YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIESEL MOTORLARINDA EMME HAVASININ ULTRASONİK YÖNTEMLE NEMLENDİRİLMESİ İLE NO_x EMİSYONUNUN AZALTILMASI

Makine Müh. Özkan ÖZTÜRK

FBE Makine Mühendisliği Anabilimdalı Enerji Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Muammer ÖZKAN

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ iv

KISALTMA LİSTESİ v

ŞEKİL LİSTESİ vi

ÇİZELGE LİSTESİ ix

ÖNSÖZ x

ÖZET xi

ABSTRACT xii

1. GİRİŞ 13

2. AZOT OKSİT NEDİR? 14

2.1 Azot Oksit Kaynakları 15
2.2 Azot Oksitlerin Çevreye ve İnsan Sağlığına Etkileri 16

3. AZOT OKSİT KONTROL YÖNTEMLERİ 17

3.1 Motor Modifikasyonları 20
3.1.1 Yanma Odası Modifikasyonu 21
3.1.2 Püskürtme Gecikmesi 21
3.1.3 EGR (Eksoz Gazları Resürkülasyonu) 21
3.1.4 Yakıt Püskürtme Yöntemi 22
3.1.5 Dolgu Havasının Soğutulması 23
3.1.6 HCCI (Homojen Dolgulu Sıkıştırma ve Yanma) 24
3.2 Eksoz Kontrol Yöntemleri 24
3.2.1 NO_x Katalistleri 26
3.2.1.1 Fakir NO_x Katalistleri 26
3.2.1.2 SCR Katalistleri (Selective Catalytic Reduction) 27
3.2.1.3 Azot Oksit Emiciler 27
3.2.1.4 Plazma Destekli Katalistler 27
3.3 Yakıtlarda Yapılan Geliştirmeler 28
3.3.1 Diesel Yakıtı ve Geliştirilmesi 28
3.3.1.1 Setan Sayısı 28
3.3.1.2 Yakıt Yoğunluğu 29
3.3.1.3 Aromatlar 29
3.3.1.4 Yakıt Sülfür İçeriği 29
3.3.2 Alternatif Yakıtlar ve Diesel Yakıt ile Yapılan Karışımlar 29
3.3.2.1 Biodiesel (BD) 29
3.3.2.2 Dimetil Eter (DME) 30
3.3.2.3 Dimetoksi Metan (DMM) 30
3.3.2.4 Fisher-Tropsch Diesel (F-T) 30
3.3.2.5 Diesel-Su Emülsiyonları 31

4. DİESEL MOTORLARINDA AZOT OKSİT EMİSONLARININ AZALTILMASI AMACIYLA YANMA ODASINA SU İLAVESİ KONUSUNDAKİ ÇALIŞMALAR 32

4.1 Yakıt/Su Emülsiyon Tekniği İle Yanma Odasına Su Gönderilmesi 32
4.1.1 Sayısal Analiz 33
4.1.1.1 Yanma Olayının Sayısal Analizi ve Simülasyonu 34
4.1.1.2 Püskürtme İşleminin Sayısal Analizi ve Simülasyonu 35
4.1.1.3 Sayısal Sonuçlar 35
4.2 Emme Manifolduna Su Püskürtülmesi 44
4.3 Direk Su Enjeksiyonu 47

5. DOLGU HAVASINI ULTRASONİK NEMLENDİRİCİDEN ELDE EDİLEN BUHAR İLE NEMLENDİRME DENEYİ 51

5.1 Kullanılan Yöntem ve Materyaller 51
5.1.1 Yöntem 51
5.1.1.1 Isı Analizi 51
5.1.1.2 Emilen Hava Miktarının Belirlenmesi 53
5.1.1.3 Su Buharı (Nem) Miktarının Hesaplanması 53
5.1.2 Materyaller 57
5.1.2.1 Ultrasonik Nemlendirme Cihazı 57
5.1.2.2 Deney Düzeneği 57
5.1.2.3 Emisyon Ölçüm Cihazı 59
5.2 Deneysel Çalışma 59
5.2.1 Ölçüm Sonuçları 60

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 66

KAYNAKLAR 67

ÖZGEÇMİŞ 70

SİMGE LİSTESİ

CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
H	Hidrojen atomu
HC	Hidrokarbon
HNO_2	Nitröz asidi
HNO_3	Nitrik asit
N	Azot elementi
N_2	Azot molekülü
NO	Nitrik oksit
NO_2	Azot peroksit
N_2O	Diazotoksit
N_2O_3	Diazot trioksit
NO_x	Azot oksit
O	Oksijen elementi
O_2	Oksijen molekülü
O_3	Ozon
OH	Hidroksil
SO_4	Sülfat
λ	Hava fazlalık katsayısı
T_c	Sıkıştırma sonu sıcaklığı
T_z	Yanma sonu maksimum sıcaklığı
μ	Yanan dolgunun moleküler değişim katsayısı
ξ_z	Isıl yararlanma katsayısı
$\overline{C_v}\|_0^{T_c}$	Sıkıştırma sonundaki molar ortalama özgül ısı
$\overline{C_v}\|_0^{T_z}$	Yanma sonundaki molar ortalama özgül ısı
M_1	Taze dolgu miktarı
M_2	Yanma ürünlerinin miktarı
y_x	Yanma ürünlerindeki "x" gazının hacimsel oranı
A_x	Yanma ürünlerindeki "x" gazının lineer özgül ısı değişim katsayısı
B_x	Yanma ürünlerindeki "x" gazının lineer özgül ısı değişim katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

BD	Biodiesel
CFD	Computational Fluid Dynamics
DME	Dimetil Eter
DMM	Dimetoksi Metan
DPF	Diesel Partikül Filtresi
EBaş	Enjeksiyon başlangıcı
EBit	Enjeksiyon bitişi
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EPA	Environmental Protection Agency
ERU	Electronic Regulation Unit
F-T	Fisher-Tropsch Diesel
GEI	Generator of Electrical Impulses
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
LPG	Liquid Petrol Gas
MAK	Maksimum sınır değeri
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
P_{nr}	Silindir iç basıncı (Normal)
P_{ne}	Silindir iç basıncı (Nemli)
PM	Particulate Matter
PPB	Part Per Billion
PR	Pressure Regulator
SCR	Selective Catalytic Reduction
SFC	Specific fuel consumption
SOF	Soluble Organic Fraction
TDC	Top Dead Center
THC	Thermal Hydro Carbon
VOC	Volatile Organic Compound
VTG	Variable Turbine Geometry
WIA	Water In Air
WIF	Water In Fuel
WR	Water Injection Regulator
$YBaş_{nr}$	Yanma başlangıcı (Normal)
$YBit_{ne}$	Yanma bitişi (Nemli)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 Diesel partikül oluşumu (Diesel Passenger Vehicles and the Environment, Union of Concerned Scientists) 19

Şekil 3.2 Düşük basınçlı EGR + DPF sistemi (Emission control Technologies for diesel powered engines, Meca, December 2007) 22

Şekil 4.1 Yanma odası içerisinde, yanma bölgelerinin yerleşimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002). 34

Şekil 4.2 %0; 10; 20 su içerikli, Su ve n-Heptan emülsiyonunun yanma sonu sıcaklık profili (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002). 36

Şekil 4.3 %0; 10; 20 su içerikli, Su ve n-Heptan emülsiyon yanmasındaki NO miktarının zamanla değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 37

Şekil 4.4 %0; 10; 20 su içerikli, Su ve n-Heptan emülsiyon yanmasındaki OH miktarının zamanla değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002). 38

Şekil 4.5 %0; 10; 20 su içerikli, Su ve n-Heptan emülsiyon yanmasındaki is miktarının zamanla değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 39

Şekil 4.6 Çalışma rejimlerine göre, püskürtme işleminin ilk 0.5 milisaniyesinde püskürtülen karışım miktarının (q), krank açısına göre değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 40

Şekil 4.7 Çalışma rejimlerine göre, püskürtme sonucu oluşan damlacıkların ortalama çapının (d32), krank açısına bağlı değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 40

Şekil 4.8 Çalışma rejimlerine göre, birim krank açısında salınan ısı miktarının (Q) ve silindir içi basıncın (Pc) zamanla değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 41

Şekil 4.9 Bağıl eksoz emisyonu ve özgül yakıt tüketimi değişimi (be). Motor çalışma rejimi pe=10 bar, n=1700 rpm. (Numerical and experimental study of water /

oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 42
Şekil 4.10 Bağıl eksoz emisyonu ve özgül yakıt tüketimi değişimi (be). Motor çalışma rejimi pe=8 bar, n=1700 rpm. (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 43
Şekil 4.11 Bağıl eksoz emisyonu ve özgül yakıt tüketimi değişimi (be). Motor çalışma rejimi pe=5 bar, n=1700 rpm. (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 43
Şekil 4.12 Su Enjeksiyon Sistemi (Emme havası içerisine). (Reduction of NOx and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.). 45
Şekil 4.13 Su enjeksiyon nozulunun konumu (Reduction of NOx and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.). 46
Şekil 4.14 Su enjeksiyon sistemi (Turbo nozuluna). (Reduction of NO_x and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.). 46
Şekil 4.15 NO_x emisyonu ve ısıl yük azalım oranları (Maksimum güçte çalışma durumunda). (Reduction of NOx and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.)..... 47
Şekil 4.16 Direk su enjeksiyon yönteminde kullanılan özel enjektörün şematik resmi (Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion, Bedford F. , Rutland C. , 2000)..... 49
Şekil 5.1 Nemlendirme etkisi ile silindir içi maksimum sıcaklığın değişimi 52
Şekil 5.2 Emilen hava miktarının devir sayısı ile değişimi (T=25 ˚C, P=101.3 kPa)..... 53
Şekil 5.3 İki girişli ve bir çıkışlı, düzgün akışlı, adyabatik sistem..... 54
Şekil 5.4 Ortam şartlarında emilen havanın taşıyabileceği azami nem miktarının devir sayısına bağlı değişimi (T=25 ˚C, P=101.3 kPa) 56
Şekil 5.5 Çevrim başına emilen Nem kütlesi / Hava kütlesi [%] değişimi (T€25 P=101.3 kPa)..... 56
Şekil 5.6 Ultrasonik Nemlendirme Cihazı 57
Şekil 5.7 Deney setinin önden görünüşü..... 58
Şekil 5.8 Emme havasının nemlendirilmesinin motor karakteristiklerine etkisi 60

Şekil 5.9 Emme havasının nemlendirilmesinin motor karakteristiklerine etkisi 61
Şekil 5.10 Emme havasının nemlendirilmesinin motor karakteristiklerine etkisi 62
Şekil 5.11 Emme havasının nemlendirilmesinin emisyonlara etkisi (n=1270 d/dk; Pme=5,6 kPa)..... 63
Şekil 5.12 Emme havasının nemlendirilmesinin emisyonlara etkisi (n=1270 d/dk; Pme=5,6 kPa)..... 64
Şekil 5.13 Silindir içi basıncın krank açısı ile değişimi(n=1270 d/dk; Pme=5,6 kPa) 65
Şekil 5.14 Silindir içi salınan ısı miktarının krank açısı ile değişimi(n=1270 d/dk; Pme=5,6 kPa)..... 65

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Azot Oksitler (NO_x) (Nitrojen Oxides, Why and How They Are Controlled,EPA November 1999) 14

Çizelge 2.2 Azot Oksit Emisyon Kaynakları (Nitrojen Oxides, Why and How They Are Controlled,EPA November 1999) 16

Çizelge 3.1 NO_x ve PM emisyonları kontrol yöntemleri (Diesel Passenger Vehicles and the Environment, Union of Concerned Scientists) 18

Çizelge 3.2 Motor modifikasyonları sonucunda NOx ve PM emisyonlarının azalma potansiyeli (Diesel Passenger Vehicles and the Environment, Union of Concerned Scientists) 20

Çizelge 3.3 Eksoz kontrol yöntemleriyle NOx ve PM emisyonlarının azalım potansiyeli (Diesel Passenger Vehicles and the Environment, Union of Concerned Scientists). 25

Çizelge 4.1 İlave edilen su miktarına bağlı olarak, is ve NO değişim miktarları (% olarak) (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 39

Çizelge 4.2 İlave edilen su miktarına bağlı olarak ortalama kirletici emisyon değişim miktarları (% olarak) (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002) 43

Çizelge 4.3 İlave edilen su miktarına bağlı olarak NO ve İs değişimi (WIA) (Reduction of NO_x and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.) 47

Çizelge 5.1 Diesel motorunun teknik özellikleri 58

Çizelge 5.2 AVL DiCom4000 Teknik özellikleri 59

Çizelge 5.3 Emme havasının nemlendirilmesinin motor karakteristiklerine etkisi 62

Çizelge 5.4 Emme havasının nemlendirilmesinin emisyonlara etkisi (% olarak) 63

Çizelge 5.5 Emme havasının nemlendirilmesinin emisyonlara etkisi (% olarak) 64

ÖNSÖZ

Diesel motorlarında emme havasının nemlendirilmesiyle NO_x emisyonunun azaltılması konulu tez çalışmam esnasında benden bilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli tez danışmanım Otomotiv Anabilim dalı öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Muammer ÖZKAN'a, Otomotiv Anabilim dalı öğretim üyesi sayın Arş. Gör. Levent YÜKSEK'e, Otomotiv Anabilim dalı teknisyenlerine ve ayrıca Delta Makine Ltd. Şti. çalışanlarına teşekkürlerimi bir borç bilirim.

ÖZET

Bu çalışmanın amacı günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan ve alternatif enerji kaynaklarına göre düşük güç/ağırlık oranı, kolay işletimi, basit bakım-onarımı, uzun ömrü ile önemli bir avantaja sahip olan küçük diesel motorların egzoz emisyonlarının azaltılması amacıyla yeterince ucuz ancak etkili bir emisyon sisteminin geliştirilebilmesi için gerekli ön çalışmanın yapılmasıdır. Yüksek güçlü motorlarda başarıyla uygulanmakta olan EGR, katalitik konverterler gibi gelişmiş emisyon iyileştirme sistemleri, yüksek maliyetleri ve karmaşık kontrol sistemi gerektirmeleri nedeniyle küçük diesel motorlarında uygulanamamaktadır. Küçük diesel motorlarında emisyonların azaltılması için genellikle püskürtme basıncının artırılması, püskürtme avansının azaltılması, sıkıştırma oranının yükseltilmesi gibi tasarıma dayalı konstrüktif çözümler ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte ticari rekabet nedeniyle küçük işletme ölçeğinde olan imalatçıların üretim maliyetlerinin mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılması ayrı bir sınırlayıcı etkendir.

Çalışmada emme havası sınır şartlarına kadar, ultrasonik bir cihazdan elde edilen soğuk buharla nemlendirilen bir Diesel motorun NO_x emisyonunun değişimi gözlenmiş ve emme havasında nemin artmasıyla NO_x emisyonunda %40 azalma olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Diesel motorları, NO_x emisyonu, nemlendirme, ultrasonik nemlendirme

ABSTRACT

This research work is to make a required pre-study for developing efficient but cheaper emission improving system which will be used in small diesel engines that are widely used and has advantages of having small power / mass ratio, easy operation, simple maintenance and long life when compared to alternative energy sources. Systems like EGR that can successfully applied to high powered engines and advanced emission improvement systems like catalytic converter can not be applied to diesel engines because of their complex control systems and high costs. For reducing the emissions in small diesel engines generally constructive solutions like increasing injection pressure, reducing fuel injection timing, increasing compression ratio comes to foreground. Nevertheless efforts of small enterprises keeping costs minimum because of trade rivalry is another limiting factor.

In this study emission changes in diesel engines that has ultrasonically humidified intake air till limit conditions has been observed and % 40 decreases in NO_x emission has been seen.

Keywords: Diesel engines, NO_x emissions, humidity, ultrasonic humidifier

1. GİRİŞ

Dünyadaki enerji ihtiyacının yaklaşık %30'u hidrolik ve nükleer santrallerden karşılanırken; %70'i fosil yakıtların (kömür, petrol, gaz) veya bunların sentetik türevlerinin yakılması sonucu elde edilmektedir. (Ergeneman ve Ark, 1998). **[1]**

Şehirlerdeki kirliliğin büyük bölümü taşıtlardan kaynaklanmakta olup, bu kirleticilerin özellikleri ve yoğunlukları motor tipine, motor ayarına, kullanım tarzına, kullanılan yakıtın bileşimine ve atmosferik şartlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. (Çakıroğlu, 1996).**[1]**

Motorlu taşıtlardan çevreye; egzoz emisyonu, yakıt buharı, yağ buharı, kurşun bileşikleri, asbest ve lastik tozları, aşınma ve paslanma sonucu oluşan gazlar, sıvı ve katı atıklar gibi kirleticiler yayılmaktadır. Bu kirleticilerin en etkin ve yoğun olanları egzoz gazında bulunan CO, HC, NO_x ve PM (is, duman vb.) emisyonlarıdır. Bunlardan NOx (azot oksitler) ve PM (partikül) emisyonları daha çok diesel motorlardan kaynaklanan kirleticilerdir.(Işıksoluğu, 1997). **[1]**

Diesel motorları; geniş kullanım alanına sahip ağır yük taşıtları (kamyonlar), otobüsler, stasyonel ekipmanlar ve binek araçları için önemli oranda yakıt ekonomisi ve uzun kullanım süresi sağlamaktadır. Güç santrallerinin de vazgeçilmez tercihi diesel motorlardır. Birçok avantaja sahip olmalarına karşın yüksek oranda partikül ve azot emisyonlarına neden olmaktadırlar. Ayrıca bu emisyonlara kıyasla daha az oranda CO ve HC emisyonlarına ve toksik hava kirleticilerine de neden olmaktadırlar. **[2]**

Diesel motorlardan salınan partiküller küçük boyutlarda olup genellikle çapları 2.5 mikronun altındadır. Partiküller karbon çekirdeğe sahip karmaşık oluşumlardır. Motor yağında ve yakıtında bulunan hidrokarbonların, kükürt ve suyun ve motor aşınmaları sonucu ortaya çıkan diğer inorganik maddelerin bu karbon çekirdek tarafından adsorbe edilmesi sonucu partiküller meydana gelmektedir. Oldukça küçük boyuta sahip olmaları ve bileşimlerinden dolayı sağlık endişelerini artırmaktadırlar. Sağlık uzmanları, partiküllerin astım, bronşit ve emfezama gibi kronik akciğer hastalıklarını artırmasından endişe etmektedirler. Ayrıca partiküllere maruz kalan kişilerde kanser riskinin arttığına dair elde edilen deliller de sürekli artmaktadır. **[2]**

Diesel motorlarından salınan azot oksit (NO_x) emisyonları da sağlığı olumsuz yönde etkilemektedir. Atmosfere salınan azot oksit, güneş ışığı altında, uçucu organik bileşiklerle (VOC) reaksiyona girerek ozon (O_3) meydana getirmektedirler. Ozon aktif ve korozif bir gaz olmakla birlikte birçok solunum yolu problemine neden olmakta ve bunları artırmaktadır. Özellikle çocuklara ve yaşlılara daha çok zarar vermektedir. Burada bahsedilen ozon atmosferin en üst tabakasında bulunan, soluyamadığımız, stratosferik ozon (stratosferik ozon

güneşten gelen ışınların traposferi iyonlaştırmasını engellemekte ve dünyayı korumaktadır) olmayıp, soluduğumuz açık havada bulunan traposferik ozondur. **[2]**

2. AZOT OKSİT NEDİR?

Soluduğumuz havanın yaklaşık % 78 'ini oluşturan N_2 oldukça inert bir gaz iken azot elementi (N) aktiftir ve +1 den +5' e kadar valans durumu olarak da bilinen iyonlaşma seviyesine sahiptir. Bu nedenle azot, değişik formlarda oksitler meydana getirebilmektedir. Azot oksit ailesi aşağıdaki tabloda listelenmiştir. **[3]**

Çizelge 2.1 Azot Oksitler (NO_x) (Nitrojen Oxides, Why and How They Are Controlled,EPA November 1999)

