ve bitkiler için zararlı olan duman ve fotokimyasal sis oluşumunda önemli rol oynarken, ortamda NO olması durumunda güneş ışığının da etkisiyle tekrar oksidasyon tepkimesine girerek diğer bir zararlı olan ozon NO₃ oluşmasına neden olurlar. Aromatik HC' ların (benzen ve aldehit) karakteristik bir kokusu vardır. Bunların bir kısmı kanserojen olup bir kısmı da sinir sistemini olumsuz etkileyip düşük konsantrasyonda bile olsa göz ve burun tahrişlerine neden olurlar.

4.2.2 Hidrokarbon Emisyonları

Dizel motorlarında hidrokarbonlar, hidrokarbonlu yakıtların eksik yanması sonucu meydana gelirler. Egzoz gazlarındaki yanmamış hidrokarbon derecesi, karbon atomlarının milyon mertebesindeki kısımlardan toplam hidrokarbon konsantrasyonu ile ifade edilir. Dizel motorları egzoz gazlarında hidrokarbon veya organik emisyonlarının geniş bir kısmını ihtiva ederler. Egzoz gazlarının bileşiminde bulunan hidrokarbonların tamamı toplam hidrokarbon olarak adlandırılır. Bu hidrokarbonların bir kısmı etkisiz olup fotokimyasal görüş noktasında reaktif değildirler. Diğerleri ise

partikül üretiminde yüksek derecede reaktiftirler. Yapılarına göre 100'den fazla farklı hidrokarbon mevcuttur. Motorlu taşıtlar tarafından üretilen egzoz gazındaki hidrokarbon yakıt sisteminden buharlaşan yakıtın tam yanmayışından oluşmaktadır.

Yakıtın bileşimi, organik emisyonların büyüklüğü bakımından önemli derecede etkili olur. Hidrokarbonlar genelde alkanlar, alkinler ve aromatikler diye üç gruba ayrılır. Diğerleri bu üç grubun bileşenleri şeklindedir. Yüksek oranlarda olefin ve aromatikleri bulunduran yakıtlar daha yüksek reaktif hidrokarbon üretirler. Egzoz gazında bulunan organik bileşimlerinin çoğu yanma işlemi boyunca erime sentez oluşumu gösteren yakıtlar da mevcuttur. Egzoz gazında karboniller, fenoller ve düşük molekül ağırlıklı aldehit ve alifatik ketonlar da bulunmaktadır. Ayrıca buharlaşabilen aldehitler de bulunur.

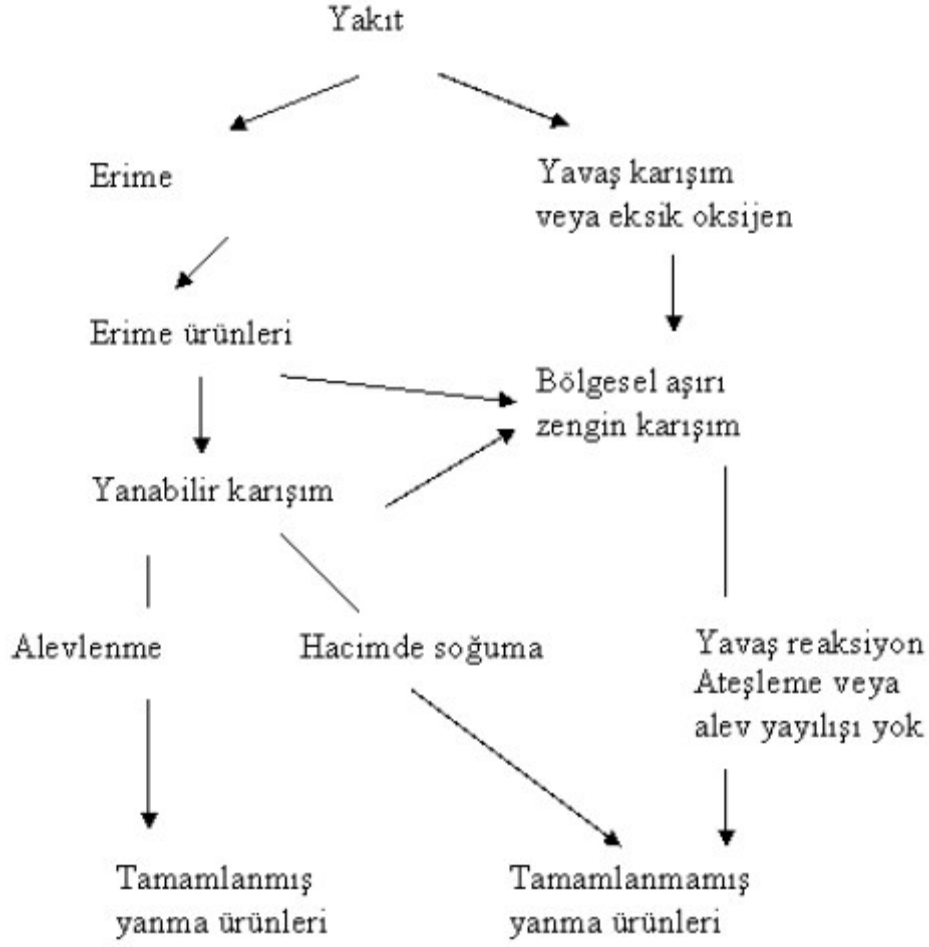
Dizel motorlarında hidrokarbon emisyon seviyeleri çalışma şartları ile büyük oranda değişmektedir. Motorun boşa ve hafif yükte çalışması, tam yükte çalışmasından daha yüksek oranda HC emisyonları üretir. Bununla beraber motora aşırı yakıt yüklenildiği zaman HC emisyonları yükselir. Motorun hafif yük altında çalışması halinde yanma odasında oluşan zengin karışım HC emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Silindirin cidar sıcaklığı da HC emisyonunu etkiler ve cidar soğuması sonucu eksik yanmadan dolayı HC emisyonu yükselir. HC' lerin oksidasyonu, yanmadan sonraki sıcaklığa, yanmış gazların silindir ve egzoz manifoldu içerisinde kalma süresine ve oksijen içeriğine bağlı olarak değişir.

Frank ve Heywood 1991, motorun soğutma suyu ve yağlama yağının sıcaklığının değişimini sağlayarak pistonun sıcaklığını arttırmak suretiyle HC emisyonlarının oranını düşürmüşlerdir. HC emisyonlarının, motor yağı ve soğutma suyunun 40°C' den 90°C' ye çıkması halinde %30 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Düşük sıkıştırma sıcaklıkları, basınç ve gecikmiş püskürtme zamanı HC oluşumunda önemli rol oynar. Çevrimden çevrime önemli değişimler olduğu zaman HC emisyonları daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yanma zamanında içeriye alınmış karışım tam olarak yanmıyorsa, HC emisyonları yanmanın bir yüzdesi olarak artış gösterir.



Şekil 4. 1: Tutuşma gecikmesi peryodunda püskürtülen yakıtın HC mekanizmasının şematik görünüşü

Şekil 4. 1’de tamamlanmamış ve tamamlanmış yanma ürünlerinin oluşumu şematik olarak gösterilmiştir. Gecikmiş bir tutuşma peryodu sırasında yakıtın hava ile karışması sırasında bazı bölgelerde fakir, bazı bölgelerde ise püskürtmenin yavaş ilerlemesinden ötürü zengin karışım oluşur. Zengin karışım oluşan bölgelerde tutuşma daha önce başlar. Buna karşılık fakir bölgelerde daha geç tutuşma oluşmaktadır. Genişleme zamanı başladığında zengin karışimli bölgelerde yanma tamamlandığı halde fakir karışimli bölgelerde yanma egzoz peryoduna kadar uzanır. Bundan dolayı egzoz emisyonlarında yanmasını tamamlayamamış yanma ürünleri ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4. 2: Yanma Sırasında Püskürtülen Yakıtın HC Oluşum Mekanizması Şematik Resmi

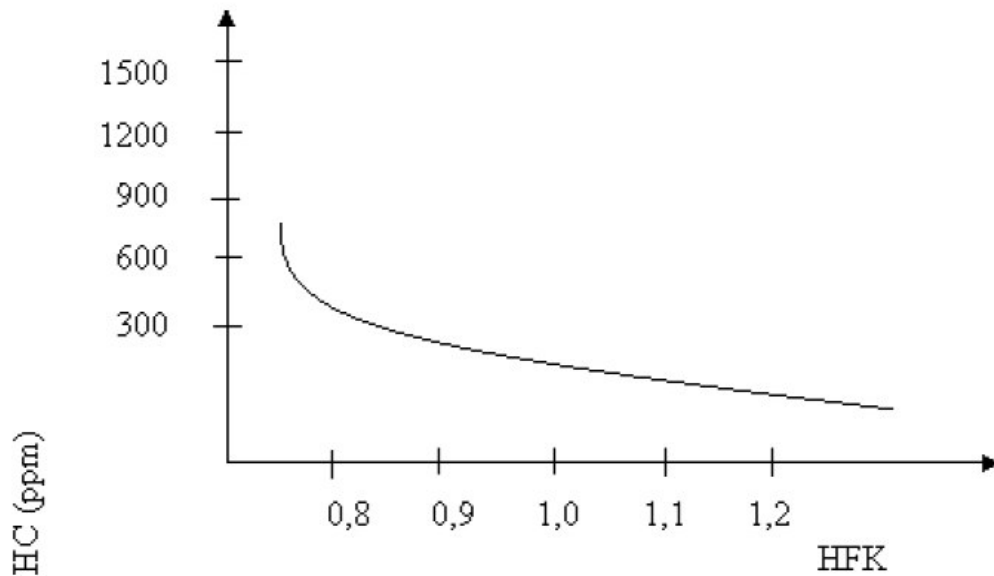
Şekil 4. 2’de yakıtın hava ile karışımı sırasında hızlı oksidasyon ve yakıtın erime ürünlerinin hava ile yavaş karışması zengin karışım oluşumuna sebep olur. Yavaş reaksiyon ve hacimde soğuma gibi haller tam yanma sağlanamadan egzoz periyodunda yanmış ve yanmamış yakıt ile erime ürünlerini dışarı atarak HC oluşumuna neden olmaktadır.

HC emisyonları yanmamış hidrokarbonlar ve kısmen yanmış hidrokarbonlardan ibarettir. Hidrokarbonlar 52°C’ de çözülebilir organik kısımların oluşumu sırasında is partikülleri içerisinde absorbe edilir veya yoğunlaşabilirler. Cidarların önündeki alevin sönmesi ile yanmamış HC ve karbon partikülleri beraberce oluşurlar. Fakir bir karışım ve yakıt damlacıklarının çapının büyük oluşu da diğer bir HC emisyonu oluşum kaynağıdır.

Yanmamış HC iki kaynaktan meydana gelir. Bunlardan biri yayılı alevin önündeki zayıf karışım, diğeri ise meme boşluğunda ve silindir hacminin genişlemesi boyunca sönmüş zengin karışımdır. HC emisyonlarında çatlak hacimler olarak isimlendirilen piston segmanları etrafındaki boşluk, supap başları ve enjektörlerin etrafındaki boşluklar gibi hacimlerin önemli etkisi vardır. Bu çatlak hacimlerde alevlerin sönmesi sonucu bu boşluklarda HC oluşur.

Daha yüksek sıkıştırma oranları ve basınçları ile çatlak hacimlerin yanma odasının hacmine oranı da HC oluşumunu etkiler. HC emisyonları yük ve hıza da bağlıdır. Hava fazlalık katsayısı ile küçük de olsa değişir. Yüksek yüklerde HC emisyonları düşük iken kısmi yüklerde bu oran artmaktadır.

Karışım zenginleştikçe karışımda bulunan O_2 miktarı düşmektedir. Fazla yakıt bulunması sebebiyle yüksek sıcaklıklar ortaya çıkmakta ve soğutma suyu ile yağlama yağına ısı geçişi artmaktadır. Sonuçta yanma reaksiyonlarında azalma ve HC oranında yükselme görülmektedir.



Şekil 4. 3: HC Emisyonlarının Hava Fazlalık Katsayısı İle Değişimi

4.3 Azotoksitler (NO_x)

4.3.1 Azotoksitlerin Tanımı

NO , NO_2 , N_2O_2 gibi bileşiklere genel olarak azotoksitler adı verilmektedir. NO_x ' ler de CO gibi kandaki hemoglobin ile birleşme özelliği göstermektedir. Bunun yanında NO_x en önemli zehirleyici etkisi akciğerlerdeki nem ile birleşerek nitrik asit oluşturması sonucu meydana gelmektedir. Oluşan asitin konsantrasyonunun azlığı

nedeniyle etkisi az olmaktadır; ancak zamanla birikim özelliği olduğundan özellikle solunum hastalıkları bulunan kişiler için tehlike oluşturmaktadırlar.

NO_x' ler aynı zamandan kimyasal sis oluşumunu da etkilemektedirler. Atmosferde bulunan su ile birleşerek nitrik asit oluşumuna ve dolayısıyla asit yağmurlarına sebebiyet verirler.

NO_x' ler içerisinde NO renksiz ve kokusuz bir gazdır. NO₂ ise kırmızı, kahverengi renkli, kötü kokulu ve tahriş edici bir gazdır. Yanma ürünleri arasında genellikle NO bulunmasına rağmen atmosfere atıldıktan sonra bir kısmı NO₂'ye dönüşmektedir.

4.3.2 NO_x Emisyonları

NO_x emisyonları genelde NO ve NO₂ emisyonlarından oluşur. NO motor silindiri içerisinde bulunan azotun oksitlenmesi olup başlıca kaynağı atmosferdeki azottur. Azot havadan oksijenle birlikte alınır. Havanın %79'unun N₂ ve %21'inin O₂ olduğu kabul edilmektedir. Havada %79 oranında bulunan azot NO_x' in asıl kaynağıdır. Azot ile oksijenin değişik şartlarda tepkimeye girmesi sonucu azotoksitler oluşmaktadır. NO_x oluşumu alev sıcaklığının 1800°K' nin üzerinde kalış süresi ve yeterli O₂ bulunan bölgelerdeki maksimum sıcaklık ve O₂ ve N₂ miktarına bağlıdır.

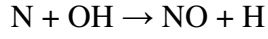
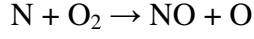
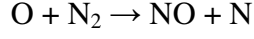
NO_x emisyonları yüksek toksik ve fotoreaktif olması nedeniyle önemli bir problemidir. NO_x emisyonlarının düşürülmesi için yanma odası cidar sıcaklıklarının düşürülmesi gerekmektedir. Bu da sıkıştırma başındaki hava sıcaklığının düşmesi, ateşleme avansının mümkün olduğunca geciktirilmesi ile mümkündür.

Silindir içerisindeki oksijen konsantrasyonunun artması ile NO_x emisyonları da artış göstermektedir. Yakıtın püskürtme süresinin uzatılması da oksijen konsantrasyonunu arttırmaktadır.

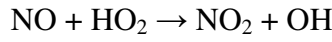
Motorda yanma yüksek basınçlarda oluşurken alev bölgesi oldukça incedir. Yanma işleminde yanmış gazlar bir yüksek sıcaklığa kadar sıkıştırıldıktan hemen sonra silindir basıncı düşer. Böylece alevin gerisindeki gazlardan NO_x oluşumu alevin ön tarafında oluşan NO_x de etki eder.

Yanma başlangıcı sırasında NO meydana gelmez. Yanma sonucu oluşan yüksek sıcaklık peryotlarında NO oluşumu başlar. Karışımın erken tutuşması sıcaklıkları ve dolayısıyla NO oluşumunu artırır. Genişleme sırasında basınç düştüğü için oluşan NO değişmeden kalmaktadır. Alevdeki azot oksitlerin oluşumu öncelikle yanmış

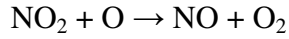
gazların özelliklerine bağlıdır. Böylece Zeldovich mekanizması ön plana çıkar. Yanmanın stokiyometrik oranda karışım ile olduğu kabul edilir ve NO oluşum reaksiyonları şu şekilde ifade edilir:



Alev bölgesinde oluşan NO aşağıdaki reaksiyon ile hızlı bir şekilde NO₂' ye dönüşebilir.

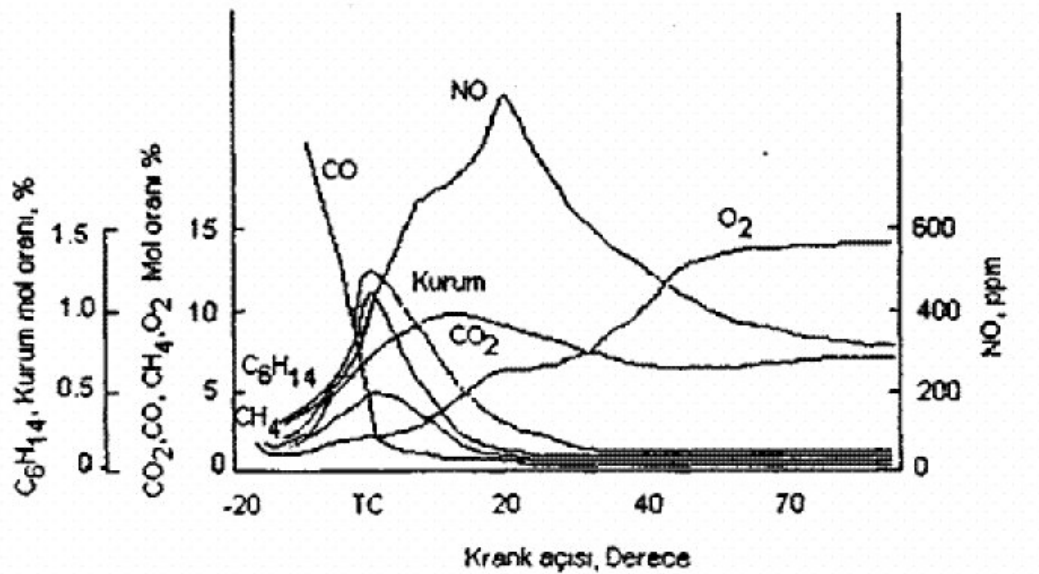


NO₂'nin tekrar NO' ya dönüşmesi ise



Reaksiyonu ile gerçekleştirilir. Alevin içinde oluşan NO₂ soğutucu akışkan vasıtasıyla tekrar soğumaya başlar.

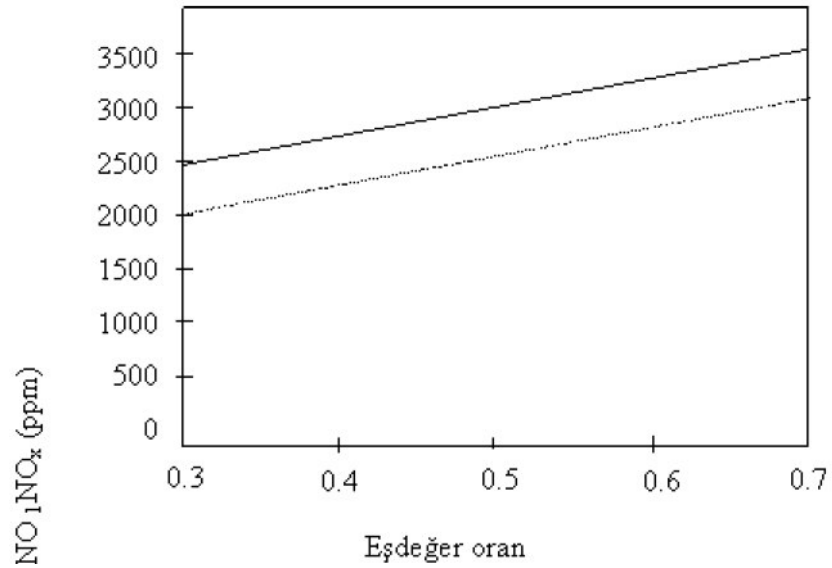
NO oluşumu yanmanın başlangıcını takip ederek toplanmış gazlarda yükselir ve yanmış gazların eşdeğer oranında zengin karışımdan fakir karışıma doğru artar. NO' nun oluşumunun yanma başlangıcından itibaren 20° krank mili açısı civarında olduğu ve NO konsantrasyonunun en yüksek basınç oluşturuluncaya kadar düşük olduğu, en yüksek basınç sağlandığı andan itibaren de hızla artmaya başladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 4: Emisyonların Krank Açısına Göre Değişimi

Şekil 4. 4’de görüldüğü gibi NO oluşumu, yanmanın başlamasıyla 20° krank mili açısına kadar devam etmekte ve en yüksek basınca ulaşıldığında maksimum değerine ulaşmaktadır. Daha sonra düşmeye başlar. CO ise yanmanın başlaması ile en yüksek değerde olur ve en yüksek basınç değerine ulaşılmadan düşmeye başlar. CO₂ oranı yanmadan sonra 20°KMA’ da en yüksek değerindedir.

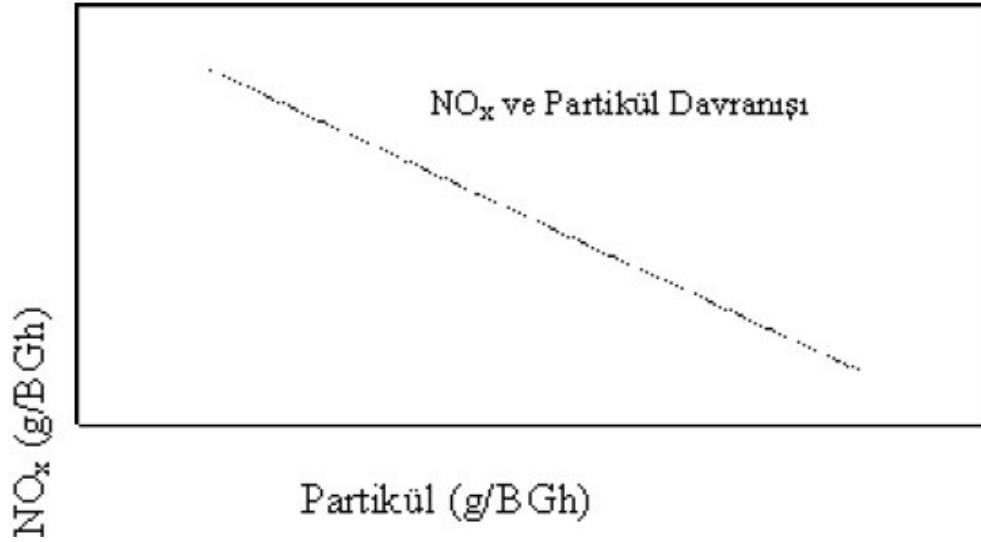
Yanma işlemi boyunca mevcut NO₂ konsantrasyonu dizel motorlarda karışımın içine girerek dönüşüm yapabilir. Dizel motorları için $\frac{NO_2}{NO}$ oranı kısmi yüklerde daha çok şekillenen NO₂ ile eşdeğerlilik oranının bir fonksiyonudur. Havada bulunan oksijenden dolayı yanma gerçekleşirken yanma ısısı ve dolayısıyla NO_x miktarı da artmaktadır. Tam yük, yüksek basınç ve sıcaklıklarda stokiometrik karışım şartlarında NO meydana gelmektedir. Eşdeğer oranın düşmesiyle NO ve NO_x konsantrasyonları düşmektedir. NO₂’ nin çoğu silindir içerisindeki sıcaklık yüksek iken yüksek eşdeğer oranında genişleme stroğu boyunca NO’ ya dönüşür. NO₂’nin çoğu düşük eşdeğer oranlı karışımlarda uzun ömürlüdür ve motordan dışarıya atılır.



Şekil 4. 5: Eşdeğerlik Oranına Bağlı Olarak NO ve NO_x Emisyonlarının Değişimi

Egzoz emisyonlarını azaltmak için yapılan çalışmalarda bazı problemlerle karşılaşmıştır. CO ve HC’ nin düşürülmesi için alınan önlemlerin NO_x emisyonlarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Yakıt püskürtme basınçlarının artırılması, enjektörlerin silindir duvarlarına yakın yerleştirilmesi ve damlacık çaplarının azaltılması HC ve CO emisyonlarını iyileştirirken NO_x emisyonlarını arttırmıştır.

NO_x emisyonları da diğer emisyonlar gibi motor hızı, yanma odası sıcaklıkları, O₂ konsantrasyonu püskürtme zamanı gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Silindir içerisindeki O₂ konsantrasyonunu artması ile birlikte NO_x konsantrasyonu artmaktadır. Bunun yanı sıra NO_x emisyonları ile partikül emisyonlarının ters orantılı olduğu da söylenebilir.



Şekil 4. 6: NO_x ve Partikül Emisyonları Arasındaki Etkileşim

4.4 İs ve partiküller

4.4.1 İs ve partiküllerin tanımı

İçten yanmalı motorlar tarafından üretilen katı taneciklerin büyük bir bölümünü is oluşturmaktadır. İs yanmamış karbon partikülleridir ve özellikle dizel motorlarında oluşmaktadır. İs zararlı bileşenleri bünyesinde taşıyarak solunum sisteminde birikir ve sağlığa zararlıdır. Dizel motorlarının egzozundan atılan partiküller karbon-hidrojen zincirinden oluşmakta olup bünyelerinde yanmamış hidrokarbonları, oksitlenmiş hidrokarbonları, polinükleer aromatikleri ve kükürt dioksit, azot oksit ve sülfürik asit gibi inorganik bileşenleri bulundurmaktadır.

Tablo 4. 2: Partikül Emisyonlarının Bileşenleri

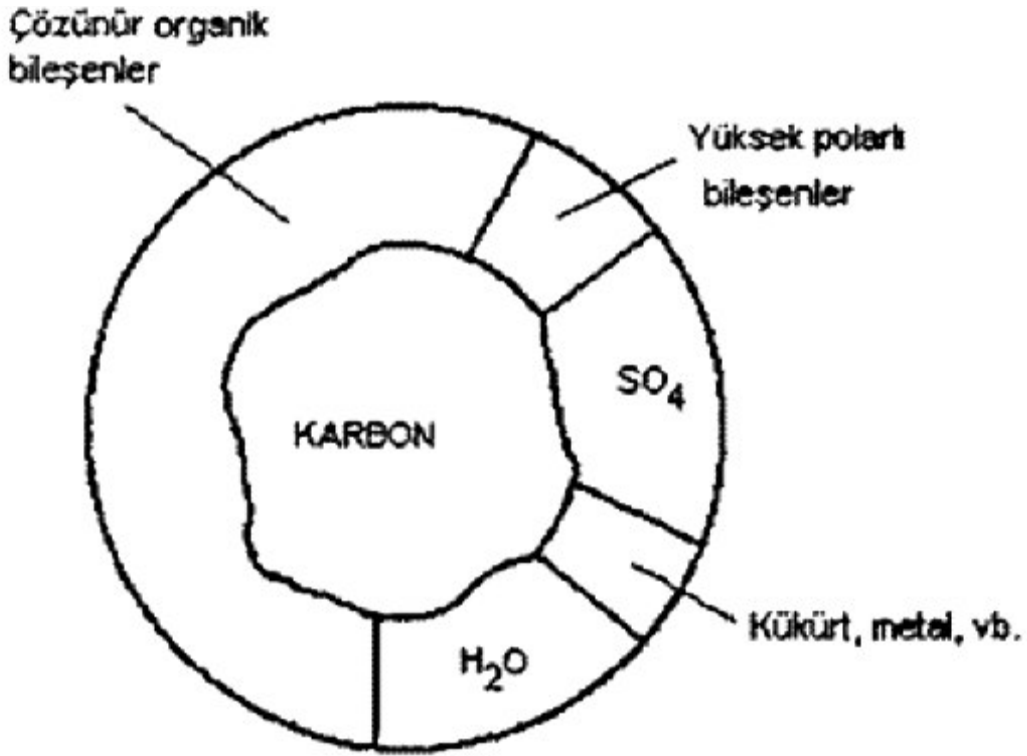
Partikül Bileşeni	Dizel egzoz gazındaki partikül emisyonunun içeriği (ağırlık %)
Katı Parçacıklar	66 – 82
Sıvı yakıt ve organik bileşenleri	11 – 15
Motor yağı ve organik bileşenleri	9 – 11
Kükürt bileşenleri ve su	1 - 11

Partikül maddelerin basit kimyasal formülleri olmayıp içeriğinde karbon ihtiva eden değişik kimyasal bileşenleri oluşturduğu bir harmonidir. Solunum yollarının tahrişine neden olduğu gibi öksürük ve astıma da yol açabilmektedirler. Partiküllerin bir kısmı yanmamış hidrokarbonları da bünyelerinde bulundurmaktadır ki bunlar kanserojen özelliktedirler.

4.4.2 Partikül Emisyonları

Dizel partikülleri genellikle yanma esnasında karbonlu maddeleri ihtiva eden bazı organik bileşimlerin absorbe edildiği emisyonlardır. Partiküllerin çoğu hidrokarbonların tam yanmamasından meydana gelmektedir. Partikül maddelerinin bileşimi motor egzozundaki şartlara bağlıdır. 500°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda yaklaşık partikül küreciğinin çapı 15 ile 30mm arasında değişen bir çok küre ve karbon küreciklerinin bir yığını olarak görülmektedir. Sıcaklığın 500°C' nin altına düşmesi halinde partiküller yanmamış hidrokarbon, oksidasyona uğramış hidrokarbon; ketonlar, eterler, organik asitler; ve polinükleer aromatik hidrokarbonlar ihtiva eden yüksek molekül ağırlıklı bileşimler halinde yoğunlaşır ve tabaka haline gelirler. Partikülün yapısı, karbon taneciklerine sülfatlar, metal ve benzeri oksitler, nem, yüksek polarlı bileşenler ve organik bileşenlerin yapışması ile meydana gelirler. Yoğuşmuş olan kısımlar sülfür dioksit (SO₂), azot dioksit (NO₂) ve sülfürik asit (H₂SO₄) gibi inorganik türler de ihtiva ederler.

Tek partiküller kürecik zincirleri halinde meydana çıkarak dizilirler. Bu dizilişler kümeleri meydana getirirler. Kümeler dört bin kadar kürecik ihtiva edebilirler. Küreciklerden oluşan partikül boyutları iki boyutlu olarak görüldüğü gibi tek boyutlu bir kompleks şeklinde de görülebilirler.

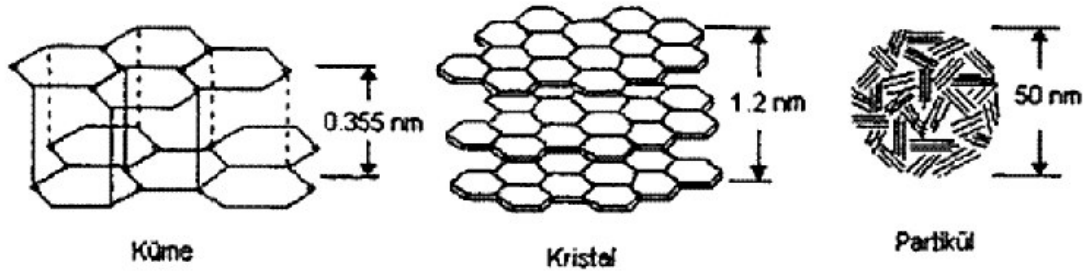


Şekil 4. 7: Egzoz partikülünün kimyasal yapısı

Dizel partikül oluşumu, yakıtın cinsine, yanma odası sıcaklığına ve hava fazlalık katsayısına bağlıdır. Dizel partikülü ve is üretimi alevin çevreye yayılması ile zengin karışımda ve yüksek sıcaklıkta daha fazla olmaktadır. Ayrıca bu oran hıza ve yüke bağlı olarak da değişmektedir. Partikül emisyonları püskürtme basıncının artması ile azalmaktadır. Partiküllerin oluşumunda yanmamış yakıt, yanmamış yağ ve yanma ürünleri önemli rol oynamaktadır. Özellikle yağlama yağı partikül oluşumunda etkilidir. Yağlama yağı segmanlar vasıtasıyla yanma odası içine girebilmektedir. Yağlama yağının viskozitesi dizel yakıtına göre daha yüksektir. Karbon hidrojene göre daha geç yandığı için partikülün çekirdek kısmı yağlama yağı tarafından oluşturulmaktadır.