Formül	**İsim**	**Azot Valans Değeri**	**Özellikler**
N_2O	Diazot monoksit	1	Renksiz, gaz, suda çözünebilir
NO	Azot oksit	2	Renksiz, gaz
N_2O_2	Diazot dioksit		Suda düşük oranda çözünebilir
N_2O_3	Diazot trioksit	3	Katı, siyah, suda çözünebilir
NO_2	Azot Dioksit	4	Gaz, kırmızı-kahverengi renkli,
N_2O_4	Diazot tetroksit		Suda çözünebilir
N_2O_5	Diazot pentoksit	5	Katı, beyaz rekli, suda iyi çözünebilir

Oksijen iyonları -2 valans değerine sahiptir. Azot oksitlerin (NO_x), atmosferde reaksiyonları sonucunda ozon derişimi artıp-azalabilir ve bu durum oksijen iyonlarının sayısına bağlıdır. Bu oksitler içindeki azot iyonlarının bağladıkları oksijen iyonlarının sayısı, iyonlaşma enerjisi seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. Azot iyonizasyon seviyesini değiştirdiği zaman, bağlamış olduğu oksijen miktarını da değiştirmektedir. **[3]**

Azot oksitlerden herhangi birisi su içerisinde çözünüp parçalandığı zaman, nitrik asit (HNO_3) ya da nitröz asidi (HNO_2) meydana gelmektedir. Nitrik asit nötürleştiği zaman nitrat tuzları meydana getirirken; nitröz asidi ise nitrit tuzlarını oluşturmaktadır. Sonuç olarak azot oksit ve türevleri hava içerisinde gaz olarak, su damlalarında asit olarak ya da tuz olarak bulunmakta ve reaksiyona katılmaktadır. Asit gazları ve tuzlar asit yağmurlarına neden olmaktadır. **[3]**

N_2O, NO ve NO_2 havadaki en kirletici azot oksitlerdir. N_2O yarı-aktif ve aneljezik bir gazdır (Uyuşturucu bir gazın aksine acı hissedilebilir ancak, iyi hissettirdiği için dikkate alınmaz ve umursanmaz) ve biyolojik kaynaklar (bitkiler, mayalanma... vs.) sonucu üretilmektedir. N_2O ayrıca CO_2 gibi sera etkisine neden olan bir gazdır ve dünyadan yansıyan uzun dalga boylu kızıl ötesi ışınları absorbe ederek küresel ısınmaya neden olmaktadır. N_2O'nun O_3 ile oksitlenmesi herhangi bir sıcaklıkta meydana gelebilir ve ürün olarak O_2 ile birlikte NO ya da N_2O_2 meydana gelmektedir. Sonrasında ise NO ya da N_2O_2 kısa bir süre içerisinde (yaklaşık iki saat) NO_2 ye oksitlenmektedir. NO_2 ise güneş ışınlarının etkisiyle ozon molekülleri meydana getirmektedir. **[3]**

Yanma sonucu meydana gelen NO_x (Termal NOx) emisyonları birincil olarak NO formunda oluşmaktadır. Genelde stokiyometrik orana yakın hava-yakıt karışımlarında yanma sırasında NO oluşur. NO oluşumunu artıran parametreler gaz sıcaklığı ve oksijen konsantrasyonudur. İçten yanmalı motorlarda yanma odasındaki sıcaklık 1800 ˚K'nin üzerine çıktığında, havanın içerisindeki azot ve oksijen kimyasal olarak birleşerek, azot oksit denilen, insan sağlığına ve çevreye zararlı bir gaz haline dönüşür. Stokiyometrik karışımın bir miktar fakir tarafında (λ =1–1,1) NO oluşumu maksimum iken, karışım zenginleşip fakirleştikçe NO miktarı da azalmaktadır (Heywood 1988). **[1]**

Yanma olaylarında oluşan NO için Zeldowich mekanizmasına göre $O_2 \leftrightarrow 2O$ durumu sağlanınca zincir teşkil eden serbest radikallerde NO doğmaktadır.

$$O+N_2 \leftrightarrow NO+N \qquad (2.1)$$

$$O_2+N \leftrightarrow NO+O \qquad (2.2)$$

Bu arada alevin son yanma bölgesinde, NO teşekkülü başlamadan önce esas yanma reaksiyonlarının dengeye ulaştığı kabul edilebilir. Yukarıdaki mekanizma hava fazlalık katsayısının 0,8 değerinden büyük olduğu durumlarda geçerlidir. Hava fazlalık katsayısının 0,8 den küçük olduğu durumlarda ise ilave olarak

$$N+OH \leftrightarrow NO+H \qquad (2.3)$$

reaksiyonu önem kazanmaktadır (Borat ve Ark ,1994). **[1]**

2.1 Azot Oksit Kaynakları

Azot oksit emisyonlarının %50'si otomobiller ve mobil kaynaklardan, %20'si elektrik üretim santrallerinden ve %30'u diğer kaynaklardan çevreye salınmaktadır. Ek olarak emisyonların çoğunluğu endüstriyel kazanlardan, yangınlardan, gaz türbinlerinden, dizel ve kıvılcım

ateşlemeli motorlardan, demir-çelik fabrikalarından, çimento üretim tesislerinden, cam üretiminden, petrol rafinerilerinden ve nitrik asit üretim tesislerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca orman ve çim yangınları, ağaçlar, çalılar, çimenler ve mayalar gibi biyojenik ve doğal kaynaklardan da emisyonlar meydana gelmektedir. Bu çok çeşitli kaynaklar değişik miktarlarda azot oksit üretmektedir ve bu kaynaklardan salınan NO_x emisyon oranları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. **[3]**

Çizelge 2.2 Azot Oksit Emisyon Kaynakları (Nitrojen Oxides, Why and How They Are Controlled,EPA November 1999)

Mobil Kaynaklar	**Elektrik Üretim Santralleri**	**Diğerleri**
%50	%20	%30

Bu tablo, en büyük iki azot oksit kaynağını açıkça göstermektedir ve azot oksit emisyonlarının yarısı taşıtlardan kaynaklanmaktadır. Bütün yanma türlerinde NO_x oluşumu için üç seçenek bulunmaktadır:

1. Termal NO_x: Termal NO_x derişimi; yanma sıcaklığı, azot ve oksijenin molar derişimleri ile kontrol edilmektedir. 1300 ˚C'nin altındaki yanma sıcaklıklarında üretilen azot oksit derişim miktarı oldukça düşüktür. **[3]**

2. Fuel NO_x: Azot içeren yakıtlar (kömür gibi) "Fuel NOx" üretmekte, bu NO_x ise zaten yakıt içinde iyonlaşmış olarak bulunan azotun oksidasyonu sonucu ortaya çıkmaktadır. **[3]**

3. Prompt NO_x: Yakıtça zengin karışımlarda, hava içerisindeki azot moleküllerinin yakıtla birleşmesi sonucu "Prompt NOx" meydana gelmektedir. Bu azot daha sonra yakıt içerisinde oksitlenir ve yanma sonucunda NO_x oluşur, tıpkı Fuel NO_x gibi. Bu üretilen NO_x miktarı ise yakıtın azot içeriğine ve karışımın şekline göre değişmektedir. **[3]**

2.2 Azot Oksitlerin Çevreye ve İnsan Sağlığına Etkileri

Azot oksitler, hemen hemen bütün ışık dalga boylarında saydam-geçirgen bir yapıya sahip oldukları için (buna rağmen NO_2 kahverengimsi bir renge ve N_2O_3 siyah renge sahiptir), oldukça geniş oranda fotonun geçişine izin vermekte ve bu nedenle doğada en azından birkaç gün kalabilmektedir. NO, uçucu organik bileşiklerle yaptığı (VOC) foto reaksiyonlar sonucunda, NO_2'ye dönüşmekte ve NO_2 de güneş ışınları etkisi ile daha fazla miktarda ozon

açığa çıkarmaktadır. NO_2 daha uzun ömre sahiptir ve ozon oluşturmak için reaksiyona girmeden önce çok uzun mesafelere kadar taşınabilmektedir. Dünyayı çevreleyen hava sistemlerindeki rüzgârlar aracılığıyla taşınma olayı (birkaç 100 mil mesafeye kadar) gerçekleşmektedir. Ozon aktif ve korozif bir gaz olmakla birlikte birçok solunum yolu problemine neden olmakta ve bunları artırmaktadır. **[3]**

Azot oksitler kandaki hemoglobin ile birleşmektedir. Ciğerdeki nem ile birleşerek nitrik asit oluştururlar ve oluşan asit konsantrasyonunun azlığı nedeni ile etkisi de az olmaktadır ancak zamanla birikerek solunum yolu hastalıkları bulunan kişiler için tehlike oluşturmaktadırlar. (Ergeneman ve Ark, 1998). **[1]**

Azot oksitler icinde NO, kokusuz bir gazdır. Akciğerlerin çalışmasını bozmakta, mukoza zarını tahriş etmekte ve felç yapıcı etkisi bulunmaktadır. Nitrik asit oluşumuna sebep olmaktadır. Cevre şartlarında kararsızdır ve oksijenle birleşerek NO_2'ye dönüşür. MAK değeri 9 mg/m^3'tür. (Ergeneman ve Ark, 1998). **[1]**

NO_2, keskin kokulu kırmızı-kahverengi karışımı bir gazdır. Düşük yoğunlukta olması halinde bile akciğeri tahriş ederek, dokulara ve mukoza zarına zarar vermektedir. MAK değeri 9 mg/m^3'tür (Schafer, 1995). (Ergeneman ve Ark, 1998). **[1]**

3. AZOT OKSİT KONTROL YÖNTEMLERİ

Son yirmi yılda diesel taşıtlardan kaynaklanan azot oksit ve partikül emisyonları % 80–90 oranlarında azaltılmıştır. Bu emisyonları azaltma başarısına; EGR, püskürtme avansı ayarı, yüksek püskürtme basınçları gibi modifikasyonların motorlara uygulanması sonucu ulaşılmıştır (Dickey et al. 1998). Diesel oksidasyon katalistleri ise günümüze kadar diesel binek taşıtlarına uygulanan tek egzoz kontrol araçlarıdır. Azot emisyonlarını azaltmak amacıyla yapılan çalışmalar motorda yapılan modifikasyonlar, egzoz kontrol teknolojileri ve yakıt formüllerinde yapılan geliştirmeler şeklinde yürütülmektedir. Bu çalışmalar tabloda gösterilmiştir. **[4]**

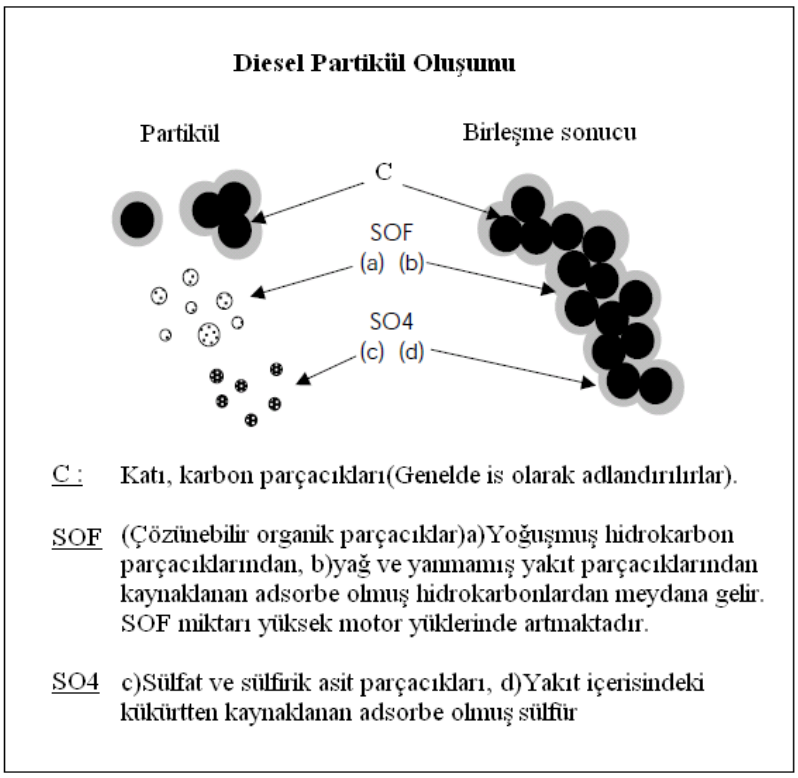
Çizelge 3.1 NO_x ve PM emisyonları kontrol yöntemleri (Diesel Passenger Vehicles and the Environment, Union of Concerned Scientists)

NO_x	**PM**
1.MOTOR MODİFİKASYONLARI	
• Yakıt enjeksiyon sistemleri Yüksek basınçlı Değişken enjeksiyon oranlı Pilot & Post enjeksiyonlar Enjeksiyon zamanlaması • Egzoz Gazı Resürkülasyonu Soğutmalı Anlık tepkili Yüksek seviyeli • Yanma odası 4-Supaplı silindirler Girdaplı Yuvarlak şekilli • Dolgu havasının soğutulması • HCCI	• Yakıt enjeksiyon sistemleri Yüksek basınçlı Aşırı püskürtme oranlı • Dolgu havasının artırılması Turbo-charge • HCCI
2.EKSOZ KONTROL YÖNTEMLERİ	
• Fakir NOx Katalistleri • SCR (Selective Catalytic Reduction) • NO_x emiciler • Plazma destekli katalistler	• Diesel oksidasyon katalistleri • Partikül kapanları Pasif rejenerasyon —Yakıt katkılı —Katalistli Aktif rejenerasyon —Elektrikli yakıcılar —Mikrodalgalı rejenerasyon —Eksoz gazı kısma
3.YAKIT TEKNOLOJİLERİ	
• Diesel yakıt değişiklikleri Kükürt içeriğinin azaltılması Setan sayısının artırılması Aromatların azaltılması • Diesel yakıt katkıları Su emülsiyonları Surfactants/cosurfactants • Fischer-Tropsch diesel • Dimetil Eter (DME)	• Diesel yakıt değişiklikleri Kükürt içeriğinin azaltılması • Diesel yakıt katkıları Seryum, sodyum, bakır, demir, diğer metaller • Biyodizel ve biyodizel karışımları • Dimetil Eter (DME) • Dimetoksi Metan (DMM) • Fischer-Tropsch diesel

Azot oksitler, yanma süresince ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar altında, hava içerisindeki azot ile oksijenin tepkimeye girmesi sonucu oluşmaktadır. Diesel motorlar, benzin motorlarına göre daha yüksek sıkıştırma oranına sahip oldukları için daha fazla azot oksit ve PM emisyonlarına neden olmaktadır. **[4]**

Yüksek sıkıştırma oranları pik sıcaklık olarak adlandırılan daha yüksek yanma sıcaklıklarına ve direk olarak diesel motorlardan daha fazla NO_x salınmasına neden olmaktadır. Azot oksit emisyonlarının kontrol yöntemleri, genel olarak silindir içi pik sıcaklıkları düşürmeyi amaçlamakta ve bu durum yakıt tüketimini de artırabilmektedir. **[4]**

Diesel partikülleri, katı ve sıvı parçacıkların karışımı sonucu ortaya çıkan kompleks bir oluşumdur. Silindir içinde yakıt ile havanın havaca fakir karışım oluşturması, karbonsu is parçacıklarının yer aldığı yakıt ceplerinin oluşmasına neden olmaktadır. Yanmamış yakıt (SOF) partikülleri ve sülfatlar (SO_4) is parçacıklarının üzerinde yoğuşurlar ve bu da partikül kütlesini artırmaktadır. Adsorbe olmuş hidrokarbonlar ve sülfatlar yapıştırıcı olarak da etki ederler, diğer parçacıkların is üzerine yapışması sonucunda, partikül kütlesinde artış meydana gelmektedir. **[4]**



Şekil 3.1 Diesel partikül oluşumu (Diesel Passenger Vehicles and the Environment, Union of Concerned Scientists)

3.1 Motor Modifikasyonları

Azot oksit emisyonlarını azaltmayı amaçlayan motor modifikasyonları, yanma işlemini değiştirmekle alakalıdır. Ancak yapılan bu değişiklikler genellikle PM emisyonlarını artırmaktadır. Örneğin silindir içi yanma sonu maksimum sıcaklığını düşürmek, NO_x miktarını azaltmaktadır ancak isin oksitlenmesinin tamamlanmasını engellemekte ve böylece PM miktarını artırmaktadır. Motor parametrelerini değiştirmek, ayrıca özel uygulamalar için NO_x, PM ve yakıt ekonomisi optimizasyonunu gerekli kılacak ve yakıt ekonomisini etkileyecektir. Çizelge 3.2, motor modifikasyonları sonucu elde edilen emisyon azalım miktarlarını göstermektedir. **[4]**

Çizelge 3.2 Motor modifikasyonları sonucunda NOx ve PM emisyonlarının azalma potansiyeli (Diesel Passenger Vehicles and the Environment, Union of Concerned Scientists).

Teknoloji	**Azalma potansiyeli[a]**		**Notlar**
	NO_x	**PM**	
Yanma odası tasarımındaki değişiklikler	%10	%10	
Artırılmış EGR	%5-15	Artış	Dengesiz yanma, motor aşınması, yakıt tüketimi
EGR (Fazla hava kullanımı ile birlikte)	%5-15	%15-25[b]	
Yakıt enjeksiyon sistemleri	%-5 ile %0	%20	Pahalılık, karmaşıklık
Dolgu havasının soğutulması	% 0-5	?	Pahalılık
Motor modifikasyonlarının tamamı	%10-25	%40-50	NOx-PM optimizasyon güçlüğü
HCCI	%65-70	%60-95	Değişken yük ve hızlarda çalışma zorluğu

a. Günümüzün en yüksek teknolojisine göre elde edilebilecek değerlerdir. Negatif değerler emisyonlarda artış meydana geldiğini göstermektedir.
b. PM emisyonları EGR ile artmaktadır ancak hava kullanımıyla çabuk tepki elde edilen EGR sistemlerinde PM emisyonlarının azaltılması mümkündür.