Partikül boyutu ve yüzey alanı, hava fazlalık katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Dizel partikülleri, yanma sistemlerinin sahip olduğu farklı kaynaklara rağmen aynı görünüşe sahiptir. Partikül oluşumu hidrojenin karbona oranının iki olması ile başlar. Karbon atomları kümeleşmiş olarak yüzey merkezli altıgen paketler halinde dizilirler. Sıcaklık ile partiküllerin sıralanışı grafit benzeyen bir şekle dönüşür. Partiküldeki grafitleşme oranı sıcaklığa bağlıdır. Yeni oluşan partiküller yüksek bir hidrojen içeriğine sahiptir ve partikül içerisinde tabii olarak karbon bağlarının varlığı söz konusudur.

Bir dizel partikülü kafes yapısı her küreciğin merkezi etrafında düzenlenmiş ortak merkezli lamelli bir yapı şeklindedir. Ortak merkezli lamellerin düzeni karbon yapısına benzer. Karbon atomları genel olarak küme şeklinde altıgen yüzey merkezli düzende birbirine bağlanırlar. Kümeler kristal şekilli tabakalardan oluşurlar. Her kürecikte bin, kristal sırasında ise 2 ile 5 küme vardır. Tek bir kürecik yüz beş civarında karbon atomu ihtiva etmektedir.



Şekil 4. 8 Karbon partikülünün yapısı

Dizel motorlarında partikül miktarı yanma başlangıcından hemen önce hızlı bir şekilde yükselir. Enjektör deliğine yakın yakıt huzmesinin eksenindeki partikül konsantrasyonu da önemlidir. Aşırı derecede zengin yakıt çekirdeğindeki karbon, yüksek basınçlı olarak alev çekirdeğine tesir etmektedir. Piston çukurunun dış çapına yakın huzmede ve silindir cidarında önce yükselir, daha sonra yavaş yavaş düşer.



Şekil 4. 9 Silindir içerisindeki partikül oluşumunun şematik gösterilişi

Yakıt huzmesinden uzak kurum birikimleri, huzmenin merkez ekseninden yükselen mesafe ile birlikte hızlı bir şekilde düşer. Yanma işlemi boyunca silindir içindeki kurum konsantrasyonu, egzozu önceden okside eden şekillenmiş kurumun tamamını ortaya çıkarır.

Dizel motorlarında silindir içerisinde yanma püskürtmeyi müteakip oluşmaktadır. Hava fazlalık katsayısı sabit olarak değişir. Hava yakıt karışımı oluşurken karışım homojen olarak yanmaz ve alev bölgesinde ara ürünlerin oluşumu artabilir. Alevi üç bölgeye ayırmak mümkündür.

- Çekirdek bölgesi
- Orta bölge
- Dış bölge

Birinci bölgede kurum oluşumunun sebebi zengin karışımındaki yakıt buharı ve yakıt zerreciklerinin bir arada bulunmasıdır. İkinci bölgede sadece zerrecikler çıkar ve kurum üretimi durur. Üçüncü bölgede ise artık fakir karışım olduğu için yakıtın içindeki kurum yakıt ile beraber yanar. Egzoz sistemindeki kurum oksidasyonu is oluşumunun bir fonksiyonudur.

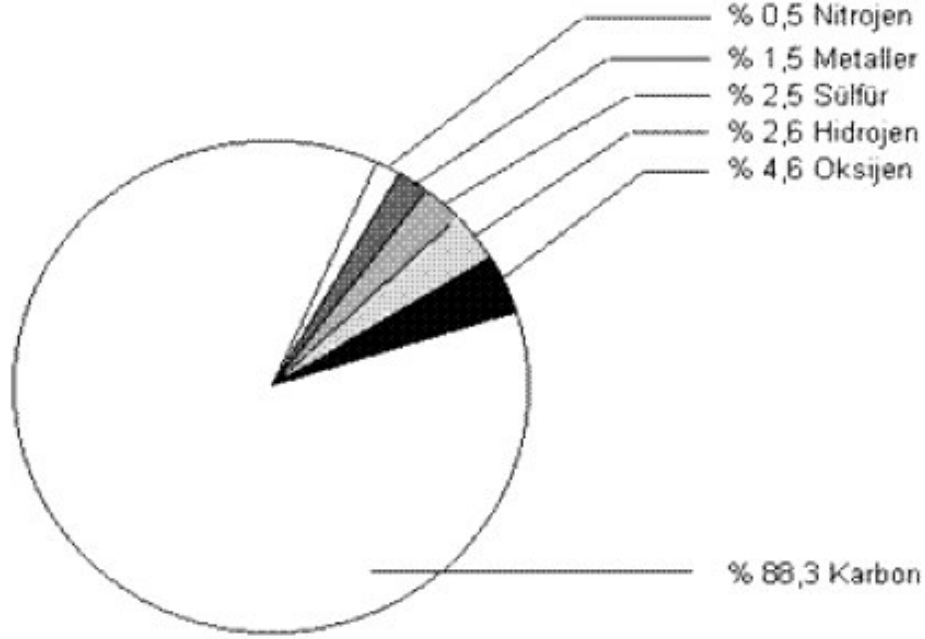


Şekil 4. 10: Türbülans yayılmalı alevde kurumun oluşumu ve oksidasyonu

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

- Beyaz Duman: Soğuk havalarda görünür. Genellikle su buharıdır. Kirletici değildir. Soğuk ilk harekette veya çok düşük yüklerde görülen beyaz duman yük artınca kayboluyorsa yoğunlaşmış yakıt buharıdır.

- Mavi Duman: Tam yanmamış yakıt veya bilhassa aşınmış motorlarda yağ zerreciklerinin oluşturduğu dumandır.
- Siyah Duman: İs – karbon parçacıklarının oluşturduğu dumandır. Tam yükte ve düşük hava/yakıt oranlarında ortaya çıkar.
- Diğer Parçacıklar: Sülfatlar, yağlama yağı ve yakıt içindeki katkılardan gelen parçacıklardır.



Şekil 4. 11: Partikül bileşimindeki elementlerin ağırlık oranları

Partiküllerin kütleli olarak %71 kadarı karbondan, %20 kadarı (%2,6 hidrojen + %16,9 karbon) hidrokarbon bileşiklerinden %5 kadarı da metalik bileşiklerden oluşmaktadır.

Aşağıdaki tabloda dizel motorunun egzoz gazlarındaki katı, sıvı ve gaz halindeki emisyonlar gruplandırılmıştır. Dizel motorlarında çıkan partiküllerin önemli bir bölümü katı haldedir.

Dizel motorundaki yanma incelendiğinde silindirde buharlaşan yanmamış motor yağının egzoz gazlarında hidrokarbon artışına neden olduğu görülmektedir. Buna ek olarak alev cephesinin yetersiz alev bölgelerindeki hidrokarbonlar da birbirleri ile reaksiyona girmekte ve partikül oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Partikül çekirdekleri katlaşma sürecine girdiklerinde Şekil 4. 12’de gösterildiği gibi kurum küreciklerinin oluşumuna sebep olmaktadır. Şekilde bir partikülün oluşumu elli

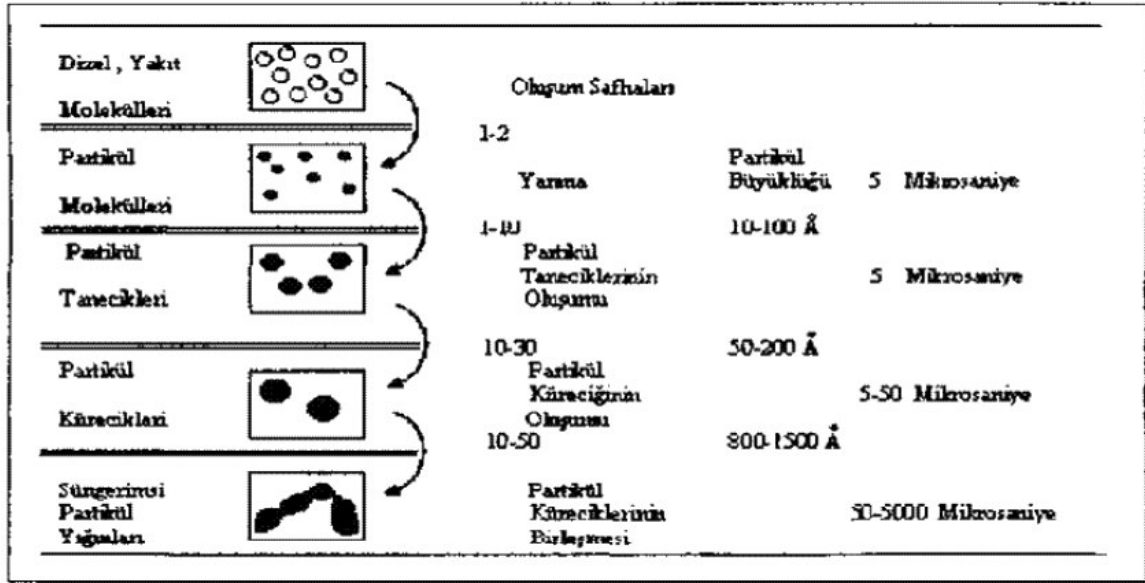
safhaya ayrılmıştır. Oksijenin bol olduğu yanma bölgelerinde partiküllerin oksijenle birleşmesi olasıdır.

Tablo 4. 3: Dizel motorlarından çıkan katı, sıvı ve gaz emisyonlar

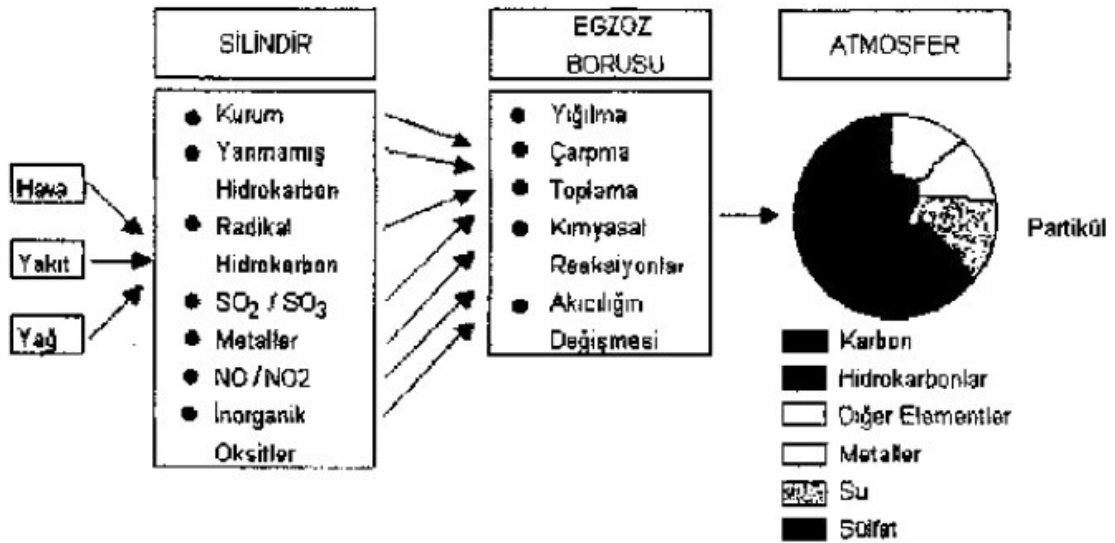
Gaz	Sıvı	Katı
N ₂	H ₂ O	Kurum
CO ₂	H ₂ SO ₄	Metaller
CO	Hidrokarbonlar	İnorganik maddeler
H ₂	Oksijenli karışım	Sülfatlar
NO / NO ₂	Poliaromatikler	Katı hidrokarbonlar
HC		
Oksijenli karışım		
Organik azot ve kükürt bileşimleri		

Yakıt içerisindeki hidrokarbonlar ve yanmamış motor yağı içerisindeki elementler, partikül oluşumunun 10, 11 ve 12. safhalarında PAH oluşuma neden olurlar. Yakıt içerisindeki organik sülfürler oksitlenirler. Bunun yanı sıra, sülfatlar da oksitlenebilirler. Motor yağı katkıları da oksitlenebilir ve inorganik oksitlerin oluşmasına sebep olabilirler. Şekil 4. 13’de egzoz gazlarının silindirden atmosfere çıkıncaya kadar olan süre içerisindeki partikül oluşumum şematik olarak ifade edilmiştir. Partiküller şekilde görüldüğü gibi, yoğunlaştırılmış hidrokarbonların üzerinde, inorganik oksitlerin ve metal partiküllerinin birikmesi ile oluşmaktadır. Su ve sülfürik asit de yine bu partiküller üzerinde yoğunlaşabilmektedir.

Dizel motorları genelde fakir karışım oranlarında çalışmakta ve hava/yakıt oranı motorun yük durumuna göre değişmektedir. Şekil 4. 14’de hava fazlalık katsayısının emisyonlara etkisi görülmektedir. Karışımın belli bir oranın üzerinde zenginleşmesini sınırlayan belli bir is sınırı mevcuttur. Özellikle, hava fazlalık katsayısı 2’den az olduğunda önemli derecede is emisyonu ortaya çıkmaktadır.



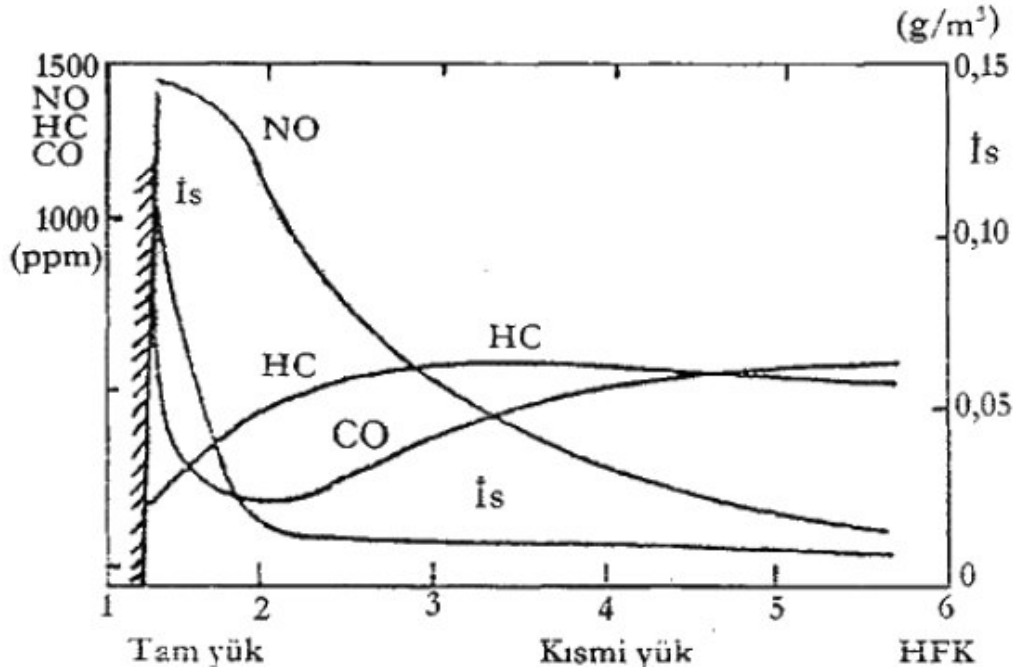
Şekil 4. 12: Partikül çekirdeklerinin katılaşma süreci



Şekil 4. 13: Egzoz gazının silindirden atmosfere kadar almış olduğu yolda partikül oluşumu

Düşük yüklerde sıcaklığın az olması nedeniyle CO' nun oksidasyonu için gerekli reaksiyonlar gerçekleşmediğinden CO miktarı yükselir. Yük arttıkça CO azalmaktadır. Tam yüke doğru oksijen miktarının ve reaksiyon süresinin azalması nedeniyle CO miktarı tekrar artış göstermektedir. Yükün artışı ile silindire alınan yakıt miktarının artması ve sıcaklıklardaki artış reaksiyonları hızlandırmakta ve yanmamış HC emisyonları azalmaktadır.

NO_x miktarı yük arttıkça buna bağlı olarak sıcaklığın artması ve hava/yakıt oranının stokiyometrik orana yaklaşması ile artmaktadır.



Şekil 4. 14: Direkt püskürtmeli dizel motorunda egzoz gazı kirlenici konsantrasyonları

İs miktarı yük arttıkça artmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi yük arttıkça HFK azalmakta ve buna bağlı olarak yanma odası içindeki hava miktarının azalmasıyla karbon tanecikleri yanmasını tamamlayamadıklarından is oluşumuna neden olmaktadır.

4.5 Dizel Motor Tasarım ve İşletme Parametrelerinin Emisyonlara Etkileri

4.5.1 Tasarım Parametrelerinin Etkileri

Motor verimini artırma çalışmaları, yanmayı ideal şartlara yaklaştırma ve egzoz emisyonlarını düşürme araştırmaları günümüzde en popüler araştırma konularından birisidir. Bu amaçla, motor sıkıştırma oranının, püskürtme zamanı ve açısının değiştirilmesi, enjektör memesi şekli, alanı, delik sayısı, delik çapı ve manifold supaplarının üzerinde geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.

4.5.2 Enjektör Memesi

Dizel motorlarında enjektör tasarımı ve çalışma parametrelerinin performans ve egzoz emisyonları üzerinde çok net ve kesin bir etkisi vardır. Tablo 4.4' de enjektör meme tasarımının bazı yanma karakteristiklerine olan etkileri belirtilmiştir. Bu bilgilere göre meme delik sayısı ve püskürtme açısı ve püskürtme basıncının yakıtın atomizasyon

şekli üzerinde belirleyici rol oynadığı, çok delikli enjektör memesinin tek delikli memeye performans ve emisyon değerlerinde üstünlük sağladığı görülmektedir.

Çok delikli meme yapısında TG 'nin azaldığı, P_{max} ve P_{me} 'nin dp/dt oranının yükseldiği buna karşılık buna karşılık özgül yakıt sarfiyatının önemli miktarda düşme gösterdiği anlaşılmaktadır. Meme çaplarındaki küçülme ve çok delikli memelerde delik sayısının fazlalığı da yine benzeri oranda emisyon ve performans değerleri üzerinde etki göstermektedir.

Tablo 4. 4: Enjektör meme tasarımının yanma karakteristiklerine etkisi

Enjektör Tipi	Çap veya Delik Sayısı	TG (KMA)	P_{max} (kg/cm ²)	P_{me} (kg/cm ²)	b_e (g/hp h)	(dp/dt)
Tek Delikli	0,2mm	20	----	----	----	----
	0,5mm	20	37	4,5	372	2,04
	1mm	13	47	4,8	359	2,04
Çok Delikli	2	13	51	6,0	286	6,12
	6	12	54	7,8	213	6,12
	16	14	44	5,2	327	3,06

4.5.3 Yanma Odası Biçimi

Dizel motorlarında hem basınç yükselme hızı hem de maksimum basıncın krank açısı cinsinden kontrolü ve zamanlaması gerekir. Basınç yükselme hızı için gerekli olanın tersine performans açısından da yanmanın uzun sürmesi istenmez. Dolayısıyla dizel motorlarında yanma odası tasarımı son derece önemli olmaktadır. Yüksek hızlı dizel motorları için tasarım esnasında, sıkıştırma oranı, maksimum devir ve çalışma sıcaklığı tespit edilmişse TG ancak yakıtın kalitesine bağlı olarak kontrol edilebilir.

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 yanma odalı dizel motorlarda yakıt sarfiyatının az olduğu ve tutuşma kabiliyeti düşük yakıtlarla bile kolayca tutuşma

sağlandığı, bölünmüş yanma odalı motorlarda ise yukarıdaki bilginin tersine bir sonucun çıktığı araştırma sonuçlarıyla ortaya konulmuştur.

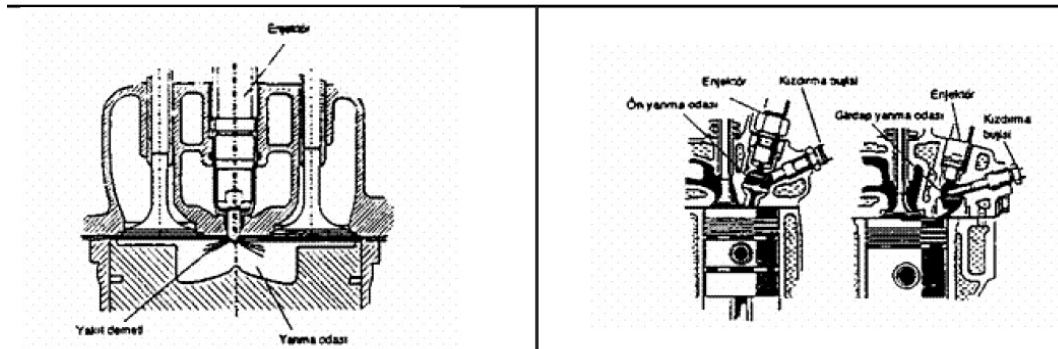
Bölünmüş yanma odalı motorlarda yakıt püskürtme karakteristikleri, direkt püskürtmeli yanma odalı motorlara nazaran pek önem arz etmemektedir. Zira, bölünmüş yanma odalı motorların düz yanma odalı motorlara kıyasla sıkıştırma oranı yüksek, yakıt enjeksiyon basıncı ve verimi ise daha düşüktür.

Direkt püskürtmeli dizel motorlarında püskürtmenin yapıldığı, piston içerisindeki çanak şeklindeki oyukun geometrisi ve boyutlarının, hava hareketleri açısından, önemi büyüktür.

Direkt püskürtmeli motorlarda pistonun ÜÖN' ye 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 iş oluşumunun azalmasına neden olur. Bu şekilde oluşan hava hareketinin hızı büyük ölçüde, piston ÜÖN' ye geldiği anda, pistonun en üst yüzeyi ile motor kapağı arasında kalan boşluk azaldıkça artmaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi, direkt püskürtmeli motorlar piston üst yüzeyi ile motor kapağı arasında kalan boşluk mümkün olduğu kadar az olacak şekilde imal edilerek is emisyonu düşürülebilir.

Bölünmüş yanma odalı dizel motorlarında ise ön yanma odası ile ana yanma odası arasındaki kanalın yapısı (büyüklüğü) kirletici egzoz emisyonunu etkilemektedir.

Kanal kesitinin küçültülmesi partikül ve HC emisyonunu azaltmaktadır; çünkü kanal kesiti küçüldükçe ön yanma odasındaki hızlar artmakta ve yakıt demeti daha kolay parçalanmaktadır. Ancak bu durumda yanma hızlanıp sıcaklıklar artacağından NO_x emisyonu artmaktadır. Bu durum ayrıca ilk hareket güçlüğü meydana getirmektedir.



Şekil 4. 15: Direkt püskürtmeli ve ön yanma odalı dizel motorlarının kesit resimleri

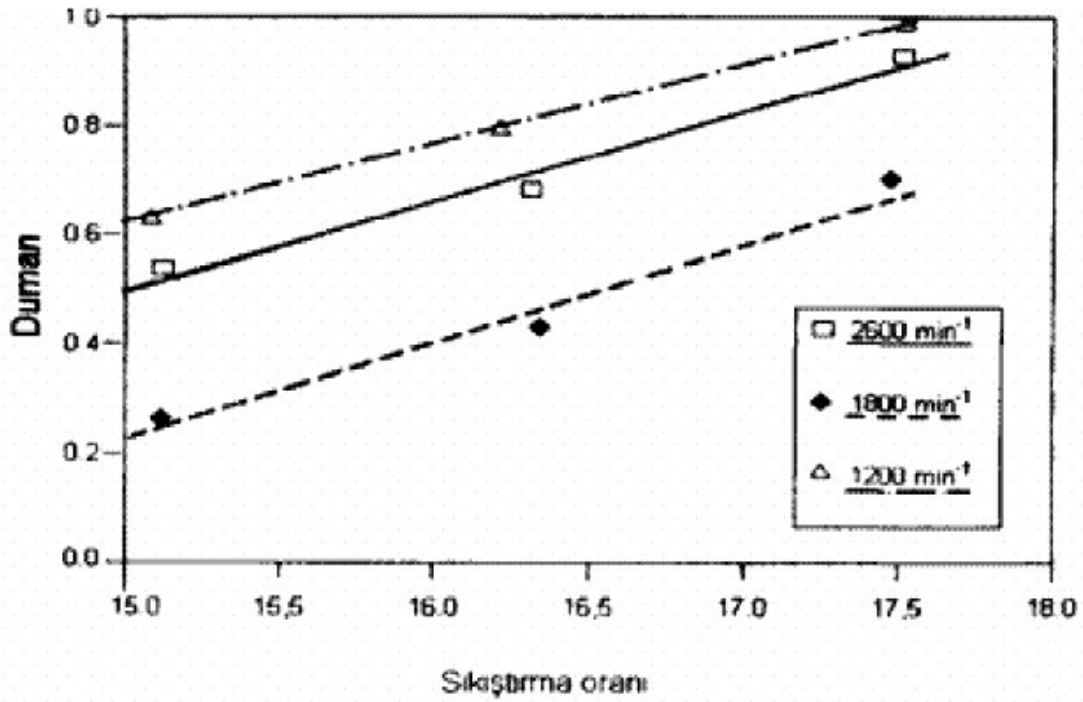
4.5.4 Manifold Tasarımı

Emme manifold çapının silindir çapına oranı, volümetrik verim ve hava-yakıt oranı açısından önem kazanmaktadır. Emme havasına verilen türbülans ve emiş hızı, silindire alınan taze hava miktarını etkilediğinden manifoldun tasarımında bu hususlar dikkate alınmaktadır. Keskin köşe veya cidar pürüzlülüğünün fazlalığı hava giriş hızını ve miktarını azaltmakta, dolayısıyla silindire alınan dolgu kütlelerinde düşme olmaktadır. Karışım içerisindeki hava oranının azalması yanmanın kötüleşmesine yol açtığından, motor performansı ve emisyon değerleri üzerinde olumsuz etki meydana getirmektedir. Benzeri bir durum ise egzoz manifold tasarımında görülmektedir. Egzoz manifoldun da yanmış gazların çıkışına direnç olacak şekilde düzenlenecek olan biçimler (keskin köşeler, pürüzlü yüzeyler gibi) yanma odası içerisinde artık gazların birikmesine yol açacak ve dolayısıyla taze dolgunun yanma odasına girişini önleyecektir. Bu durum volümetrik verimin azalmasına sebep olacaktır. Bu mahsurları önlemek amacıyla manifold tasarımcıları, manifold da oluşabilecek dirençleri engellemeye, manifold ceketlerinde gaz titreşimlerini yok etmeye yönelik biçimler üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmaktadırlar.

4.5.5 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; ancak maksimum basıncın artması krank-biyel mekanizmasının daha dayanıklı yapılmasını gerektirir. Ayrıca, kompresyon kaçaklarının artması ve motorun ilk harekete geçişin zorlaşması mekanik verimi azaltır.

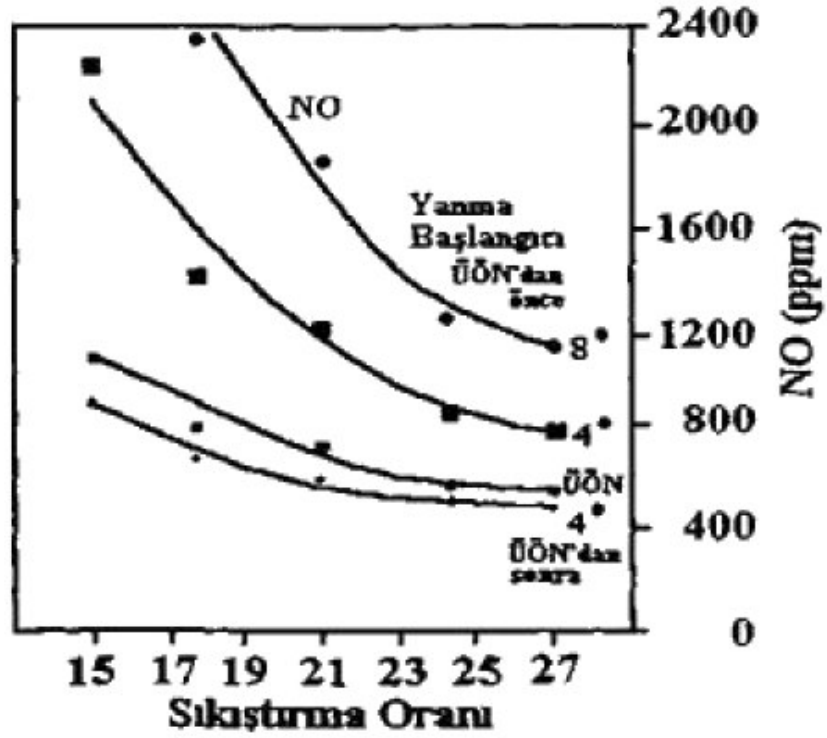
Şekil 4. 16 'da sıkıştırma oranına bağlı olarak duman miktarının değişimi görülmektedir. Sıkıştırma oranının artmasıyla duman miktarı da buna bağlı olarak artmaktadır. Zira, sıkıştırma oranının artmasıyla yanma odası içerisindeki girdabın azalması ve hava yakıt karışım formasyonunun kötüleşmesi duman miktarının artmasına neden olmaktadır. Sıkıştırma oranının artışı ile yanma odasındaki ortalama gaz hızlarında, sıcaklık ve basınç seviyesinde artış görülür. Ayrıca silindire giren hava-yakıt karışımının kütlesi de değişmektedir. Sıkıştırma oranının artırılması sonucu, ÜÖN civarında, yanmanın gerçekleştiği süreçte yanma odasının yüzey/hacim oranı artacağından HC emisyonları olumsuz etkilenecektir .



Şekil 4. 16: Sıkıştırma oranının duman miktarına etkisi

Bu değişken tutuşma gecikmesini kontrol eder. Direkt püskürtmeli dizel motorlarında NO oluşumuna etkiyen önemli faktörlerden biridir. Şekil 4.17’ de 1400 d/d’ da 15:1-27:1 aralığında değişen sıkıştırma oranının, NO emisyonlarına etkisi görülmektedir.

Püskürtme avansının sabit kalması şartıyla, sıkıştırma oranının azaltılması tutuşma gecikmesini uzatacaktır. 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 kısılacağından NO oluşumu azalacaktır. Fakat sürtünme işi artacağından çevrim verimi kötüleşecektir.