3.1.1 Yanma Odası Modifikasyonu

Yanma odası içerisine püskürtülen yakıt ve havanın homojen olarak karışmasını sağlamak her iki azot oksit ve PM emisyonunu düşürecektir ancak henüz küçük kamyonlarda ve otomobillerde kullanılmakta olan küçük-yüksek hızlı motorlarda gerçekleşmesi güçtür. Silindir içi modifikasyonlar, yakıtın püskürtülmekte olduğu piston kafalarında yer alan şekilleri uygun biçimde tasarlayarak homojen karışım sağlamaya çalışmaktadır. Silindir başına 2 supap yerine 4 supap kullanmak, silindir kafa geometrilerini değiştirmek, motorun çalışma koşullarına göre püskürtülen yakıtı ve hava hareketlerini optimize etmek gibi uygulamalar NO_x-PM emisyonlarını azaltmaktadır (Krieger et al.1998; Sawyer and Johnson 1995). **[4]**

3.1.2 Püskürtme Gecikmesi

Yakıt püskürtme başlangıcının geciktirilmesi püskürtme gecikmesi olarak bilinmektedir. Bu uygulama pik gaz sıcaklıklarını düşüreceği için NO_x emisyonunu önemli oranda azaltmaktadır ve halen otomobillerde NO_x emisyonlarını azaltmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Buna rağmen püskürtme gecikmesi PM emisyonlarında ve yakıt ekonomisinde olumsuz etkiye sahiptir. **[4]**

3.1.3 EGR (Eksoz Gazları Resürkülasyonu)

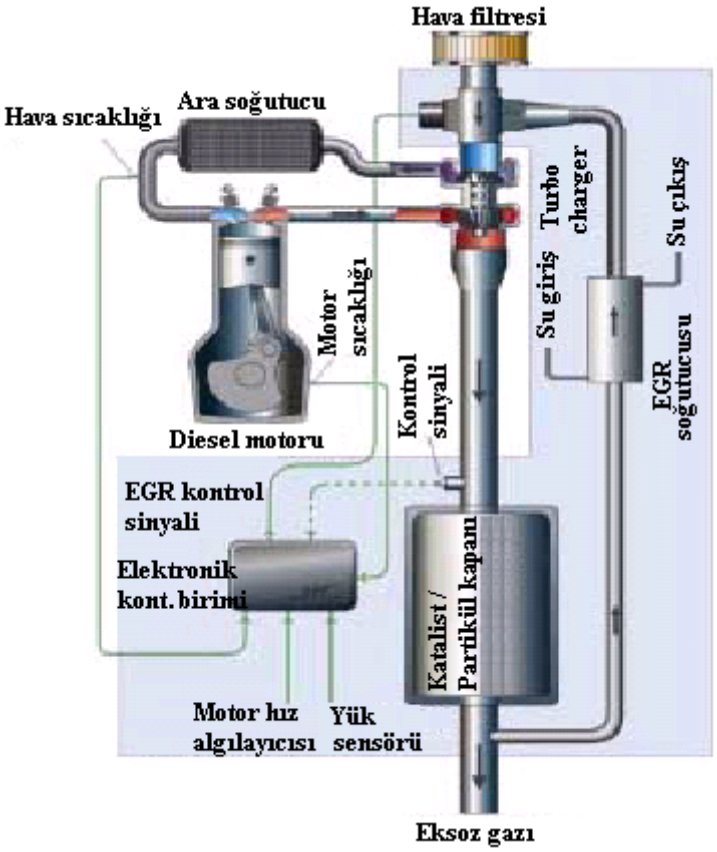
İsminden de anlaşılacağı üzere, EGR motor eksoz gazlarının bir kısmını dolgu havası içerisine göndermeyi amaçlamaktadır. Birçok sistemde ara soğutucular vasıtasıyla resirküle edilmiş eksoz gazlarının sıcaklığı düşürülmektedir. Soğutulmuş, havadan daha az oksijene ve daha çok ısıl kapasiteye sahip olan eksoz gazlarının emme manifolduna gönderilmesiyle, silindir içi yanma sıcaklığı düşürülmekte ve bu durum ise NO_x olşumunu azaltmaktadır. İki tip EGR bulunmaktadır: **[2]**

Yüksek Basınçlı EGR: Eksoz gazları ilk olarak turbo şarj sistemine gönderilmekte ve daha sonra emme manifolduna yönlendirilmektedir. **[2]**

Düşük Basınçlı EGR: Turbo şarj sisteminden çıkan eksoz gazları ilk olarak partikül filtrelerine, daha sonra ara soğutucuya ve son olarak buradan çıkan gazlar emme manifolduna gönderilmektedir. Yüksek orandaki partiküller turbo şarj sistemi ve motor içinde aşınmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle düşük basınçlı EGR sistemlerinde genellikle diesel partikül filtreleri kullanılmaktadır. **[2]**

Bazı durumlarda motor üreticileri PM emisyon seviyelerini düşürmek amacıyla yüksek basınçlı EGR sistemiyle birlikte katalistler kullanmaktadır. EGR sistemleri tipik olarak yanma

gazlarının %25–40 arasındaki miktarını resirküle etmekte ve NO_x emisyonlarında %40'tan fazla düşüş sağlanmaktadır. Düşük basınçlı bir EGR+DPF (Diesel Partikül Filtresi) şeması resimde görülmektedir. **[2]**



Şekil 3.2 Düşük basınçlı EGR + DPF sistemi (Emission control Technologies for diesel powered engines, Meca, December 2007)

Daha fazla oranda NO_x azalımı ve aynı zamanda daha az yakıt tüketimi sağlamak amacıyla motor üreticileri kombine hava emiş teknolojileri geliştirmişlerdir. Hem motor verimini ve hem de NO_x seviyesindeki düşüşü artırmak amacıyla değişken türbin geometrili turbo-şarj (VTG) sistemi ile düşük basınçlı EGR sistemi birleştirilmiştir. Düşük motor hız ve yüklerinde, düşük basınçlı EGR sistemi türbine enerji akışı sağlamakta iken yüksek hızlarda yüksek basınçlı EGR sistemi, kayıpları en aza indirmek amacıyla, optimum türbin geometrisiyle akış ihtiyacını karşılamaktadır. Düşük ve yüksek basınçlı EGR sistemi ile VTG'nin bir arada kullanılması bütün çalışma koşullarında daha iyi bir dolgu sıcaklığı kontrolü sağlayacaktır. **[2]**

3.1.4 Yakıt Püskürtme Yöntemi

Gelişmiş yakıt püskürtme sistemlerinin iyileştirilmesi diesel motorları için büyük bir gelişmedir. Yeni sistemler uzun süreli kullanım, bakım maliyeti gibi isteklere cevap vererek

yüksek püskürtme basınçlarını (geleneksel pompa sistemlerindeki püskürtme basınçları 900 bar iken, yeni sistemler 1500–2000 bar) ve esnek püskürtme oranlarını sağlamaktadır. **[4]**

Yüksek püskürtme basıncına sahip sistemler ile püskürtülen yakıtlar, daha küçük boyutlarda, atomize şekilde püskürtüldüğü için, silindir içerisinde daha homojen bir karışım meydana gelmesini sağlamakta ve partikül emisyonları azaltılmaktadır. Geleneksel püskürtme sistemlerinde direk motordan güç alan pompalar kullanılarak her püskürtme işlemi için yeni bir basınç sağlanmakta ve böylece püskürtme için uygulanacak basınç motor hızına göre sınırlı kalmakta ve değişiklik göstermektedir. Bu tür sistemler büyük oranda emisyon azalımı elde etmek adına bütün çalışma koşullarına uygun püskürtme basıncını sağlayamamaktadır. **[4]**

Püskürtme oranı ayarlamasıyla, püskürtme süresi boyunca yakıt akış oranı değiştirilmekte, püskürtme zamanı verimli bir şekilde ayarlanarak daha düşük emisyonlara ulaşılmaktadır. Bunun bir örneği pilot enjeksiyon uygulamasıdır. İlk olarak yakıtın çok küçük bir miktarı püskürtülmekte, sonrasında ise daha küçük ve daha gecikmiş ana püskürtme gerçekleşmekte ve NO_x emisyonu azaltılmaktadır. Gecikmiş (post) enjeksiyon uygulaması ise püskürtme oran ayarının diğer bir örneğidir. Yakıtın küçük bir miktarı daha geç, genişleme stroğunda püskürtülmektedir. Bu uygulama eksoz akışına hidrokarbon sağlamakta ve eksoz emisyonu kontrol yöntemlerinin daha verimli çalışabilmesine imkân vermektedir. **[4]**

İleri püskürtme teknolojisinin önde gelen uygulamalarından bir tanesi de, çok silindirli motorlar için Common-Rail sistemidir. Bu sistem, içinde sürekli olarak enjektörlere gönderilmek üzere basınçlı yakıtın bulunduğu ve rail olarak adlandırılan depo hatlara sahiptir. Motorun hızından ve yükünden bağımsız olarak, her anda enjektörlere basınçlı yakıt gönderilebilmektedir. Buna rağmen yüksek basınçlar kaza ile ortaya çıkabilecek yakıt sızıntı riskini artırmaktadır. Ayrıca hassas imalat gerektirdiği için pahalıdır ve hemen hemen motor ücretinin % 30–40 ‘ına varan maliyettedir (Ashley, 1997). **[4]**

3.1.5 Dolgu Havasının Soğutulması

Turbo şarj sistemi direkt püskürtmeli diesel motorlarda çıkış gücünü artırmak amacıyla kullanılmaktadır ancak dolgu havasının sıcaklığını yükseltmektedir. Silindir içi sıcaklığın sıkıştırma işleminden önce daha yüksek olması NO_x emisyonlarını artırmaktadır. Bu durum turbo şarj için kullanılan havayı soğutarak (ara soğutma) önlenebilir ancak yakıt ekonomisini ve PM’yi olumsuz yönde etkilemektedir (Dickey et al. 1998) **[4]**

3.1.6 HCCI (Homojen Dolgulu Sıkıştırma ve Yanma)

HCCI temel olarak yanma işleminin ideal bir şekilde gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Yakıt silindirin hemen dışında, ısıtılmış dolgu havasının içine püskürtülmekte (Port Fuel Injection), bu sayede yakıt ile havanın daha homojen karışması sağlanmaktadır. Karışımın daha iyi karışmasını sağlamak, silindir içindeki yakıtça zengin bölgelerin ve böylece partiküllerin oluşumunu azaltmaktadır. Sıkıştırma işlemi sırasında tek bir alev yerine çoklu ateşlemelerle daha düşük silindir içi sıcaklıklar meydana getirilmekte ve böylece NO_x emisyonları düşürülmektedir (Dickey et al. 1998). **[4]**

NO_x ve PM emisyonlarının azaltılmasında HCCI yöntemi oldukça büyük öneme sahiptir. Buna rağmen HCCI; yanma başlangıcının kontrolü, motor vuruntusunun engellenmesi ve bütün motor hız-yüklerinde çalışma zorluğu gibi teknik konularla karşı karşıya kalmaktadır. Bunun da ötesinde HCCI motorlarında vuruntuyu engellemek amacıyla motorun daha düşük sıkıştırma oranlarına sahip olması gerekmekte ve bu durum yakıt ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir (Dickey et al. 1998). **[4]**

Nissan araştırmacıları HCCI teknolojisini Nissan'ın yeni 4 supap/silindirli direk püskürtmeli diesel motoruna başarıyla uygulamışlar ve common rail püskürtme sistemi kullanmışlardır. Motor yüksek yüklerde HCCI modunda çalışamaz gibi gözükse de (bu durumda yüksek yüklerde NO_x ve PM emisyonları azaltımı sağlanamayacaktır), araştırmacılar daha yüksek yük durumlarında HCCI yanma bölgesinin genişletilmesiyle alakalı umut verici yöntemler vaat etmektedir. Düşük yükte çalışma durumlarında, yakıt tüketiminde artış meydana gelmeden, NO_x ve PM emisyonlarında anlık azalışlar gözlemlenmiştir (Kimura et al. 1998). Nissan, Japon test çevrimlerine göre motoru başarı ile test etmiştir ancak US test çevrimlerinin Japon test çevrimlerinden daha ağır koşullar içerdiği de unutulmamalıdır. **[4]**

3.2 Eksoz Kontrol Yöntemleri

Motor modifikasyonları tek başına NO_x ve PM emisyonlarını istenen düzeye getirebilmek için yeterli değildir, eksoz gazlarından NO_x ve/veya PM emisyonlarının atılmasına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu teknolojilerden bazıları otomobillerde ve ağır yük taşıtlarındaki (kamyon) birinci ve ikinci nesil sistemlerde hala kullanılmaktadır. Bazıları ise hala araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Çizelge 3.3 bu çalışmaları listelemektedir. **[4]**

Çizelge 3.3 Eksoz kontrol yöntemleriyle NOx ve PM emisyonlarının azalım potansiyeli (Diesel Passenger Vehicles and the Environment, Union of Concerned Scientists).

Teknoloji	**Azalma Potansiyeli (%)[a]**		**Durum[b]**	**Yakıt kükürtü[c]**	**MPG[d] (%)**	**Notlar**
	NO_x	PM				
Lean NO_x Katalistleri	10-35		Tic.	Gel.	0-5	Sürüş çevrimleri üzerinde etkilidir
	20-50		Demo	Gel.	4-9	HC ilavelerinde yüksek ve sürekli verimlilik sağlamaktadır.(Yüksek verim elde etmek için HC ilavesine gerek duyulmaktadır).
NO_x Emiciler	50-95		Demo	Ger.	2-3	Düzgün ve dengeli azalımlar
	52		Demo	Ger.	2-3	Düzgün-dengeli sonuçlar kullanılarak test çevrimleri simülasyonu yapılmıştır. Uzun ömürlü değildir ve HC ilavesi gerektirmektedir.
SCR Katalistleri	40-45		Comm	Tol.	2-3	Üre depolama altyapısı mevcut değildir, amonyak sızıntı tehlikesi mevcuttur.
	70-90		Demo	Tol.	4-6	
Plazma Destekli Katalistler	35-70		Demo	Tol.	2-5	Araştırma ve geliştirme aşamasının başlangıcındadır.
Gelişmiş Diesel Oksidasyon Katalistleri		20-40	Comm	Gel.		Ultrafin emisyonlarında muhtemel artış, fakat PAH emisyonlarının azaltılmasıyla dengelenebilir.
Partikül Kapanları		70-95	Demo	Gel. / Ger.	1-5	Dioxin emisyonlarında muhtemel artış söz konusudur.

a.Günümüzün en iyi teknolojisi ile sağlanabilen azalımlar.

b.Durum: Tic.=Şuanda ya da yakın zamanda ticari olarak mevcut; Demo=Laboratuarlarda ideal koşullar altında gösterilmektedir.

c.Kükürt: Tol.=Kükürtlü yakıt kullanılabilir; Gel.=Düşük kükürtlü yakıtla gelişmektedir; Ger.=Düşük kükürtlü yakıt gerektirmektedir. (<50 ppm)

d.MPG=Birim karbon dioksit miktarına karşılık tüketilen yakıt yüzdesi

e.Eksoz gazı içerisine diesel yakıtı yada diğer HC içeren kaynakların püskürtülmesi ile HC ilavesi (Post enjeksiyonla ya da katalist içine direk püskürtülebilir).

3.2.1 NO_x Katalistleri

Geleneksel üç yollu katalistler, yalnızca motorun stokiyometrik orana yakın çalıştığı durumlarda, NO_x emisyonlarının azaltılmasında başarılı olabilmektedir. Diesel motorlar genellikle ihtiyaç duyulandan daha fazla miktarda hava ile çalışmaktadır. Bu durum motor verimini artırmaktadır ancak geleneksel katalist teknolojisini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden yeni NO_x katalistleri oksijence geniş bir ortam içerisinde NO_x 'leri N_2 'ye indirgeyecek şekilde geliştirilmelidir. **[4]**

3.2.1.1 Fakir NO_x Katalistleri

Bu tip katalistlerde, eksoz gazlarında bulunan hidrokarbonlar, NO_x'i N_2'ye dönüştürmek için yardımcı eleman olarak kullanılmaktadır. Eksoz gazları içindeki HC / NO_x oranı yüksek olduğu zamanlarda, bu katalistler daha verimli çalışabilmektedir. Buna rağmen diesel motorlarda bu oran çok düşüktür ve genel olarak 1'den daha küçük değerdedir (Hoezler et al. 1997). Bu durum eksozdaki HC/NO_x oranını artırmak için eksoz gazlarına hidrokarbon ilavesini zorunlu kılmaktadır ve bu amaçla eksoz gazları içerisine post enjeksiyon yöntemiyle diesel yakıtı püskürtülmektedir. Hidrokarbon ilavesi, katalistlerin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır ancak ilave oranına bağlı olarak % 1–7 arasında bir yakıt sarfiyatına neden olmaktadır (NRC 1998; Bunting et al. 1998). **[4]**

Her katalistin verimli olarak çalışabildiği bir sıcaklık aralığı vardır. Bu sıcaklık aralığı tipik olarak katalistin ilk aktiviteye girdiği sıcaklığa (Light off sıcaklığı) yakın değerlerde başlamaktadır ve platinyum için 200 ˚C' den 250 ˚C'ye; bakır için 450 ˚C'den 500 ˚C'ye kadar olan aralıklardadır (Kreiger et al. 1997) . US test çevrimlerinde eksoz sıcaklıkları 150–500 ˚C arasında değişmektedir ve çalışma aralığını genişletmek için katalist içine değişik tipte metaller katılabilmektedir. Buna rağmen genel olarak eksoz gazları, kataliste 300–400˚C sıcaklıklarında girmektedir (Hoelzer et al. 1997) . Bu aralık ise bakır ve platinyumun verimli çalışma aralığının dışındadır ve birçok test çevriminde verimsiz oldukları ortaya çıkmaktadır. **[4]**

Yakıtın içerdiği kükürt seviyesinin yüksek olması da katalistin verimli çalışmasını engellemektedir. Çünkü NO_x ve kükürt bileşikleri, katalistin aktif bölgesinde reaksiyona girmek için yarış vermektedir ve kükürt bileşikleri azot oksitlerin redüklenmesini engellemektedir. Aslında birçok diesel araştırmacısı, lean NO_x katalistlerinin başarılı bir şekilde çalışabilmeleri için düşük kükürtlü yakıt kullanılmasında hemfikirdir. **[4]**

3.2.1.2 SCR Katalistleri (Selective Catalytic Reduction)

SCR katalistlerinde indirgeyici eleman olarak hidrokarbonlar yerine nitrojen içerikli bileşikler (amonyak ve üre gibi) kullanılmaktadır. Amonyak ve üre bileşikleri, hidrokarbonlardan daha aktif oldukları için SCR katalistlerinin kükürt içerikli yakıtlarda da verimli çalışmasını sağlamaktadır (Hammer and Broer 1998). SCR sistemlerin stasyonel kaynaklardaki verimliliği ve uygulanabilirliği kanıtlanmıştır ancak düşük yüklü mobil alanlarda kullanımı hala birtakım zorluklar içermektedir: **[4]**

- Altyapı sistemi içerisinde bir üre veya amonyak kaynağına olan ihtiyaç;
- Amonyağın depolanma ve ikmal maliyetleri;
- Emisyonların artma potansiyeli (Emisyon kontrol sistemi çalışmasa bile araç çalışabileceğinden dolayı meydana gelebilecek emisyon);
- Karmaşık bir amonyak enjeksiyon sistemi gerektirmesi;
- Amonyağın toksik oluşu ve muhtemel amonyak sızıntıları sonucu meydana gelebilecek istenmeyen reaksiyonlar (Geçiş halinde veya diğer çalışma durumlarında reaksiyona girmemiş amonyak sızıntısı).