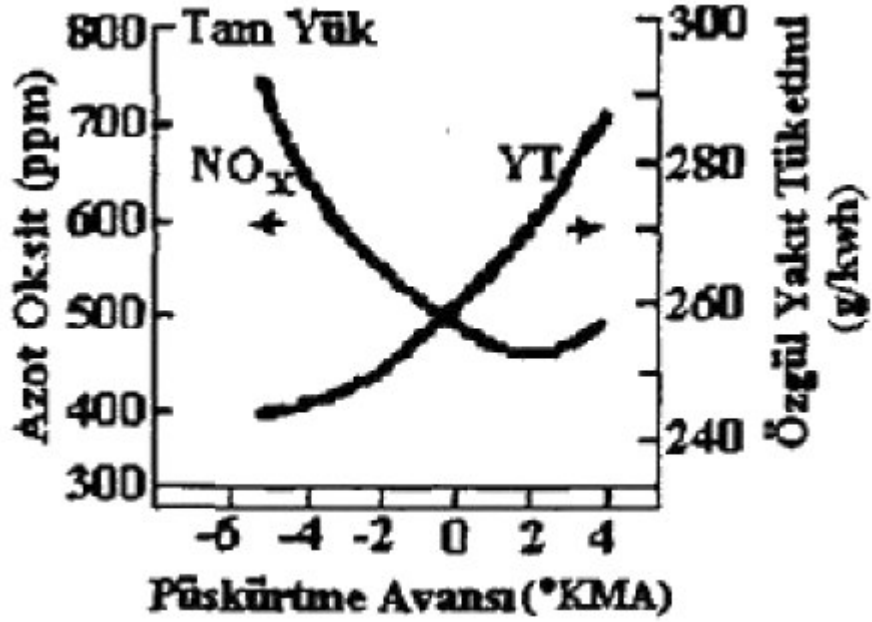
Şekil 4. 17: Sıkıştırma oranının NO emisyonlarına etkisi

4.5.6 Püskürtme Açısı

Püskürtme esnasında yakıt, enjektörden silindirik bir huzme şeklinde çıkmakta, daha sonra meme deliği çapı, uzunluğu ve geometrisi, havanın ve püskürtülen yakıtın yoğunluğu ile püskürtme basıncına bağlı olarak değişik davranışlar göstererek gaz ortama nüfuz etmektedir. 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.

4.5.7 Püskürtme Avansı

Diğer parametreler sabit kabul edilirse, direk püskürtmeli bir dizel motorunda püskürtme başlangıcının bir miktar öne alınması tutuşma gecikmesini artıracığından bu safhada silindirlere daha fazla yakıt püskürtülecektir. Tutuşma ile birlikte dizel motoru yanma süreçlerinden biri olan ani yanma periyodunda birim krank derecesi başına düşen basınç değişimi (dp/da) aşırı derecede artacağından çevrimin maksimum sıcaklığı ve basıncı da yükselecektir. Buna bağlı olarak NO_x emisyonlarında bir artış olacaktır. Şekil 4.18'de püskürtme avansına bağlı olarak NO_x emisyonlarının ve özgül yakıt tüketiminin değişimi görülmektedir.



Şekil 4. 18: Püskürtme avansının NO_x ve yakıt tüketimine etkisi

Püskürtme avansının azaltılması NO_x emisyonlarını azaltarak, is oluşumunu artırır. Bu durum püskürtme basıncının artırılmasını gerektirir. Dolayısıyla malzeme dayanımı ve yakıt sisteminin fiyatının artması gibi sorunlar ortaya çıkacaktır. Avansın azaltılması silindir içi maksimum basıncı düşürür, fakat yanmamış yakıt miktarı artacağından, yakıt tüketimi kötüleşmektedir. Ayrıca avansın aşırı azaltılması hafif yüklerde teklemeye sebep olmaktadır. Normal çalışma şartlarında püskürtme avansının ÜÖN 'den 10°-15° önce olması durumunda tutuşma gecikmesi minimumdur. Tutuşma gecikmesindeki artış püskürtmenin daha erken veya daha geç yapılmasından kaynaklanır; çünkü sıkıştırma zamanındaki havanın sıcaklığı ve basıncı ÜÖN' ye yaklaştıkça önemli miktarda artar. Eğer püskürtme erken başlarsa, püskürtme başlangıcındaki basınç ve sıcaklık düşük olacağından tutuşma gecikmesi artar. Eğer püskürtme ÜÖN' ye çok yakın yapılırsa, püskürtme başlangıcındaki basınç ve sıcaklık yüksek olmasına rağmen pistonun alt ölü noktaya doğru hareket edip silindir hacmini genişletmesinden dolayı tutuşma gecikmesi süresi artacaktır. Bu yüzden uygun püskürtme avansı bu iki nokta arasında olmalıdır.

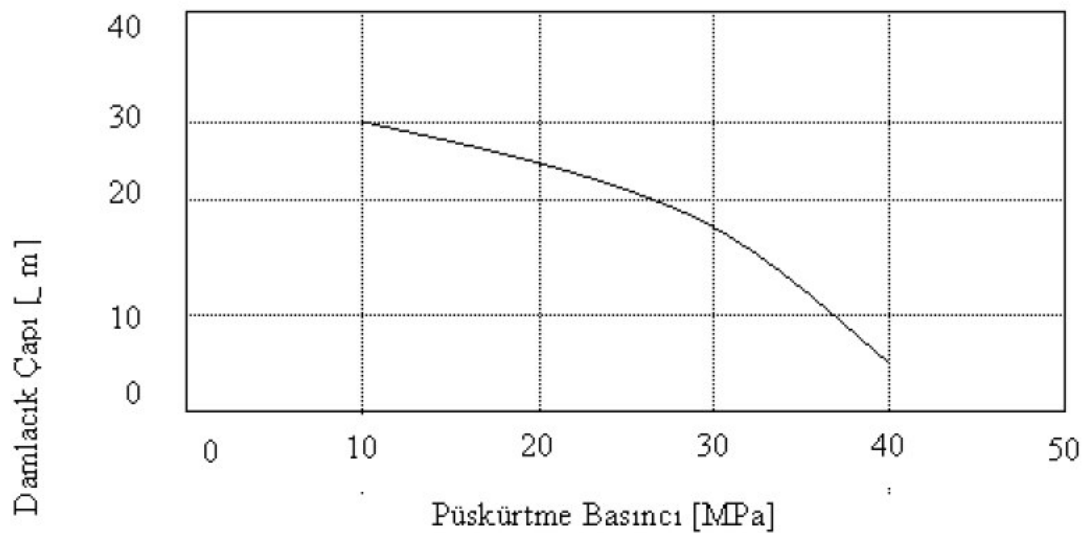
4.5.8 Emme Havası Giriş Basıncı ve Sıcaklığı

Emme zamanında silindire alınan havanın giriş basıncı arttıkça, sıkıştırma sonu basıncı ve sıcaklığı artacağından tutuşma gecikmesi süresi azalır. Giriş basıncının artmasıyla, silindire daha fazla hava alınacağından volümetrik verim de artar. İçeriye

daha fazla yakıt püskürtülerek, güç artırılabilir; ancak bu durum maksimum basıncın da artmasına neden olur.

4.5.9 Püskürtme Basıncı

Enjeksiyon basıncı, yakıtın atomizasyonuna, dolayısıyla karışım formasyonuna etki eden faktörlerden birisidir. Enjeksiyon basıncı arttıkça yakıt daha iyi parçalanarak, damlacık çapı küçülmektedir. Şekil 4.19'da püskürtme basıncına bağlı olarak, yakıt damlacık çapının değişimi verilmektedir. Burada püskürtme basıncı arttıkça damlacık çapının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.19: Püskürtme Basıncına Bağlı Olarak Damlacık Çapı Değişimi

4.5.10 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, kurs hacmine bağlı olarak değişmektedir. Silindir içerisine bir çevrimde alınan hava miktarını artırabilmek 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 artırılır. Normal emişli motora göre, aşırı doldurma uygulaması yapılan motorda silindirlere gönderilen hava miktarının artırılmasıyla silindir içerisine daha fazla yakıt sürülerek; fren ortalama efektif basıncı ve motor gücü artırılır. Egzoz gazlarının sahip olduğu enerjiden yararlanan aşırı doldurma sistemlerinin kullanımı, sıcaklık seviyelerinde artış sağladığı için genelde HC emisyonlarını azaltıcı, diğer taraftan NO_x 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_x emisyonları ise özellikle yüksek güçte çalışma bölgesinde, sıcaklıktaki artışa paralel olarak artmaktadır; ancak ara soğutmalı aşırı doldurma sistemlerinde, sistemin sağladığı güç artışı dikkate alındığında, birim güç başına üretilen NO_x emisyonu değerlerindeki artış sınırlandırılabilir.

4.5.11 Hava Hareketleri

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 motorun ancak belli bir hızında iyi bir yakıt hava karışımı oluşmasını sağlar. Ayrıca bu dönme hareketinden dolayı yüksek hızlarda motorun volümetrik verimi düşerek güçte bir azalma meydana gelmektedir. Yüksek püskürtme basıncıyla ve alışlagelenden daha çok ve daha küçük çaplı hassas işlenmiş delikler bulunan (8-10 delik) enjektörler sayesinde küçük damlacıklar (5-10 mikron) elde ederek yanma odası içinde gerekli olan dönme hareketindeki hava hızlarını düşürmek, dolayısıyla volümetrik verimi yükseltirken karışım oluşturma kalitesini korumak olanaklıdır. Burada hava hızlarını düşürmek, yakıt daha küçük damlacıklara bölünmüş olması ve çok delikli enjektörden püskürtme yapılmasıyla çok daha kısa sürede iyi bir karışım sağlandığı için olanaklı hale gelmektedir. Böylece özellikle yüksek devir sayılarında motor gücü 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 açısından çok iyi sonuç verirler.

4.5.12 Yakıt Özelliklerinin Emisyonlara Etkileri

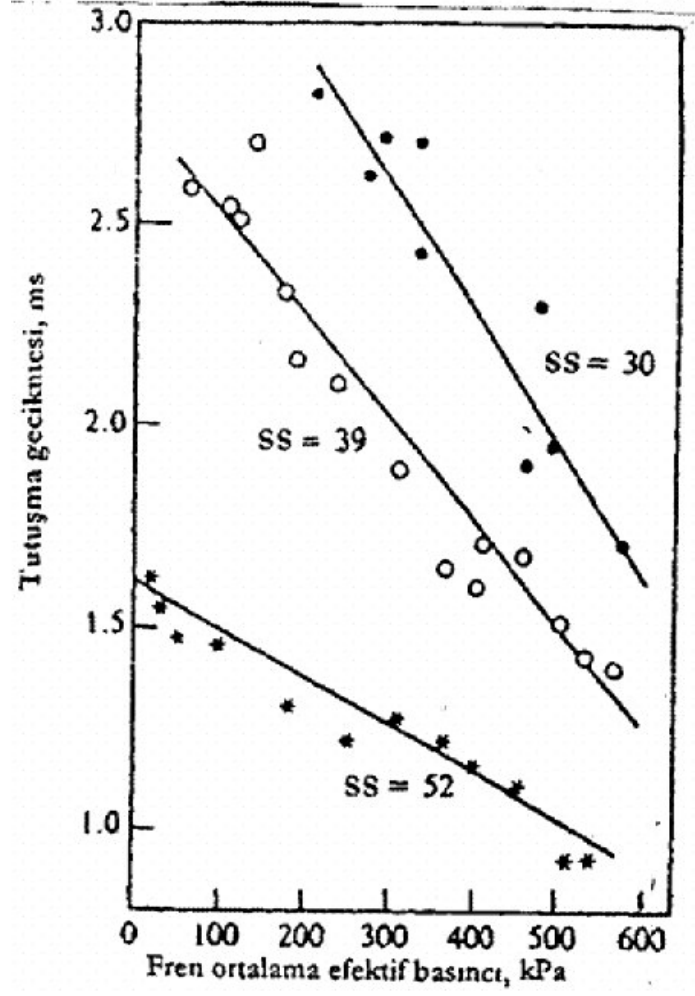
Yakıtın kimyasal kompozisyonu, motor performansı ve emisyonlarını önemli oranda etkilemektedir. Yakıt ne kadar fazla parafin hidrokarbonları ihtiva ederse, setan sayısı o kadar yüksek olur, tutuşma gecikme süresi kısalmış, motorun çalışması daha düzenli ve sarsıntısız oluşur. Yakıtın uçuculuğu, yüzey gerilmesi ve viskozitesi gibi fiziksel karakterler aynı zamanda yanma prosesine tesir eder. yakıtın viskozitesi ve yüzey gerilimi, atomizasyonun iyiliğini, yakıtın uçuculuğu ise yanıcı karışımın oluşum hızını etkiler. Yakıtın bileşiminde bulunan hidrokarbonlar, gerek tek ve gerekse grup halinde

yanma olayını önemli derecede yönlendirir. Yakıttaki parafinik hidrokarbonların miktarı arttıkça yakıtın setan sayısı da artar. Dolayısıyla tutuşma gecikme süresi azalır ve motor daha yumuşak çalışır. Yakıtın setan sayısı yanında viskozitesi, yüzey gerilimi ve uçuculuk gibi fiziksel özellikleri de yanma olayını etkiler. Viskozite ve yüzey gerilimi parçalanmanın derecesini, uçuculuk ise karışımın oluşumunu biçimlendirir. Özellikle setan sayısı düşük olan yakıtlar içine anil nitrat gibi katkıları katılırsa tutuşma gecikme süresi kısalmış ve motorun yumuşak çalışması sağlanır.

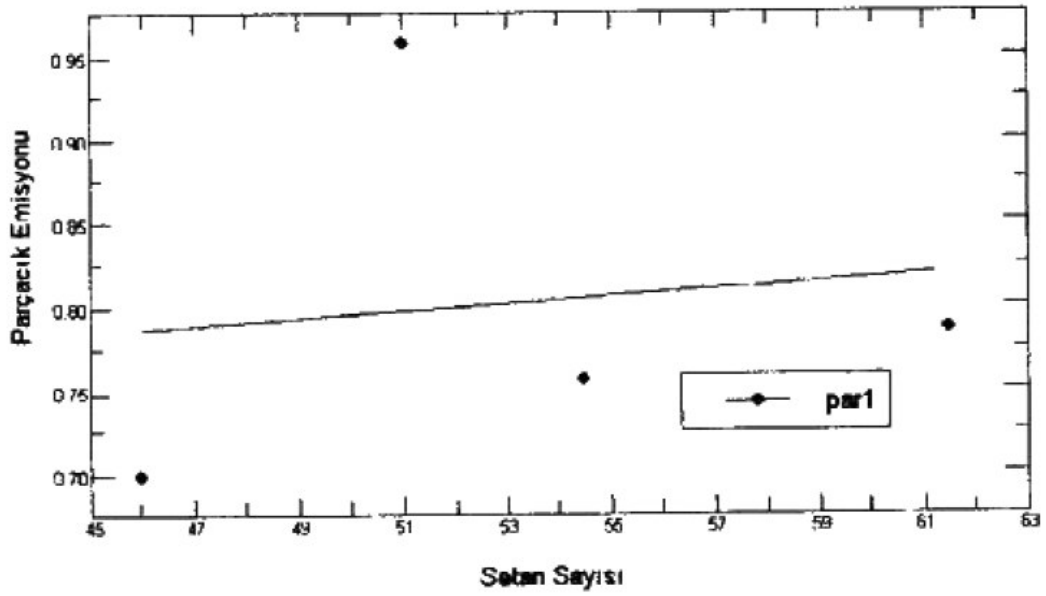
4.5.12.1 Setan Sayısı

Dizel motorunda aynı şartlarla aynı vuruntu şiddetini veren metil naftalin ve setan karışımındaki setan yüzdesine setan sayısı denmektedir. Şekil 4. 20'de setan sayısının tutuşma gecikmesine etkisi görülmektedir. Setan sayısı yüksek olan yakıtın, tutuşma gecikmesi süresinin daha kısa olduğu görülmektedir. Tutuşma gecikmesinin kısılması, ani yanma safhasındaki basınç artma oranını azaltır. Yakıtın çoğunluğu, kontrollü yanma safhasında yandığından silindir içerisinde oluşan maksimum basınç daha düşük olmaktadır. Ayrıca, tutuşma gecikmesinin azalmasıyla, karışımın sağlanabilmesi için daha az süre olması ve yakıtın yanma odası içerisinde iyi dağılamaması nedeniyle yanma hızı da azalır.

Setan sayısı, dizel motorlarının kolay çalışması ve yanma şartları üzerine etki eder. Setan sayısının yüksek olması motorun sessiz ve yumuşak çalışmasını sağlar. Setan sayısının gereğinden fazla yüksek olması tutuşma gecikmesini kısalttığından, yakıt yanma odası içerisinde iyi dağılamaz ve dumanlı bir yanma meydana gelir. Setan sayısının parçacık emisyonu üzerindeki etkileri Şekil 4. 21'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 20: Setan sayısının tutuşma gecikmesine etkisi



Şekil 4. 21: Setan sayısının partikül emisyonlarına etkisi

4.5.12.2 Yakıt Yoğunluğu

Yakıtın yoğunluğu, partikül ve NO_x emisyonlarının oluşmasında en önemli faktörlerden biri olarak bilinmektedir. Özellikle geçiş şartlarında yapılan deneylerde bu etki daha net görülmektedir. Yoğunluğun fiziksel etkisi detaylı olarak incelendiğinde, daha yüksek yoğunluktaki dizel yakıtının daha fazla miktarda yakıtın püskürtülmesine neden olduğu ve buna bağlı olarak da dinamik zamanlamanın değiştiği söylenebilir. Yanma odasına fazla miktarda enjekte edilen yakıt, yani oluşturulan zengin karışım, yanma odası cidar sıcaklığının artmasına sebep olmakta ve dolayısıyla tutuşma gecikmesi süresini azaltmaktadır. Püskürtülen yakıt miktarı, püskürtme hızını değil de püskürtme süresini değiştirmek suretiyle değiştirildiği takdirde, kısa tutuşma gecikmesi süresince daha az yakıt gönderilerek, yanmanın ikinci safhasında dp/dt oranı azalma gösterecektir. Dizel motorlarındaki güç artışı silindire gönderilen yakıt yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir. Maksimum güçte tam gaz verilir. Ancak bu durumda arzu edilen homojen bir karışım sağlanamadığından yanma sonucunda karbon birikintileri fazla olur ve egzozdaki duman miktarı artarak isli bir görüntü verir.

4.5.12.3 Aromatik Yüzdesi

Hidrokarbonlar içerisinde yoğunluğu en fazla olan aromatiklerdir. Dolayısıyla birim hacim başına en yüksek ısı değere sahip olduğundan isli yanarlar. Yanma odasına püskürtülen yakıtın aromatik yüzdesinin fazla olması durumunda yanma sonucu oluşan karbon birikintilerinin çokluğu sebebiyle özellikle supap sapı ve tablalarında ve enjektör meme uçlarında kurum oluşarak yanma odası hacminin azalmasına sebep olmaktadır. Yanma odası içerisinde çok fazla miktarda biriken artıklar yüzünden yanma verimi azalarak performans değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu yüzden özellikle jet yakıtlarında aromatik ağırlığının %25'den fazla bulunmaları arzu edilmez.

4.5.12.4 Kükürt Oranının Etkisi

Egzoz gazı emisyonlarından partikül emisyonunun en önemli kaynaklarından birisi de dizel yakıtında bulunan kükürt miktarıdır. Düşük kükürtlü yakıtın kullanılması durumunda daha düşük SO_2 ve partikül emisyonları oluşmaktadır. Yüksek miktarda kükürdün katalitik konvertörlerin ve partikül filtrelerinin tıkanmasına yol açtığı düşünülecek olursa düşük kükürt oranına sahip yakıtların bu sistemlerin verimini arttıracığı görülmektedir. Bunun yanında kükürt motor içerisinde H_2O ile birleşerek

H₂SO₄ oluřturmakta; H₂SO₄'de motorun piston ve segman b6lgelerinde korozyona ve ařınmaya neden olarak bakım maliyetlerini arttırmaktadır. Bunun yanında dūřuk kūkūrtlū yakıt kullanılması durumunda yakıtın setan sayısı dūřmektedir. Ayrıca yakıt yaęlama 6zellięinden kaybetmektedir. Bu olumsuzlukların bertaraf edilmesi için yakıt katkı maddeleri eklenmektedir.

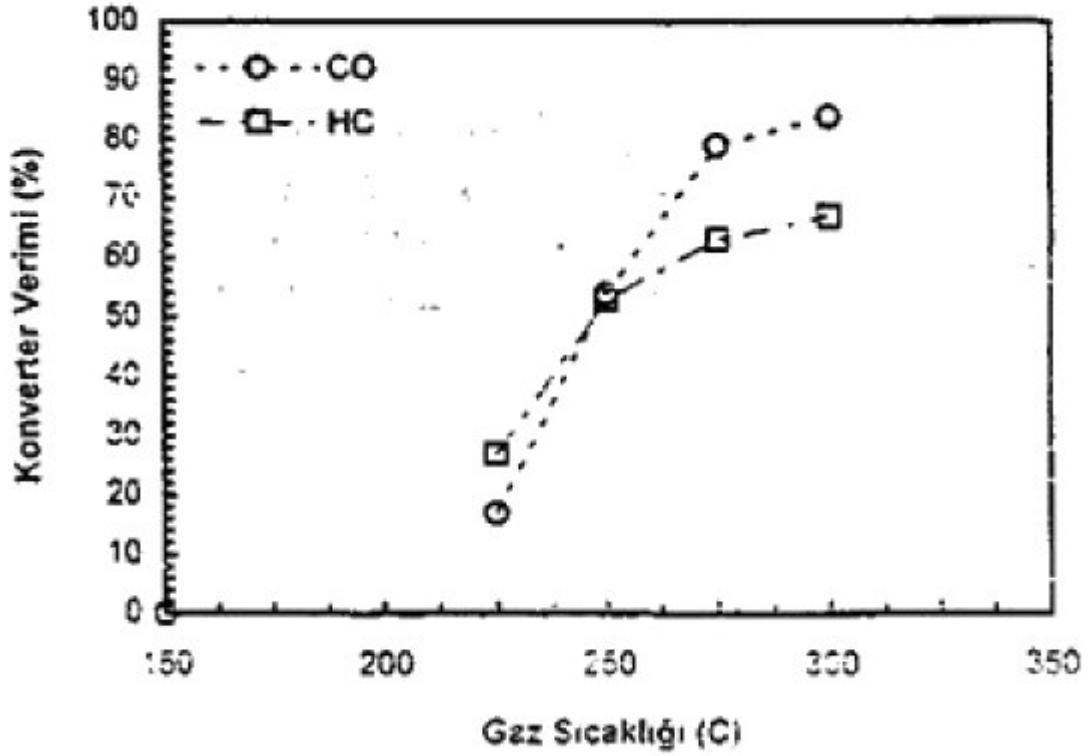
4.6 Dizel Motorlarında Egzoz Emisyonu Kontrol Y6ntemleri

Dizel motorlarda, hidrokarbonlar (HC), karbonmonoksit (CO) ve azot oksit (NO_x) emisyonları ile partikūl emisyonları 6nlenmesi gereken en 6nemli emisyonlardır. İlerleyen teknolojiye rağmen silindir içerisindeki yanma olayı tam olarak 6zūlemedięinden bu emisyonları kaynağında 6nlemek için yapılan çalışmalar yeterli olamamaktadır. Bu nedenle emisyonların motorda yapılan değişiklikler, ek sistemler, yakıt kalitesini iyileştirmek ve benzeri y6ntemlerle 6nlenmesine veya kontrol altında tutularak azaltılmasına çalışılmaktadır.

Gūnūmūzde egzoz gazı emisyonlarının azaltılması için katalitik filtre kullanılmaktadır. Partikūl emisyonların da kontrol edilebilmesi için seramik monoblok, alūminyum kaplı, cam yūnū kullanılan, g6zenekli, g6zeneksiz, partikūl tutucu çeřitli filtreler tek bařlarına veya gaz emisyonlarının 6nlenebilmesi için kullanılan oksidasyon kataliz6rū gibi monoblok katalitik filtrelerle birlikte kullanılabilmektedir.

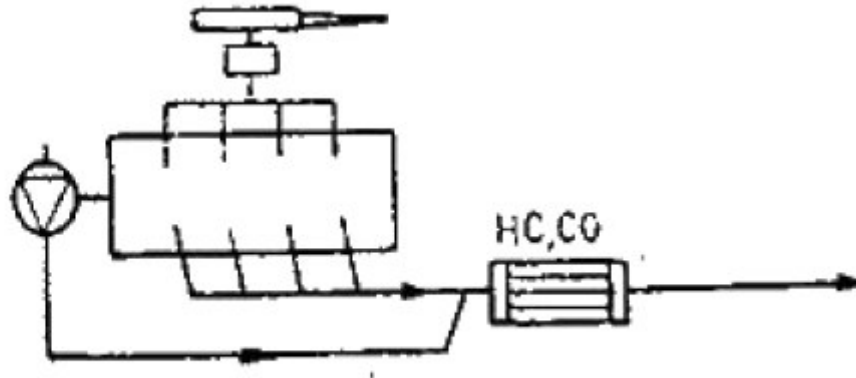
4.6.1 HC ve CO Emisyonlarının Kontrolū

Dizel motorlarında karbonmonoksit ve hidrokarbon emisyonları genellikle oksidasyon kataliz6rleri ile azaltılabilir. Oksijen kataliz6rlerinin fonksiyonu karbonmonoksit ve hidrokarbonları oksitleyerek, karbondioksit ve su haline d6nūřturmaktadır. Dizel motorların egzoz gazlarında oksijen miktarının fazla olması karbonmonoksit ve hidrokarbonların soy metalli monoblok katalitik filtrelerle azaltılmasını kolaylařtırmaktadır. řekil 4.22 ile karbonmonoksit ve hidrokarbonların d6nūřmū g6sterilmektedir. řekilden de g6rūldūęu gibi dūřuk sıcaklıklar da dahi d6nūřmū yeterli olmaktadır. Soy metal kombinasyonları karřılařtırıldığında řu etkenlik sırası g6rūlūr; Pd < Pt/Pd < Pt. Platinli katalitik filtrelerde 235°C' de % 78 hidrokarbon, % 95 karbonmonoksit d6nūřmū verimlerine eriřilmiřtir.



Şekil 4. 22: CO ve HC emisyonlarının egzoz gazı sıcaklığına göre değişimi

Oksidasyon, katlizatörlerinin kullanıldığı durumlarda, motordan çıkan egzoz gazlarına hava ilave edilmekte ve böylece egzoz gazlarının oksitlenmesi için gereken ortam hazırlanmaktadır.



Şekil 4. 23: Oksidasyon katalizörü

Egzoz gazlarındaki oksijen miktarının yüksek olmasından dolayı azot oksitlerin üç fonksiyonlu katalizörlerle azaltılması mümkün olamamaktadır. Bu nedenle dizel motorlarında azot oksit emisyonlarının azaltılması için egzoz gazlarının bir kısmı tekrar silindir içersine verilerek yeniden dolaşım sağlanmaktadır; fakat bu yöntemde yakıt sarfiyatının artmasının yanında, yakıtta bulunan kükürt, kükürt dioksit haline dönüşerek asit yağmurlarına neden olmakta ve partikül emisyonlarını da

arttırmaktadır. Dolayısıyla azot oksit emisyonlarının partikül emisyonları artmadan azaltılması için değişik katalitik filtreler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Dizel motorlarda gaz emisyonları azaltmak için katalizörlerden başka, yağ buharları ile kaçak egzoz gazlarının bir araya gelerek oluşan kirleticilerin karter havalandırması yoluyla azaltılması, emme manifolduna egzoz gazının geri verilerek (EGR) NO_x emisyonunun düşürülmesi, egzoz gazı sıcaklığının düşmesini ve oksijen miktarının artmasını dolayısıyla emisyonların azalmasını sağlayan yanma odasına hava püskürtülmesi sistemleri kullanılmaktadır.

4.6.2 NO_x Emisyonlarının Kontrolü

Dizel motorlarında NO_x emisyonlarını azaltmak için aşağıda belirtilen temel parametrelerden yararlanılır.

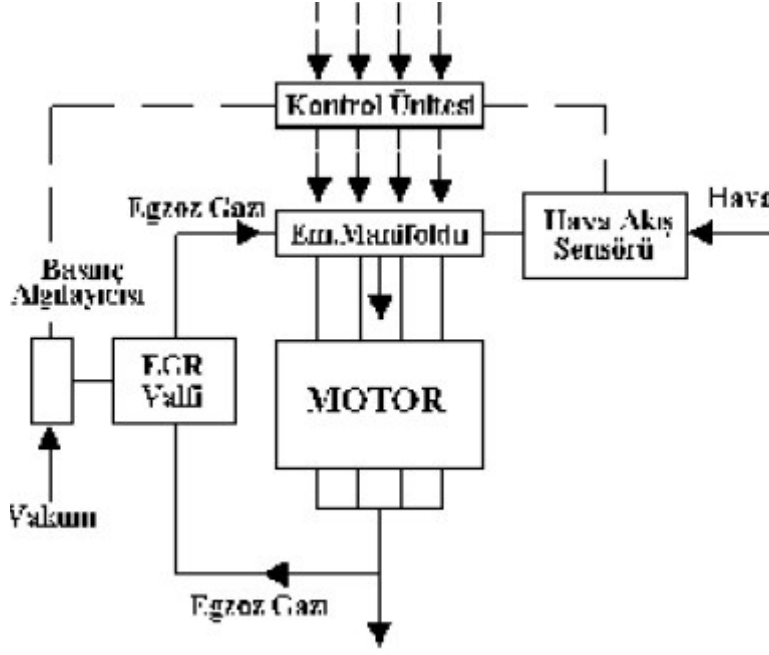
4.6.2.1 Yakıt Püskürtme Sistemi Özellikleri

Yakıt püskürtme sistemi özellikleri yakıt ile havanın karışmasına ve yanmasına etki etmektedir. Çalışma şartlarında alevin oluşumu ve yayılması, yakıtın atomizasyonu ve yakıt dağıtımı, püskürtme sistemi özelliklerinden etkilenir.

Tutuşma gecikmesi süresince püskürtülen yakıtın azaltılması NO_x emisyonlarını azaltır. Bunun için enjektör delik çapı küçültülerek, püskürtme süresi uzatılmakta ve pilot yakıt miktarı azaltılmaktadır. Bu durumda yakıt ile hava daha iyi karışacağından kullanılan hava miktarı artar ve alev daha geniş bölgeye yayılır. Sonuçta NO_x emisyonlarında artış görülür. Püskürtülen yakıt miktarının azaltılması ile NO_x emisyonlarında elde edilen azalma bu nedenden dolayı dengelenecek ve NO_x emisyonlarında bir değişim görülmeyecektir. Bunun için püskürtme basıncı artırılarak setan sayısı yüksek yakıt kullanımı ile tutuşma gecikmesini kısaltmak gerekmektedir. Deney motorunda da kullanılan Common Rail püskürtme sistemi ile artık püskürtme basıncı ve süresi ile püskürtülen yakıt miktarı hassas olarak ayarlanabilmektedir.

4.6.2.2 Egzoz Gazları Resürkilasyonu (EGR)

Yanma sırasında oluşan NO_x miktarı büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Yanma odası içindeki karışımın egzoz gazları ile seyreltilmesi sonucu yanma sonu sıcaklıkları, dolayısıyla üretilen NO_x miktarı azalmaktadır.