SCR sistemlerinde NO_x lerdeki azalma oranı % 50–70 iken yakıt tüketiminde ki artış % 3–5 olmaktadır (Bunting 1998). **[4]**

3.2.1.3 Azot Oksit Emiciler

NO_x emiciler iki farklı çalışma moduna sahiptir. Birincisi, fakir yanma boyunca (hava miktarının fazla olduğu yanma), sünger gibi davranarak azot oksitleri emmek; ikincisi ise peryodik rejenerasyon boyunca üç yollu katalistler gibi NO_x in N_2'ye dönüştürülmesini sağlamak. Rejenerasyon, hidrokarbon ilavesi ile gerçekleştirilmektedir. Hidrokarbonlar emicilerde geçici bir indirgeyici ortam oluşturmaktadır ve bu durum NO_x'in emici malzemeden salınmasını ve N_2'ye redüklenmesini sağlamaktadır. Lean NO_x katalistlerinde olduğu gibi, diesel yakıtı, hidrokarbon kaynağı olarak direk katalist içine veya eksoz gazları içine enjekte edilebilir. **[4]**

3.2.1.4 Plazma Destekli Katalistler

Plazma destekli katalistler yeni bir teknoloji olmakla birlikte kükürte karşı tolerans gösterebilme özelliğiyle NO_x emisyonların yüksek düzeyde azaltılmasını amaçlamaktadır. Bu teknoloji Lean NO_x ya da SCR katalisti ile termal olmayan bir plazmayı birleştirmeyi amaçlamaktadır. **[4]**

Termal olmayan bir plazma; oldukça düşük sıcaklığa sahip bir gazdır ve içerisinde, kendisinden daha fazla kinetik enerjiye sahip olan ve tahrik edilmiş elektronlar bulundurmaktadır. Eksoz gazlarıyla karıştırıldığı zaman plazma serbest radikaller üretmekte ve kimyasal reaksiyonları hızlandırmaktadır. Esas amaç NO_x'in N_2'ye dönüşüm reaksiyonunun, termal olmayan bir plazma kullanımı ile hızlandırılmasıydı ve bazı şirketler bunun oldukça yüksek azot oksit azaltımı sağlayacağını iddia ettiler. Buna rağmen araştırmacılar yüksek miktarda enerji verilmeksizin diesel eksoz gazı ortamında NO_x-N_2 dönüşümünün gerçekleşmesinin mümkün olmadığını ortaya koymuşlardır (Penetrante et al. 1997). Ayrıca açıkta bulunan NO_x kolaylıkla nitrik asit gibi son ürünlere dönüşebilmektedir. **[4]**

Termal olmayan katalistler, esas etkilerini NO'nun NO_2'ye oksitlenmesinde göstermektedir. Bu durum zarar verici gibi görülebilir ancak SCR ve Lean NO_x katalistlerinin verimliliğini artırmaktadır ki bu katalistler azot oksitin temel bileşeni olan NO_2 bulunduğu zaman en iyi şekilde çalışmaktadır (Penetrante et al. 1998; Hammer and Broer 1998). Diesel eksoz gazları NO_2 miktarının dengelenmesiyle tipik olarak % 70–90 oranında NOx gazından meydana gelmektedir(Heywood 1988). Bu nedenle kataliste non-termal bir plazma eklenmesi eksoz kontrol sisteminin etkinliğini artırmaktadır. Plazma ayrıca kükürt toleransını da artırmaktadır. **[4]**

3.3 Yakıtlarda Yapılan Geliştirmeler

Yakıtlar ve otomobil motorları, sürücüler tarafından genellikle birbirinden ayrı, bağımsız kavramlar gibi düşünülmektedir. Buna rağmen bu iki kavram birbirinden bağımsız düşünülemez ki bir motorun emisyon ve performans karakteristikleri kullanılan yakıtla yakından ilişkilidir. **[4]**

3.3.1 Diesel Yakıtı ve Geliştirilmesi

Diesel yakıtı, petrolün daha az rafine edilerek damıtılması sonucu üretilmektedir. Setan sayısı, yakıt yoğunluğu, aromat içeriği ve kükürt içeriği konuları diesel motorlarındaki emisyonların azaltılması amacıyla yakıtlarda yapılan çalışmaların önde gelen geliştirme alanlarındandır. **[4]**

3.3.1.1 Setan Sayısı

Setan sayısı yakıtın tutuşmaya yatkınlığının bir ölçüsüdür ve yüksek setan sayıları yakıtın daha kısa tutuşma süresine sahip olduğunu ifade etmektedir. Daha kısa tutuşma gecikmesi, silindir içerisindeki basınç artışının daha yavaş meydana gelmesini sağlamakta ve bu durum NO_x oluşum oranını düşürmektedir. **[4]**

3.3.1.2 Yakıt Yoğunluğu

Emisyonların yanma sistemi tasarımı (yanma odası tasarımı, enjeksiyon sistemi-miktarı-oranı ve püskürtme basıncı gibi) ile yakından ilişkili olmasına rağmen, yakıt enjeksiyonu ve hava-yakıt karışımının oluşumu yakıtın yoğunluğuna bağlıdır. Yakıt yoğunluğunu düşürmek genel olarak eski motorlarda daha az NO_x üretimi ve PM emisyonlarında da faydalar sağlayacaktır. Buna rağmen bu faydalar, yakıt püskürtme işleminin elektronik olarak gerçekleştirildiği günümüz modern motorlarında elde edilmeyebilir. **[4]**

3.3.1.3 Aromatlar

Aromatik bileşikler daha yüksek sıcaklıklarda yanmaktadır, bu nedenle aromatik içeriği azaltmak makul düzeyde NO_x'lerin azalmasını sağlamakta ancak PM emisyonlarındaki etkisi oldukça küçüktür. Buna rağmen modern, düşük PM emisyonlu motorlarda bu durum önemsenmeyebilir (Lee et al. 1998). Aromatik içeriği US'de hacim başına %35 ile sınırlı iken California'da %10 ile sınırlandırılmaktadır. **[4]**

3.3.1.4 Yakıt Sülfür İçeriği

Yakıtın ihtiva etmiş olduğu kükürt miktarı emisyonlar üzerinde iki temel etkiye sahiptir. Birincisi: Yakıt kükürtünün yaklaşık %1-2'si sülfata dönüşmekte ve bu durum direkt olarak PM emisyonunu artırmaktadır (Lee et al. 1998). İkincisi: Şuan ki kükürt seviyesi, geliştirilmekte olan eksoz kontrol sistemlerinin çalışmasını yavaşlatarak ya da kapasitesini düşürerek olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Örnek olarak NO_x emiciler, oksidasyon katalistleri yüksek kükürt oranlarından etkilenmekte ve kükürt zehirlenmesi olarak bilinen etkiye maruz kalmaktadır. **[4]**

3.3.2 Alternatif Yakıtlar ve Diesel Yakıt ile Yapılan Karışımlar

3.3.2.1 Biodiesel (BD)

Biodiesel yakıtı hayvansal ya da bitkisel yağlardan üretilmektedir. Soya fasulyesi Amerika'da en çok kullanılan biodiesel üretim kaynağıdır ancak kanola, mum yağı ya da atık yemek yağları da bu amaçla kullanılmaktadır. Kimyasal işlem sonucu elde edilen fakir (hafif) biodiesel (BD100), normal diesel yakıtı ile karıştırılabilmektedir (Genellikle karışımın %20'si biodiesel iken %80 i diesel yakıtı olacak şekildedir). Bu yakıtlar sadece yakıt sisteminde ya da motorda ufak değişimler yapmak suretiyle kullanılabilmektedir. **[4]**

Biodiesel yakıtı normal diesel yakıtından daha fazla oksijen içermekle birlikte PM emisyonlarına neden olan aromatlar ve kükürt içeriğine sahip değildir. Buna rağmen

biodieselin yanması sonucu oluşan eksoz gazında birkaç sülfat çeşidi ve yüksek oranda SOF bulunmaktadır. Üretim kaynağına bağlı olarak yüksek setan sayısı (45-65) içermesine rağmen, püskürtme zamanlaması uygun ayarlanmadığı sürece NO_x emisyonlarında artış meydana gelmektedir. **[4]**

3.3.2.2 Dimetil Eter (DME)

DME; yenilenebilir biokütle, doğal gaz, kömür gibi karbon içeren her maddeden sentezlenebilir ancak günümüzde genellikle metanolün dehidrasyonu yöntemiyle elde edilmektedir. Ürün karbon-karbon bağı, kükürt ve aromat içermeyen, kısmen oksitlenmiş bir gazdır. Oldukça yüksek setan sayısına sahiptir (55-60, Fleish et al. 1995) Bu özellikler, PM ve NOx emisyonlarının daha düşük değerde olmasını sağlamaktadır. **[4]**

Oda sıcaklık ve basınç değerlerinde gaz halinde bulunan DME, hazır bir şekilde diesel yakıtının yerine kullanılamamaktadır. Daha çok propan gibi sıvı fazda depolanması için basınçlı tanklara ihtiyaç duyulmaktadır. Yakıt enjeksiyon sistemi, sızıntılara karşı hassas hale gelmekte ve kullanım süresi kısalmaktadır (yakıtın yüksek buharlaşma basıncına ve düşük viskoziteye sahip olmasından dolayı) ve bundan dolayı bazı modifikasyonlara gerek duyulmaktadır (Kapus and Ofner 1995). LPG' de olduğu gibi güvenlik endişeleri de bulunmaktadır ve kullanılmakta olan diesel altyapısı ile DME'nin kullanımı olanaksızdır. DME; emisyon bakımından avantajlara sahip olmasına rağmen yakıt depolama ve altyapı değişikliği sorunlarıyla karşı karşıyadır. **[4]**

3.3.2.3 Dimetoksi Metan (DMM)

DME ile alakalı olan dezavantajlar DMM için de geçerlidir ve bu nedenle yapılan araştırmalar DMM'nin diesel yakıt katkısı olarak kullanılması yönündedir. Dimetosi metan, Dimetil etana benzemektedir ancak oda şartlarında sıvı fazdadır ve diesel yakıt ile herhangi bir oranda karıştırılabilmektedir. DMM ve diesel karışımı, motorda herhangi bir değişim yapılmaksızın kullanılabilmektedir ve NO_x emisyonlarında değişiklik olmazken PM emisyonlarında düşüş gözlemlenmektedir. Ayrıca DMM kullanımı ultrafine parçacıkların artmasına neden olmaktadır (Marciq et al 1998). **[4]**

3.3.2.4 Fisher-Tropsch Diesel (F-T)

Fisher-Tropsch işlemi hidrojen ve karbondioksit gibi sentetik gazları syncrude olarak adlandırılan sentetik, kaba yağlara dönüştürmektedir (Glasstone 1982). Sentetik gazlar genel olarak doğalgazlardan kendi kendine meydana gelmektedir. Sentetik yağdan daha sonra geleneksel yöntemle F-T üretilmektedir ve kullanılmakta olan diesel altyapısına da uygundur.

Fisher-Tropsch diesel yüksek setan sayısı, düşük kükürt ve aromat oranı gibi birçok olumlu özelliğe sahip sıvı bir yakıttır. Bu özellikler NO_x ve PM emisyonlarında fayda sağlamanın yanında F-T yakıtına motorlarda bir değişiklik yapılmadan kullanma olanağı sunmaktadır. **[4]**

3.3.2.5 Diesel-Su Emülsiyonları

Normal olarak karışım oluşturamadıkları halde diesel yakıtı ile suyun karıştırılmasını sağlamak amacıyla yürütülen çalışmalardır. Yakıta eklenen su, (EGR'de olduğu gibi) seyreltici olarak etki etmekte, yanma sıcaklığını düşürerek NOx oluşumunu engellemektedir. Birçok durumda PM emisyonlarını da düşürmektedir (Kreiger et al 1997). Yakıt sistemindeki, altyapıdaki uygunsuzluklar ve maliyetler su ilave işleminin karşı karşıya olduğu olumsuzluklardır. Ancak yakıt-su emülsiyonları yakıt içerisine, ek olarak setan sayısını artırıcı bir takım katkı maddelerinin eklenmesini gerektirmektedir ve bu durum yakıt maliyetini %45-50 oranında yükseltmektedir (Ramavajjala et al. 1997). **[4]**

Orhan DENİZ yapmış olduğu çalışmada, su-diesel emülsiyonlarının motor performansına etkisini inlemiştir ve özgül yakıt tüketiminde %8,5 azalma olduğunu tespit etmiştir (DENİZ, Orhan; 1985)

4. DİESEL MOTORLARINDA AZOT OKSİT EMİSONLARININ AZALTILMASI AMACIYLA YANMA ODASINA SU İLAVESİ KONUSUNDAKİ ÇALIŞMALAR

İçten yanmalı motorlarda yapılan araştırma ve geliştirmeler yıllardır iki temel amaca ulaşmak için yapılmaktadır:

- Motor performansını artırmak
- Zararlı emisyonları azaltmak.

Yakıtın ve kullanılan yağın kalitesi bu amaca ulaşmak için büyük önem taşımaktadır.

Diesel motor karakteristiklerinin geliştirilmesinde NO_x ve PM emisyonları gibi noktalar ön plana çıkmaktadır. Yapılan iyileştirmelerin, motor performansını artırırken bu emisyonlarda artış meydana getirmemesi ve daha da azaltması istenmektedir. Bu çalışmalar içerisinde diesel yakıtına su ilave edilmesi uzun bir geçmişe sahiptir. Birçok sistem geliştirilmiş ve deneysel olarak araştırılmıştır. Suyun, yanma prosesi üzerindeki etkisi teorik olarak araştırılmıştır. Bunun da ötesinde, silindir içine su ilavesi NO_x ve PM emisyonlarının azaltılmasındaki en etkili yöntem olarak düşünülmektedir.

Genel olarak su buharının varlığının yanma fiziğini ve yanma kinetiğini etkilediği, yanma sıcaklığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve emisyonları azalttığı düşünülmektedir. Yanma boyunca buharlaşan su yanma odası sıcaklığını düşürmekte; NO oluşum oranını ve is oluşumunu kontrol eden, yüksek OH radikallerinin derişimini artırmaktadır. Ayrıca yanma odasındaki yakıtça zengin bölgeleri seyreltmektedir. **[5]**

Literatürde üç temel yöntemle yanma bölgesine su gönderilebilmektedir:

- Yakıt su emülsiyon tekniği ile
- Motor emme manifolduna su püskürtülmesi ile (tek noktadan veya çok noktadan)
- Ayrı enjektörlerden direk silindir içerisine su püskürtülmesi ile **[6]**

4.1 Yakıt/Su Emülsiyon Tekniği İle Yanma Odasına Su Gönderilmesi

Bu yöntemde, azot oksit ve partikül emisyonlarını azaltmak amacıyla yanma odasına su sokulması, emülsiyon vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Emülsiyon, birbiri içerisinde çözünemeyen iki sıvının oluşturduğu heterojen karışımın genel adıdır. Diesel yakıtı ile suyun belli oranlarda karıştırılması sonucu elde edilen karışıma diesel-su emülsiyonu adı verilmekte olup stabilize emülsiyon ve stabilize olmamış emülsiyon olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Stabilize emülsiyonlarda suyu yakıt içerisinde tutabilmek amacıyla karışım oluşturucu katkı maddeleri kullanılmaktadır. Günümüzdeki araştırmalarda, tek bir faz gibi davranan ve ayrışmayan bir stabilize emülsiyon elde etmek amacıyla, surfactant adı verilen, sıvı yüzey

gerilmesini azaltıcı kimyasallar kullanılmaktadır. Bu kimyasallar azot oksit emisyonlarında ufak bir artış meydana getirmekte ancak enjektörlerin temizlenmesini sağlayarak kalıcı birikintiler oluşmasını engellemektedir (Montagne et al. 1987). **[6]**

Stabilize olmamış emülsiyonlara yanmayı iyileştirici katkı maddeleri katılmamakta ve katkı maddesi olmadığı için de emisyonlar azalmakta ve yakıt maliyeti düşmektedir (De Vita, 1989). Stabilize olmamış emülsiyonların, ufak su damlacıklarını yakıt içerisinde tutabilmesi için yüksek dirençli olması gerekmektedir. Bu emülsiyonlar yüksek hızlı karıştırıcı pompalar vasıtasıyla üretilmektedir. Ulrich ve Kesler (1992) herhangi bir katkı maddesine ihtiyaç duymadan iyi bir su-yakıt emülsiyonu elde etmek amacıyla kompleks bir girdap odası kullanılmasını önermişlerdir. **[6]**

Diesel yakıta belirli oranlarda su ilave edilmesiyle elde edilen emülsiyon silindir içerisine püskürtülmektedir. Bu yöntemin uygulanması için motorda herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duyulmamaktadır.

N. Samec, B.Kegl ve R. Dibble yakıt/su emülsiyonunun yakıt tüketimi ve emisyonlar (NO_x, HC ve is) üzerindeki etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deney için dört silindirli, hava soğutmalı, direkt püskürtmeli bir kamyon diesel motoru kullanılmıştır. Uzun süre ayrışmadan kalabilen ve stabil emülsiyon elde etmek amacıyla diesel/su karışımı içerisine çok az miktarda emülsifayır eklenmiştir.

İlk olarak NO ve is oluşumu üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkilerin sayısal olarak analizini yapmışlar; su-yakıt emülsiyon yanmasının, bir motor yanma modeli uygulaması ile simülasyonunu elde etmişlerdir. Ayrıca püskürtme ve sprey karakteristiklerinin her ikisini de sayısal simülasyonla analiz etmişlerdir. Emisyonlar üzerindeki püskürtme ve sprey karakteristiklerini ve diğer motor karakteristiklerini değişik çalışma rejimlerinde, değişik su-yakıt oranları için incelenmişlerdir. Diesel yakıt içerisindeki değişik miktardaki su oranlarının (% 0, 10 ve 30) NO, HC ve is emisyonlarındaki etkisini; dört silindirli, hava soğutmalı, direkt püskürtmeli kamyon diesel motorunun kullanıldığı deneysel çalışmada incelemişlerdir.

4.1.1 Sayısal Analiz

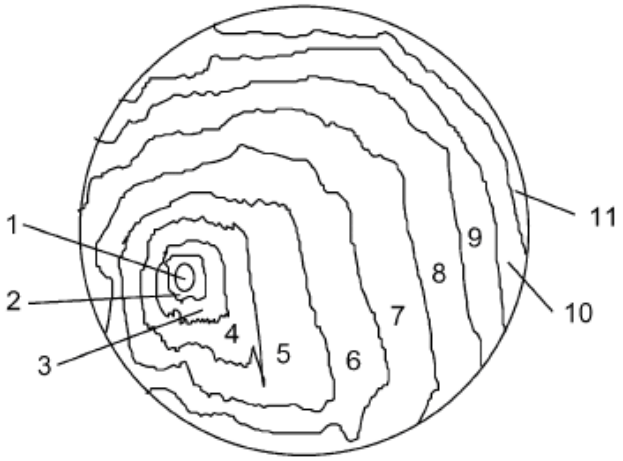
Diesel yakıtına su katılmasının; emisyonlar, özgül yakıt tüketimi, ısıl yük ve maksimum yanma basıncı gibi konular üzerine sağladığı faydaları göstermek amacıyla birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Ancak bu çalışmalarda su-yakıt emülsiyon yanmasının kimyasal ve fiziksel kinetiği hakkında detaylı bilgi verilmemiştir. Yapılan çalışmalarda ele alınan sayısal incelemeler bu konuda çok yardımcı olmaktadtır. N. Samec, B.Kegl ve R. Dibble

çalışmalarında sayısal analizi iki büyük başlık altında ele almışlardır:

- Su-yakıt emülsiyonunun yanmasının kimya kinetiği açısından sayısal analizi
- Püskürtme işleminin sayısal analizi (Buharlaşan su damlacıklarının etkisi altındaki su-yakıt karışımının atomizasyon prosesinin anlaşılması için)

4.1.1.1 Yanma Olayının Sayısal Analizi ve Simülasyonu

Yanma odası içerisindeki karışımın yanma işleminin sayısal modelini çıkarmışlardır. Model yanma odası içerisindeki akışı ve reaksiyon bölgesini katmanlara ayırmaktadır. Katmanların iç içe olduğu, birbirini çevrelediği ve şekillerinin değişebildiği kabul edilmektedir. Her katman, içinde homojen karışımın bulunduğu bir reaktör olarak kabul edilmektedir. Her katmanda meydana gelen kimyasal tepkimeleri ve diğer hesaplamaları, CHEMKIN adı verilen programla ayrı ayrı hesaplamışlardır. Yanma odasını, aşağıdaki gibi, değişik boyutlarda yanma bölgesinden meydana geldiğini düşünerek modellemişlerdir.



Şekil 4.1 Yanma odası içerisinde, yanma bölgelerinin yerleşimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002).

İlk yanma bölgesinin ateşlenmesi sonucu meydana gelen sıcak gaz ikinci yanma bölgesinin içine doğru akmakta, böylece ikinci bölgenin sıcaklığını yükselterek tutuşmasını sağlamaktadır. Daha sonra ikinci yanma bölgesi içindeki sıcak gaz üçüncü yanma bölgesine akmakta ve tutuşma işlemi zincirleme olarak meydana gelmektedir. Bütün çıkışlardaki akışkan özellikleri aynı olduğundan, bütün çıkışlardaki akışlar tek bir akış olarak ele alınabilmektedir. Her bir yanma bölgesinin aynı basınca sahip olduğu kabul edilmektedir.