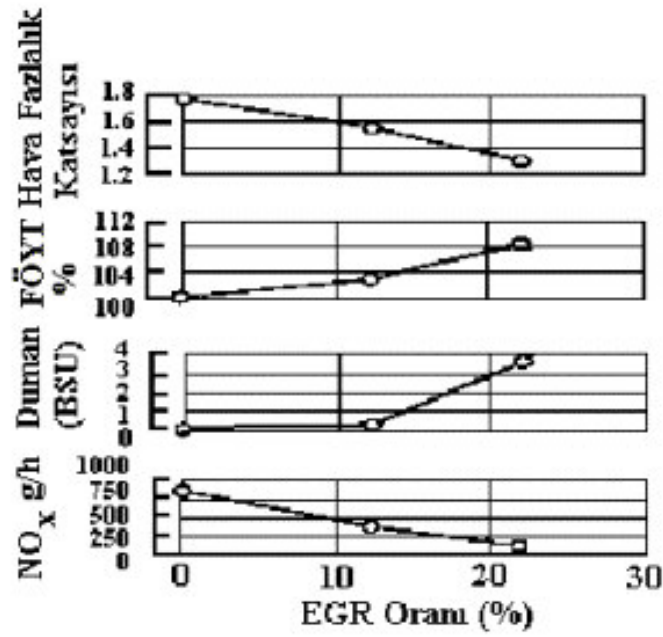
Şekil 4. 24: EGR şematik görünüşü

Bu sistemin işlevi egzoz gazlarının bir kısmını silindire geri göndererek karışım içerisindeki oksijen konsantrasyonunu azaltıp, karışım oranını düşürerek silindir içi maksimum gaz sıcaklığını düşürmektir.

EGR direk püskürtmeli dizel motorlarında yakıt ekonomisini kötüleştirmeden NO_x emisyonlarını azaltmanın en iyi yollarından birisidir.

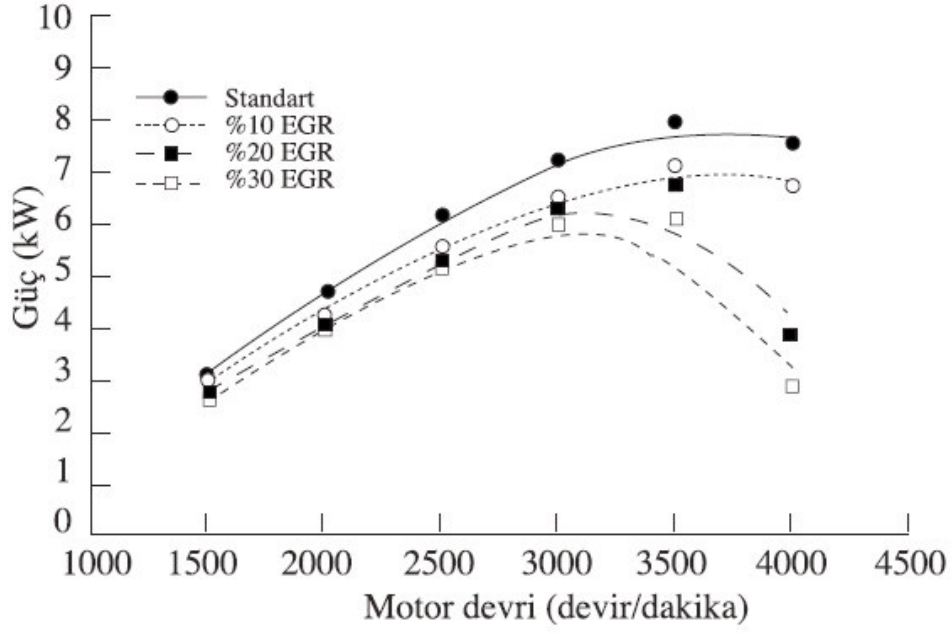
Yanmış gazların sıcaklığı maksimum iken NO_x oluşma ihtimali de artar. Bu maksimum sıcaklık yanma başlangıcı ve maksimum silindir içi basıncın oluşmasından hemen sonra meydana gelmektedir. Erken yanmaya başlayan karışımın sıcaklığı, sıkıştırma stroğu devam ettiği için yükselmeyi sürdürecektir. Dolayısıyla NO_x oluşum hızı da artacaktır. Motorlarda NO_x son alev cephesindeki sıcak gazlarda oluşur. NO_x ' in başlangıçtaki oluşum hızı kısmen sıcaklığa bağlıdır. Oksijen konsantrasyonunun yüksek olması da NO_x oluşum hızını arttırır. EGR ile silindir içindeki oksijenin bir kısmının yerini atık CO_2 ve su buharı alacağından lokal oksijen konsantrasyonu azalacaktır. Bu durum yakıt ve oksijen moleküllerinin buluşup reaksiyona girme ihtimalini azaltır. Buna bağlı olarak reaksiyon hızı ve lokal alev sıcaklığı düşerek NO_x oluşumu azalacaktır.

EGR ile yanma odasının farklı bölgelerindeki lokal sıcaklıklar değiştirilmiş olur. Bu da yakıtın buharlaşma hızına ve H_2 oksidasyon hızına etki eder. H_2 oksidasyon hızı lokal sıcaklığın artması ile kısmen artar.

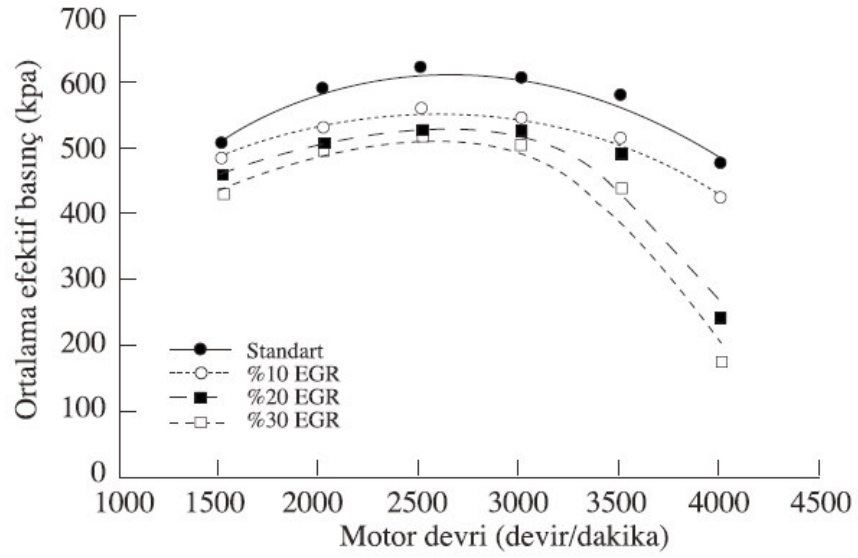


Şekil 4. 25: EGR oranına bağlı olarak NO_x değişimi

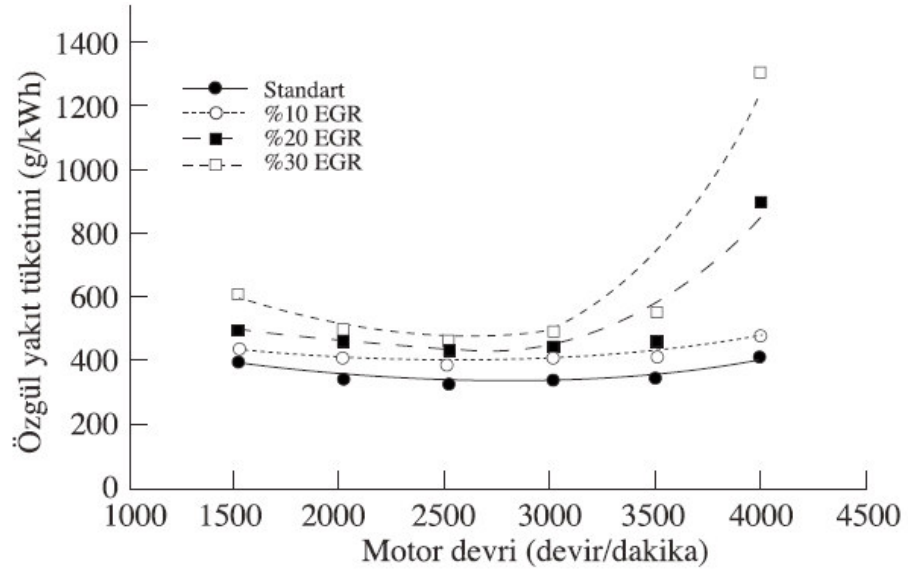
EGR' nin neden olduğu alev sıcaklığındaki azalma oksidasyon hızının azalmasına ve is oluşumunun artmasına yol açar. EGR ile silindir giriş sıcaklığı artacağından yanmamış HC emisyonları azalmaktadır. Yukarıdaki şekilde orta hızda ağır yük altındaki aşırı doldurmalı ve ara soğutuculu bir dizel motoruna EGR uygulandığı zamanki test sonuçları gösterilmiştir. %10 EGR civarında duman ve fren özgül yakıt tüketimi fazla artmamıştır. EGR oranı arttıkça NO_x azalır; fakat hava fazlalık katsayısının da azalması sonucunda is emisyonları ve yakıt tüketimi artmaktadır. Silindire alınan taze hava içerisindeki oksijen miktarı azaldıkça CO emisyonları artacaktır. Oksijen miktarı belli bir sınırın altına inmediği sürece EGR yakıt ekonomisine çok fazla etki etmeyecektir. Aşırı EGR yakıt hava oranını değiştireceğinden partikül madde ve is emisyonları artar. Silindirlere geri gönderilen egzoz gazları soğutulur ya da püskürtme basıncı artırılarak partikül ve is emisyonları azaltılabilmektedir.



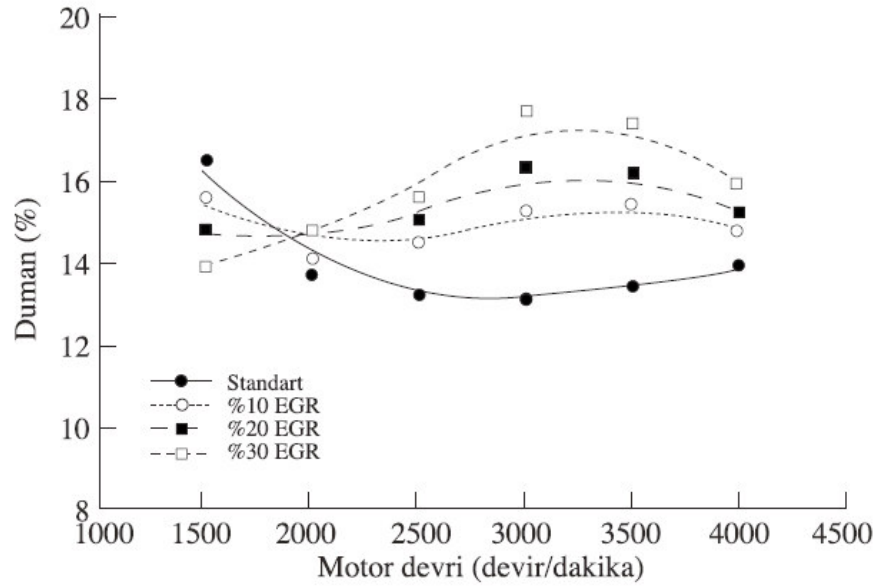
Şekil 4. 26: Değişik EGR oranlarının motor performansına etkisi



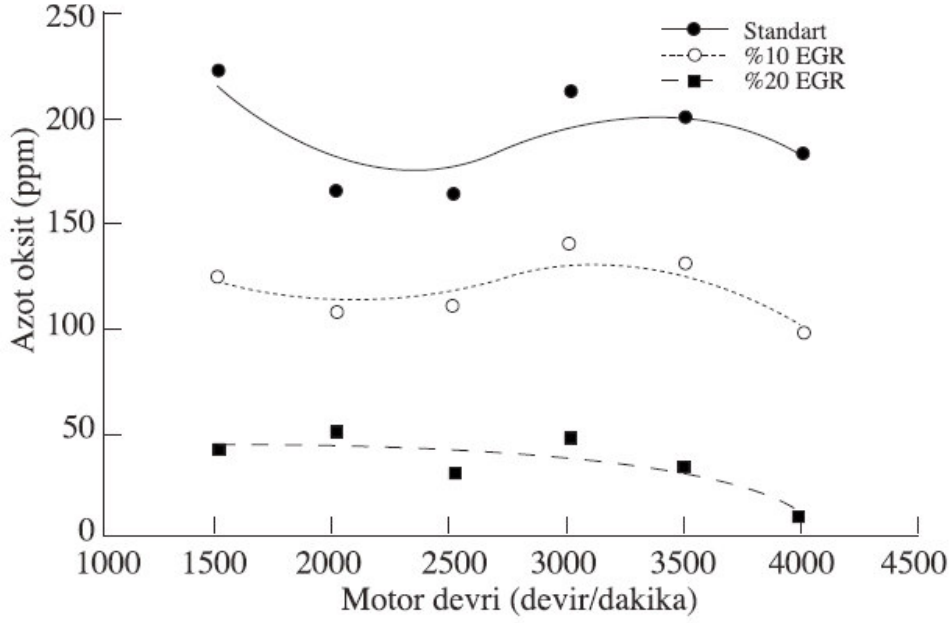
Şekil 4. 27: Değişik EGR oranlarının ortalama efektif basınca etkisi



Şekil 4. 28: EGR' nin özgül yakıt tüketimine etkisi



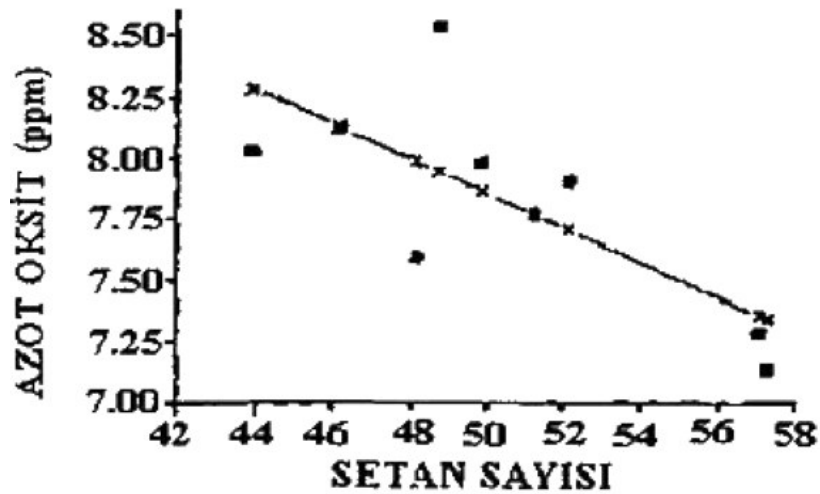
Şekil 4. 29: EGR' nin duman emisyonlarına etkisi



Şekil 4. 30: EGR' nin NO emisyonlarına etkisi

4.6.2.3 Yakıt Kalitesi

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 gecikmesi periyodunu 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 NO_x 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.



Şekil 4. 31: Setan sayısının NO emisyonlarına etkisi

4.6.2.4 Oksijen Konsantrasyonu

Karışım içindeki oksijen konsantrasyonu artırıldıkça PM ve yanmamış HC emisyonları azalır. %2'lik bir oksijen ilavesi ile is emisyonları neredeyse sıfır olur, yakıt tüketimi iyileşir; fakat oksijen konsantrasyonunun artırılması NO_x emisyonlarını artırmaktadır. Oksijen konsantrasyonunun artırılması tutuşma gecikmesini kısaltır. Bu durum püskürtme avansının azaltılmasına imkan sağlar. Avansın azaltılması ile NO_x emisyonları azalır. Avansın 12°'den 16°'ya alınması ve oksijen konsantrasyonunun %21'den %23'e çıkarılması ile NO_x emisyonları artırılmadan partikül emisyonları iyileştirilmektedir.

4.6.3 Partikül Emisyonlarının Kontrolü

Dizel motorlarında partikül emisyonlarını azaltmak için yanma odasının tasarımının değiştirilmesi, püskürtme şeklinin değiştirilmesi gibi motorda değişiklikler yapılması çalışmaları devam etmektedir; fakat mevcut motorların partikül emisyonlarının kontrolü için en fazla uygulanan yöntem tutucu filtrelerin kullanılmasıdır ve bir çok araştırmacı tarafından partikül tutucu filtreler üzerinde yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar alınmıştır. Partikül tutucu filtrelerde, egzoz gazı filtrenin giriş tarafındaki açık kanallardan içeriye girer ve tasarım şekillerine göre filtre içerisindeki gözenekli kanal çeperlerinden çeşitli kanallardan geçerek arıtılmış olarak dışarı çıkar. Bu sırada partiküller kanal çeperlerinin iç taraflarında gözeneklerde toplanırlar. Filtrelerde toplanan partiküller egzoz gazlarının soğuk olmasından dolayı brülörlü veya elektrikli yanma sistemleri tarafından yakılmak suretiyle rejenere edilirler. Tutucu filtreler seramik monoblok, alüminyum kaplanmış ağ yumağı, seramik fiber örgü, gözenekli boruda cam yünü vb. kullanılan malzeme, ısıtmalı veya alevli rejenerasyon sistemi, duvardan akışlı veya çapraz akışlı, katalitik filtreli veya katalitik filtresiz vb. özelliklerine göre değişik şekillerde tasarlanmakta, imal edilmekte ve geliştirilerek kullanılmaktadır. Partikül tutucu filtrelerin bazı tiplerinde elde edilen tutuculuk verimi %90 seviyelerine kadar çıkmıştır.

Dizel motorlarında benzin motorlarından farklı olarak havaya karışan çok miktardaki partikül emisyonları insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen en önemli unsurlardan birisidir. Günümüzde partikül emisyonlarının büyük miktarda atmosfere karıştığı ve önlem alınmazsa, çevre sağlığı için ciddi bir tehdit unsuru olacağı bilinmektedir. Dizel motorlarındaki yanma koşullarının iyileştirilmesi ve egzoz sisteminde kullanılan bazı

emisyona azaltma teknikleri ile CO, HC, NO_x ve partikül emisyonları önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

NO _x Emisyonu			
Standart Ayar (% 100)			
Sıkıştırma Oranının Artırılması			% 80
Püskürtme Avasının Azaltılması		% 55	
EGR	% 25		
Su Püskürtülmesi	% 30		
EGR+Su Püskürtülmesi	% 20		
Tüm Yöntemler+Katalitik Konvertör	% 5		

Şekil 4. 32: NO_x emisyonu kontrol yöntemlerinin etkisi

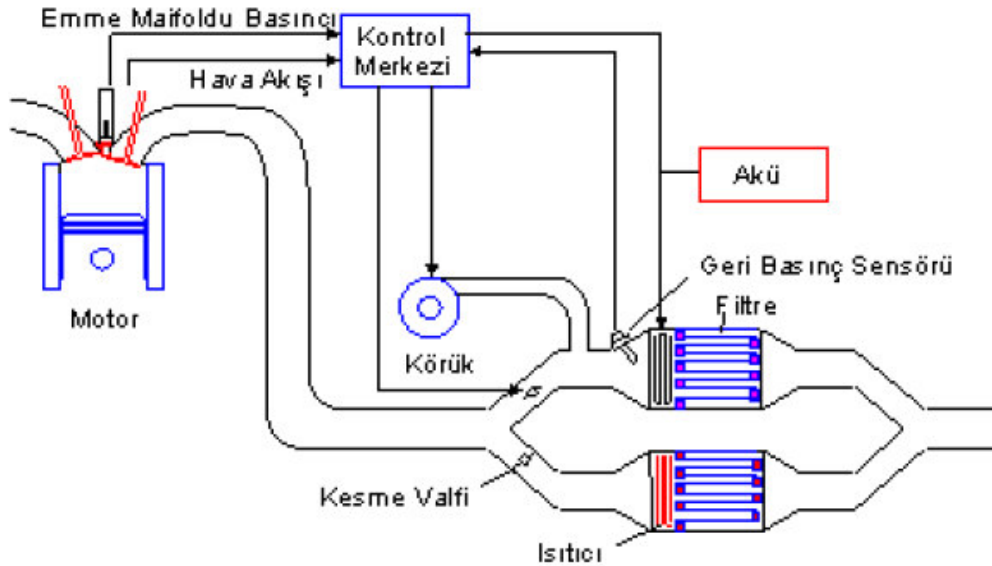
4.6.3.1 Dizel Partikül Filtreleri

Dizel motorundan çıkan partiküllerin, çapları yaklaşık 0,12 mm olan küresel taneciklerin bir araya gelmesinden oluşan, süngerimsi ve katı formunda bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Partiküller, katı formunda olduğundan, uygun pürüzlü yüzeylerde, çarpma etkisi ile tutulabilecektir.

Dizel motorlarında egzoz gazı içinde bulunan partikülleri tutmak için kullanılır. Filtre elemanı genellikle üzerinde bir çok delik açılmış paslanmaz çelik bir taşıyıcının üzerine gözenekli seramik kaplanarak oluşturulur. Egzoz gazları seramik yüzeyli filtre içinden geçerken partiküller yüzeyde tutulmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda partikül filtrelerinin %80 civarında bir verimle çalıştığı gözlemlenmiştir. Bunun anlamı egzoz gazında gözle görülebilen isin %80' i filtre içinde tutulabilmektedir. Temizleme işlemi filtre sisteminin sıcaklığını artırıp biriken partikülleri yakarak gerçekleştirilebilir. Bu amaçla filtre içine belli aralıklarla yakıt püskürtülerek temizlenme işlemi (rejenerasyon) uygulanır. Bu yöntemin dışında filtrenin katalitik yolla temizlenmesi üzerine de çalışmalar vardır. Filtrede biriken partiküller belli bir sıcaklıkta yakılmayacak veya filtre yüzeylerinden ayrı bir yerde muhafaza edilmeyecek olursa, filtre kanalları kısa bir zamanda tıkanacaktır. Bu tıkanma sonucunda, filtre geri basıncı artacağından motorun volümetrik verimi düşecek ve güç kayıpları artacaktır.

Dizel partikül filtreleri dizel kaynaklı partikül emisyonlarını Euro III emisyon standartlarına getirilmesinde temel etkidir. İlk kez partikül filtre teknolojisi 1992 yılında New York şehrinde 400 otobüste test edilmiştir. Aşağıdaki şekilde bu ilk DPF'

nin şematik yapısı görülmektedir. Sistemin filtresinde toplanan partiküller periyodik olarak imha edilmektedir. Filtre optimum yüke ulaşana kadar partikül ile doluyor ve daha sonra körük ve ısıtıcı sistemi eski haline getiriyordu. Partikül yükü; emilen hava akışı, filtre basıncı ve filtre sıcaklığı ölçülerek belirleniyordu.

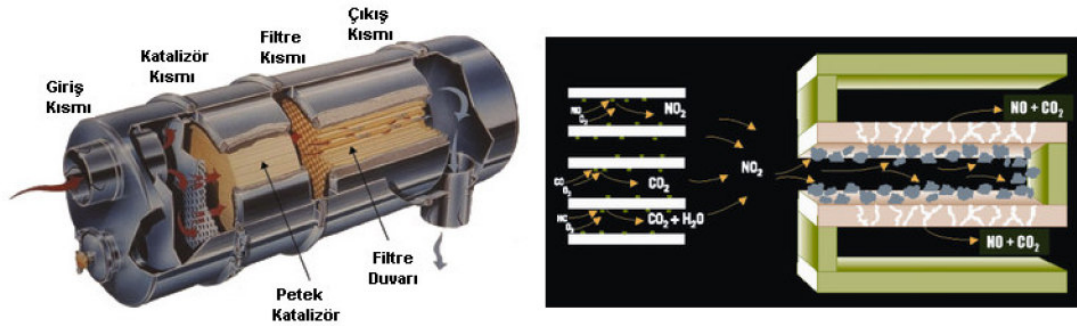


Şekil 4. 33: Elektrikli ısıtıcı tip ilk DPF

Daha sonraları sisteme brülör ve kısma sistemi eklenerek bir dış ısıtıcı vasıtası ile partiküller yakılır hale getirilmiştir. Bu sistem aktif rejenerasyon sistemi olarak isimlendirilmiştir. Bu sistem DPF' lerin ilk jenerasyonu olarak isimlendirildi. Bu teknolojiye filtre basıncının artarak düşmesi yakıt tüketimini artırırken, sistemin karmaşıklığı ve güvensizliği birinci kuşak DPF' lerin sonunu getirdi. Daha sonraları ikinci kuşak pasif rejenerasyonlu DPF' ler geliştirildi. Bu sistemde yakıt katkıları ve katalizör kullanımı ile partikül madde emisyonları düşürülmeye çalışıldı. 2000 yılından itibaren Peugeot firması dizel binek araçlarını yakıt katkı sistemlerine dayanarak üretmeye başlamıştır.

İlerleyen zamanlarda sürekli rejenerasyon teknolojisi (CRT) geliştirilmiştir. CRT teknolojisinin temeli partiküllerin kolayca NO₂ ile oksitlenmesine dayanmaktadır. 550°C' nin üzerinde bir sıcaklıkta karbon oksijen ile oksitlenir iken NO₂ ile 250°C' de reaksiyona girmeye başlamaktadır. CRT üst kısımda oksidasyon filtresi ve alt kısımda seramik filtre olmak üzere iki filtreden oluşmaktadır. Dizel emisyonlarında var olan nitrit oksit oksidasyon katalizörüne girerek NO₂ oluşturur. Oluşan NO₂ alt filtreye geçerek ve partiküllerle reaksiyona girer. CRT teknolojisi ile partikül madde emisyonları %90 oranında azaltılmaktadır. CRT sisteminin başarılı bir şekilde

çalışabilmesi için egzoz gazı sıcaklıklarının 275°C ' nin üzerinde olması ve NO_x/PM oranının 20'den büyük olması gerekmektedir.



Şekil 4. 34: CRT partikül filtresi

Dizel motorunda partikül emisyon düzeyinin üstüne çıkılmasına neden olan etkenler ve bunların ayrıntıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Yanma için gerekli havanın eksikliği:

- Hava miktarı az:
 - a) Hava filtresi kanalı
 - b) Aşırı doldurucu ünitesi var ise ara soğutucu tıkalı
 - c) Aşırı doldurma ünitesi bozuk veya yetersiz
 - d) Egzoz sistemi tıkalı
- Yakıt miktarı çok:
 - a) Püskürtme pompası ayarsız
 - b) Enjektörler aşınmış veya yay ayarları bozuk
 - c) Motorun hızlanması sırasında yakıt miktarını sınırlayan sistem (eğer varsa) bozuk

İlk tutuşma ve yanma sıcaklıklarının düşüklüğü:

- Aşırı soğutma yapılıyor:
Termostat bozuk
- Sıkıştırma sonu basıncı (kompresyon) ve sıcaklığı düşük:
Silindirler, segmanlar veya pistonlar aşınmış
- Silindirlere büyük ölçüde yağlama yağı girmesi:
- Silindirler, segmanlar veya supap kılavuzları aşınmış.
- Yakıt uygun değil:

- Setan sayısı en az 55 olmalı
- Yakıtta aromatik bileşenler yüksek oranda bulunuyor.
- Kükürt miktarı %0,05'i aşmamalı
- Ayar ve bakım değerleri:
- Dizel motorları için imalatçı firma tarafından öngörülen ayar değerleri olan
- Püskürtme avansı ve bunun dönme sayısına bağlı olarak göstereceği değişim,
- Bir pompa stroku başına püskürtülecek yakıt miktarı,
- Enjektör tipi ve enjektör açılma basıncı,
- En büyük dönme hızı

gibi büyüklükler, çok özel durumlar dışında, her zaman en az is miktarı ve en az yakıt tüketimi sağlayan değerler olup, bunların imalatçı firma tarafından öngörülen bakım aralıklarında kontrol edilmemesi ve yakıt özelliklerinin yerine getirilmemesi durumunda dizel motorunun emisyonu kolaylıkla normalinin birkaç katına çıkabilir.

Çevrim başına püskürtülen yakıtın normalin %25 üzerine çıkması, egzozdaki is miktarını birkaç kat artırmaktadır. Dizel yakıt püskürtme pompasının ve enjektörlerin elemanlarının aşınması yakıt tüketimi ve egzozdaki is miktarında önemli ölçüde artışa neden olmaktadır.

Tablo 4. 5: Motorun filtreli ve filtresiz durumlarında elde edilen ortalama genel karakteristik değerler

Parametreler	Filtresiz Durum	Filtreli Durum	% Değişim
Mil Gücü (hp)	23,22	23,60	+ 1,61
Moment (Nm)	84,12	85,49	+ 1,6
Mil Öz. Yak. Tük (kg/hp h)	0,52	0,52	0,0
Hacimsel Verim (%)	76,95	76,70	- 0,32
Isıl Verim (%)	25,27	25,17	- 0,39
HC (g/hp h)	14,80	17,1	+ 13,65
CO (g/hp h)	29,90	32,6	+ 8,29
NO _x (g/hp h)	17,50	13,7	- 21,9
Kurum (g/hp h)	0,298	0,141	- 52,68
CO ₂ (%)	4,46	4,57	+ 2,1

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Dizel Motorlarında Enjektör Meme Geometrisinin ve Püskürtme Basıncının Emisyonlara ve Performansa Etkisi

Dizel motorları benzinlilere göre daha verimli olmasına karşın emisyon ve gürültü değerleri daha fazladır. Dizel motor üreticileri regülasyonları sağlamak için partikül ve NO_x miktarlarını sınırlandırmak ve bunun yanında konforu arttırmak için gürültü seviyelerini düşürmek yoluna gitmişlerdir.

Partikül ve NO_x emisyonları ile motor gürültüsü yanma prosesi ile yakından ilgilidir. Yanma prosesi ile ilgili iyileştirilebilme yapılabilmesi için püskürtme ve demet yapısının çok net şekilde belirlenebilmesi gerekmektedir.

Günümüzde eğilim daha düşük partikül miktarlarını sağlayabilmek için püskürtme basıncını arttırmak ve meme delik çapını küçültmek yönündedir. Böylece daha iyi bir atomizasyon ve hava – yakıt karışımı sağlanabilmektedir. Bu işlemlerin özellikle yanmanın başlangıcındaki oksijen konsantrasyonlarının ve sıcaklıkların yüksek olduğu bölgelerde NO_x üretimini arttırdığı belirlenmiştir. NO_x oluşumunun maksimum sıcaklık ve basınca ulaşma süresinin geciktirilmesi ile azaltılabildiği gözlenmiştir. Buna karşın bu işlem yakıt tüketimini arttırmaktadır ve verimli değildir. NO_x ve partikül emisyonlarını yakıt tüketimini arttırmadan düşürebilmek için enjektör ve püskürtme parametrelerinin yanma prosesine etkisinin irdelenmesi gerekmektedir. Enjektör meme delik çapı ve püskürtme basıncının yanı sıra L/D oranı, meme iç R/D oranı gibi demet yapısını etkileyen parametreler de incelenmelidir. Demet karakteristiği, nüfuz derinliği, çıkış hızı, koni açısı ve damlacık çapı ile yakından ilgilidir. Püskürtme şekli de motor emisyonlarına doğrudan etki etmektedir. Örneğin Tow, birden fazla enjektör kullanmanın partikül emisyonlarında düşüş sağlarken NO_x emisyonlarında bir değişikliğe neden olmadığını göstermiştir. Püskürtme basıncının artırılması ve enjektör meme delik çapının optimize edilmesi partikül emisyonlarında önemli oranda düşüşe sebep olmaktadır. Bu işlemler iyi bir optimizasyon sağlar, dolayısıyla demet nüfuz derinliği artar. Pratikte ise püskürtme basıncı maliyetler ve malzeme dayanımları nedeniyle belli bir değerin üzerine çıkartılamamaktadır.

Karasawa, keskin kenarlı enjektör memelerinin aynı ortalama püskürtme hızı için yuvarlatılmış kenarlıya göre daha düşük ortalama damlacık çapı oluşumu sağladığını göstermiştir. Bu da ideal demet şekline yaklaşılmaması anlamına gelmektedir. Bu şekilde demet daha çabuk parçalanmakta ve duvara çarpmalar azalmaktadır. Meme L/D oranı arttıkça, demet tekrar birleşme yoluna gidecek ve yanma odası duvarına çarpmalar artacaktır. Buna karşılık keskin kenarlı enjektör memesinin düşük deşarj katsayısı nedeniyle aynı püskürtme hızını yakalayabilmesi için daha yüksek püskürtme basınçlarında püskürtülmesi gerekmektedir. Su ve Farrel'da keskin kenarlı aynı ortalama püskürtme hızı için daha düşük damlacık çapı ve daha yüksek demet nüfuz derinliği verdiğini göstermişlerdir. Bunun yanı sıra aynı püskürtme basıncında her iki tip enjektör memesini test ettiklerinde düşük püskürtme basınçlarında keskin kenarlı enjektör memelerinin yuvarlatılmış kenarlı memelere oranla daha küçük damlacık çapları verdiğini; yüksek püskürtme basınçlarında ise yuvarlatılmış kenarlı memelere oranla daha büyük damlacık çapları verdiklerini gözlemlemişlerdir.

Pierpont ve Reitz ise püskürtme basıncının ve meme püskürtme deliğinin keskin veya yuvarlak kenarlı olması, meme koni açısının, partikül, NO_x ve fren özgül yakıt tüketimine etkilerinin araştırılması amacıyla bir çalışma yapmışlardır.

Deneyler Caterpillar 3406 ağır hizmet dizel motorunun tek silindirli bir versiyonuyla %25 ve %75 yükleme şartlarında 1600d/d motor hızında çalışarak gerçekleştirilmiştir. Püskürtme sistemi, elektronik kontrollü, hidrolik amplifikatörlü, 1600 bar püskürtme basıncı sağlayabilen birim enjektör sistemidir. Partikül ve is emisyon grafikleri püskürtme zamanlaması değiştirilerek her durum için çizilmiştir.

%75 yükte püskürtme basıncının arttırılması beklenildiği gibi partikül emisyonlarında düşüş sağlamıştır. Püskürtme basıncı 900 bar'dan 1600 bar'a çıkarılırken, püskürtme başlangıcı aynı NO_x emisyonu verecek şekilde geciktirilmiştir. Bu durumda fren özgül yakıt tüketiminde %1 ile 2 arasında bir artış gözlenmiştir.

Yuvarlatılmış kenarlı enjektör memelerinin daha yüksek deşarj katsayıları olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yuvarlatılmış kenarlı ve keskin kenarlı enjektör memelerinin karşılaştırılması için aynı debiyi verdikleri şartların sağlanması gerekmiştir. Bu nedenle aynı debiyi verebilmeleri için her iki enjektörün püskürtme basınçlarında farklı ayarlar yapılmıştır. Düşük püskürtme basınçlarında keskin kenarlı enjektör memelerinin dikkat çekici oranda daha düşük partikül emisyonu ve fren özgül yakıt

tüketimi değerleri verdiği görülmüştür. Püskürtme basınçları arttırıldıkça partikül emisyonları arasındaki fark azalmakta ve yuvarlatılmış kenarlı enjektör memesinin fren özgül yakıt tüketimi değerleri daha düşük çıkmaktadır.

125° ve 140°'lik iki farklı koni açısına sahip memenin test edildiği durumda, tam yükte partikül ve NO_x emisyonlarının mertebelerinde enjektör memesinin koni açısının fazla etkisi olmadığı görülmüştür. Enjektör memesinin koni açısının emisyonlara etkisi kısmi yüklerde gözlemlenmiştir. 125° koni açısına sahip memelerden çıkan yakıt demetlerinin yanma odası çeperlerine 140° koni açısına sahip enjektör memesinden çıkan demete göre daha fazla çarptığı görülmüştür.

5.1.1 Deney Düzeneği

Tablo 5.1: Deney motorunun özellikleri

Motor Tipi	Caterpillar 3406, tek silindirli, direk püskürtmeli, 4 supaplı
Çap x Strok	137,2mm x 165,1mm
Sıkıştırma Oranı	15.1:1
Hava Hareketi	Yok
Piston	Meksika başlı, keskin köşeli oyuk

Deney motoru altı silindirli Caterpillar 3406 ağır hizmet motorunun tek silindirli basitleştirilmiş bir versiyonudur. Turboşarj ve intercooler sistemleri deney motorunda birebir simüle edilmiştir. Bir sönümleme tankı vasıtası ile egzoz gazı karşı basıncı kontrol edilmektedir. Tüm akışkan sıcaklıkları termokupller aracılığıyla deney boyunca kaydedilmektedir. Yakıt sistemi elektronik kontrollü, hidrolik aktivatörlü bir birim enjektöre sahiptir. Elektronik kontrollü solenoid bir supap tarafından yüksek basınçlı yakıt kontrol altında tutulmaktadır. Yakıt plancerli bir pompa tarafından sevk edilmektedir. Bu yakıt sistemini motora entegre edebilmek için çeşitli düzenlemeler yapılmış; fakat yanma odası geometrisine müdahale edilmemiştir.

4 farklı tip enjektör kullanılmıştır. Enjektörler yuvarlatılmış ve keskin kenarlı ve 125 ile 140 derece koni açılı kombinasyonlara sahiptir. Bu enjektörlerden bir tanesinin üzerine konum sensörlü supap ve püskürtme basıncını ölçebilmek amacıyla basınç algılayıcı monte edilmiştir. Anlık püskürtülen debi de Bosch marka bir debi ölçer ile

ölçülmektedir. Yakıt akışı ise her 30 dakikalık peryodun başında ve sonunda tartılarak belirlenir.

Tablo 5. 2: Enjektörlerin teknik özellikleri

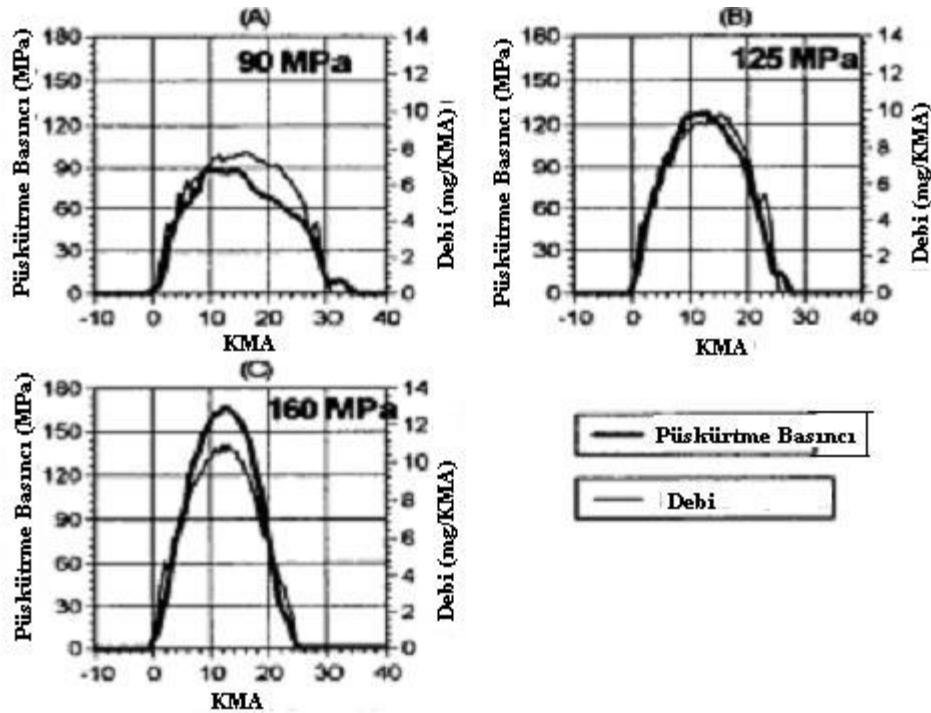
Enjektör Tipi	Elektronik kontrollü, hidrolik aktivatörlü birim enjektör	
Püskürtme Basıncı	Maksimum 1600 bar	
Delik Sayısı	6	
Delik Çapı	0,259mm	
Meme kanal yapısı	Keskin kenarlı	Yuvarlatılmış kenarlı
İç koni açısı	125°	140°

Egzoz gazı numunesi önce buz banyosundan, partikül filtresinden ve kurutucudan geçirilerek partikül ve su buharı ayrıştırılmakta buna mukabil gaz analizörüne girmektedir. Her ölçümden önce analizör kalibre edilmektedir.

Ölçümlerden önce motorun 4 saat çalıştırılarak rejim sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Partikül filtresinde ölçüm yapılabilecek miktarda partikül birikebilmesi için 30 dakikalık bir test süresi ön görülmüştür. 30 dakika boyunca motor sıcaklığı, basınçlar, debi ve krank açısı kaydedilmiştir. Deney sonuçları %25 ve %75 yüke göre ayrı ayrı çıkartılmıştır.

5.1.2 %75 yük durumu

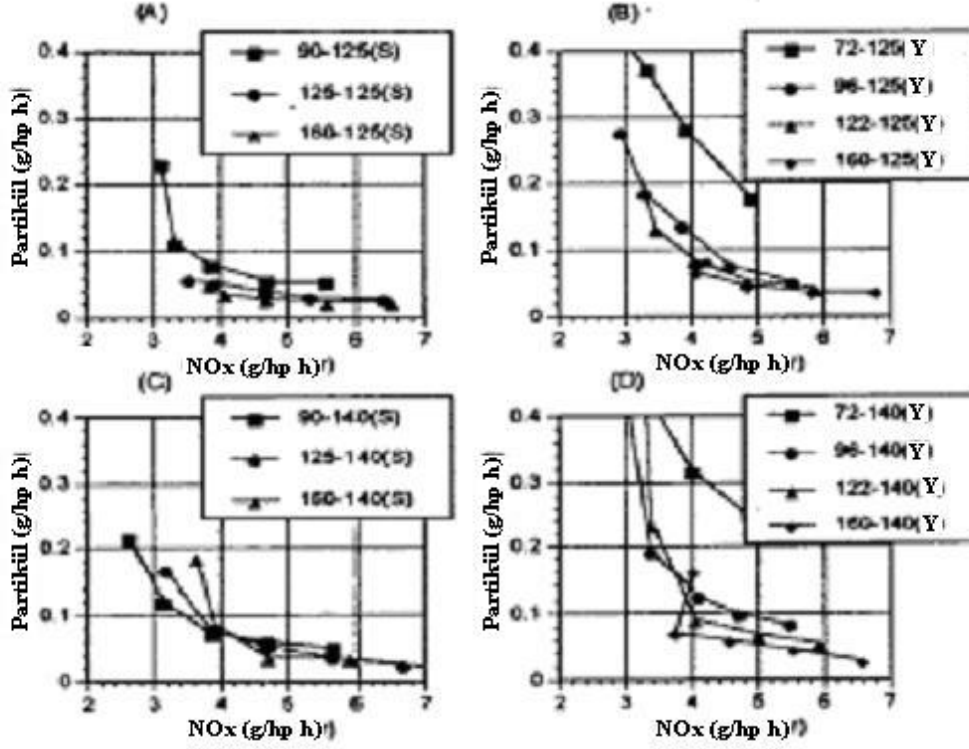
5.1.2.1 Püskürtme Basıncının Etkisi



Şekil 5. 1: Püskürtme basıncı ve debinin KMA' ya göre değişimi

Şekilde 140° koni açılı ve keskin kenarlı enjektör memesinin 3 farklı püskürtme basıncında krank açısına göre debileri görülmektedir. Her üç püskürtme basıncı içinde ortalama basınç pik basınçtan oldukça küçük çıkmaktadır. Sırasıyla maksimum püskürtme basıncının 90, 125 ve 160MPa olduğu durumlarda ortalama basınçlar 58, 81 ve 99MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler maksimum basınçların %60 – 65 altındadır.

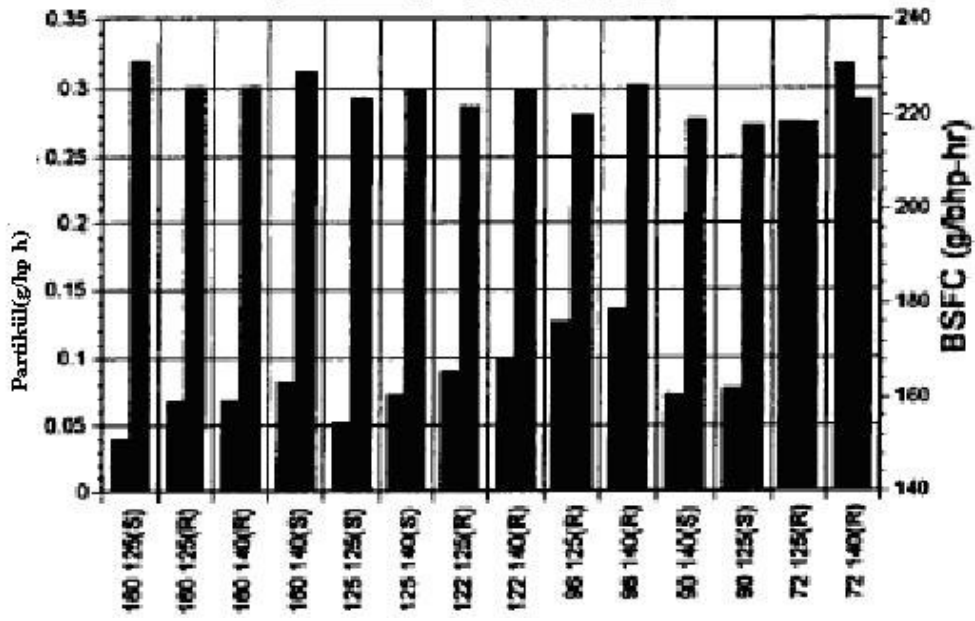
Şekilde her 4 çeşit enjektör için partikül ve is değerleri görülmektedir. Ölçümler 3'er derece aralıklarla toplam 12° KMA'lık bir aralıkta 5 farklı noktada yapılmaktadır. Bu aralık ÜON'dan 9° KMA'dan başlamakta ve 3° KMA'da sonlanmaktadır. Her 4 farklı meme tipinde de püskürtme basıncının artırılması sonucunda partikül miktarlarının arttığı görülmüştür. Şekilde B grafiğinde püskürtme basıncının 72MPa'dan 96MPa'ya yükseltildiği durumda partikül miktarının önemli ölçüde düştüğü; ancak 122MPa ile 160MPa'lık püskürtme basınçları arasındaki farkın çok fazla olmadığı görülmüştür.



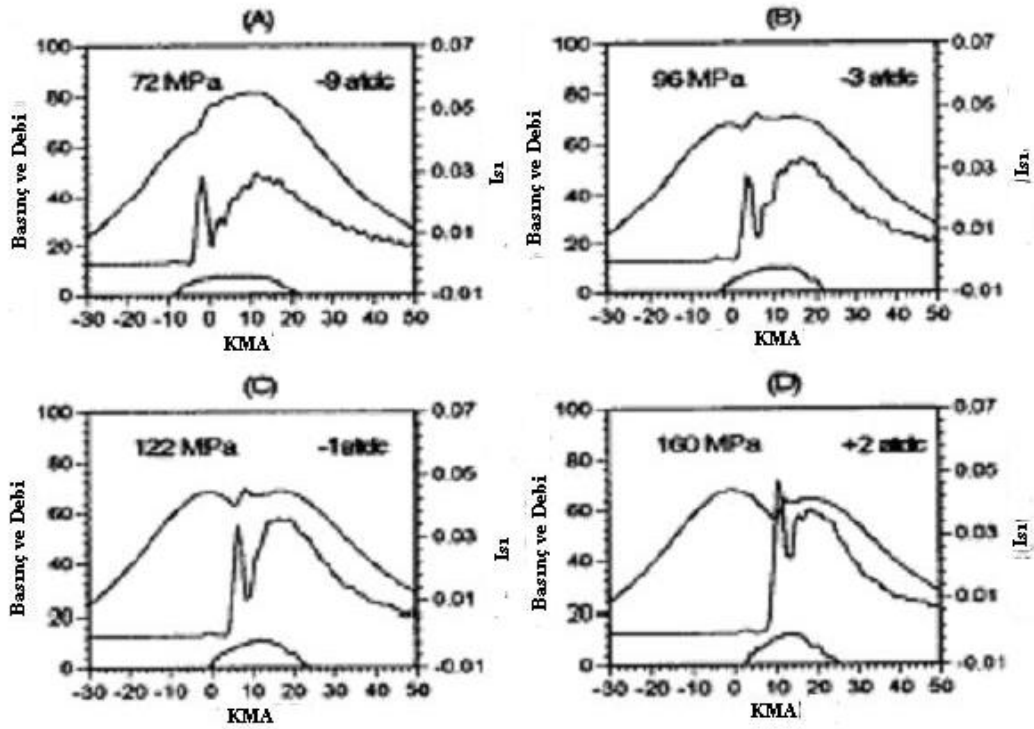
Şekil 5. 2: Farklı meme şekillerinde püskürtme basınçlarının NO_x ve partikül emisyonlarına etkisi

Motordan alınan moment arttıkça püskürtme basıncının artırılması sonucu partikül miktarında gerçekleşen azalmaya karşılık fren özgül yakıt tüketiminde büyük artışlar meydana gelmektedir. Ayrıca püskürtme basıncını 90MPa'dan 160MPa'ya çıkarılırken, püskürtme başlangıcı aynı NO_x seviyelerini sağlayabilmek için geciktirilmelidir. Aksi halde daha fazla yakıt girişi ve dolayısıyla yanma odasında daha yüksek sıcaklıklar meydana gelecek. Sonuçta NO_x emisyonları ve fren özgül yakıt tüketimi artacaktır.

Şekil 5.3'de aynı NO_x seviyesi için her enjektörün verdiği partikül ve fren özgül yakıt tüketimi miktarları gösterilmiştir. Genel eğilim püskürtme basıncının artırılması ile partikül miktarının azaldığı yönündedir. Buna karşın fren özgül yakıt tüketimi %3 civarında artmaktadır. Bu artışın nedeni NO_x emisyonlarının sabit tutulması nedeniyle geciktirilen püskürtme başlangıcından kaynaklanmaktadır. Yakıt sistemi motor tarafından tahrik edilmediği için fren özgül yakıt tüketimi gerçekte olacağından daha az çıkmaktadır. Hesaplamalara göre yakıt sisteminin enerji gereksinimi de motor tarafından karşılanırsa idi fren özgül yakıt tüketimi 72MPa püskürtme basıncı için %1 daha fazla, 160MPa için ise %2 – 3 daha fazla olmaktadır.



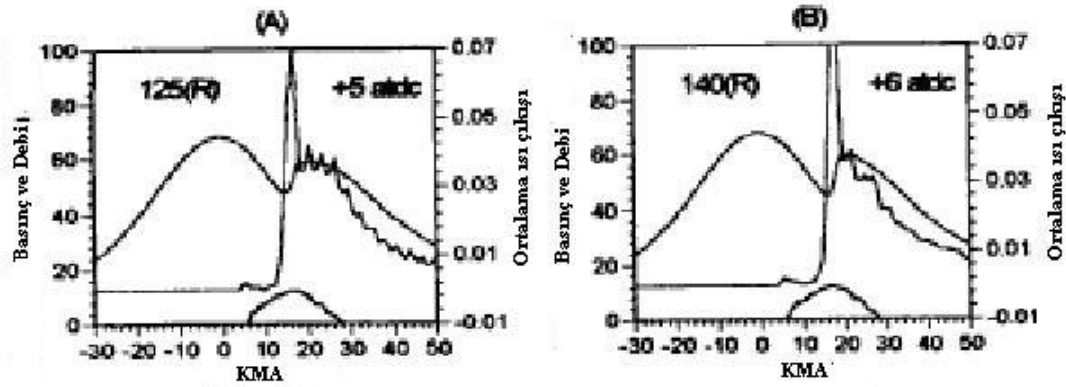
Şekil 5. 3: Farklı püskürtme basınçlarının NOx emisyonu sabit tutulduğu durumda farklı geometrilere sahip memelerde verdiği fren özgül yakıt tüketimi ve partikül emisyonları



Şekil 5. 4: 125° koni açısına sahip enjektör memesinde sabit 4g/hph NOx miktarı için silindir basıncı, ısı çıkışı, debi ve püskürtme basınçları

Şekil 5.4’de silindir basıncı, ortalama ısı çıkışı ve püskürtülen yakıtın debisi KMA’ya bağlı olarak verilmiştir. Püskürtme hızı, parçalanma ve karışım oranı; püskürtme süresi ve yanma süresi düştükçe ve püskürtme basıncı arttıkça artmaktadır. Ayrıca aynı NO_x seviyesini sağlayabilmek için 72 ve 160MPa püskürtme basınçları arasında

büyük bir püskürtme süresi farklılığı oluşmaktadır. Şekilde B ve D grafiklerinde görüldüğü gibi püskürtme basıncı ve püskürtme gecikmesi ters NO_x değerleri vermektedir. Yuvarlatılmış uçlu enjektör memesi ile 160MPa püskürtme basıncı durumunda püskürtme başlangıcı (ÜÖN'dan 5°KMA önce) NO_x miktarı artmaktadır. Her iki durum için de püskürtme başlangıcı ÜÖN'den önce olduğu durumda yanma başlangıcı 4 – 5 KMA gecikmektedir. Püskürtme başlangıcı ÜÖN'den sonra olursa yanma başlangıcı gecikmesi 5 – 7°KMA civarında olmaktadır. Bu uzun gecikme süresi ve yüksek püskürtme hızı daha yüksek sıcaklıklar ve NO_x vermektedir.

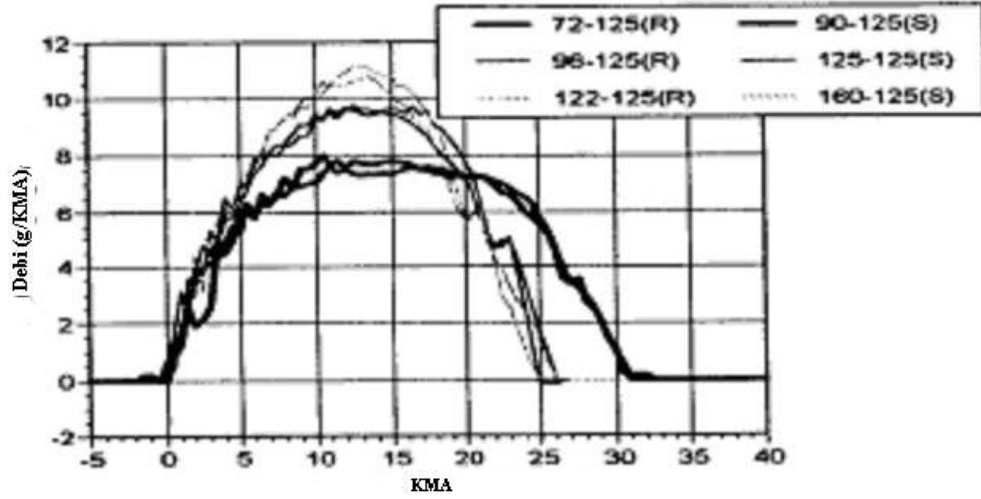


Şekil 5. 5: Yuvarlatılmış kenarlı memeler için basınç, debi ve ısı çıkışının KMA ile değişimi

5.1.2.2 Meme Geometrisinin Etkisi

Yuvarlak ve keskin kenarlı enjektörlerin karşılaştırılmasında aynı püskürtme debisinin yakalanması çok önemlidir. Aynı debiyi yakalayabilmek için yuvarlatılmış kenarlı memelerin püskürtme basınçları daha düşük tutulmuştur. Yuvarlak kenarlı memenin deşarj katsayısı 0,72 iken keskin kenarlı memenin deşarj katsayısı 0,64 olarak hesap edilmiştir. Aynı debiyi sağlayabilmek için keskin kenarlı enjektörlerde püskürtme basıncı 90MPa iken bu değer yuvarlatılmış kenarlı memelerde 72MPa olarak ayarlanmıştır.

Delik çapı, püskürtme süresi ve püskürtülen miktara göre partikül miktarlarında önemli farklılıklar oluşmaktadır. Keskin kenarlı enjektör memeleri denenilen tüm püskürtme basınçlarında yuvarlatılmışıya göre daha düşük partikül emisyonları vermiştir. Bunun nedeni meme L/D oranının 2,9 olması sonucu memeden kanala giren yakıtın keskin kenarlar nedeniyle bu aşamada parçalanması ve çıkış deliğinden yanma odasına girene kadar bir daha bir araya gelmemesi olduğu tahmin edilmektedir.

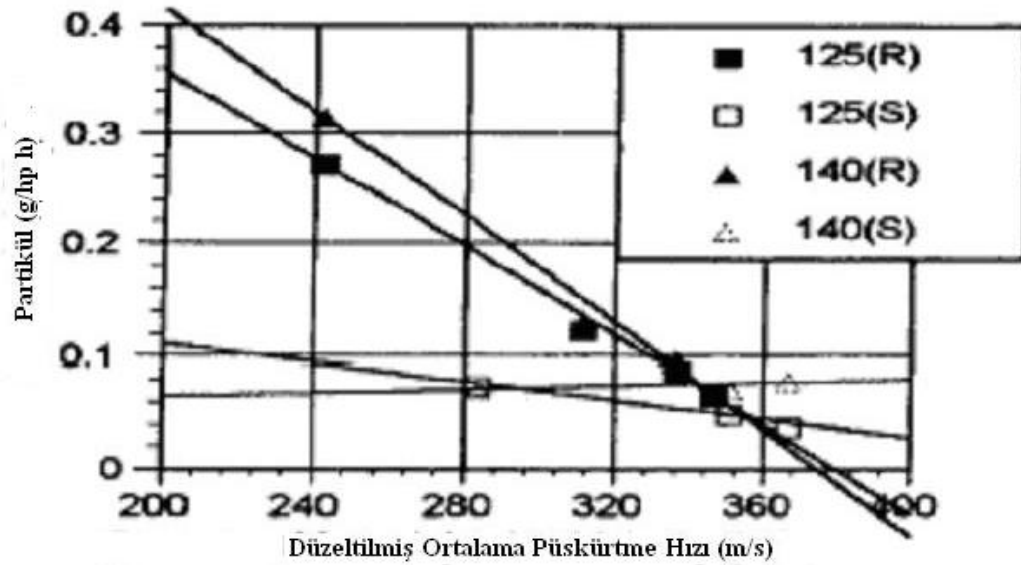


Şekil 5. 6: Yuvarlatılmış (R) ve keskin kenarlı (S) memelerin farklı püskürtme basınçlarında verdiği debiler

Buna karşın eğer akış tekrar meme kanal duvarlarına temas ediyorsa ve ortalama püskürtme hızları aynı ise bu durumda Karasawa, Su ve Farrel'a göre keskin kenarlı enjektörün yuvarlatılmış kenarlıya göre daha küçük damlacık çapları vermektedir. Bunun yanı sıra Karasawa püskürtme hızını meme deşarj katsayısı ile oranlayarak düzeltilmiş püskürtme hızını elde etmiştir.

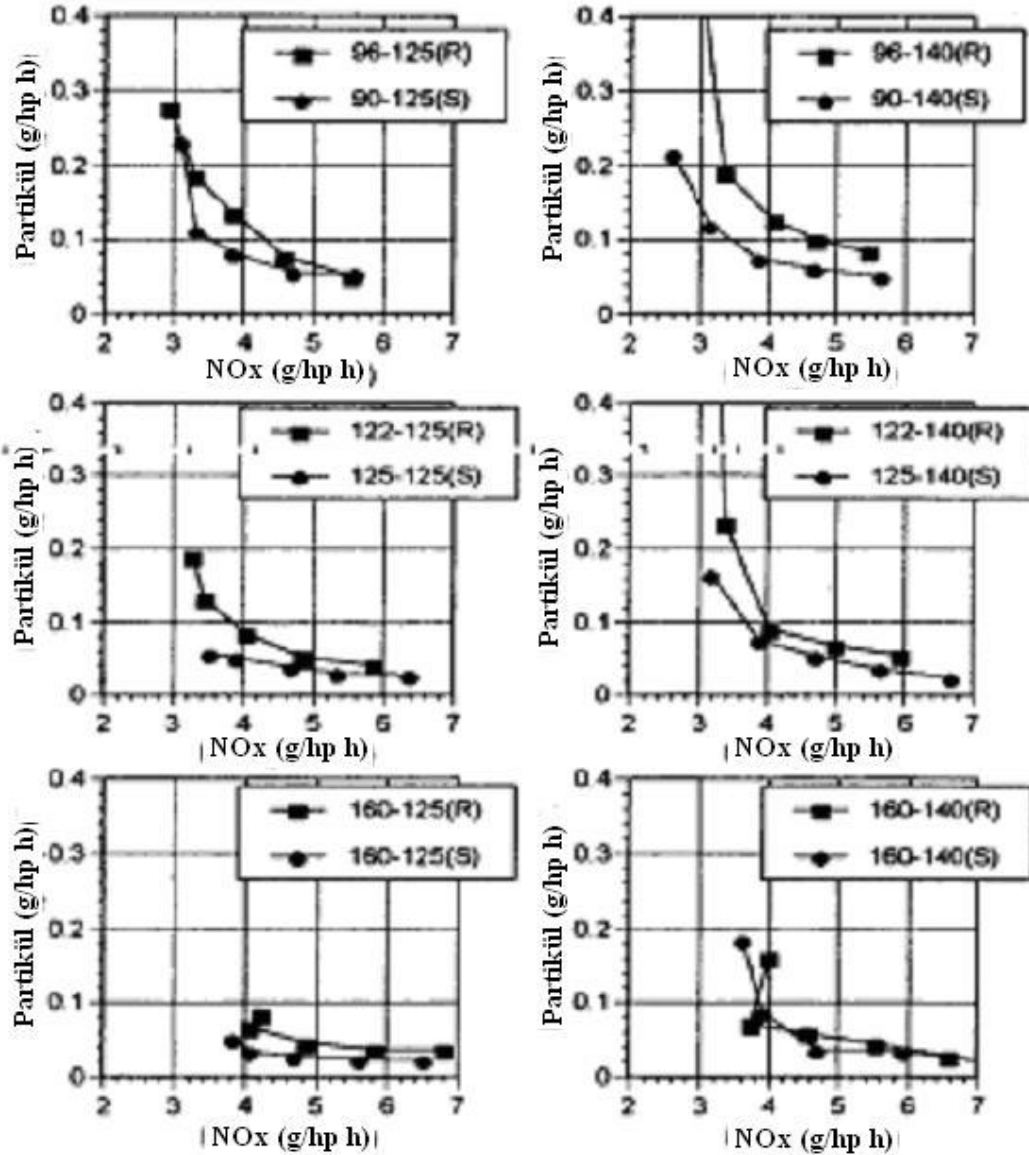
$$V_{\text{Düzeltilmiş}} = V_p / c_d$$

Böylece tanecik çapının meme geometrisine bağlılığını düzeltilmiş hıza bağımlılığa dönüştürmüştür.