4.1.1.2 Püskürtme İşleminin Sayısal Analizi ve Simülasyonu

Su-yakıt emülsiyon yanmasında; birinci sprey yakıt damlacıkları, patlamalı buharlaşma nedeni ile daha fazla parçacıklara ayrılmaktadır. Yakıt damlacıklarının ihtiva ettiği, dağılan suyun hızlı bir şekilde ısınması sonucu patlamalı buharlaşma meydana gelmektedir. İç kesimlerdeki su damlacıkları; silindir iç basıncına bağlı olarak, buharlaşma sıcaklığının daha üstündeki bir sıcaklıkta kendiliğinden oluşan çekirdeklenmiş buhar kabarcıklarına maruz kalmaktadır ve bu durum su damlacıklarının şiddetli bir şekilde buharlaşmasına neden olmaktadır. Buharlaşma ilk olarak etrafı çevreleyen yakıt damlacıklarının hızlı bir şekilde genişlemesine, etrafa dağılmasına neden olmaktadır ve bu dağılan yakıt damlacıkları ikinci aşamada çok daha ufak boyutlara ayrılarak çok yoğun olan mikro patlamalar meydana getirmektedir. Bu duruma **ikincil atomizasyon** adı verilmektedir.

N. Samec, B.Kegl ve R. Dibble yaptıkları çalışmada, püskürtme işleminin (sıralı bir diesel enjeksiyon sisteminde) sayısal simülasyonunu yaparken matematiksel modelde en önemli püskürtme ve sprey karakteristiklerini hesaplara dahil etmişlerdir. Bu matematiksel modelde, yakıtın yüksek basınçlı sistem içindeki akışını bir boyutlu akış olarak modellemişlerdir.

4.1.1.3 Sayısal Sonuçlar

N. Samec, B.Kegl ve R. Dibble hesaplamalarda diesel yakıt yerine, stokiyometrik n-heptan karışımı kullanıldığını düşünmüşlerdir. Buna göre ilk reaktör ilave edilen miktarda su ve n-heptan içermekte oldup diğer reaktörler ise sadece 950 ˚K sıcaklığında hava içermektedir. Hesaplamalarında kullandıkları Zeldovich-NO_x oluşum mekanizması ve is oluşum modeli aşağıdaki gibidir.

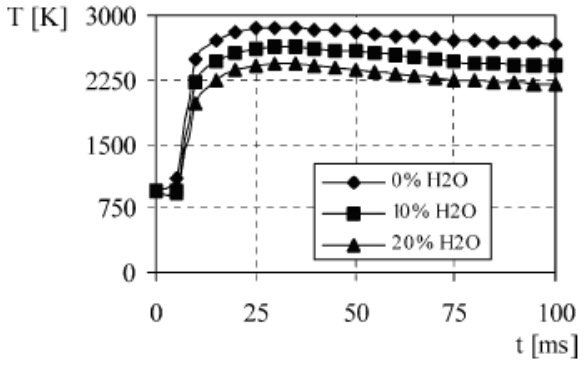
$$C_3H_3 + C_3H_3 \rightarrow 6C(S) + 3H_2 \quad (4.1)$$

$$C_4H_2 \rightarrow 4C(S) + H_2 \quad (4.2)$$

$$C(S) + C_2H_2 \rightarrow 3C(S) + H_2 \quad (4.3)$$

$$C_2H_2 \rightarrow 2C(S) + H_2 \quad (4.4)$$

Yakıta su ilave edilmesi sonucunda, suyun kapladığı hacim kadar daha az miktarda yakıt silindir içine sokulduğu için, yanma sonu sıcaklığında düşüş meydana gelmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 %0; 10; 20 su içerikli, Su ve n-Heptan emülsiyonunun yanma sonu sıcaklık profili (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002).

Yanma odası sıcaklığının düşmesi, termal NO oluşumuna, zeldovich mekanizmasındaki redüklenme reaksiyonları boyunca, doğrudan etki etmektedir. (4.5), (4.6) ve (4.7) nolu reaksiyonlar NO oluşumunda etkili olan reaksiyonlardır. (4.8) ve (4.9) nolu reaksiyonlarında etkili olduğu düşünülebilir ancak bu reaksiyonların aktivasyon enerjileri düşük olduğu için (özellikle 4.9 nolu reaksiyon) düşük sıcaklıklarda etkilidirler.

$$O + N_2 \xrightarrow{k1} NO + N \qquad (4.5)$$

$k_1 = 1.8 \times 10^{12} \exp(-319 \text{ kJ mol}^{-1} / RT)$

$$N + O_2 \xrightarrow{k2} NO + O \qquad (4.6)$$

$k_2 = 6.4 \times 10^{9} \exp(-26 \text{ kJ mol}^{-1} / RT)$

$$N + OH \xrightarrow{k3} NO + H \qquad (4.7)$$

$k_3 = 3 \times 10^{13}$

$$O + N_2 + M \rightleftharpoons N_2O + M \qquad (4.8)$$

$$N_2O + O \rightleftharpoons 2NO \qquad (4.9)$$

Ek olarak NO miktarı; (4.5), (4.8) ve (4.9) nolu reaksiyonlarda ki oksijen (O) atomunun miktarının azaltılması ile azaltılabilir. Yakıt içerisine su katılması sonucunda, su molekülleri oksijen atomuyla reaksiyona girerek OH radikalleri meydana getirmekte ve dolayısıyla oksijen (O) tüketmektedir. OH radikallerinin oluşumu aşağıdaki reaksiyonlar sonucu gerçekleşmektedir.

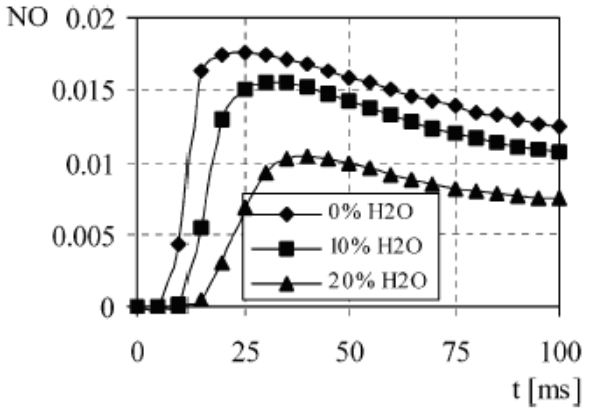
$$H_2O + O \longrightarrow OH + OH \qquad (4.10)$$

$$H_2O + H \longrightarrow OH + H_2 \qquad (4.11)$$

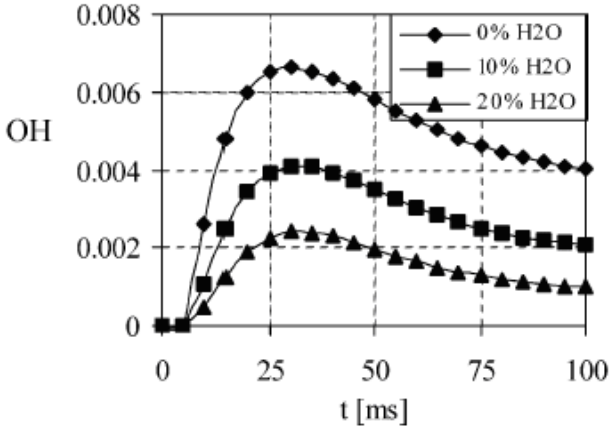
N. Samec, B.Kegl ve R. Dibble; reaksiyonlara katılan (N) atomlarının, teorik olarak sanki-dengede olduğunu ve birim zamandaki (N) miktarının sabit olduğunu kabul etmektedir. Buna göre giren ürünler içerisinde (N) atomunun bulunduğu reaksiyonlar (4.6 ve 4.7 nolu reaksiyonlar) sonucunda oluşan NO ürünlerinin miktarı da zamanla değişmeyecektir ve bu nedenle zamana göre türevi sıfır olacaktır. Sonuç olarak (4.5) nolu reaksiyonun azot oksit oluşumunda birinci derecede etkili olduğu açığa çıkmaktadır. Böylece NO oluşumunun, çok büyük oranda, oksijen atomu (O) miktarına bağlı olduğunu gösteren aşağıdaki ifadeyi elde etmişlerdir:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[\mathrm{O}][\mathrm{N_2}] \qquad (4.12)$$

Bu ifadeden NO oluşumda (4.5) nolu reaksiyonun büyük rolü olduğu görülmektedir. NO emisyonları bu reaksiyonun giren ürünlerine; oksijen atomu (O) ve N_2 molekülüne büyük oranda bağlıdır. Bu nedenle azot oksit emisyonunu azaltmak için, oksijen atomu derişimini azaltmak etkili olacaktır ve bu amaçla yanma odası içerisinde su bulunması; su moleküllerinin OH radikallerine dönüşürken oksijen (O) atomunu tüketmesi nedeni ile oksijen atomlarının azaltılmasını, NO oluşumunun da düşmesini sağlayacaktır. Aşağıdaki şekilde su ve n-heptan karışımı yanması sonucunda meydana gelen azot oksit miktarının değişimi verilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 %0; 10; 20 su içerikli, Su ve n-Heptan emülsiyon yanmasındaki NO miktarının zamanla değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)

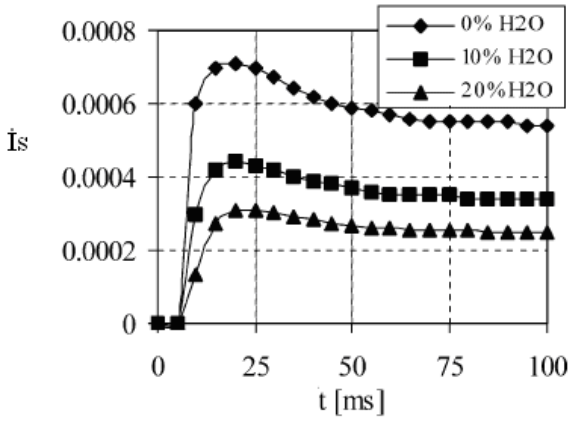


Şekil 4.4 %0; 10; 20 su içerikli, Su ve n-Heptan emülsiyon yanmasındaki OH miktarının zamanla değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002).

Su miktarı arttıkça, (4.10) ve (4.11) nolu reaksiyonlar sonucunda yanma sonucunda OH radikallerinde artış meydana gelecektir. Ancak Şekil 4.4'te aksine OH radikallerinin su miktarı ile azaldığı görülmektedir. OH radikalleri is (C_n) oksidasyonunda yer almaktadır ve is emisyonlarının azaltılmasında önemlidir. Aşağıdaki muhtemel reaksiyonla, is oksidasyonu sırasında OH radikallerinin tüketimi söz konusudur.

$$C_n + OH \longrightarrow CO + C_{n-1} + H \qquad (4.13)$$

Sonuç olarak yanma sonu ürünleri içinde daha az miktarda is bulunacaktır. OH radikalleri is oksidasyonunda özellikle yüksek sıcaklıklarda önemli rol almaktadır. Çünkü OH radikalinin ihtiva ettiği moleküler formdaki oksijen alev tarafından tüketilmekte ve bu nedenle OH radikalleri is oksidasyonunda ana oksitleyici olarak görev almaktadır. OH derişiminin azalmasının ayrıca (4.7 nolu reaksiyonla) NO emisyonlarının da azalmasına neden olduğu da görülmektedir.



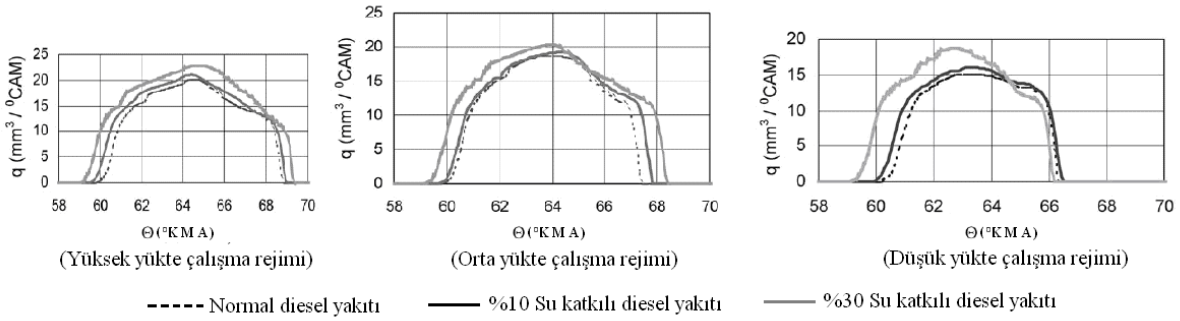
Şekil 4.5 %0; 10; 20 su içerikli, Su ve n-Heptan emülsiyon yanmasındaki is miktarının zamanla değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)

Çizelge 4.1 İlave edilen su miktarına bağlı olarak, is ve NO değişim miktarları (% olarak) (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)

Emülsiyon içindeki su miktarı (%)	**Sıcaklık**	**NO_x**	**İs**
10	-10	-15	-35
20	-15	-35	-60

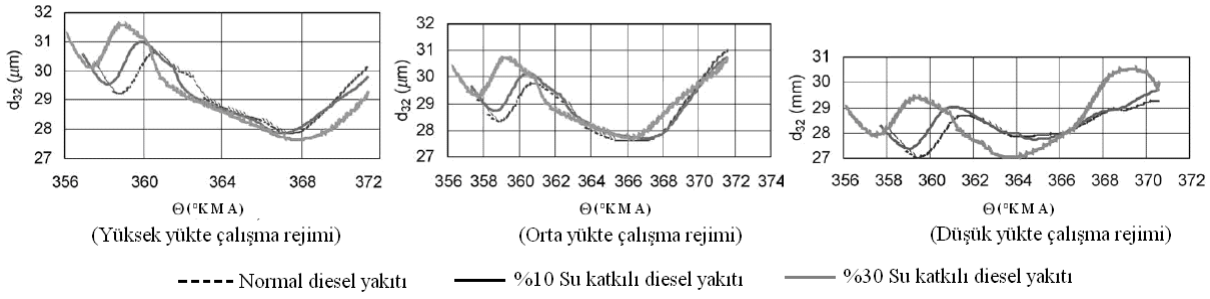
Yazarlar, enjeksiyon karakteristiklerini incelemek amacıyla da bir sayısal inceleme yapmışlardır. Normal diesel, %10 su katkılı diesel ve %30 su katkılı diesel olmak üzere üç farklı yakıt kullanmışlar ve her bir yakıt için düşük, orta ve yüksek yükte çalışma rejimlerinin karakteristiklerini incelemişlerdir. Her çalışma rejiminde 13°KSMA püskürtme avansı uygulanmıştır. Her rejimde püskürtme işlemi sonucunda oluşan yakıt damlacıklarının ortalama efektif yarıçapı, püskürtülen yakıt miktarı ve tutuşma sonucunda salınan ısı miktarı, yakıt türleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çalışma rejimleri:

- Yüksek yük rejimi: Motor momenti=575 Nm; Motor gücü=102 kW; Motor devri =1700 d/dk; Ortalama efektif basınç=10 Bar.
- Orta yük rejimi: Motor momenti=451 Nm; Motor gücü=82.2 kW; Motor devri=1700 d/k; Ortalama efektif basınç=8 Bar.
- Düşük yük rejimi: Motor momenti=299 Nm; Motor gücü=53.3 kW; Motor devri=1700 d/k; Ortalama efektif basınç=5 Bar.



Şekil 4.6 Çalışma rejimlerine göre, püskürtme işleminin ilk 0.5 milisaniyesinde püskürtülen karışım miktarının (q), krank açısına göre değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)

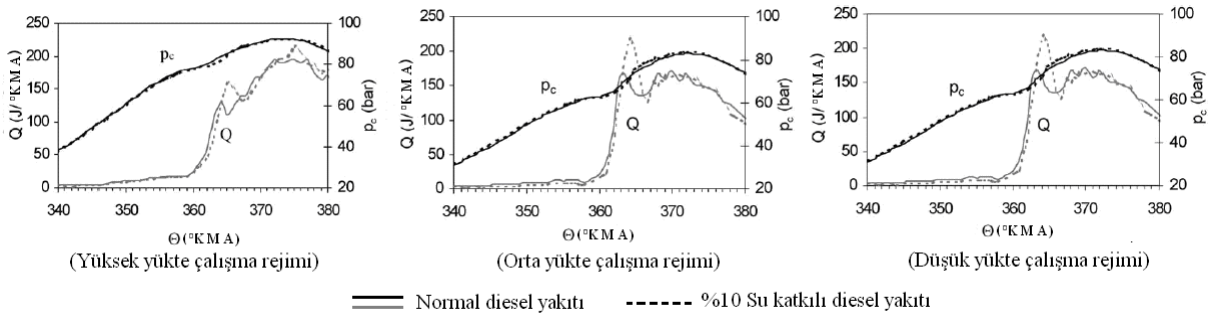
Yazarlar sayısal simülasyonları uygularken, yüksek su oranına sahip emülsiyonlarda, püskürtülen diesel yakıt miktarının azaldığını görmüşlerdir (Şekil 4.6). Daha az diesel yakıtın püskürtülmesi sonucu yanma sıcaklığı azalmış ve NO_x emisyonları düşmüştür. Bu durum ayrıca daha önceki n-heptan emülsiyon yanması için yapılan sayısal simülasyonlarda da görülmüştür.



Şekil 4.7 Çalışma rejimlerine göre, püskürtme sonucu oluşan damlacıkların ortalama çapının (d32), krank açısına bağlı değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)

Şekil 4,7'de görüdüğü gibi, yakıt içindeki su miktarının artması sonucunda, püskürtme işlemi neticesinde meydana gelen damlacıkların boyutu artmaktadır. Damlacık boyutu arttıkça is emisyonlarının artacağı düşünülebilir. Buna rağmen önceki simüle edilmiş ve ölçülmüş olan is emisyon değerleri bütün motor çalışma rejimlerinde düşük bulunmuştur. Bu durum **mikro patlamalar** fenomeni ile açıklanabilir. Mikro patlamalar püskürtülen karışımın daha iyi atomize olmasını sağlamaktadır ancak yukarıdaki grafiklerde püskürtmenin başlangıç safhasında partikül boyutlarının büyük olduğu görülmektedir. Bu durum normaldir çünkü damlacıklar, içlerinde su da ihtiva etmektedirler (ilerleyen aşamalarda mikro patlamalar sonucu damlacık boyutları küçülmektedir). Bir yanma işleminde ikincil atomizasyonun daha

etkili olmasını sağlamak için boyutları kontrol edilebilen, çok küçük damlacıkların olması gerekmektedir. Su damlacıklarının boyutu çok küçük olduğu zaman ikincil atomizasyon meydana gelir. Diğer taraftan çok büyük damlacıklar patlama için gerekli olan damlacıkların sayısını azaltmaktadır ve bu durum yakıt damlacıkları içinde daha etkisiz patlamalara neden olmaktadır (Çekirdeklenmenin buharlaşma sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelmesi gerekirken daha düşük sıcaklıkta meydana gelmesinden dolayı).



Şekil 4.8 Çalışma rejimlerine göre, birim krank açısında salınan ısı miktarının (Q) ve silindir içi basıncın (Pc) zamanla değişimi (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)

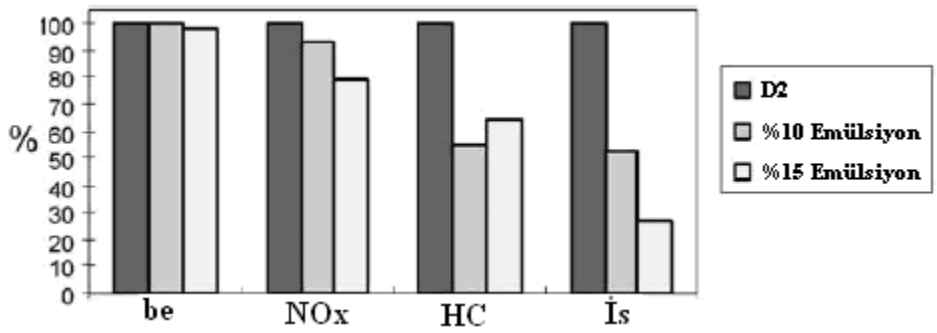
Şekil 4.8'de de görüleceği gibi, su-diesel emülsiyonu kullanılması sonucunda birim zamanda açığa çıkan ısı miktarında artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni uzun süren tutuşma gecikmesinden dolayı karışımın daha iyi gerçekleşmiş olması gibi gözükmektedir. Bu şekilde yanma işleminin kinetik fazında yakıtın daha büyük bir kısmı yanacaktır. Ayrıca emülsiyon yakıtlarının tutuşma bölgelerinin, normal diesel yakıtlarından daha farklı olduğu da dikkate alınmalıdır. Tutuşma normal diesel yakıtında yanma odasının tam ortasında meydana gelirken; emülsiyonlarda yanma odasının tabanında ya da birçok noktasında aniden meydana gelmektedir. Alev tutuşma bölgelerinden yanma odasına yavaşça yayılmakta, bu yüzden emülsiyonlarda parlak alevin tüm yanma odasını kaplaması için normalden iki katı kadar ya da daha fazla zaman gerekmektedir. Bu durum tutuşma gecikmesini arttırmaktadır ve karışımın daha iyi oluşması için zaman tanınmış olup ve tutuşmanın başlamasından sonra da daha iyi yanma meydana gelerek daha çok ısı açığa çıkmaktadır. Bazı deneysel araştırmalar, spreyin uç kısımlarındaki parlak alev bölgesi içinde, damlacık gruplarının güçlü **mikro patlamalar** meydana getirdiklerini göstermektedir. Bu patlamalar alevin şeklini ve parlaklığını (küçük, az parlak ve yuvarlak olarak), damlacıklar içindeki aşırı-ısıtılmış su buharının patlamalarına bağlı olarak etkiler. Mikro patlamaların boyutları çok küçük değerlerden birkaç mm çapa kadar değişir. Emülsiyon yakıtlarda meydana gelen mikro patlamalar; yakıtın silindir içindeki havayla daha iyi karışmasını sağlamakta ve bu durum

daha hızlı ve verimli bir yanmanın meydana gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca sonuç olarak yanmanın başlangıcında daha fazla ısı açığa çıkmasına neden olmaktadır.

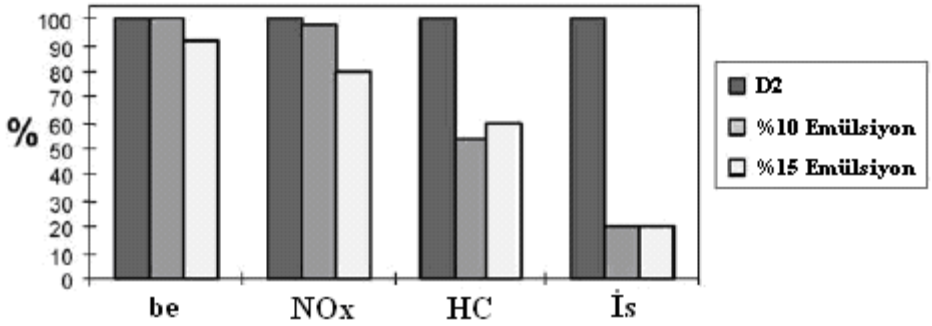
4.1.2 Deneysel Analiz

N. Samec, B.Kegl ve R. Dibble, enjeksiyon ve yanma simülasyonlarına ek olarak yaptıkları deneysel çalışmada, hava soğutmalı, dört silindirli, direk püskürtmeli bir diesel kamyon motoru kullanmışlardır. Üç farklı çalışma rejiminde (püskürtme simülasyonunun gerçekleştirildiği çalışma şartları) deney gerçekleştirilmiş ve her bir rejim için normal diesel yakıtı (D2), %10 su katkılı ve %15 su katkılı diesel yakıtı kullanılmıştır. Eksoz gazlarındaki NO_2, NO, THC, CO ve is değerleri ölçülmüştür.

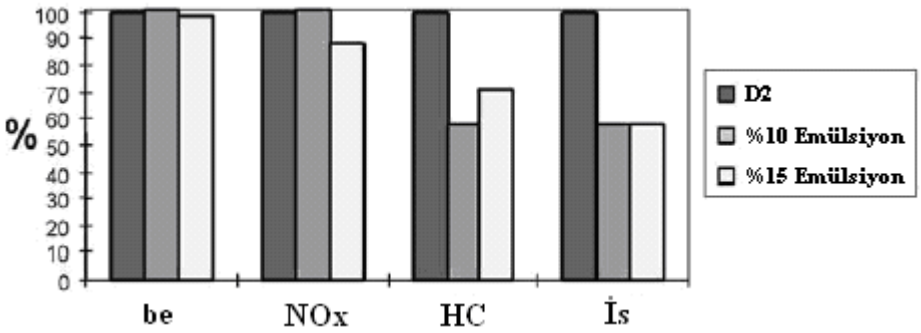
Daha önce kendilerinin ve diğer araştırmacıların yapmış olduğu silindir içerisine tek noktadan ya da çok noktadan yakıt püskürtülmesi yöntemiyle alakalı deneylerden elde edilen sonuçlara kıyasla emülsiyon tekniğinin daha etkili olduğunu ve yakıt tüketiminde artış olmadığını gözlemlemişlerdir. Ve bu yöntemin uygulanması için motorda herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duyulmadığı için, en ucuz yöntemdir. **[5]**



Şekil 4.9 Bağıl eksoz emisyonu ve özgül yakıt tüketimi değişimi (be). Motor çalışma rejimi pe=10 bar, n=1700 rpm. (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)



Şekil 4.10 Bağıl eksoz emisyonu ve özgül yakıt tüketimi değişimi (be). Motor çalışma rejimi pe=8 bar, n=1700 rpm. (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)



Şekil 4.11 Bağıl eksoz emisyonu ve özgül yakıt tüketimi değişimi (be). Motor çalışma rejimi pe=5 bar, n=1700 rpm. (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)

Çizelge 4.2 İlave edilen su miktarına bağlı olarak ortalama kirletici emisyon değişim miktarları (% olarak) (Numerical and experimental study of water / oil emulsified fuel combustion in a diesel engine; Samec N., Kegl B., Dibble R, 2002)

Emülsiyon içindeki su miktarı (%)	**NO_x**	**THC**	**İs**
10	-20	-52	-68
15	-18	-33	-75

Grafiklerden görüleceği üzere yüksek motor yüklerinde yüksek is azalımı gerçekleşmektedir. Yüksek yüklerde daha fazla yakıt püskürtülmekte ve bu ayrıca daha fazla su miktarının silindir içine sokulması anlamına gelmektedir. Püskürtülen damlacıkların fazlaca ihtiva etmiş oldukları su, mikro patlamalara ve ikincil atomizasyona neden olmakta ve yanmanın iyileşmesini sağlayarak is oluşumun azaltmaktadır. Düşük yüklerde ise daha az yakıt ve dolayısıyla daha az su silindir içine sokulduğu için is emisyonlarındaki azalma miktarı daha

az olmaktadır. **[5]**

Yapılan deney sonucunda emülsiyon kullanımının, yakıt tüketiminde artış meydana getirmeden eksoz gazı içerisindeki azot oksit derişimini %20 ve is miktarını da %50 civarında azalttığı gözlemlenmiştir. **[5]**

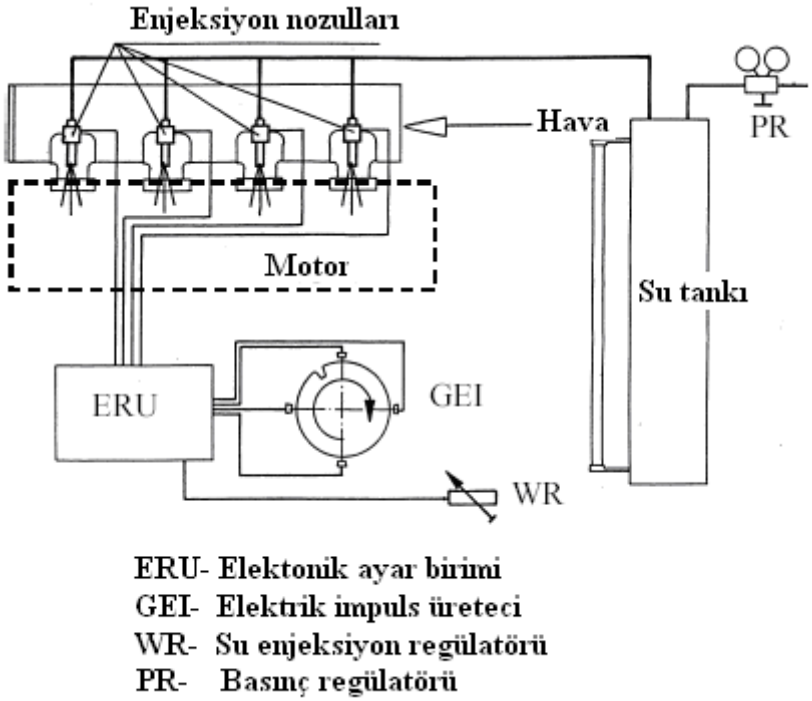
4.2 Emme Manifolduna Su Püskürtülmesi

İs ve NO_x emisyonlarını azaltmak amacıyla uygulanan değişik yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan biri de Koketsu et al. (1996) tarafından uygulanan hava içerisine su ilavesidir(WIA). Diğer yöntem ise daha önce değinildiği üzere yakıt içerisine su ilavesidir(WIF). WIA yöntemi yanma işleminde daha çok termal etkiye sahip iken WIF yöntemi yanma işleminin kimyasını etkilemektedir ve bu nedenle NO_x-PM emisyonlarının azaltılmasında daha etkili bir yöntemdir. N. Samec, B.Kegl ve R. Dibble yapmış oldukları sayısal ve deneysel çalışmada motorlarda hava içerisine su ilave yöntemini (Water In Air), iki farklı teknikle incelemişler ve ayrıca yakıt içine su ilave yöntemini de farklı su içeriğine sahip emülsiyonlar kullanarak gözlemlemişlerdir. Hava içerisine su püskürtme yönteminde ilk olarak su motorun emme manifoldundaki hava akışı içerisine periyodik olarak püskürtülmüştür (WIA1). İkinci yöntem ise turbo şarj sisteminin nozuluna suyun sürekli olarak püskürtülmesiyle gerçekleştirilmiştir(WIA2). **[7]**

Su ilave yönteminin eksoz emisyonlarına etkisini incelemek amacıyla yapmış oldukları deneysel çalışmada hava soğutmalı, dört silindirli bir diesel motoru kullanmışlardır. Motora su enjeksiyon yöntemini gerçekleştirebilmek amacıyla ekipmanlar takviye edilmiştir. **[7**

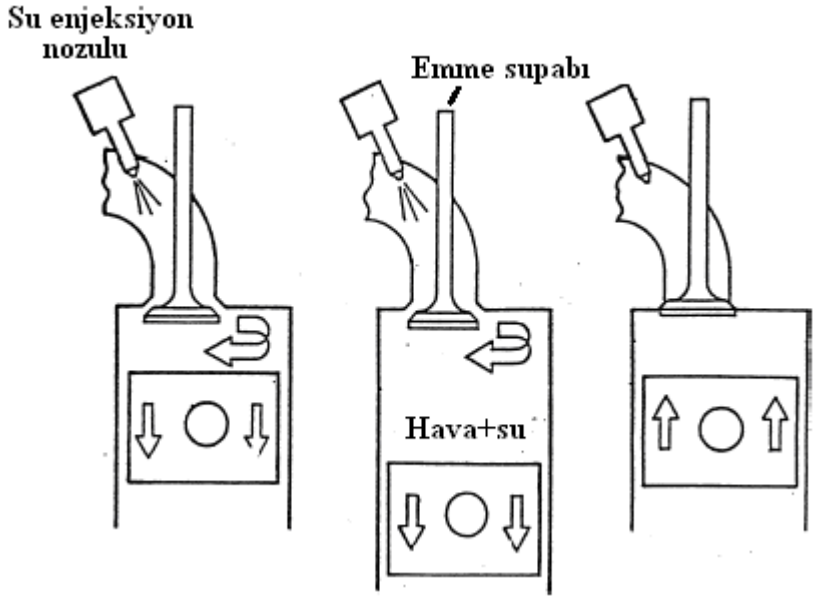
1.Yöntem: Emme havasına su püskürtülmesi

Emme manifoldundaki hava akışı içerisine su püskürtme işlemi Şekil 4.12'de görülen sistemle gerçekleştirilmiştir. Bu sistem hava/su oranının serbestçe ayarlanmasına imkân vermektedir. **[7]**



Şekil 4.12 Su Enjeksiyon Sistemi (Emme havası içerisine). (Reduction of NOx and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.).

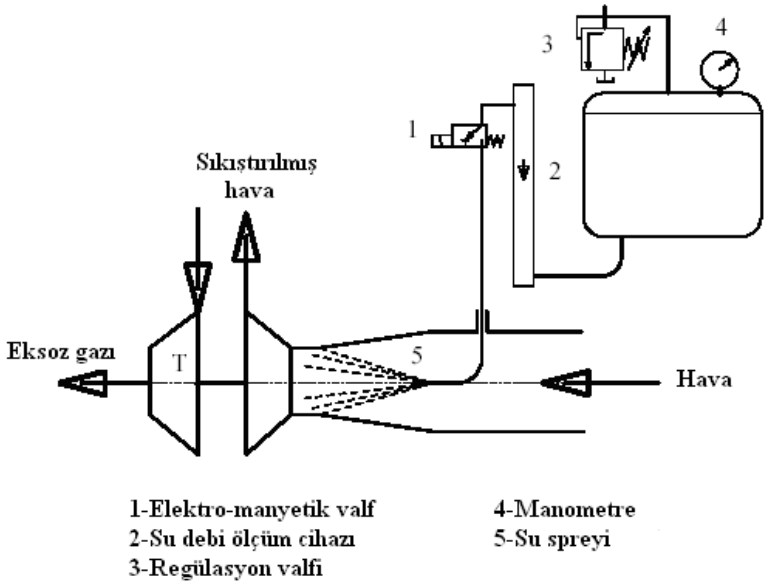
Hava akışı içerisine püskürtülen su miktarı püskürtme basıncıyla birlikte değişmektedir ve basınç değeri su tankının basıncını kontrol eden elektronik bir basınç kontrol regülatörü ile ayarlanmaktadır. Su püskürtme işlemi TDC'den sonra 20 ˚KMA'nda başlamakta, emme stroku boyunca devam etmekte ve emme supabının kapanmasıyla birlikte sona ermektedir. Su enjeksiyon nozulunun konumu Şekil 4.13'de görülmektedir. **[7]**



Şekil 4.13 Su enjeksiyon nozulunun konumu (Reduction of NOx and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.).

2.Yöntem: Turbo şarj nozuluna su püskürtülmesi

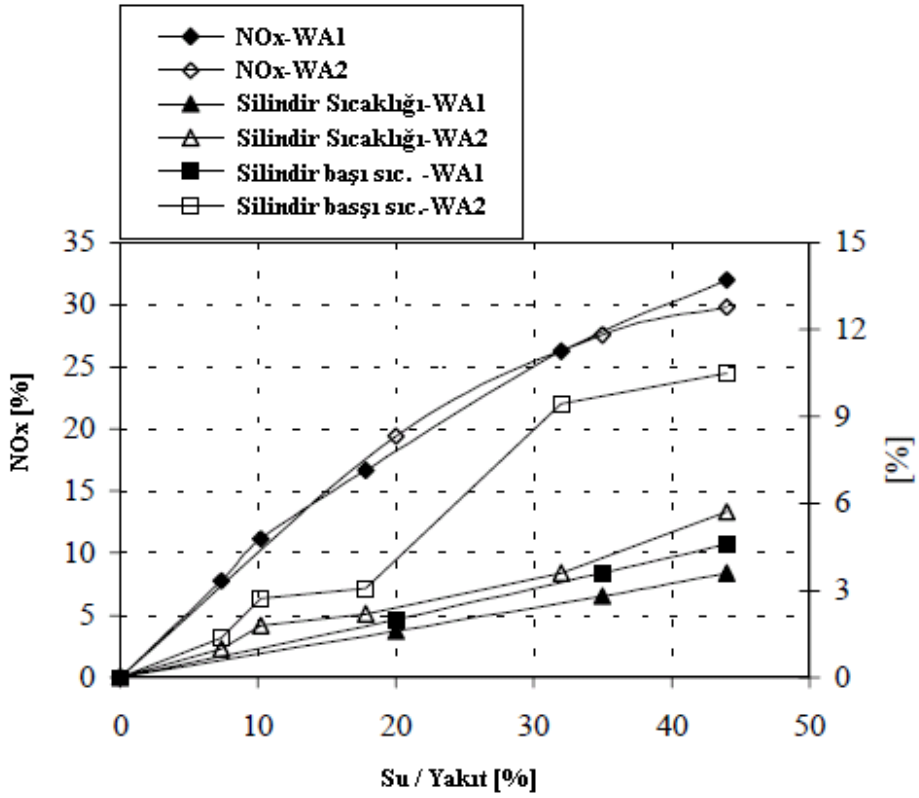
Bu yöntemde Şekil 4.14'de görüldüğü gibi su turbo şarj sistemine sürekli olarak püskürtülmektedir. Bu sistem kurulum kolaylığı bakımından çoklu su püskürtme sistemlerinden daha avantajlıdır. **[7]**



Şekil 4.14 Su enjeksiyon sistemi (Turbo nozuluna). (Reduction of NO_x and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.).

Araştırmacılar yapmış oldukları deney sonucunda her iki yöntemin de azot oksit emisyonları üzerinde hemen hemen aynı etkiye sahip iken is emisyonunda fazla etkili olmadığını

görmüşlerdir. Ancak ikinci yöntemin motorda meydana gelen termik yükler bakımından daha etkili olduğunu ifade etmektedirler. **[7]**



Şekil 4.15 NO_x emisyonu ve ısıl yük azalım oranları (Maksimum güçte çalışma durumunda). (Reduction of NOx and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.)

Çizelge 4.3 İlave edilen su miktarına bağlı olarak NO ve İs değişimi (WIA) (Reduction of NO_x and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine, Samec N. , Dibble R. , Chen Y.)