Şekil 5. 7: NOx emisyonlarının 4g/hph sabit tutulduğu durumda partikül miktarının düzeltilmiş ortalama püskürtme hızı ile değişimi

Partikül emisyonları deşarj katsayısı ile, damlacık çapı ile gösterdiği ilişkiyi göstermemektedir. Keskin kenarlı enjektörler düzeltilmiş ortalama püskürtme hızına yuvarlatılmış kenarlılardan daha az duyarlıdır. Bununla beraber aynı NO_x miktarı için keskin kenarlı memeler daha düşük püskürtme basınçlarında daha az miktarda partikül emisyonu vermektedir.



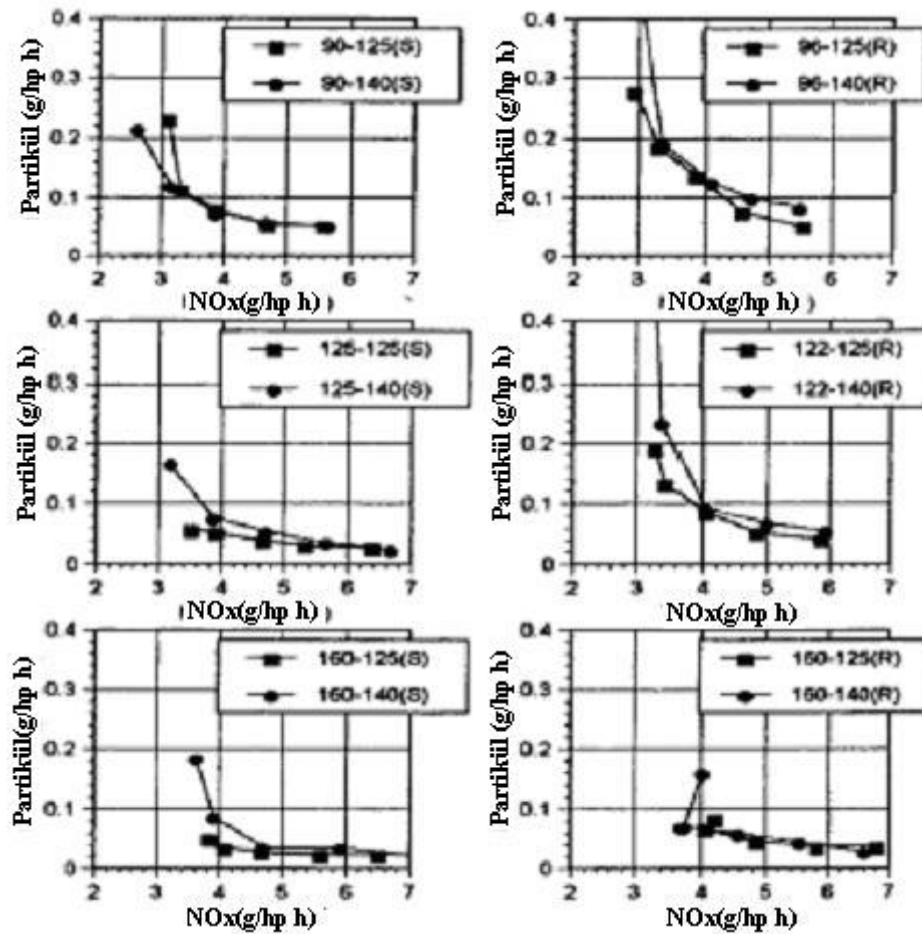
Şekil 5. 8: Aynı püskürtme basıncı için yuvarlak ve keskin kenarlı memelerin partikül ve NO_x emisyonlarının karşılaştırılması

Yukarıda partikül ve NO_x miktarları aynı püskürtme basınçları için çizilmiştir. Burada yuvarlak kenarlı enjektör memelerinin püskürtme sürelerinin keskin kenarlılara göre daha kısa tutulduğu göz önüne alınmalıdır. Tüm püskürtme basınçlarında keskin kenarlı enjektörler daha düşük partikül emisyonları vermişlerdir. Aynı debi için keskin kenarlı memelerde TG süresi $0,8^\circ\text{KMA}$ daha kısadır ve yanma periyodu da

4°KMA daha kısadır. Keskin kenarlı enjektör memesinin ideale daha yakın bir yakıt – hava karışımı sağladığı söylenebilir.

5.1.2.3 Koni Açısının Etkisi

Yakıt demetinin yanma odası duvarlarına çarpmasının incelenmesi amacıyla 125 ve 140°'lik koni açısına sahip enjektörlerle deneyler yapılmıştır. 140° koni açısına sahip memede demetin piston duvarlarına daha az çarpma gerçekleştirdiği buna karşın 125°'lik memede bu çarpmaların çok yoğun olduğu gözlenmiştir. Koni açısının NO_x emisyonlarına etkisi fazla olmamaktadır.



Şekil 5. 9: Koni açısının NOx ve partikül emisyonlarına etkisi

Yüksek püskürtme basınçlarında 125°'lik keskin kenarlı memenin emisyonları göreceli olarak hafif bir düzelme göstermektedir. Sonuçta koni açısının emisyonlara büyük etki göstermediği görülmüştür.

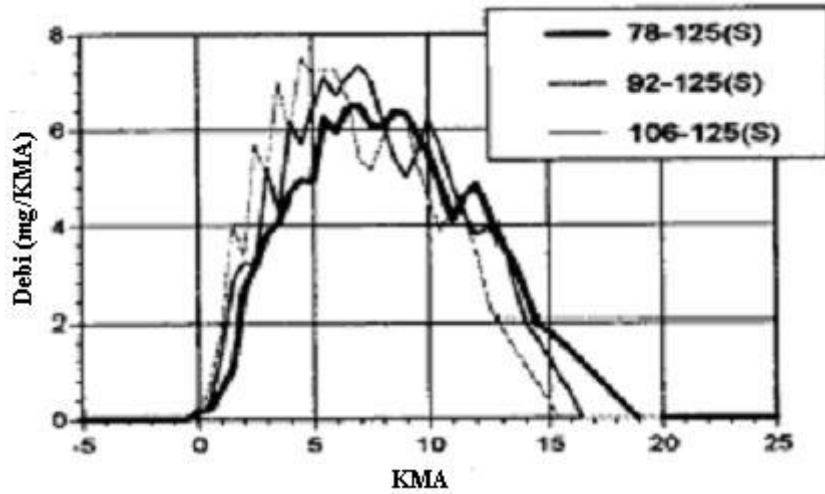
140°'lik memede TG süresi ortalama 4 – 5°KMA olmaktadır. Bu değer 125°'lik memeden daha uzundur. TG süresinin artması ile yanmanın uzaması sonucu oluşan yüksek basınçlarda partikül emisyonlarını kontrol etmek çok zor olmaktadır. Ayrıca

yanma karakteristiğindeki farklılıklar nedeniyle 140° lik memede fren özgül yakıt tüketimi %1 – 1,5 civarında daha fazla olmaktadır.

5.1.3 %25 Yük Durumu

5.1.3.1 Püskürtme Basıncının Etkisi

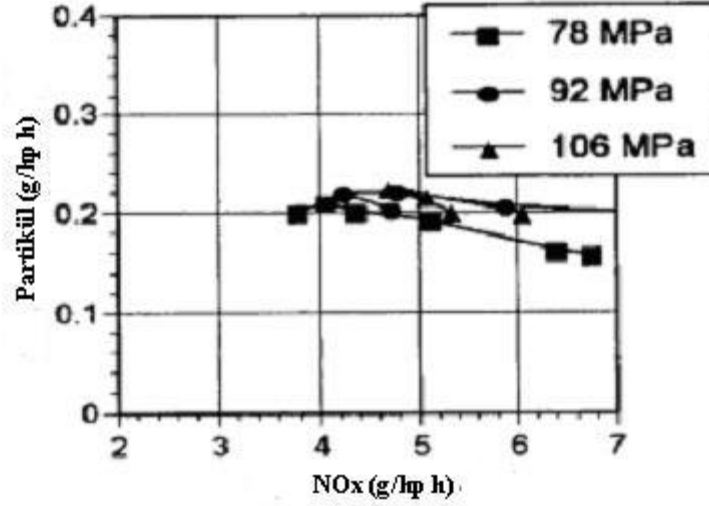
Püskürtme süresinin kısa olması nedeniyle püskürtme basıncı teorik pik püskürtme değerine ulaşamamaktadır. Dolayısıyla kapsamlı bir araştırma yapılamamış sadece keskin kenarlı enjektörler denemiştir.



Şekil 5. 10: Değişik püskürtme basınçlarında 125° koni açısına sahip keskin kenarlı memenin debisinin KMA ile değişimi

Pik püskürtme basınçları deneylerde 78, 92, 106MPa olarak gerçekleşmiştir. Ortalama basınç ile fark ise 43, 49 ve 51MPa olarak gözlenmiştir. Genelde püskürtme karakteristikleri aynı olmakla birlikte, basıncın ilk yükselmeye başladığı noktalarda hafif farklılıklar göstermektedir. Yanmadan önceki karışım fazının önemi düşünüldüğünde bu ufak farklılığın NO_x emisyonlarında dkkat çekici farklılıklar olacağı söylenebilir.

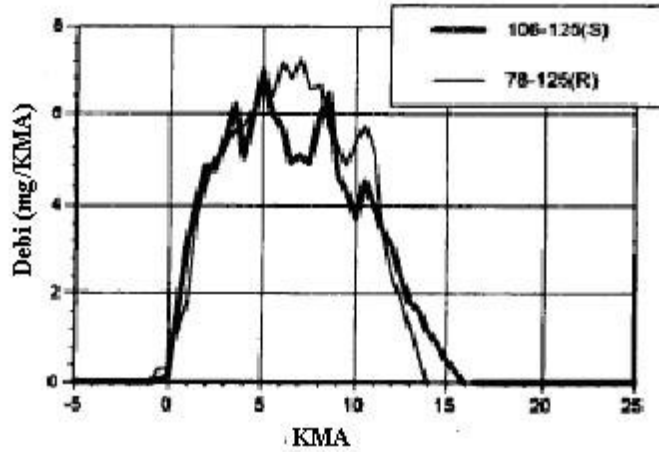
Şekil 5.11'e göre partikül miktarı hemen hemen aynı kalırken NO_x zamanlamaya göre değişmektedir. Bunun yanında bir önceki şekilde püskürtme basıncı ile partikül miktarının değişimi görülmektedir. Aynı püskürtme başlangıcı için değişik püskürtme basınçlarında farklı NO_x emisyon değerleri elde edilmiştir. Her üç koşul için de enjektörler arasındaki en büyük fark püskürtmenin başlangıcındaki debidir. %25 yükte, yanma öncesi karışımın kontrolünde debinin artışı çok önemlidir. İdeal durum debinin yavaşça artması ve az miktarda yakıtın ön ateşleme için yanma odasına girmesidir.



Şekil 5. 11: NOx ve partikül emisyonlarının farklı püskürtme basınçları ile değişimi

5.1.3.2 Meme Geometrisi

Yuvarlak kenarlı enjektörlerin 78MPa püskürtme basıncı ile verdiği debi değerleri, keskin kenarlı enjektörlerin 106MPa püskürtme basıncı değerleri birbirine uygunluk sağlamıştır.



Şekil 5. 12: 125° koni açısına sahip keskin ve yuvarlatılmış kenarlı memelerin debilerinin KMA ile değişimi

5.1.4 Sonuçlar

5.1.4.1 %75 Yük Durumu

Püskürtme basıncını arttırmak partikül miktarını düşürmektedir. Aynı NO_x seviyesini korumak için püskürtme başlangıcının geciktirilmesi ise yapılan deneylerde ise fren özgül yakıt tüketimini arttığı gözlenmiştir. 90MPa ve üstündeki püskürtme basınçlarında partikül emisyonundan elde edilen faydaya karşılık çok büyük bir fren özgül yakıt tüketimi artışı görülmüştür.

Yuvarlak kenarlı memelerin daha yüksek deşarj katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Sağlıklı deney yapılabilmesi açısından debiyi her iki tip meme için eşit tutmak gerekmektedir. Dolayısıyla yuvarlak kenarlı memelerin püskürtme basınçları daha düşük tutulmuştur. Bu da yuvarlak kenarlı memelerin partikül emisyonlarının daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Aynı püskürtme basınçlarında da keskin kenarlı enjektörlerin daha düşük partikül emisyonları verdiği gözlenmiştir.

Piston çanağına çarpma miktarlarına göre iki farklı koni açısına sahip memede ise emisyonlar çok ufak farklılıklar vermiştir. Piston çanağına daha fazla çarpan demet şekli veren koni açısına sahip memede TG ve yanma süresi uzatılırsa fren özgül yakıt tüketiminin düştüğü gözlenmiştir.

5.1.4.2 %25 Yük Durumu

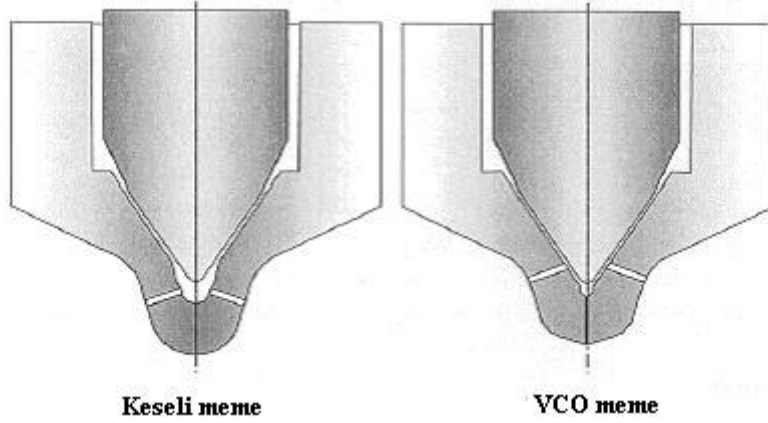
Debinin artış şeklinin NO_x emisyonları için fazlasıyla önemli olduğu görülmüştür. Düşük debi ile başlamak TG süreci boyunca az miktarda yakıt girmesini sağlamak açısından önemlidir.

Yuvarlak kenarlı enjektör memelerinde debi keskin kenarlılara oranla daha hızlı arttığı için NO_x emisyonları daha yüksektir.

Yakıt türünün özellikle düşük yüklerde emisyonlara büyük etkisi olduğu gözlenmiştir.

5.2 Enjektör Meme Geometrisinin Common Rail Dizel Yakıt Demetine Etkisi

Meme seçiminde göz önüne alınması gereken yüksek hızlı direk püskürtmeli dizel motorlarında yakıt dağılımının ve atomizasyonun iyi olmasıdır. Motor dizaynında enjektör memesinin seçimi en önemli parametrelerden birisidir. Ayrıca gittikçe sıkılaştan emisyon yönetmeliklerine uyabilmek için yanma prosesinin çok iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunun yapılabilmesi için demet karakteristiğinin kesin olarak belirlenmesi gerekir. CR sistemlerinde motor hızından ve yükünden bağımsız olarak püskürtme yapılabilir. Motor işletme şartlarına göre püskürtme süresi ve başlangıcı ayarlanabilmektedir. Dizel enjektör memeleri keseli ve supap kontrollü (VCO) olarak iki sınıfa ayrılabilir.



Şekil 5. 13: VCO ve keseli meme kesit resmi

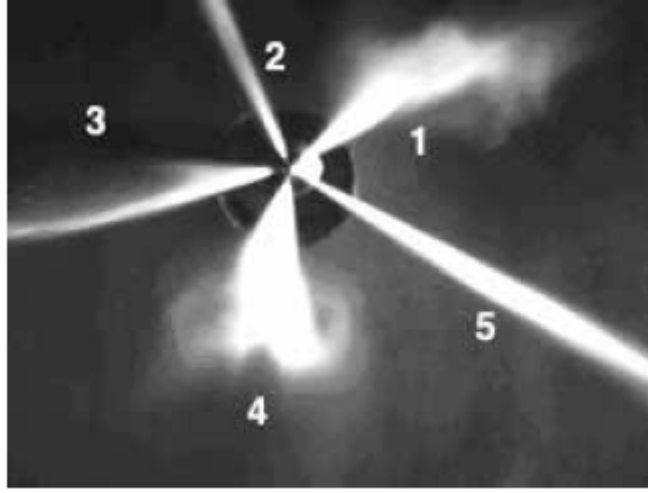
Genellikle keseli tip enjektörler kullanılmaktadır. Bu tip memelerde göreceli olarak uniform bir akış sağlanabilmektedir. Buna karşılık kesede biriken yakıtın damlama yapma ihtimalinde is ve HC emisyonlarında artış görülebilir. Prensipde VCO memelerde bir kese hacmi bulunmamaktadır; fakat iğnenin yukarıya doğru küçük hareketleri sonucunda meme içerisinde ve deliklerde simetrik olmayan basınç alanları oluşabilmektedir. Yanma veriminin artırılması ve emisyonların azaltılması için meme dizaynı çok önemlidir. Bu amaçla demet yapısının açıklanabilmesi gerekmektedir. Meme içerisindeki akış demet yapısını direk olarak etkilemektedir. Meme iç akışı da meme geometrisi ile belirlenmektedir. Yüksek püskürtme basıncı ile püskürtülen yakıt demetinin atomizasyonu, püskürtme yapısı, debisi memenin geometrisine bağlıdır. Bu araştırmada değişik delik çaplarına sahip mini keseli ve VCO enjektör memeleri kullanılmıştır. Keseli ve VCO memelerin demet karakteristikleri bir basınç odasının püskürtme yapmak suretiyle atmosferik ve basınç altındaki şartlarda testler yapılmıştır.

5.2.1 Çift Yaylı Mekanik Pompalı Enjektörler

Çift yaylı enjektörler bir adet rotasyonel pompa ile entegre çalıştırılmıştır. VCO memenin 5 adet deliği ve 144° sprej koni açısı vardır. Delik çapı 0,17mm'dir. İğne 220 bar basınçta hareketine başlar, ana püskürtme 300 bar basınçta olmaktadır.

5.2.1.1 Demet Modeli

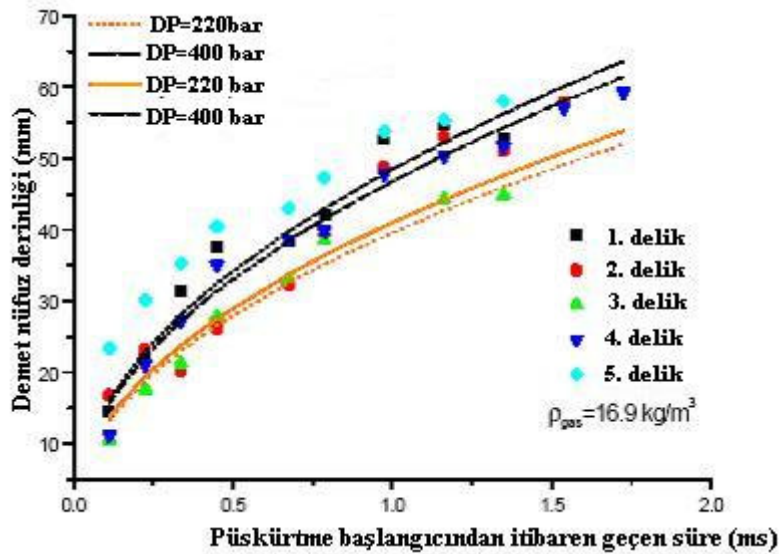
Makroskopik bakışta keseli ve VCO memelerde püskürtmeden püskürtmeye demette oluşan farklılıklar ihmal edilebilir; fakat aynı püskürtmede delikler arasında demet farklılıkları gözlenmiştir. VCO memelerde demet oluşumu başlangıcındaki farklılıklar 3 tipe ayrılabilir.



Şekil 5. 14: Memenin her bir deliğinden çıkan demet şekilleri

Şekil 5.14’de memenin yukarıya doğru küçük bir hareketinde atmosfer basıncına püskürtme yapılması durumu görülmektedir. İlk tip demet yapısı 5 numaralı demet gibidir. İkinci tip ise 1 ve 4 numaralı Üçüncü tip ise küçük açı ve demet nüfuz derinliğine sahip demettir. Bu demet şekillerinin ortam basıncından ve ortamdaki gazın yoğunluğundan etkilenmediği gözlenmiştir. 3 numaralı asimetrik demetin bir çevri hareketi sonucunda olduğu tahmin edilmiştir. Demetlerdeki asimetrinin nedeni, iğnenin akış kanalı içerisindeki hareketinin sapması olarak açıklanabilir. Püskürtme başlangıcından 0,9 – 1ms sonra ise demetler arasındaki asimetrinin kaybolduğu görülmüştür. Bu süre yayın açılma basıncına ulaşılması için geçen süre ile orantılıdır.

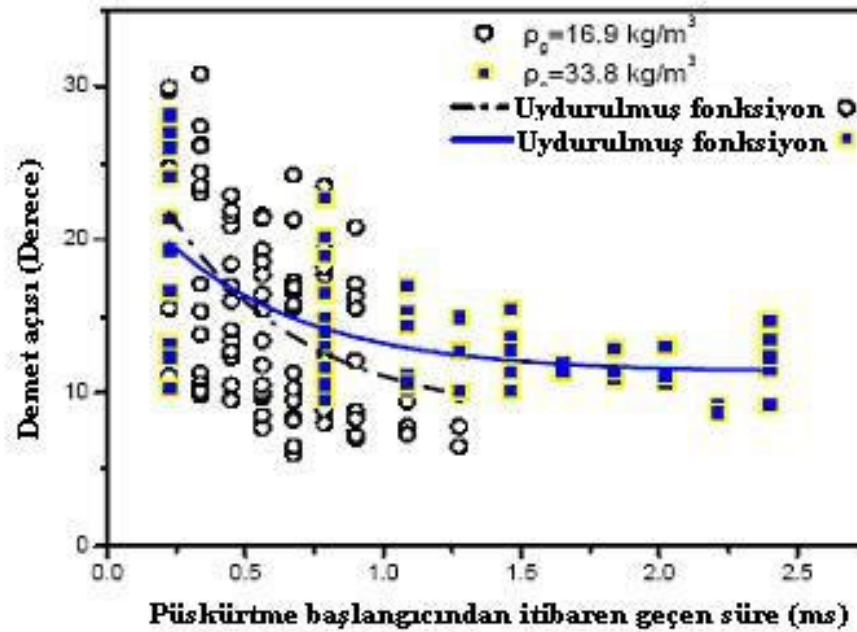
5.2.1.2 Nüfuz Derinliği



Şekil 5. 15: VCO memenin her bir deliğinden çıkan demetlerin nüfuz derinlikleri

Şekil 5.15’de 30 bar ortalama basınç ile püskürtme yapıldığında VCO memenin her bir deliğinin nüfuz derinliği görülmektedir. Püskürtme başlangıcında nüfuz derinlikleri, demet şekillerindeki farklılığa göre farklılık göstermektedirler. 1ms sonunda tüm demetler aynı nüfuz derinliğine ulaşmaktadırlar. Aynı olmayan nüfuz derinlikleri, küçük yanma odalarında havanın verimli olarak kullanılmasını engelleyebilir. Süre ilerledikçe nüfuz derinliği her delik için denk konuma gelmiştir. İğne püskürtme başlangıcında yukarıya doğru ilk ufak hareketinde yakıt akışını sınırlayarak, demet nüfuz derinliğini düşürebilmektedir. VCO memenin demet nüfuz derinliğinin iyi bir şekilde tahmin edilebilmesi için anlık basınç ve deşarj katsayısının da bilinmesi gerekmektedir.

5.2.1.3 Demet Açısı



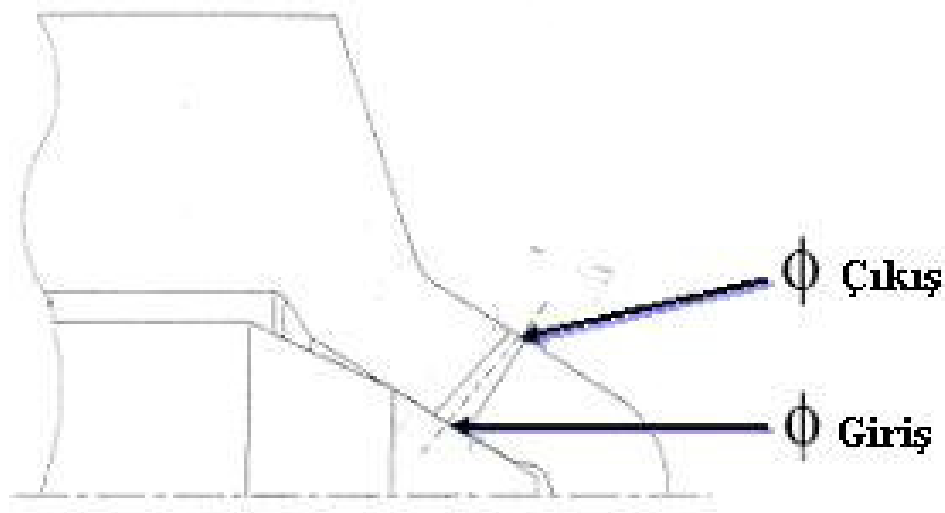
Şekil 5. 16: Farklı basınçtaki ortamlara püskürtme yapılması durumunda demet açısının değişimi

Şekil5.16’da püskürtme başlangıcından itibaren iki farklı basınçtaki ortama püskürtme yapıldığı durumda oluşan demet açıları görülmektedir. Yüksek ortam basıncı ve ortam gaz yoğunluğunun daha büyük demet açıları verdiği görülmüştür. Demet açısı jetin gelişme bölgesinde zamanla değişmekle beraber ana bölgesinde sabit kalmaktadır. Bu açı ortamın basıncı ve delik çapının büyüklüğü ile değişmektedir. Çok delikli VCO memesi için akış karakteristiği çok önemli bir rol oynamaktadır. Kim, demetin yayılma alanının açısının aynı iğne pozisyonunda kavitasyon nedeniyle zamanla arttığı belirlemiştir.

Soteriou, VCO memenin demet karakteristiğini iç akış karakteristiğinden yola çıkarak belirlemiştir. 5 numaralı demetin keseli memeler ile aynı demet şekli olduğu püskürtme boyunca değişmediği makroskopik analizlerle belirlenmiştir.

5.2.2 CR Elektro Enjektörler

Bu VCO memeler 5 veya 6 deliklidir. Sprey koni açısı 152° dir. Her memede çift kılavuzlu iğne bulunmaktadır. Keseli memeler ise 0,146mm delik çapına ve 152° sprej koni açısına sahip memelerdir. Düzenekte 1350 bar püskürtme basıncı sağlayabilen BOSCH CR sistemi ve entegre CP3 pompa kullanılmıştır. Yüksek basınç odası 30 bar ve 6mmHg vakum olduğu ortamlara püskürtme yapılmıştır.



Şekil 5.17: Sivrilik oranı

$$K = \frac{\phi_{\text{Giriş}} - \phi_{\text{Çıkış}}}{10} (\mu\text{m})$$

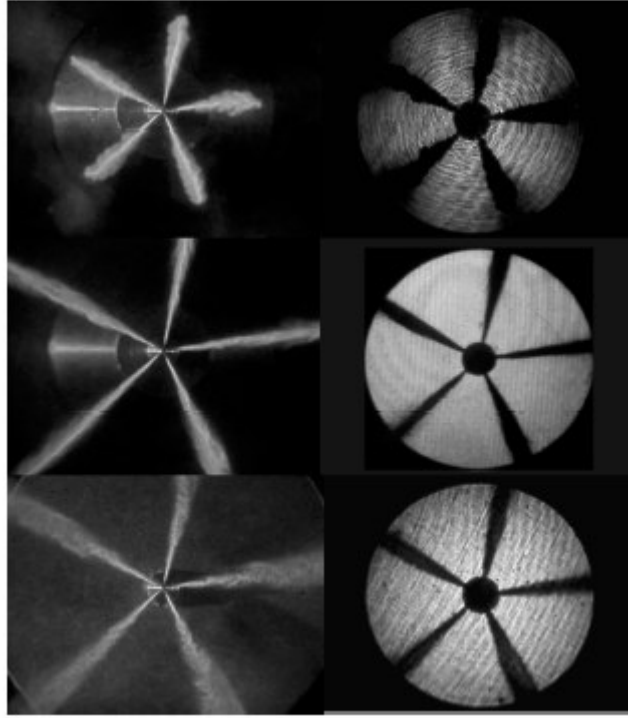
Farklı delik geometrisi ve K değerlerine sahip VCO memelerin deneyleri gerçekleştirilmiş ve delik geometrisinin etkileri araştırılmıştır. Deneyler sonucunda aynı koşullarda farklı K oranına sahip memelerin aynı püskürtme debisini verdikleri görülmüştür. Bu memelerin aynı efektif delik çapına sahip oldukları söylenebilir.

Demet yapısı azot gazı ile dolu basınçlı odada test edilmiştir. Basınç odasında 3 adet 80mm çaplı pencere ile gözlem yapılabilmektedir.

5.2.2.1 Demet Modeli

Bu tip memelerde de müteakip püskürtmeler arasında farklılık ihmal edilebilir. İlk başlangıçta püskürtülen 1 veya 2 püskürtme takip edenlerden daha kısa

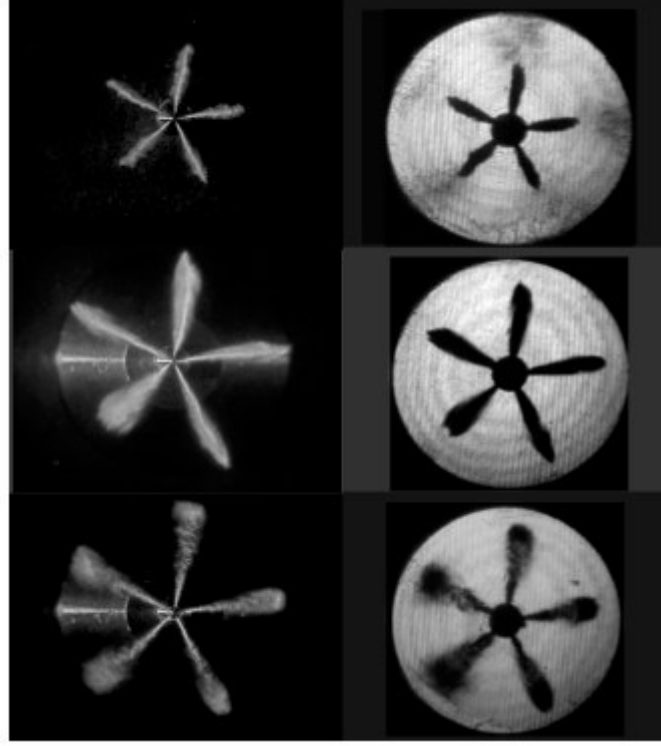
olabilmektedir. Bu olay keseli ve VCO olmak üzere her iki tip enjektörlerde de olmaktadır. delikten deliğe farklılık ise sadece keseli tip enjektörlerde görülmekte ve demet açısında farklılık oluşmaktadır. Demet nüfuz derinliği keseli enjektörler için her delikte hemen hemen aynıdır. Vakum ortamına püskürtmede her delikteki püskürtme delikleri tam olarak aynı çıkmakta bunun yanında demet açısında farklılık gözlenmektedir.