	%10 Su	**%20 Su**
Sıcaklık	%-2	%-4
NO	%-5	%-10
İs	%0	%+3.6

4.3 Direk Su Enjeksiyonu

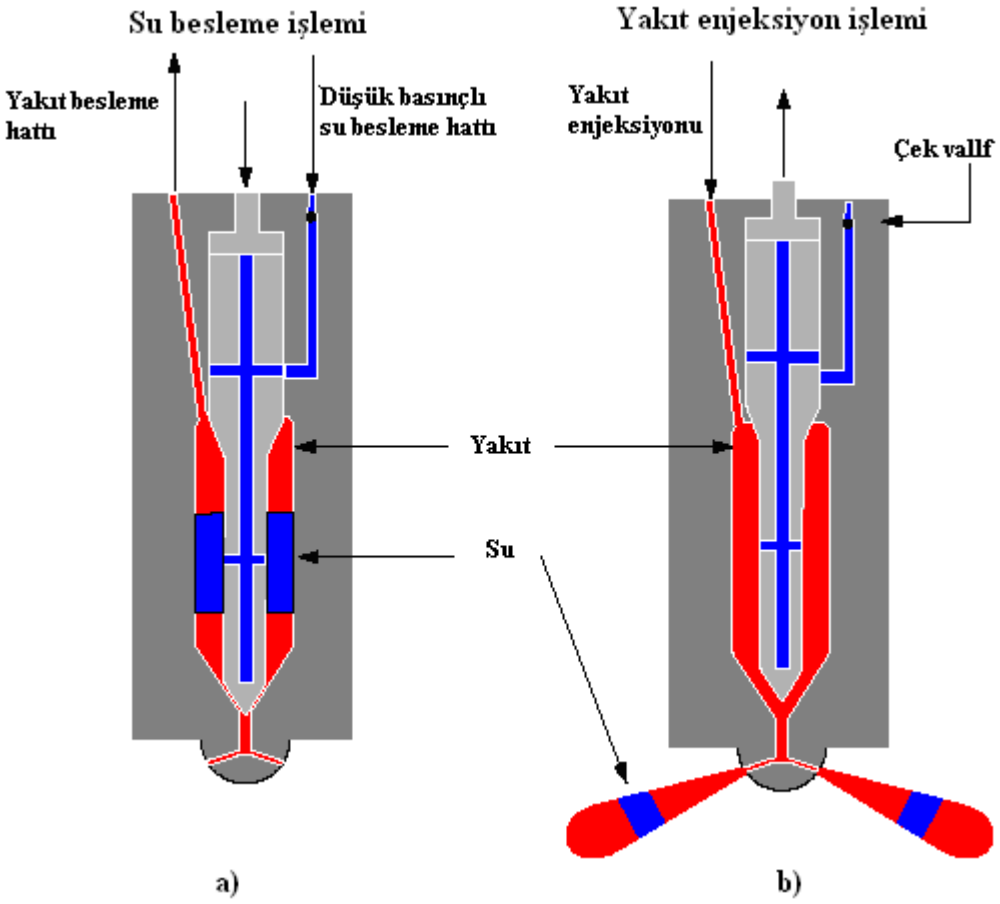
F. Bedford vd. yapmış oldukları deneysel çalışmada silindir içerisine direk su püskürtme işleminin emisyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında yakıt ile suyu özel tasarımlı, tek bir enjektörden yanma odası içerisine püskürtmüşlerdir. Burada yakıt ile suyun

sadece püskürtme esnasında birleştiğine dikkat edilmelidir ve direk püskürtme işlemi bir emülsiyon yöntemi değildir. **[8]**

Emme havası içerisine su püskürtme (Fumigasyon) yöntemi diesel motorlarda azot oksit emisyonlarının azaltılmasını sağlamaktadır ancak bazı sakıncaları da mevcuttur. Bu yöntemle püskürtülen su yanma odası içerisinde etkili olabileceği bölgelere ulaşamamakta ve emisyonlar üzerinde daha az iyileşme meydana getirmektedir. Bu nedenle fumigasyon yönteminde direk püskürtme yöntemiyle karşılaştırıldığında aynı oranda NOx azalması sağlamak için yaklaşık olarak iki kat daha fazla suya ihtiyaç duyulmaktadır. Ek olarak yanma işleminden sonra sıvı halde su bulunması yağın yapısını değiştirebilmekte ve bu durum motorda aşınmalara neden olmaktadır. **[8]**

Alternatif olarak kullanılan emülsiyonlar azot oksit ve PM emisyonlarında düşüş sağlamakta ancak yanma sıcaklığını gelişi güzel düşürmektedir. Yanma işleminde çok erken meydana gelen sıcaklık düşüşleri tutuşma gecikmesini ve motor gürültüsünü artırmaktadır. Ayrıca çalışma şartlarında yakıt içerisindeki su oranı sabittir ve soğukta çalışma veya geçici çalışma koşullarında değiştirilememektedir. **[8]**

Direk su püskürtme yönteminin fumigasyona göre avantajı püskürtülen suyun alev bölgesine ve silindir duvarlarına yakın yerlerde bulunmasıdır. Emülsiyonların aksine direk su püskürtme yöntemi soğukta ve değişik çalışma koşullarında su oranını değiştirme imkanı sunmaktadır. Buna rağmen enjeksiyon sisteminin direk püskürtme işlemi için geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Silindir başına tek bir enjektör kullanılarak toplam maliyetin paralel püskürtme sisteminden daha az olması amaçlanmaktadır. Direk enjeksiyon sisteminde kullanılan tipik bir enjektörün şematik resmi aşağıda görülmektedir. **[8]**



Şekil 4.16 Direk su enjeksiyon yönteminde kullanılan özel enjektörün şematik resmi (Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion, Bedford F. , Rutland C. , 2000)

Bu enjektörün temel prensibi su ile yakıtın aynı enjektörden silindir içerisine püskürtülmesidir. Enjektör; su besleme olayının gerçekleştirildiği iç kısımdaki doğrusal hareketli tek yönlü valf ve dış gövde kısmından meydana gelmektedir. Şekil 4.16 püskürtme olayından önce su besleme işlemini göstermektedir. Düşük basınçlı su besleme sisteminden gelen su, tek yönlü valften geçerek enjektörün bir kısmını doldurur ve dolgu suyu miktarı kadar yakıt, yakıt besleme sistemine geri döner. Püskürtme işleminin başlangıcında yakıt besleme sisteminden yüksek basınçta yakıtın enjektöre gönderilmesiyle, tek yönlü valf yukarı doğru hareket ederek su besleme hattına yakıt karışmasını engeller ve enjektör ucundan yakıt-su karışımı püskürtülmüş olur. Enjektörün içindeki karışım miktarı tam olarak bilinmemektedir ve enjektör tasarımına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Tipik olarak enjektör içerisindeki ikincil bölmenin daha geniş olması daha fazla miktarda karışımın meydana gelmesine; daha küçük olması ise daha az miktarda karışımın meydana gelmesine neden olmaktadır. Motor hesaplarından görüldüğü üzere enjektörün uç bölgelerinde su bulunması önemli oranda tutuşma gecikmesine neden olmaktadır. **[8]**

Yapmış oldukları çalışmada silindir içerisine direk su enjeksiyonunun etkisini kiva-3v

kodlarını temel alan CFD (Computational Fluid Dynamics) programı kullanılarak incelemişlerdir. Yapılan motor hesaplamalarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

%44 yükte çalışma durumunda SFC, PM ve NO_x emisyonlarının azaldığını, %86 yükte çalışma durumunda ise sadece NO_x emisyonlarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları hesaplamalardan azot oksit ve is emisyonlarını azaltmak için silindir içi pik sıcaklıkları düşürmek gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Püskürtme avansının artırılmasının %44 yük durumunda SFC, PM ve NO_x emisyonlarında önemli oranda azalma sağlarken; %86 yük durumunda yakıt sarfiyatında biraz artışa neden olduğunu, geniş oranda da PM ve NO_x emisyonlarının azalmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. **[8]**

Su püskürtülmesiyle sıvı fazdaki suyun buharlaşması ve alev etrafındaki gazın özgül ısısının artmasından dolayı yanma sıcaklığında düşüş meydana gelmektedir. Fazla miktarda su eklenmesiyle püskürtülen su hacmi artmakta ve böylece püskürtme süresi uzamakta ve sonuç olarak is emisyonunda artış meydana gelmektedir.

5. DOLGU HAVASINI ULTRASONİK NEMLENDİRİCİDEN ELDE EDİLEN BUHAR İLE NEMLENDİRME DENEYİ

5.1 Kullanılan Yöntem ve Materyaller

5.1.1 Yöntem

Yanma odasına buhar fazında su göndermenin yanma sonu sıcaklığı üzerindeki, dolayısıyla NO_x emisyonları üzerindeki etkisi daha önce yapılan araştırmalarda ortaya konmuştur. Şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalarda, su yanma odasına ya direk olarak enjektörlerle tek veya çok noktadan püskürtülmüş ya da emme manifoldu içerisine buhar fazında gönderilmiş veya emülsiyonlar ile suyun silindir içerisinde varlığı sağlanmıştır. Bu yapılan çalışmada motorun emme havası içerisine, suyun çok küçük boyutlarda, partiküller (≈1 mikron) halinde gönderilmesinin NO_x ve is emisyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Diesel motoru için ısı analizi yapılarak, su buharının yanma sonu sıcaklığı ve dolayısıyla NO_x emisyonu üzerindeki etkisi öncelikle analitik olarak incelenmiş, daha sonra ise deneysel olarak tespit edilmiştir. Ancak diğer yöntemlerden farklı olarak emme havasına gönderilen su parçacıkları, bir ultrasonik nemlendirici vasıtasıyla elde edilmiştir ve soğuk buhar halinde manifolda transfer edilmiştir. Motorun emdiği hava ve bu hava miktarının deney ortamı koşullarında yoğuşma olmadan taşıyabileceği maksimum su miktarı hesaplanmış ve yeterli debiyi sağlayabilecek ultrasonik nemlendirici cihazı temin edilmiştir. Silindir içerisinde su buharı varlığının yanma sonu sıcaklığına etkisi, diesel motoru için ısı analizi yapılarak ortaya konmuştur.

Cihaz tarafından üretilen nem, deney motorunun dolgu havası içerisine, uygun bir konstrüksiyonla transfer edilmiştir.

5.1.1.1 Isı Analizi

Silindir içerisine buhar fazında su göndermenin, yanma sonu sıcaklığı ve dolayısıyla NO_x emisyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada su buharı varlığının yanma sonu sıcaklığına etkisi Diesel motoru için ısı analizi yapılması ile öncelikle analitik olarak incelenmiştir.

Diesel motorunda; yakıt + hava karışımının yanma ısısı ile karışımın sıkıştırma işlemi sonundaki ortalama molar spesifik ısısının toplamının, yanma sonu ürünlerinin ortalama molar spesifik ısısına eşit olduğu düşünülmüştür. Yanmanın sabit basınçta gerçekleştiği düşünülerek aşağıdaki yanma denklemi elde edilmiştir.

$$\frac{\xi_z.H_u}{M_1(1+\gamma_r)} + \left(\overline{C_v}\right|_0^{T_c} + \bar{R})T_c = \mu\left(\overline{C_v}\right|_0^{T_z} + \bar{R})T_z \quad \textbf{(5.1)}$$

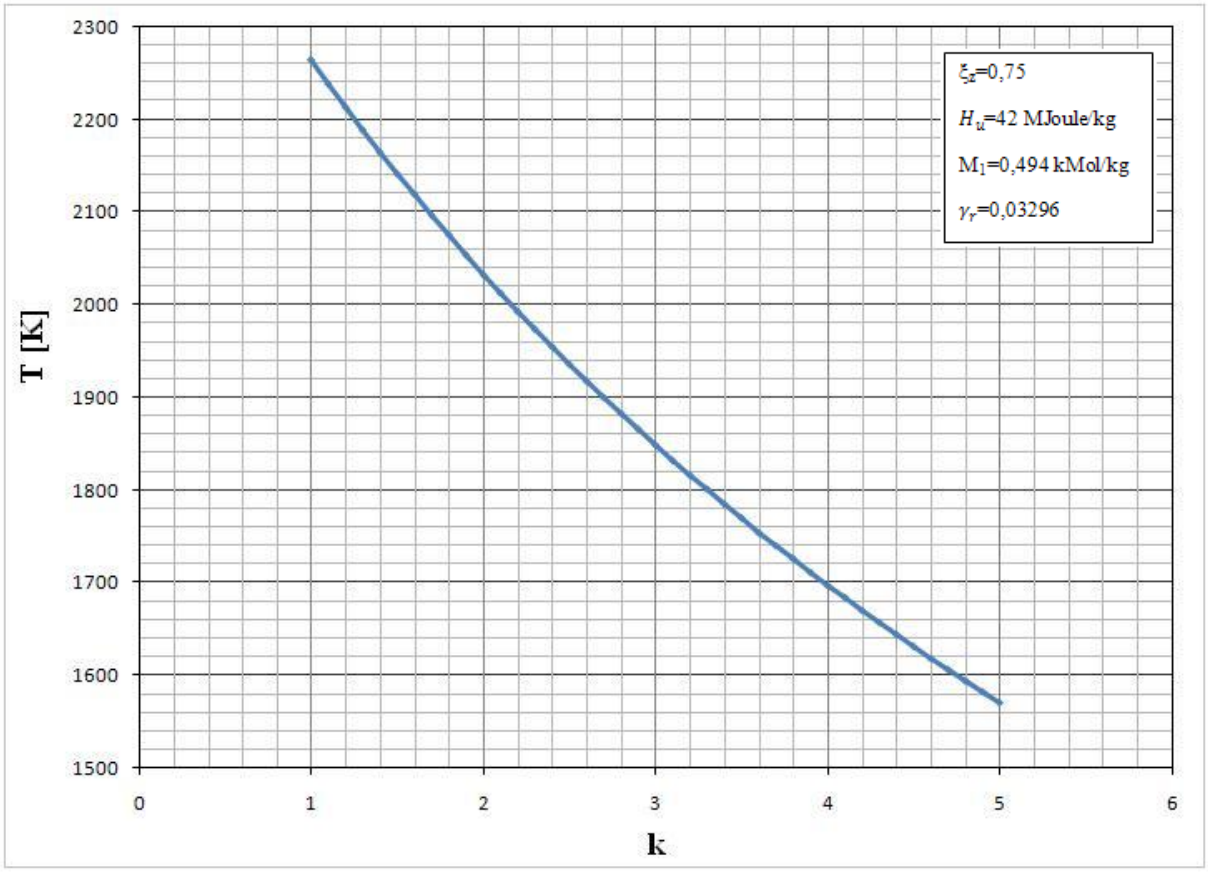
Diesel motorunda yanma sonu ürünlerinin ortalama molar spesifik ısısı ise (5.2) eşitliği ile hesaplanmıştır ve ortalama özgül ısılarının sıcaklıkla lineer değiştiği kabul edilmiştir. Eşitlikteki "y" çarpanları, yanma ürünlerinin hacimsel oranlarını belirtmektedir. (A, B gaz katsayıları ve denklemler için kaynak [10]'dan yararlanılmıştır).

$$\overline{C_v}\Big|_0^{T_z} = y_{CO_2}.A_{CO_2} + y_{H_2O}.A_{H_2O} + y_{O_2}.A_{O_2} + y_{N_2}.A_{N_2} + (y_{CO_2}.B_{CO_2} + y_{H_2O}.B_{H_2O} + y_{O_2}.B_{O_2} + y_{N_2}.B_{N_2})T_z \quad \textbf{(5.2)}$$

Yanma odasına sokulan su buharı miktarı, (5.2) ifadesindeki yanma sonucunda ortaya çıka su buharı miktarına bir "k" katsayısı ile hesaba dahil edilmiştir (k=1: Su buharı ilavesi yok).

$$\overline{C_v}\Big|_0^{T_z} = y_{CO_2}.A_{CO_2} + \boldsymbol{k}.y_{H_2O}.A_{H_2O} + y_{O_2}.A_{O_2} + y_{N_2}.A_{N_2} + (y_{CO_2}.B_{CO_2} + \boldsymbol{k}.y_{H_2O}.B_{H_2O} + y_{O_2}.B_{O_2} + y_{N_2}.B_{N_2})T_z \quad \textbf{(5.3)}$$

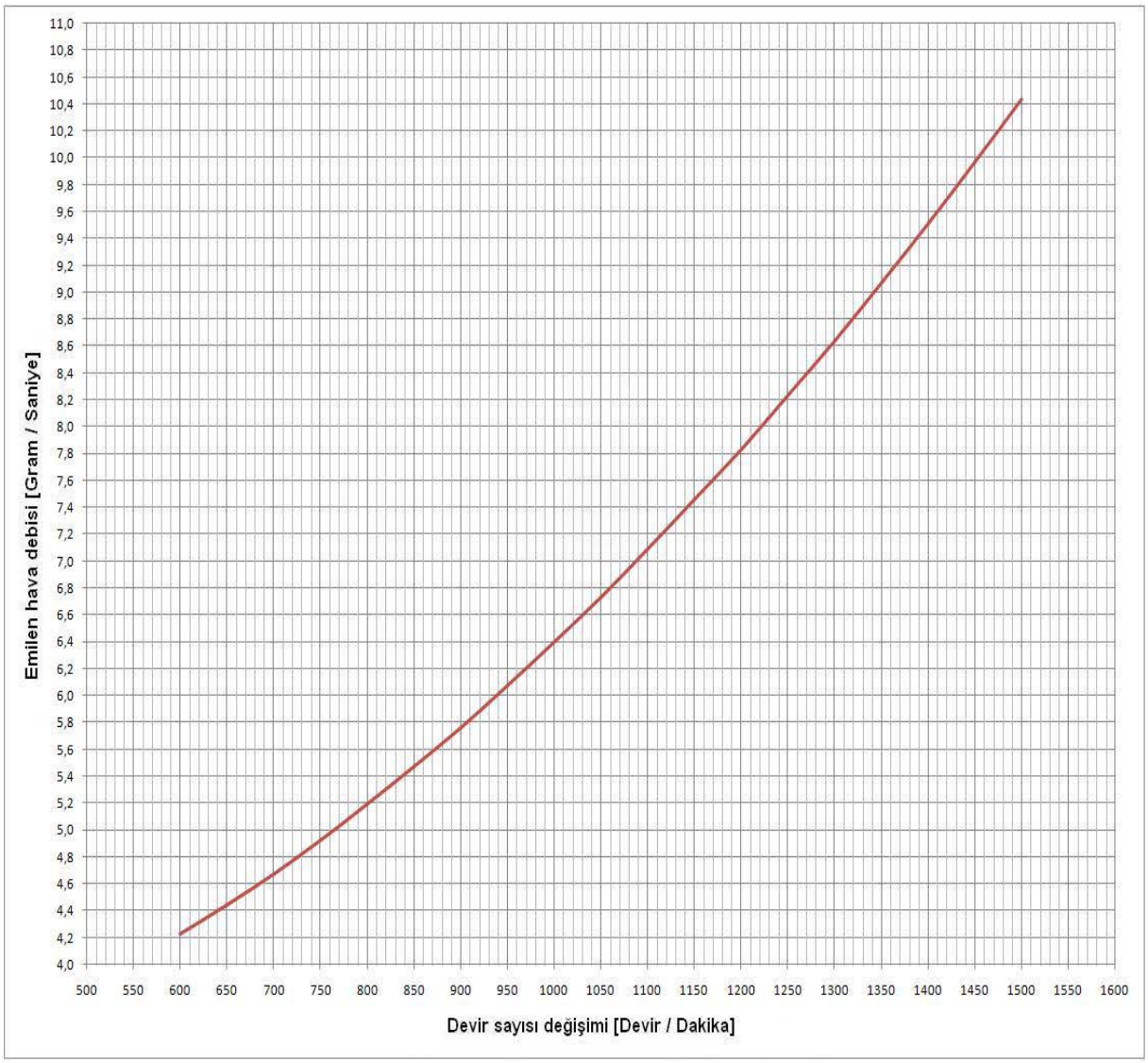
Yanma denklemi uygun kabullerin yapılmasıyla, artan "k" değerlerine karşılık gelen yanma sonu sıcaklıkları elde edilmiştir. Su buharı ilavesinin yanma sonu sıcaklığını lineere yakın karakteristikte düşürdüğü tespit edilmiştir.



Şekil 5.1 Nemlendirme etkisi ile silindir içi maksimum sıcaklığın değişimi

5.1.1.2 Emilen Hava Miktarının Belirlenmesi

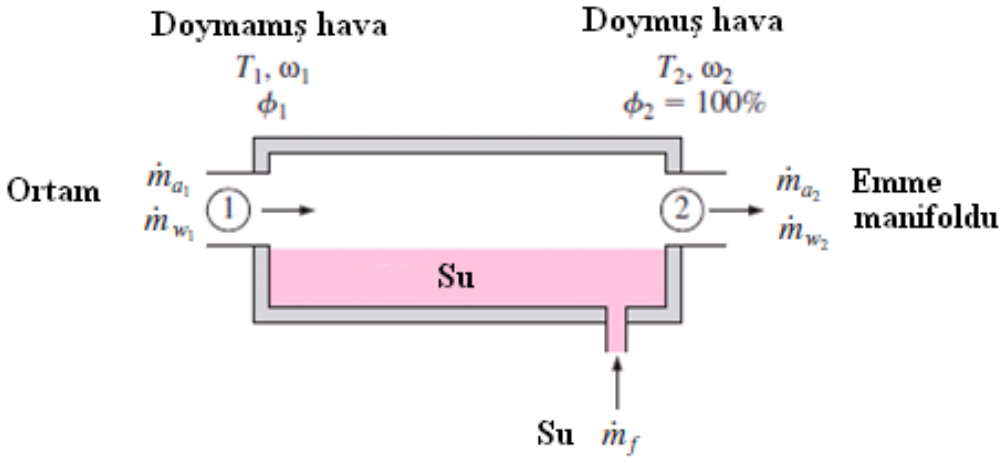
Deney motorunun teknik özellikleri dikkate alınarak, emilen hava debisinin devir sayısına göre değişim karakteristiği belirlenmiştir. Bir dirsek vasıtasıyla ultrasonik nemlendirici, emme manifolduna bağlanmıştır. Emilen havanın vakum etkisi ile cihazdan gelen nemi süpürmesi sağlanmıştır. Şekil 5.2'de cihaz sete bağlı durumda iken emilen hava debisinin devir sayısı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 5.2 Emilen hava miktarının devir sayısı ile değişimi (T=25 ˚C, P=101.3 kPa)

5.1.1.3 Su Buharı (Nem) Miktarının Hesaplanması

Ortam şartlarından emilen havanın taşıyabileceği maksimum nem miktarının devir sayısına bağlı değişimi elde edilmiştir.