Şekil 5. 18: VCO meme ile püskürtmede ortamdaki gazın yoğunluğu ile demetin değişimi

Şekilde VCO spreyin yapısının ortamdaki gazın yoğunluğu ile değişimi gözlenmektedir.

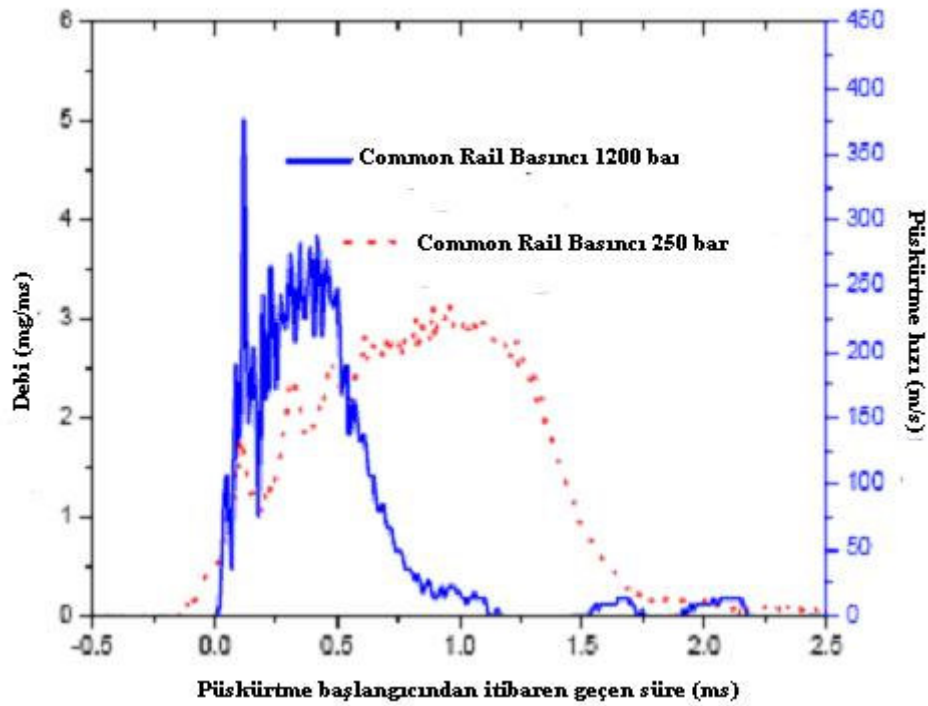
Çift kılavuzlu elektro VCO enjektörde başlangıç anında asimetric spreylere gözlenmemiştir. Çift kılavuzlu iğnenin hareket ekseninden sapmasının daha az olmasından ötürü böyle bir sonuç alındığı düşünülebilir. Vakum ortamına püskürtme yapılması durumunda ise konik demet şekli korunmakta ve ortamdaki gaz ile sürtünme olmadığından dolayı demet çeperleri pürüzsüz bir yapıda olmaktadır. yüksek basınca püskürtme yapılması durumunda ise demet ucu keskin bir şekil almaktadır. Püskürtme ortamındaki gazın şeklinin demet şekline etkisini görmek için aynı yoğunluktaki farklı tip gazlara püskürtme yapılmıştır. Sonuçta demet şeklinin değiştiği gözlenmiştir. Bu olayın farklı gazların farklı akustik hızlarından kaynaklandığı söylenebilir.



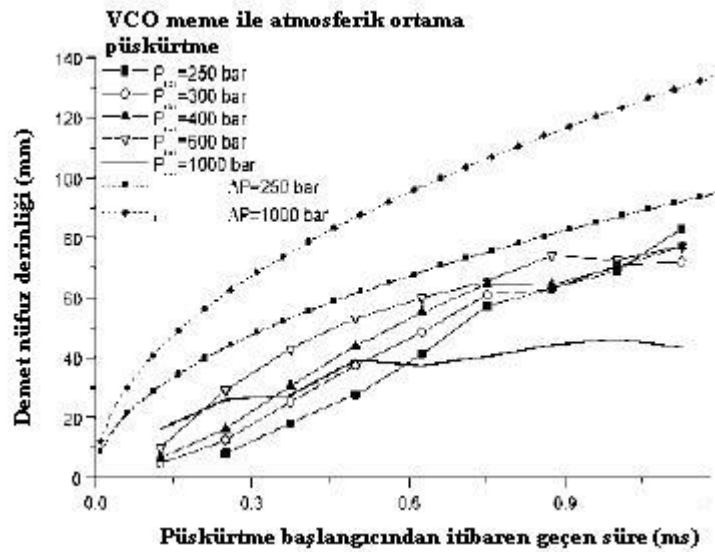
Şekil 5. 19: Keseli meme ile püskürtmede ortamdaki gazın yoğunluğu ile demetin değişimi

Şekilde keseli enjektör kullanılarak farklı yoğunluktaki gazlara püskürtme yapılması durumu incelenmiştir. Yüksek yoğunluklu ortama püskürtme yapılması durumunda tüy şeklinde bir sprej oluşmaktadır. Vakum ortamına püskürtmede ise demette kopmalar olmaktadır. bu durumda hidrolik bir ayrılma veya hızlı bir atomizasyondan bahsedilebilir. Meme püskürtme kanalı çeperlerinden bu ayrılmaların nedeni kavitasyon olabilir. VCO ile keseli tip memelerin karşılaştırılmasında keseli tip memenin daha türbülanslı ilk kırılmalara maruz kaldığı ve kavitasyon ayrılmasının daha olduğu gözlenmiştir. Demet nüfuz derinliği, açısı ve şekli ortamdaki gazın yoğunluğunun bir fonksiyonudur.

5.2.2.2 Nüfuz Derinliği

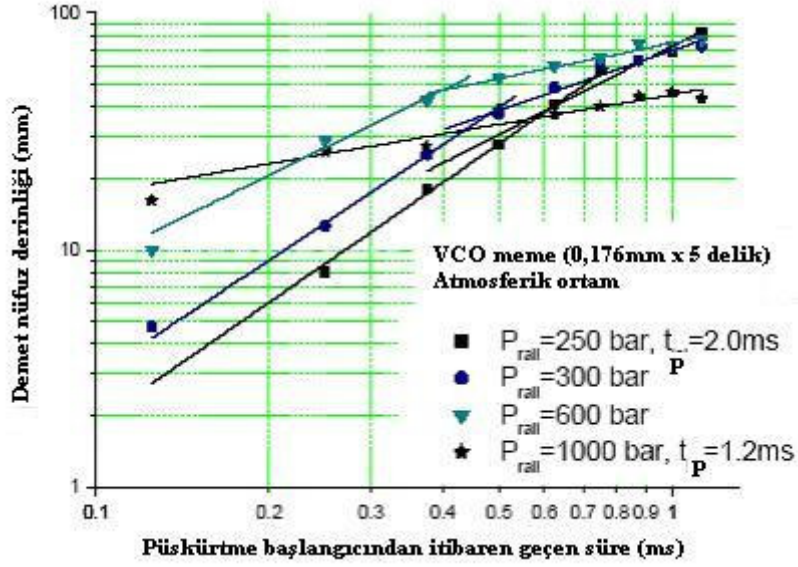


Şekil 5. 20: Debiye göre ortalama püskürtme hızı



Şekil 5. 21: Farklı püskürtme basınçlarının demet nüfuz derinliğine etkisi

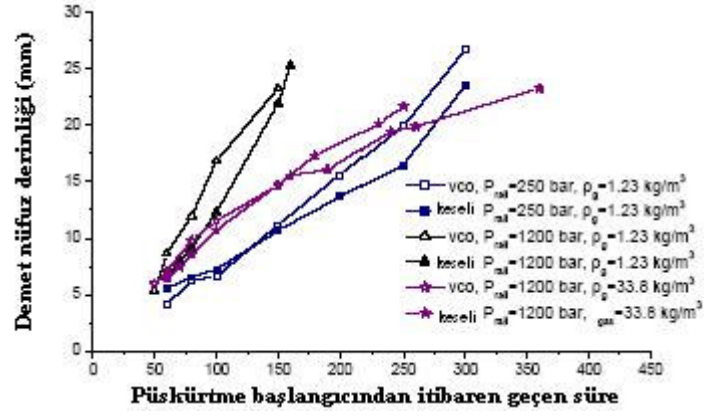
Şekilde 1000 bar püskürtme basıncında nüfuz derinliğinin diğer demetlerden daha az olduğu gözlenmiştir. Püskürtme başlangıcından itibaren 0,3ms kadar sürede demet nüfuz derinliği artış oranı püskürtme basıncı ile birlikte düşmeye başlamaktadır. Demet ilerlemesi 3 etaba ayrılabilir.



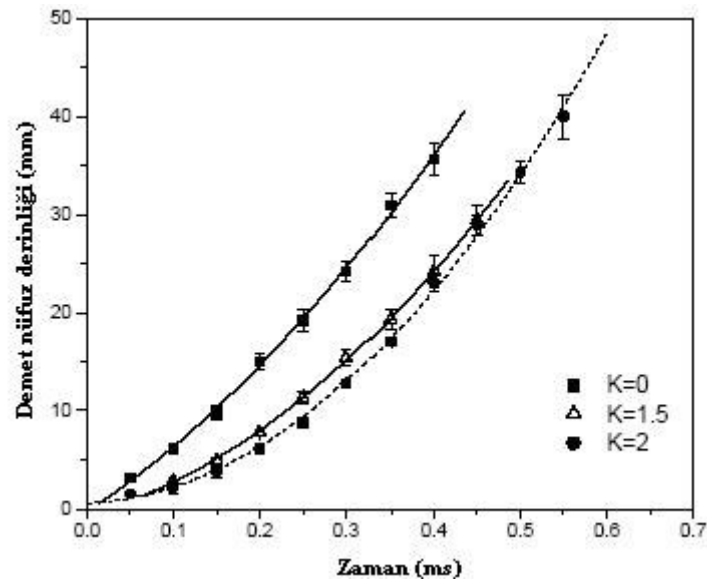
Şekil 5. 22: Demet nüfuz derinliğinin püskürtme basıncı ile değişimi

İlk etapta nüfuz derinliği püskürtme basıncı ile doğru orantılıdır. İkinci safhada demetin ilerleme hızı püskürtme basıncının artmaya devam etmesi ile birlikte düşmektedir. Bir noktada ise demet ilerlemesi doyuma ulaşmaktadır. Yüksek püskürtme basınçları daha küçük damlacık çapı ve daha iyi atomizasyon, hava – yakıt karışımı vermektedir. Ortamdaki gaz ile momentum değişimi de demet içi çok önemlidir ve püskürtme basıncı arttıkça bu değişim artmaktadır. CR püskürtme basıncı 600 ile 1000 bar arasında iken demet ilerlemesi püskürtme başlangıcından 1ms sonra doymaktadır. Damlacık boyutunun azalma hızı ilk damlacığın çapı ile ters orantılıdır. Maksimum demet nüfuz derinliği atomizasyon kalitesi ile de yakından ilgilidir. Demet ilerlemesi debi ile de hafifçe artmaktadır. İlk safhada demet uç noktası ince ligamentler ile bağlı sıvı damlacıklardan oluşur. Püskürtme başlangıcından itibaren kırılmalar ile momentum kaybedilir. Jetin hızı püskürtme hızından farklı olmaktadır.

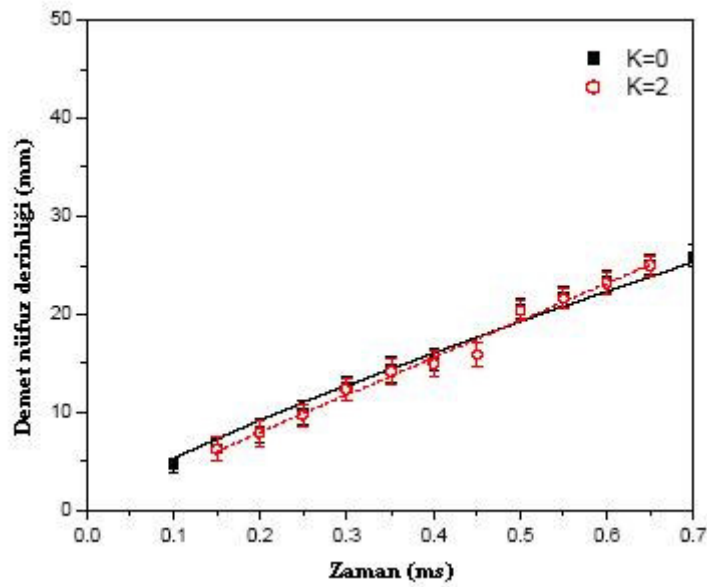
Şekil 5.23’de VCO ve keseli memelerin nüfuz derinliği görülmektedir. Gazın yoğunluğu arttıkça nüfuz derinliği azalmaktadır. Demet nüfuz derinliği yüksek yoğunluklu gazlar altında %44’e kadar azalma gösterebilmektedir.



Şekil 5. 23: Püskürtme başlangıç anındaki demet nüfuz derinliği



Şekil 5. 24: Keseli ve VCO memelerin demet nüfuz derinliklerinin karşılaştırılması

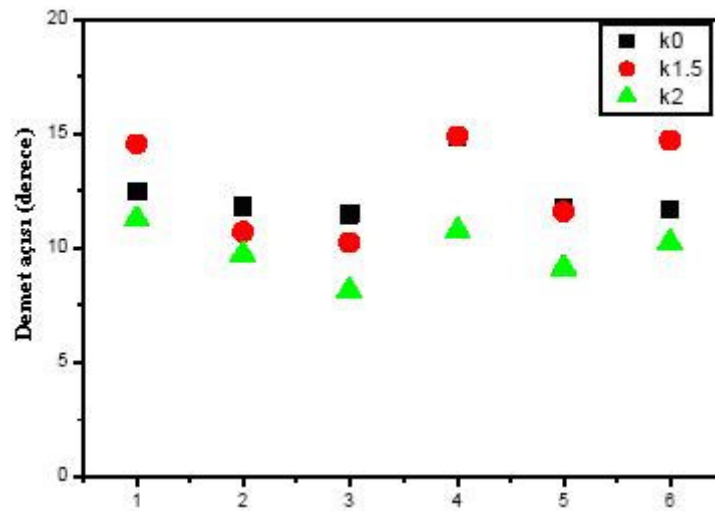


Şekil 5. 25: K oranının demet nüfuz derinliğine etkisi

Farklı K faktörlerine sahip VCO memelerin 250 ve 1200 bar püskürtme basıncındaki nüfuz derinlikleri görülmektedir. Büyük K değerleri atmosferik koşullarda daha az nüfuz derinliği vermektedir. Bunun nedeni yüksek K'lı memelerde iyi atomizasyon sonucu her damlacığın daha az momentuma sahip olması olabilir.

5.2.2.3 Demet Açısı

Demet açısı püskürtme basıncından fazlasıyla etkilenmektedir. Tam meme çıkış noktasında yapılan gözlemlerden bu safhada demet açısının püskürtme basıncından bağımsız olduğu görülmüştür. Dolayısıyla demet açısının püskürtme basıncı ile artmasının nedeni hava ile karışması sonucuna varılmıştır. 3 farklı VCO değerine sahip memelerin karşılaştırılması ile aşağıdaki şekil çizilmiştir.



Şekil 5. 26: K oranının demet açısına etkisi

Görüldüğü üzere büyük K' ya sahip memeler daha düşük demet açıları vermektedir. Bunun nedeni daha küçük çıkış kesiti ve çıkış deliği eksenindeki yüksek konsantrasyonlu demettir.

5.2.3 Sonuçlar

Çift kılavuzlu iğneye sahip VCO memelerin delikleri arasındaki demetlerde farklılık görülmemektedir. Asimetrik demetler VCO memelerin tek kılavuzlu olması ya da ufak iğne hareketleri olması durumunda görülmektedir. Bunun nedeni iğnenin hareket ekseninden sapması olarak belirlenmiştir.

Demet açısı püskürtme basıncından fazlasıyla etkilenmektedir. Buna karşın tam meme çıkış noktasında sadece meme geometrisine bağlıdır.

CR isteminde VCO memelerde nüfuz derinliği 3 safhada incelenebilir. İlk safhada nüfuz derinliğinin artışı püskürtme basıncının artışı ile doğru orantılıdır. İkinci safhada artış püskürtme basıncı ile düşmektedir. Son safhada ise nüfuz derinliği bir değerde doyuma ulaşır ve sabit kalmaktadır.

Yüksek keskinlik oranı K, daha az nüfuz derinliği ve demet açısı vermektedir.

Püskürtme basıncı 250 bar olduğu durumda atomizasyon rejimi püskürtme başlangıcından 0,1ms sonra başlamaktadır. Püskürtme basıncının 1200 bar'a çıktığı durumda ise geçiş periyodu yoktur ve atomizasyon hemen başlamaktadır. Yüksek püskürtme basınçları daha düşük Sauter ortalama yarı çapı vermekte ve daha homojen karışım oluşmaktadır.

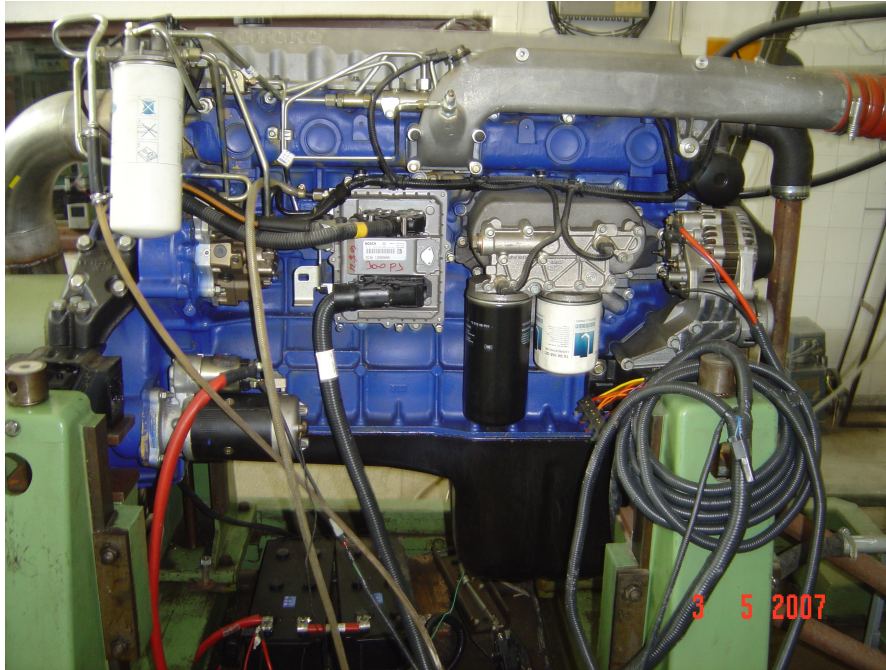
6. DENEYSEL YÖNTEMLERLE FARKLI GEOMETRİYE SAHİP ENJEKTÖR MEMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

6.1 Deneyin amacı

Deneyde amaçlanan püskürtme sisteminin en önemli parçası olan enjektördeki yapısal farklılıkların egzoz emisyonlarına etkisinin gözlenmesidir. Deneyde Bosch firmasından temin edilen 8 farklı tip enjektör memesi deney motoru üzerinde denenecek ve egzoz emisyonlarındaki farklılıklar belirlenip, bu farklılıkların nedenlerinin analizine çalışılacaktır.

6.2 Deney düzeneği

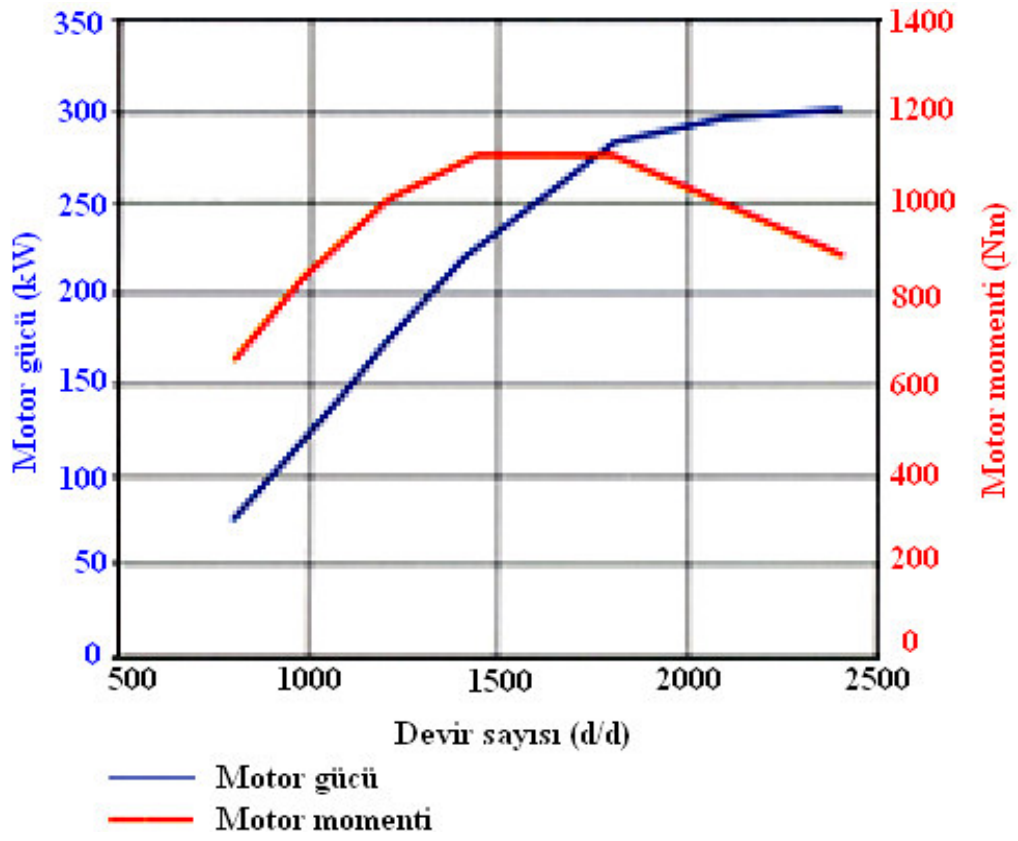
Deneylerde Ford Otosan firması tarafından tedarik edilen Ecotorq 7,33L. hacminde, 300hp gücünde ağır hizmet taşıt motoru kullanılacaktır. Motorun maksimum momenti 1100Nm' dir ve 1400 ile 1800d/d motor hızları arasında bu momenti kesintisiz olarak verebilmektedir. Motorun püskürtme sistemi Bosch firması tarafından üretilmiş common rail yüksek basınç püskürtme sistemidir. Sistem maksimum 1400bar basınçta püskürtme yapmaya izin vermektedir. Ford firmasının standart verilerine göre motor Avrupa Birliği Euro III normlarını sağlamaktadır.



Şekil 6.1: Deney motoru

Tablo 6.1: Deney motoru teknik özellikleri

Tipi	Ecotorq 300 hp
Silindir hacmi	7,33 litre
Silindir sayısı ve dizilişı	6 / sıra tipi
Supap sayısı	24
Silindir çapı ve strok	112 / 124
Sıkıştırma oranı	17,4 / 1
Karter hacmi	28 litre
Ağırlık	708kg
Motor gücü	221kW
Azami motor momenti	1100Nm (1400 d/d)
Azami motor devri	2400d/d
Püskürtme sırası	1 – 5 – 3 – 6 – 2 – 4
Püskürtme sistemi	Common rail 1400bar
Emisyon standardı	Euro III
Gürültü seviyesi	94dB (A)
Yağ tüketimi	Max 0,1g/kWh



Şekil 6.2: Motor karakteristikleri

Motoru yüklemek için 230kW frenleme kuvveti sağlayan Shenk marka elektromanyetik fren sistemi kullanılacaktır.



Şekil 6.3: Schenck marka elektromanyetik fren



Şekil 6.4: Elektromanyetik fren kumanda paneli

Motor suyunu soğutmak amacıyla harici bir eşanjör kullanılmıştır. Eşanjör soğutma suyu suyu bina dışarısındaki soğutma kulelerinden sisteme pompalamaktadır. Sistem kapalı devre olarak çalışmaktadır.



Şekil 6.5: Eşanjör

Egzoz emisyonları numuneleri egzoz borusuna özel olarak üretilip yerleştirilmiş olan bir numune toplama borusu vasıtası ile toplanmaktadır.



Şekil 6.6: Egzoz numunesi toplama borusu

Egzoz emisyonları Horiba marka emisyon ölçme cihazları kullanılmaktadır. HC emisyonlarının testi için kızdırıcılı hatlı bir cihaz kullanılmakta, bu cihazda numuneler ölçüm cihazına girmeden önce bir kızdırıcıdan geçerek kurutulmakta ve nem alınmaktadır.



Şekil 6. 7: Kızdırıcılı hatlı HC analizörü



Şekil 6.8: NO, CO ve CO₂ analizörleri

İs ve partikül ölçümleri için Bosch marka partikül ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6. 9: Partikül ölçüm cihazı

6.3 Deney yapılış şekli

Deney motorun kısmi yükte yüklenerek dört farklı devir sayısında alınan numunelerin ölçümünün yapılması sonucu değerler elde edilir. Ölçüm yapılmadan önce motor rölanti devrinde bir saat kadar çalıştırılarak ısıtılmaktadır. Cihazlar her ölçüm öncesi kalibrasyon gazları ile kalibre edilmektedir. İs emisyon ölçüm cihazı ile diğer analizörlere numuneler ayrı hattan gelmektedir. HC, analizörüne gelen hat egzoz borsundan sonra bir yoğuşturucudan geçirilmektedir. NO_x, CO ve CO₂ analizörlerine giden hat ise yoğuşturucuyu by-pass ederek direk olarak analizörlere ulaşmaktadır.

Deneye başlamadan önce NO_x analizörünün de yarım saat kadar ısıtılması gerekmektedir. Hazırlık işlemlerinin tamamlanmasının ardından ölçüm işlemnde geçilebilir. Motor önce 2000d/d değerinde ve 650N yük altında test edilir. Bu işlem daha sonra diğer hızlar için tekrarlanır. Her ölçüm öncesi analizörler kalibrasyon tüpleri vasıtası ile test edilmelidir. Bu işlemler 8 ayrı tip enjektör memesi için tekrarlanacaktır.

Bir set enjektör memesi ile test tamamlandıktan sonra motor stop edilerek meme değiştirme işlemine geçilir.

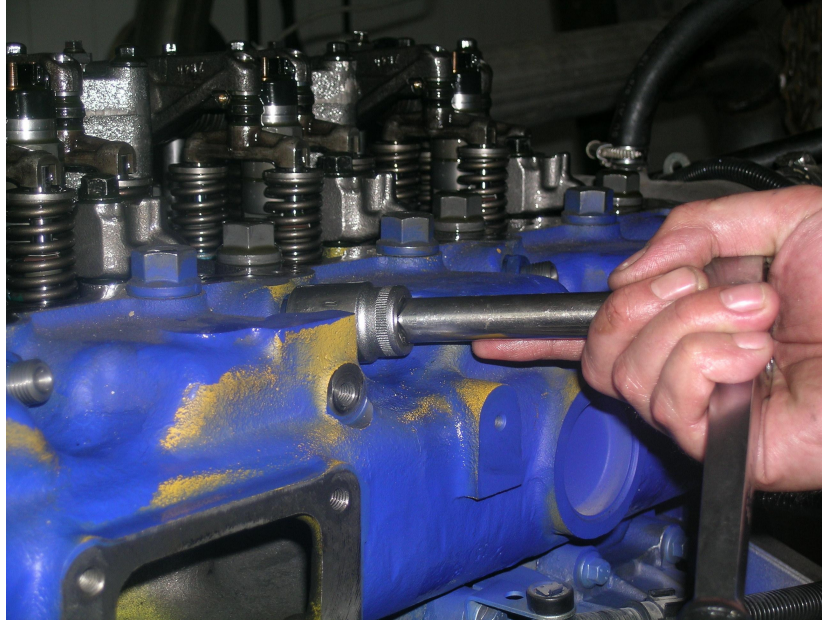


Şekil 6. 10: Enjektörler



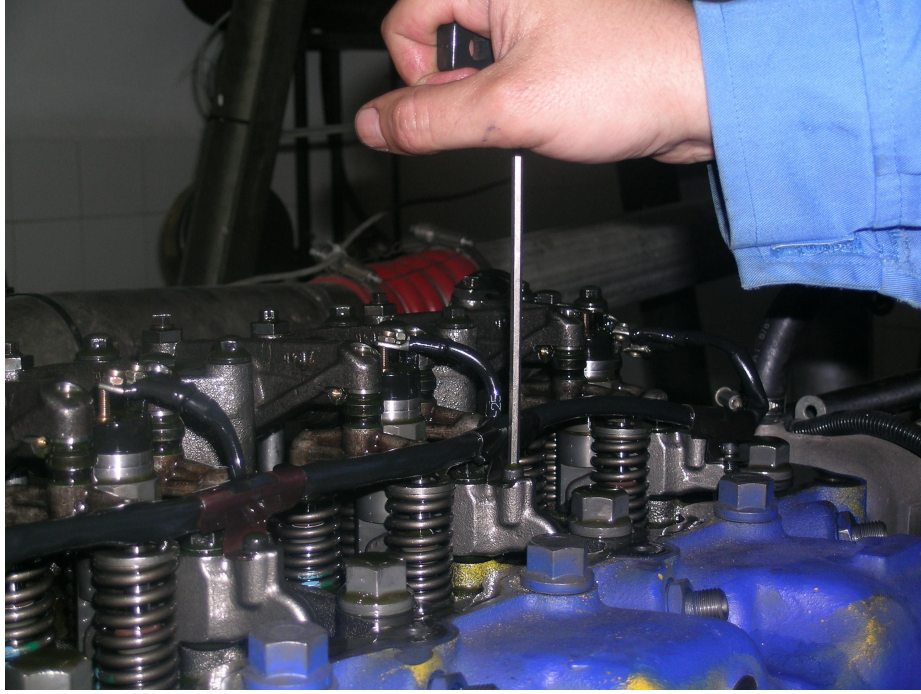
Şekil 6.11: Enjektör memesi, bağlantı somunu, gövde

Enjektörlerin motordan sökülmesi esnasında önce komple püskürtme sistemi demonte edilmektedir. Sırasıyla yüksek basınç pompası, yakıt filtresi, geri dönüş boruları ve enjektörlerden rail bağlantıları ayrılarak rail motordan sökülür. Enjektörlerin sökülmesine geçilmeden önce rail ile enjektör arasında yer alan yakıt filtreleme parçaları yerlerinden çıkarılır, böylece enjektörlerin serbest kalması sağlanır.

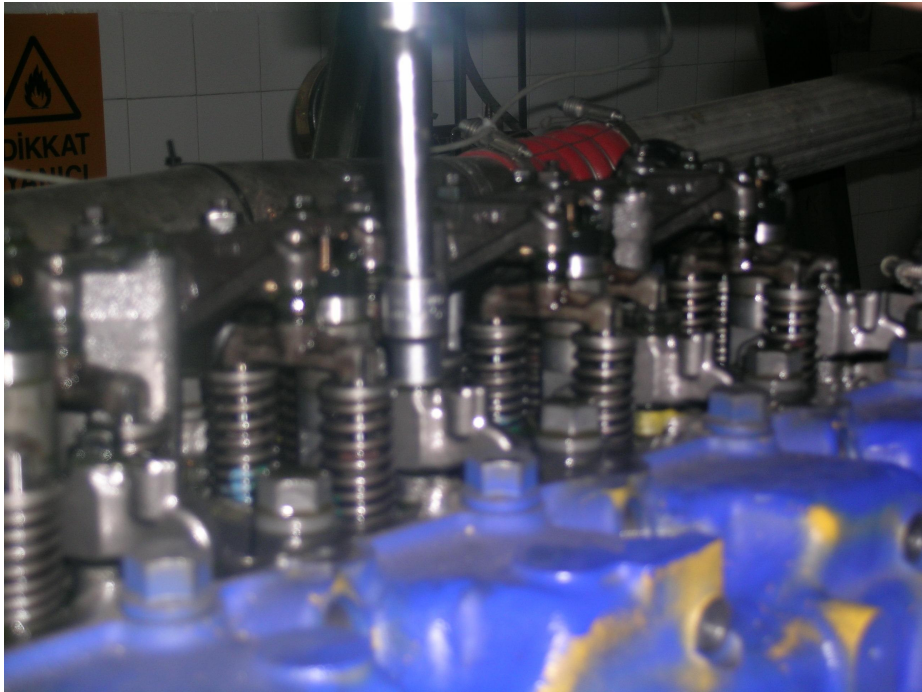


Şekil 6. 12: Filtrelerin enjektörlerden sökülmesi

Filtrelerin sökölme işlemleri tamamlandıktan sonra enjektörlerin sökölmesine geçilir. Öncelikle enjektörün kilit mekanizmasının somunu daha sonra enjektör tepe somunu sökölerek enjektör gövdesi motordan ayrılır.



Şekil 6. 13: Enjektör kilit mekanizmasının sökölmesi



Şekil 6.14: Enjektör tepe somunun sökölmesi.

Enjektör motordan ayrıldıktan sonra meme değıştirme işlemine geçilir. Meme değıştirmede dikkat edilecek hususlardan birisi de çalışılan ortamın çok temiz olması

ve meme püskürtme deliklerine her hangi bir toz, pisik vb maddeler kaçmamasıdır. Püskürtme deliklerinin tıkanması durumunda enjektör püskürtme yapmayacak veya eksik püskürtme yapacak sonuçta demet yapısı ve emisyonlar etkilenecektir. Meme değiştirilirken iğnelerin sıkışmamasına da dikkat edilmelidir. İğne sıkışması durumunda hiç püskürtme yapılamayacak ve emisyon ölçümleri sağlıklı sonuçlar verecektir.

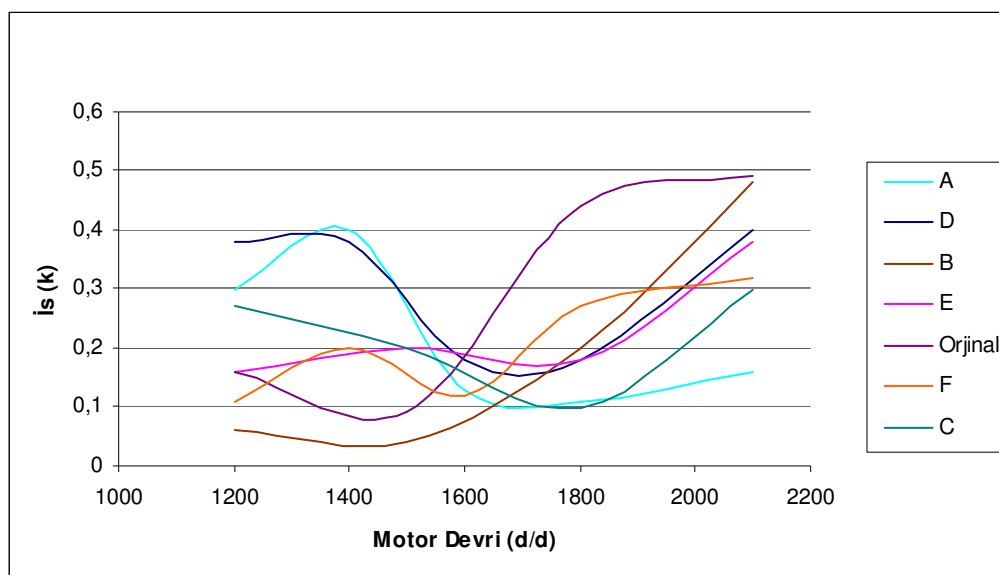
6.4 Deney Verileri

Deneyler 1200, 1500, 1800 ve 2100d/d motor hızlarında gerçekleştirilmiştir. Motor sabit moment ile test edilmiştir. Motorda standart olarak bulunan enjektörlere ek olarak 6 adet numune enjektör de denenmiştir. Tablo 6.2’de deney yapılan enjektörlerin yapısal özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.2: Deney enjektörlerinin yapısal özellikleri

Enjektör	Meme Delik Sayısı (n)	Meme Delik Çapı(Ø) mm	Meme Koni Açısı(θ)°	Enjektör Memesi Kanal Uzunluğu (L) m	L/d oranı	Kanal Konikliği (K,Ks)	Yuvarlatma Oranı (He) %	İğne ile Gövde Arasındaki Boşluk (FSP) µm
Orijinal (922)	8	0,162	150	0,95	5,8642	K0	10,5	2,1.....3,4
A (890)	6	0,185	150	0,95	5,13514	K1,5	10,5	2,1.....3,4
B (893)	6	0,185	150	0,95	5,13514	K0	17	2,1.....3,4
C (896)	8	0,156	150	0,95	6,08974	K0	17	2,8.....3,4
D (897)	6	0,177	150	0,75	4,23729	Ks1,5		2,1.....3,4
E (899)	6	0,185	150	0,75	4,05405	K1,5	10,5	2,1.....3,4
F (901)	8	0,162	150	0,75	4,62963	K0	10,5	2,1.....3,4

6.4.1 İş Ölçümleri

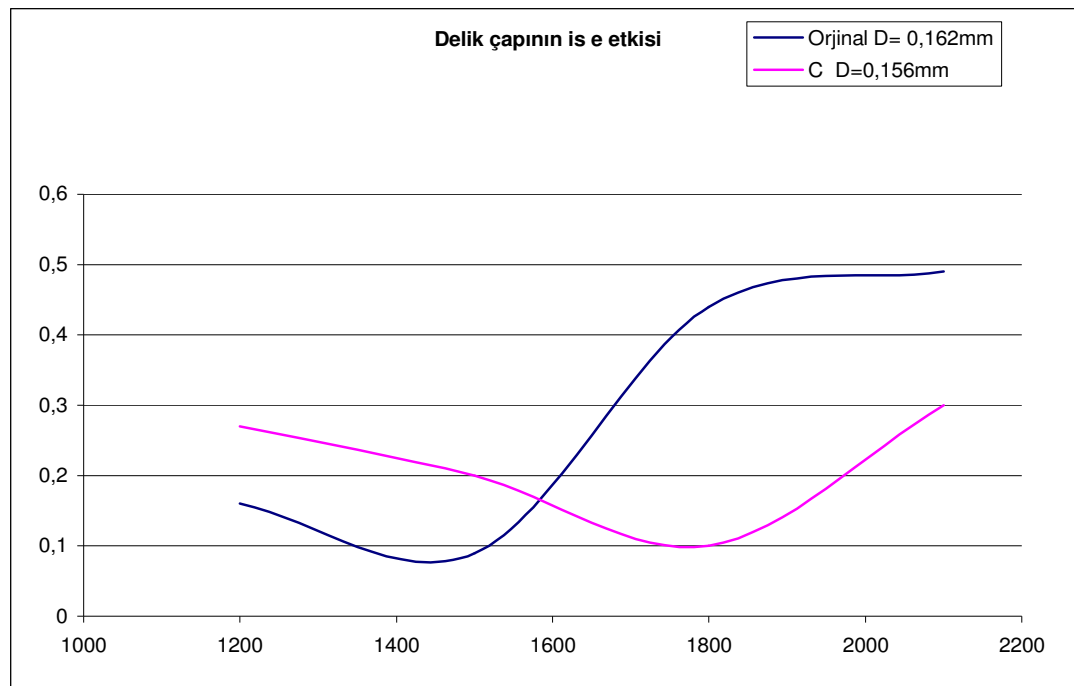


Şekil 6.15: İş ölçüm sonuçları

Şekil 6.15’ de tüm enjektörlerin is ölçümleri bir grafikte çizilmiştir. Görüldüğü gibi genel olarak grafikler benzerlik taşımakta; fakat tam olarak aynı eğilimi göstermemektedirler. Düşük devirlerde B memesinin en iyi is emisyonu performansını verdiği, yüksek devirlerde ise A memesinin is emisyonlarının en düşük kaldığı gözlenmiştir. A ve B memelerinin koniklik ve yuvarlatmaları dışında bir yapısal farklılığı yoktur. Kanal konikliğinin maksimum demet nüfuz derinliğine ulaşmayı hızlandığı düşünülürse özellikle yüksek devirlerde A memesinin konikliği sayesinde demetin yanma odasına daha fazla yayıldığı ve sonuçta daha iyi bir yanma oluşturduğu söylenebilir.

Bir diğer önemli husus motorun orijinal memesinin özellikle yüksek devir sayılarında denenen tüm enjektörlerden çok daha yüksek is emisyonu değerleri verdiğidir.

6.4.1.1 Delik Çapının Is Emisyonlarına Etkisi



Şekil 6.16: Delik çapının is emisyonlarına etkisi

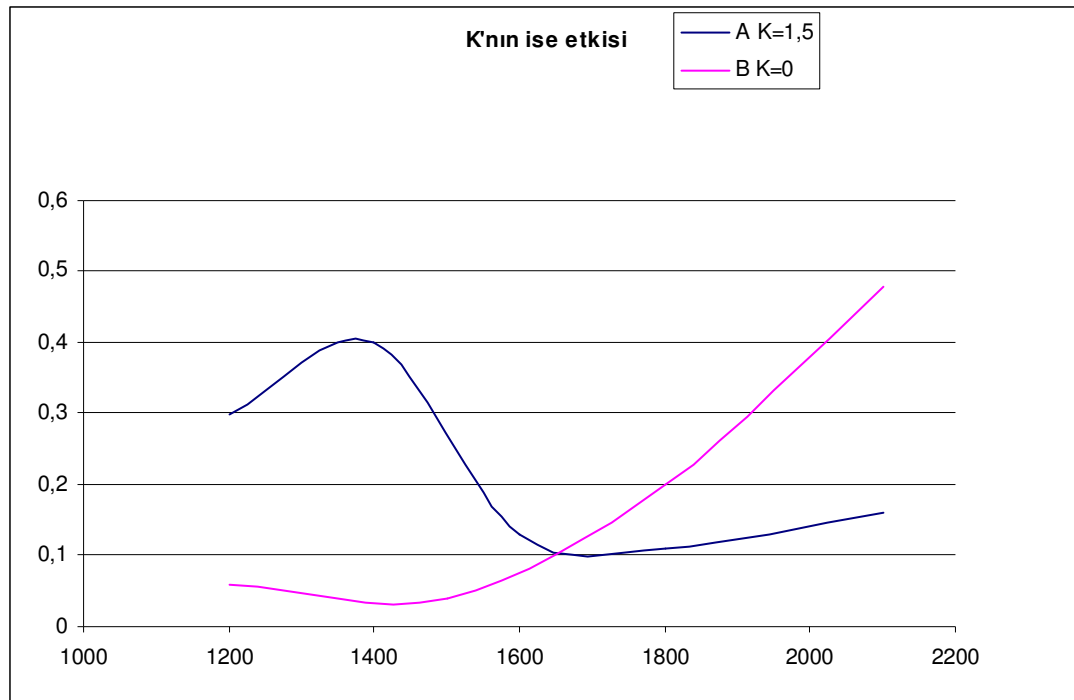
Delik çapının is emisyonlarına etkisini görebilmek için delik çapı dışında tüm yapısal özellikleri aynı olan orijinal ve C enjektör memeleri karşılaştırılmıştır. Şekil 6.16’da ölçüm sonucu elde edilen verilerle motor devrine bağlı olarak is emisyonlarının değişimi gösterilmiştir.

Her iki memede de devir sayısı yükseldikçe is emisyonlarının artması tahmin edilen bir olaydır.

Küçük çaplı memede demeti oluşturan damlacık çapları daha küçük ve dolayısıyla bu demette atomizasyon daha iyi olacağından is değerlerinin özellikle karışım oluşumu için daha kısa süre olan yüksek motor devir sayılarında daha düşük çıkması normaldir.

Delik çapı büyük olan memede demet açısı da buna paralel olarak daha büyük olacaktır. Düşük devirlerde hava hareketleri az olduğundan demet açısı fazla yakıt demetinin yanma odasına dağılımı daha iyi olacaktır. Dolayısıyla yanmanın bu durumda daha verimli olduğu tahmin edilmektedir. Devir sayısı arttıkça artan hava hareketlerine paralel delik çapı ve dolayısıyla demet açısı küçük olan memenin bu durumdan kaynaklanan düşük motor hızlarında yüksek is emisyonu verme olumsuzluğu giderilmiş olmaktadır.

6.4.1.2 Meme Kanal Konikliğinin (K) Is Emisyonlarına Etkisi



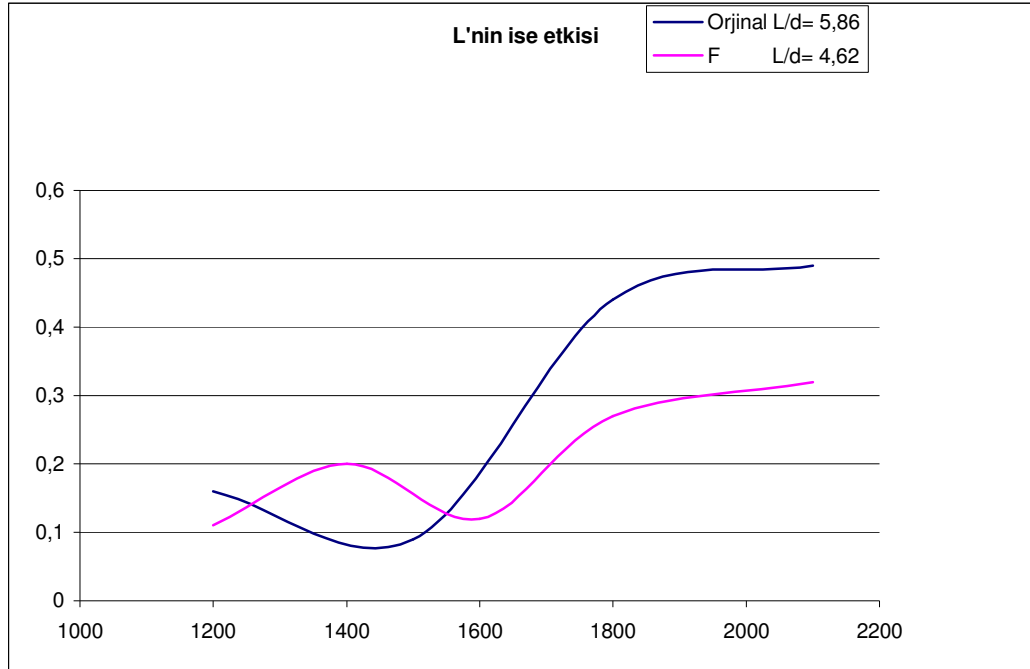
Şekil 6.17: Meme kanal konikliğinin is emisyonlarına etkisi

Meme kanal konikliğinin is emisyonlarına etkisinin görülebilmesi için A ve B enjektör memelerinin verdiği is emisyon değerleri karşılaştırılmıştır.

Konik memelerde demet açısı daha düşük olmaktadır. Bu nedenle hava hızlarının etkisinin az olduğu düşük motor devirlerinde demet açısı fazla olan silindirik kanallı B memeleri daha düşük is emisyonları sağlamaktadır. Koniklik maksimum demet nüfuz derinliğine ulaşma süresini azaltmaktadır. Özellikle karışım oluşumu için

göreceli olarak daha kısa zaman olan yüksek motor devirlerinde bu özellik konik A memesine avantaj sağlamakta ve is emisyonları daha düşük çıkmaktadır.

6.4.1.3 Meme Kanal Uzunluğunun İs Emisyonlarına Etkisi

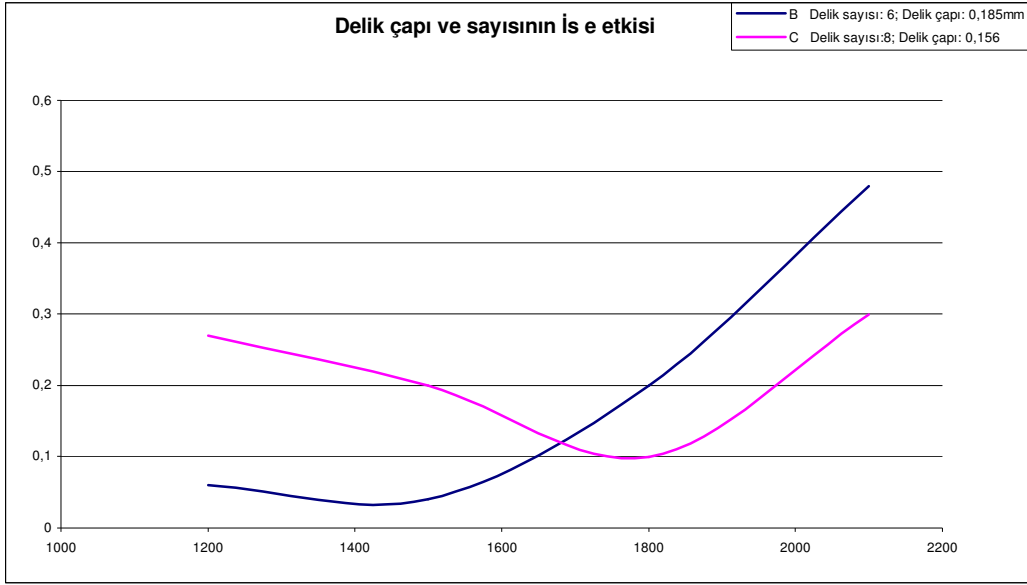


Şekil 6.18: Meme kanal uzunluğunun is emisyonlarına etkisi

Meme kanal uzunluğu genelde teoride tek başına değil kanal uzunluğunun delik çapına oranı olarak incelenmektedir. Söz konusu incelemede kanal uzunlukları dışında tüm yapısal özellikleri aynı olan orijinal ve F memelerinden elde edilen verilerle karşılaştırma yapılmıştır.

F memesinin L/d oranı 4,6 iken orijinal enjektörlerde bu değer 5,8'dir. L/d oranının 4'e eşit olduğu durumda çap dağılımının en düşük değere sahip olduğu deneylerle kanıtlanmıştır. Bu bilgiden yola çıkılarak F memesinden çıkan demeti oluşturan damlacıkların çapının daha düşük olduğu ve atomizasyonun daha etkin bir şekilde sağlandığı söylenebilir. Dolayısıyla parçalanma ve buharlaşma çok daha hızlı olmaktadır. İs emisyonlarının düşük olması bu nedene bağlanabilir.

6.4.1.4 Delik Sayısının İs Emisyonlarına Etkisi



Şekil 6.19: Delik çapı ve sayısının is emisyonlarına etkisi

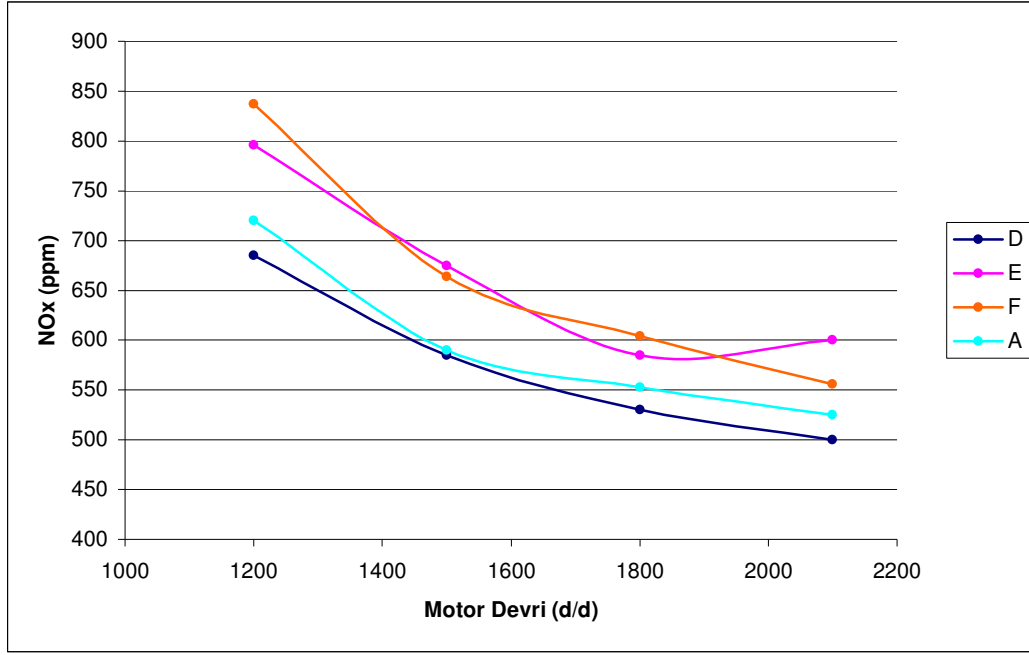
Delik sayısının is emisyonlarına etkisinin incelenmesi için delik çapı ve delik sayısı farkı dışında tüm yapısal özellikleri aynı olan B ve C memelerinden elde edilen emisyon değerleri kullanılmıştır.

Delik sayısı ve çapı düşük olan C memesinin daha düşük emisyon değerleri vermesi beklenirken düşük devirlerde B memesi daha düşük is emisyon değerleri vermiştir. Düşük devirlerde buharlaşma ve yanmanın gerçekleşmesi için daha fazla zaman olduğu ve nüfuz derinliği fazla olan B memesinin bu zaman sürecinde avantaja dönüştürdüğü düşünülebilir. Yüksek devirlerde ise C memesi hava hızlarının etkisinin de artması ile daha düşük is emisyon değerleri vermektedir.

6.4.2 NO_x Ölçümleri

Teoride motordaki yanmanın verimi arttıkça yanma odası içerisindeki sıcaklıklar ve basınç artmaktadır. Artan sıcaklıklar sonucunda NO_x emisyonları da artış göstermektedir.

Deneylerde sadece D, E, F ve A memelerinin NO_x değerlerinin ölçülmesi mümkün olabilmıştır. Yapısal özellikleri farklı olan bu memelerin arasında karşılaştırma yapılmış ve farkları açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 6.20: NO_x emisyonları

A ile E memesinin karşılaştırmasında E memesinin L/d oranı 4 olduğundan düşük damlacık çapları vermektedir. Bunun sonucunda NO_x emisyonlarının A memesinden yüksek olması da beklenen bir sonuçtur.

NO_x ölçümü yapılan memeler arasında delik sayısı fazla ve delik çapı en düşük olan F memesinin en iyi parçalanma ve yanma performansını verdiği ve dolayısıyla emisyonlarının da karşılaştırılan memeler arasında en yüksek çıktığı düşünülmektedir.

Yüksek koniklik oranına sahip D memesi NO_x emisyonları açısından en düşük değeri sağlayan meme olarak görülmüştür. Ekstra koniklik ve yuvarlatmaya sahip D memesinin demet açısının küçük olması nedeniyle emisyon değerlerinin bu şekilde çıktığı tahmin edilmektedir.

6.5 Sonuçlar ve öneriler

Farklı memelerde yapılan deneyler sonucunda şu sonuçlara varılmıştır.

- Yapılan deneyler sonucunda meme geometrilerinin egzoz emisyonlarına önemli derecede etki ettiği görülmüştür.
- Özellikle delik çapının emisyonlara doğrudan etki ettiği saptanmıştır.
- İş emisyonlarında tüm memelerden alınan sonuçlar doğrultusunda çizilen grafiklerden görüldüğü üzere eğrilerin tamamı 1600d/d civarında kesişmektedir. Bu durumdan iş emisyonları için incelemenin düşük ve yüksek

devirler için 2 ayrı safhada yapılması gerektiği sonucuna varılabilir. Düşük devirlerde daha büyük demet açısına sahip olduğu tahmin edilen memeler daha düşük is emisyon değerleri sağlamaktadır. Yüksek devirlerde ise etkinleşen hava hareketleri sonucunda bu avantajları kaybolmaktadır.

- NOx emisyonlarında ise konikliğin etkili olduğu ve konikliği fazla olan memelerin daha düşük NOx emisyonları verdikleri görülmüştür. NOx emisyonlarının memeler arasında devir sayısına göre farklılık göstermediği sürekli olarak aynı eğilimde devam ettiği görülmüştür.
- Motorun EKÜ'sünden değer okunamamış olması nedeniyle bazı çelişkili durumlarda yorum yapmak mümkün olmamış deneysel sonuçlar teorik bilgilere dayandırılarak ve memeler arasında püskürtme sürelerinin ve püskürtme basınçlarının aynı kaldığı var sayılarak yorumlar yapılmıştır.
- Püskürtme basınçları ve püskürtme hızları belirlenemediğinden emisyon değerleri arasında çıkan farklılıklar motor hava hareketlerine (swirl) dayandırılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan E. ve Soruşbay, C.,**2004.İçten Yanmalı Motorlar, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [2] **Yavaşol, İ.** 1988, İçten Yanmalı Motorlar, Eğitim Yayınları, İstanbul
- [3] **Pierpont, D.A. ve Reitz, R.D.,** 1995, Effects of Injection Pressure and Nozzle Geometry on D.I. Diesel Emissions and Performance, SAE Technical Paper Series, Detroit
- [4] **Patterson, M.A., Kong, S.C., Hampson, G.J., Reitz, R.D.,** 1994. Modelling The Effects of Fuel Injection Characteristics on Diesel Engine Soot and NO_x Emissions, SAE Technical Paper Series, Detroit.
- [5] **Ergeneman, M., Arslan, H., Kutlar, O.A. ve Mutlu M.,** 1998, Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [6] **Haşimoğlu, C. ve İcingür, Y.** 2002, Dizel Motorlarında Azotoksit Kontrol Yöntemleri, Turkish J. Eng. Env. Sci.Sayı26, İstanbul
- [7] **Bae, C., Yu, J., Kang, J., Kong, J. ve Lee, K.O.,** 2002, Effects of Nozzle Geometry on The Common Rail Diesel Spray, SAE Technical Paper Series, Detroit.
- [8] Peugeot firması internet sitesi, www.peugeot.com
- [9] www.diesel.net
- [10] www.volvo.com
- [11] www.delphi.com
- [12] www.denso.com
- [13] www.bosch.com.tr
- [14] www.siemens.com
- [15] **Çanakçı, M. ve Özsezen, N.,** 2004, Dizel Motorları Yardımcı Ekipmanlarındaki Gelişmeler, Mühendis ve Makina Sayı 530, İstanbul.
- [16] **Çanakçı, M. ve Özsezen, N.,** 2004, Dizel Motorları Yakıt Enjeksiyon Sistemlerindeki Gelişmeler, Mühendis ve Makina Sayı 531, İstanbul
- [17] **Şişman, E.,** 2007, Kişisel görüşme
- [18] **Demiröz, G.,** 2007, Kişisel görüşme.
- [19] www.ford.com.tr

EK_A Dünyadaki Egzoz Emisyonu Regülasyonları

Tablo A.1: Amerika ve Kanada ağıt taşıtlar dizel emisyon sınırlamaları (1974 – 1998)

Yıl	HC (g/bhp-h)	CO (g/bhp-h)	NO_x (g/bhp-h)	HC + NO_x (g/bhp-h)	PM (g/bhp-h)
1974	-	40,0	-	16	-
1979	-	25,0	-	10,0	-
1985	1,3	15,5	10,7	-	-
1987	1,3	15,5	10,7	-	0,60
1990	1,3	15,5	6,0	-	0,60
1991	1,3	15,5	5,0	-	0,25
1994	1,3	15,5	5,0	-	0,10
1998	1,3	15,5	4,0	-	0,10

Tablo A.2: Kaliforniya eyaleti ağır taşıtlar emisyon sınırlamaları

Yıl	HC (g/bhp-h)	CO (g/bhp-h)	NO_x (g/bhp-h)	PM (g/bhp-h)
1987	1,3	15,5	6,0	0,60
1991	1,3	15,5	5,0	0,25
1994	1,3	15,5	5,0	0,10

Tablo A.3: Avrupa Birliği Emisyon regölasyonları

	Tarih ve Kategori	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO_x (g/kWh)	PM (g/kWh)	Duman (m³)
Euro I	1992 < 85kW	4,5	1,10	8,0	0,612	-
	1992 > 85kW	4,5	1,10	8,0	0,36	-
Euro II	1996. 10	4,0	1,10	7,0	0,25	-
	1998. 10	4,0	1,10	7,0	0,15	-
Euro III	1999. 10	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15
	2000. 10	2,1	0,66	5,0	0,10	0,8
Euro IV	2005. 10	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
Euro V	2008. 10	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5

Tablo A.4: Japonya Ağır taşıtlar emisyon regülasyonları

Araç ağırlığı	Tarih	Birim	CO		HC		NO _x		PM	
			Max	Ort.	Max	Ort.	Max	Ort.	Max	Ort.
< 1700 kg	1988	g/km	2,7	2,1	0,62	0,40	1,26	0,90	-	-
	1993		2,7	2,1	0,62	0,40	0,84	0,60	0,34	0,20
	1997		2,7	2,1	0,62	0,40	0,55	0,40	0,14	0,08
	2002			0,63		0,12		0,28		0,052
1700 – 2500	1988	ppm	980	790	670	510	500 DI	380 DI	-	-
							350 IDI	260 IDI		
	1993	g/km	2,7	2,1	0,62	0,40	1,82	1,30	0,43	0,25
	1997		2,7	2,1	0,62	0,40	0,97	0,70	0,18	0,09
	2003			0,63		0,12		0,49		0,06
	1988	ppm	980	790	670	510	520 DI	400 DI		
							350 DI	260 IDI		
> 2500	1994	g/kWh	9,20	7,40	3,80	2,90	7,80 DI	6,00 DI	0,96	0,70
							6,80 IDI	5,00 IDI		
	1997		9,20	7,40	3,80	2,90	5,80	4,50	0,49	0,25
	2004			2,22		0,87		3,38		0,18

ÖZGEÇMİŞ

Evren Erdöl, 22.09.1980 yılında İstanbul’da doğdu. İlköğrenimini Levent Lütü Banat İlkokulunda tamamladı. Orta ve lise eğitimini Özel Saint Joseph Lisesi’nde gerçekleştirdi. Yüksek öğrenimini Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirdi. Halen İnform Elektronik San. ve Tic. A.Ş.’de Arge Mekanik Tasarım Mühendisi olarak görev yapmaktadır.