Şekil 5.3 İki girişli ve bir çıkışlı, düzgün akışlı, adyabatik sistem

Şekilde görüldüğü gibi (1) şartlarında ortamdan emilen doymamış hava içerisine su ilave edilerek (2) şartlarında doymuş hale gelerek %100 bağıl neme ulaştığı düşünülmüştür. Akışın adyabatik ve düzgün akışlı olduğu kabul edilmiş, kinetik-potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir. İki girişli ve bir çıkışlı, düzgün akışlı, adyabatik bir sistem için kütlenin ve enerjinin korunumu denklemleri uygulanmıştır. T_2 sıcaklığının ölçülen yaş termometre sıcaklığına eşit olduğu, P_2 basıncının ise ortam basıncına eşit olduğu kabul edilmiştir.

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a (w_2 - w_1) \quad \textbf{(5.4)}$$

$$\omega_1 = \frac{C_p.(T_2 - T_1) + \omega_2.h_{fg2}}{h_{g1} - h_{f2}} \quad \textbf{(5.5)}$$

$$\omega_2 = \frac{0{,}622.P_{g2}}{P_2 - P_{g2}} \quad \textbf{(5.6)}$$

$$\Phi_1 = \frac{\omega_1.P_2}{(0{,}622 + \omega_1).P_{g1}} \quad \textbf{(5.7)}$$

$$\dot{m}_a = \frac{1 + \omega_1}{\dot{q}_h} \quad \textbf{(5.8)}$$

(5.4) eşitliği kullanılarak ortam şartlarından emilen havanın taşıyabileceği maksimum nem debisi hesaplanmış ve devir sayısına bağlı olarak değişimi elde edilmiştir (Şekil 5.3).

ω_1 **:** Ortam şartlarındaki havanın mutlak nem değeri

ω_2**:** Doymuş şartlardaki havanın mutlak nem değeri

P_{g1}: Suyun T_1 sıcaklığındaki doyma basıncı

P_{g2}: Suyun T_2 sıcaklığındaki doyma basıncı

h_{g1}: T_1 sıcaklığındaki doymuş su buharının entalpisi

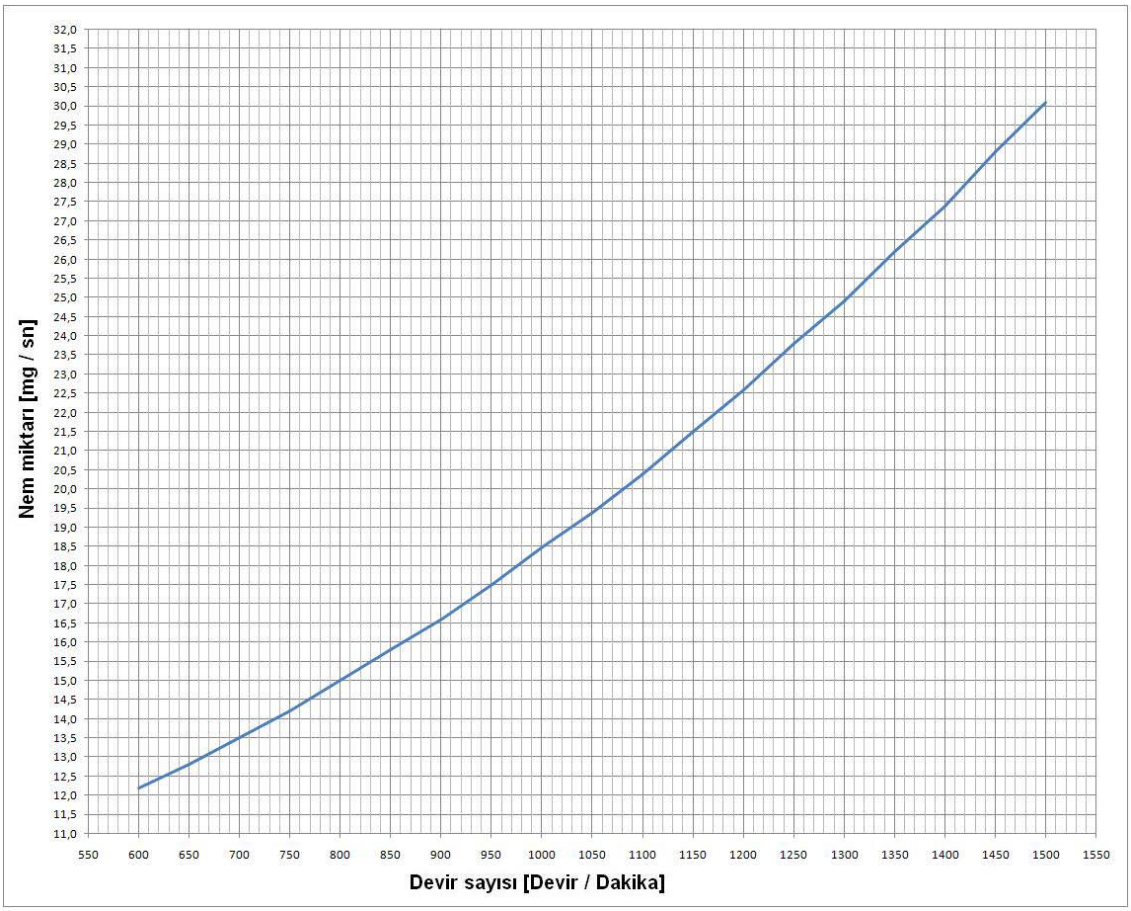
h_{f2}: T_2 sıcaklığındaki doymuş suyun entalpisi

C_p: Havanın sabit sıcaklıkta özgül ısısı (Oda sıcaklığında)

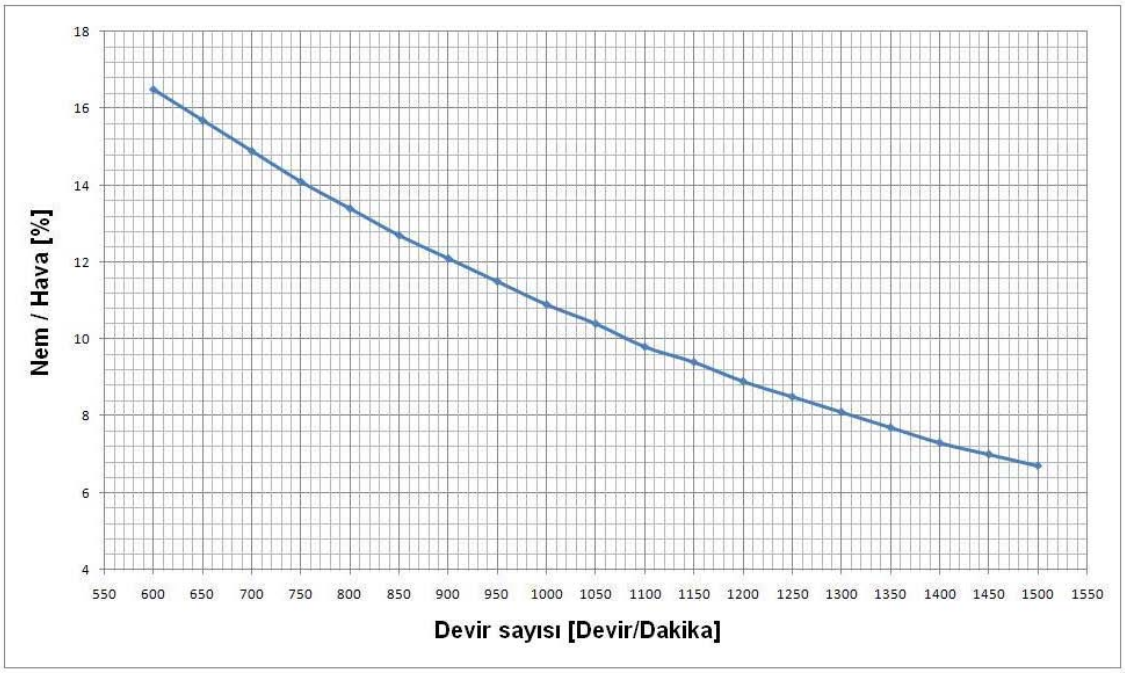
$\dot{m}_a$: Emilen kuru hava miktarı

$\dot{m}_{w1}$: (1) Şartlarında hava içindeki su buharı miktarı

Hesaplamalar sonucunda motorun emdiği havanın, yoğuşma olmaksızın taşıyabileceği azami nem debisi (azami devir sayısında) yaklaşık 30 mg / sn olarak elde edilmiştir. Motorun çalışma esnasındaki ısısından dolayı emme manifoldundan akan havanında sıcaklığında artış olacağından, yoğuşmanın olmayacağı düşünülmüş, bu nedenle dolgu havasına daha yüksek miktarda su gönderilmesi uygun görülmüştür. Buna göre motora bağlanacak olan ultrasonik nemlendirme cihazı 3 kg buhar/saat debi sağlayacak şekilde seçilmiş ve tedarik edilmiştir.



Şekil 5.4 Ortam şartlarında emilen havanın taşıyabileceği azami nem miktarının devir sayısına bağlı değişimi (T=25 ˚C, P=101.3 kPa)



Şekil 5.5 Çevrim başına emilen Nem kütlesi / Hava kütlesi [%] değişimi (T=25 ˚C, P=101.3 kPa)

5.1.2 Materyaller

5.1.2.1 Ultrasonik Nemlendirme Cihazı

Nem ihtiyacını karşılamak için AquaMystique Ultrasonik Nemlendirici kullanılmıştır. Nemlendirici piezoseramik osilatör vasıtasıyla elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedir. Ortaya çıkan mekanik enerji ise su moleküllerini atomize ederek ortalama 1 mikron boyutlarında partiküller elde edilmesini sağlamaktadır. Cihaza bağlı bulunan higrostat ve kontrol paneli ile ortam nemi kontrol edilebilmektedir. Cihazın teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

Model: AquaMystique-II

Kapasite: 3 kg Buhar / Saat

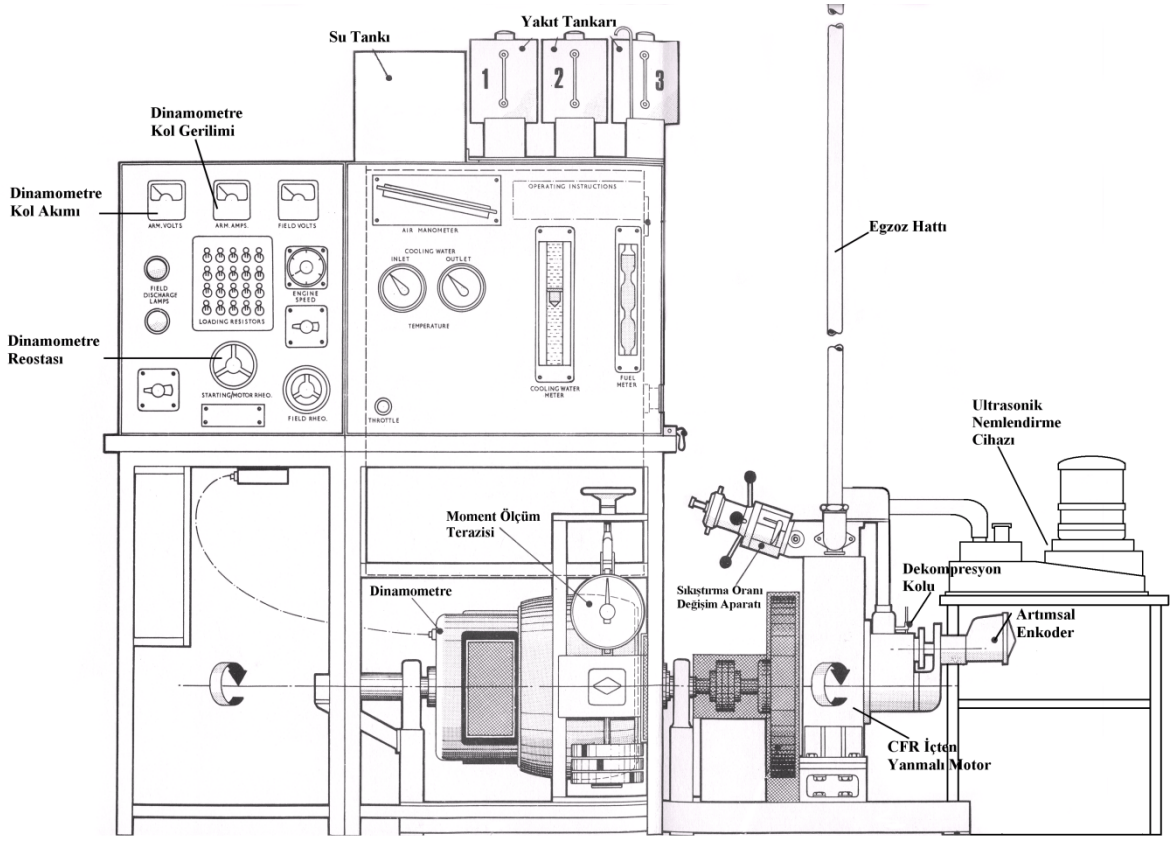
Elektrik tüketimi: 300 Watt/ Saat

Şekil 5.6 Ultrasonik Nemlendirme Cihazı

5.1.2.2 Deney Düzeneği

Deney düzeneği bünyesinde bir Diesel motoru, motor test düzeneği, emisyon analiz cihazı ve is ölçüm cihazı bulunmaktadır.

Deneysel çalışma sırasında Tecquipment marka CFR TD2 deney seti kullanılmıştır. Dört stroklu, tek silindirli, su soğutmalı, değişken sıkıştırma oranlı (23:1–11:1) diesel motor kullanılmıştır. Strok hacmi 0,765 lt olup toplam hacmi 0,799 lt, strok uzunluğu 120 mm ve silindir çapı 90 mm dir. Deney setinin önden görünüşü Şekil 5,5'tedir.



Şekil 5.7 Deney setinin önden görünüşü

Çizelge 5.1 Diesel motorunun teknik özellikleri

Marka	CFR Engine-1977
Toplam hacim	0,799 lt
Strok hacmi	0,765 lt
Sıkıştırma oranı aralığı	23:1–11:1
Strok	120 mm
Silindir çapı	90 mm
Supap sistemi	Külbütör mekanizması
Emme sup. Adedi	1
Egzoz sup. Adedi	1
Emme supabı açılma avansı	0°KMA
Emme supabı kapanma gecikmesi	60° KMA AÖN'dan sonra
Egzoz supabı açılma avansı	25° KMA AÖN'dan önce
Egzoz supabı kapanma gecikmesi	0° KMA

5.1.2.3 Emisyon Ölçüm Cihazı

Emisyon analizleri için AVL DiCOM 4000 tipi bir emisyon cihazı kullanılmıştır. Cihaz CO, CO_2, HC emisyonlarını kızıl ötesi ölçümlerle; O_2 ve NO_x emisyonlarını ise elektrokimyasal ölçümlerle hassas olarak belirleyebilmektedir. Cihazın kalibrasyonu referans gaz ile yapılmıştır.

Çizelge 5.2 AVL DiCom4000 Teknik özellikleri

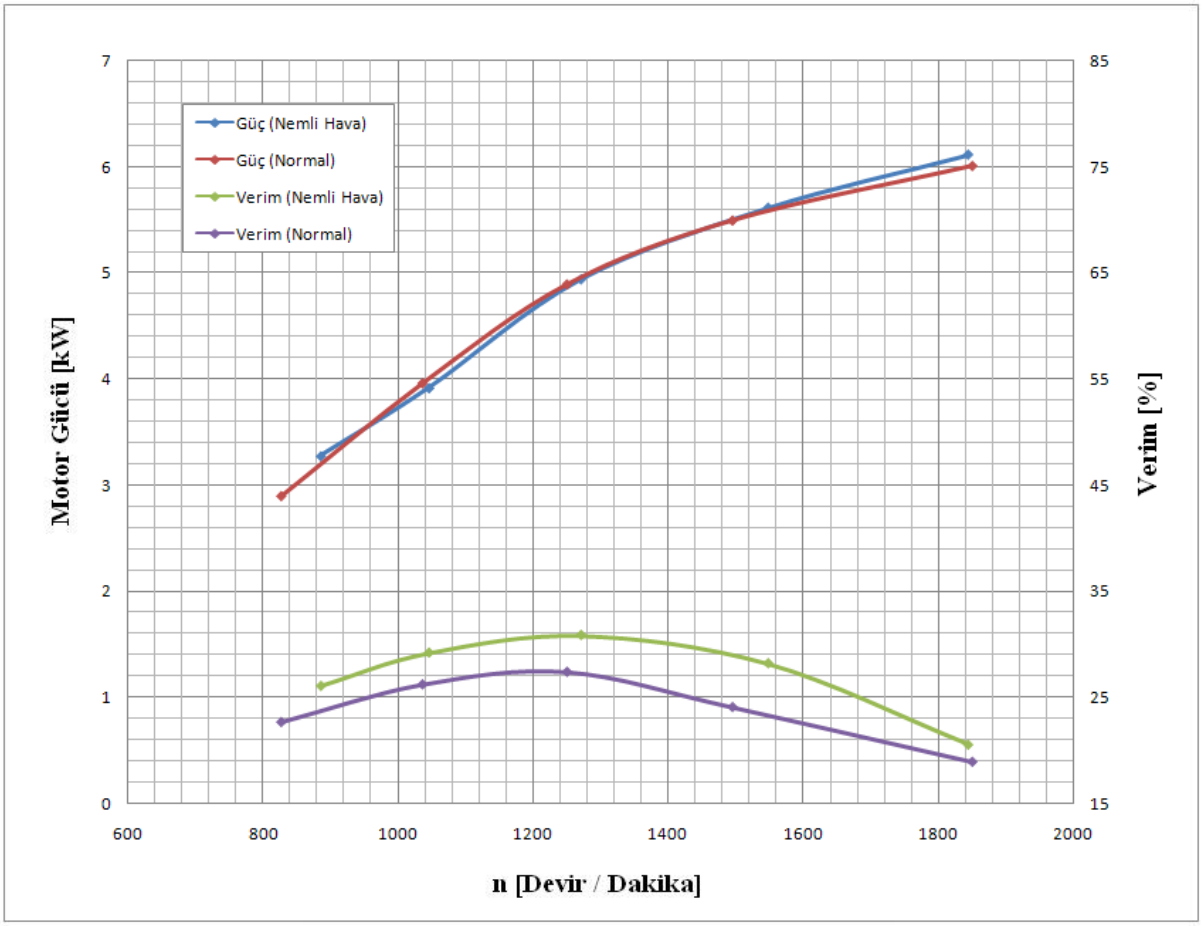
Ölçüm parametreleri	**Ölçüm aralığı**	**Hassasiyet**
Opasite	0-100 %	0,1 %
Motor hızı	250-8000 d/d	10 d/d
Yağ sıcaklığı	0-120 °C	1 °C
CO	0-10 % (hacmen)	0,01 % (hacmen)
CO_2	0-20 % (hacmen)	0,1 % (hacmen)
HC	0-20000 ppm (hacmen)	1 ppm (hacmen)
O_2	0-22 % (hacmen)	0,1 % (hacmen)
NO_x	0-4000 ppm (hacmen)	1 ppm (hacmen)

5.2 Deneysel Çalışma

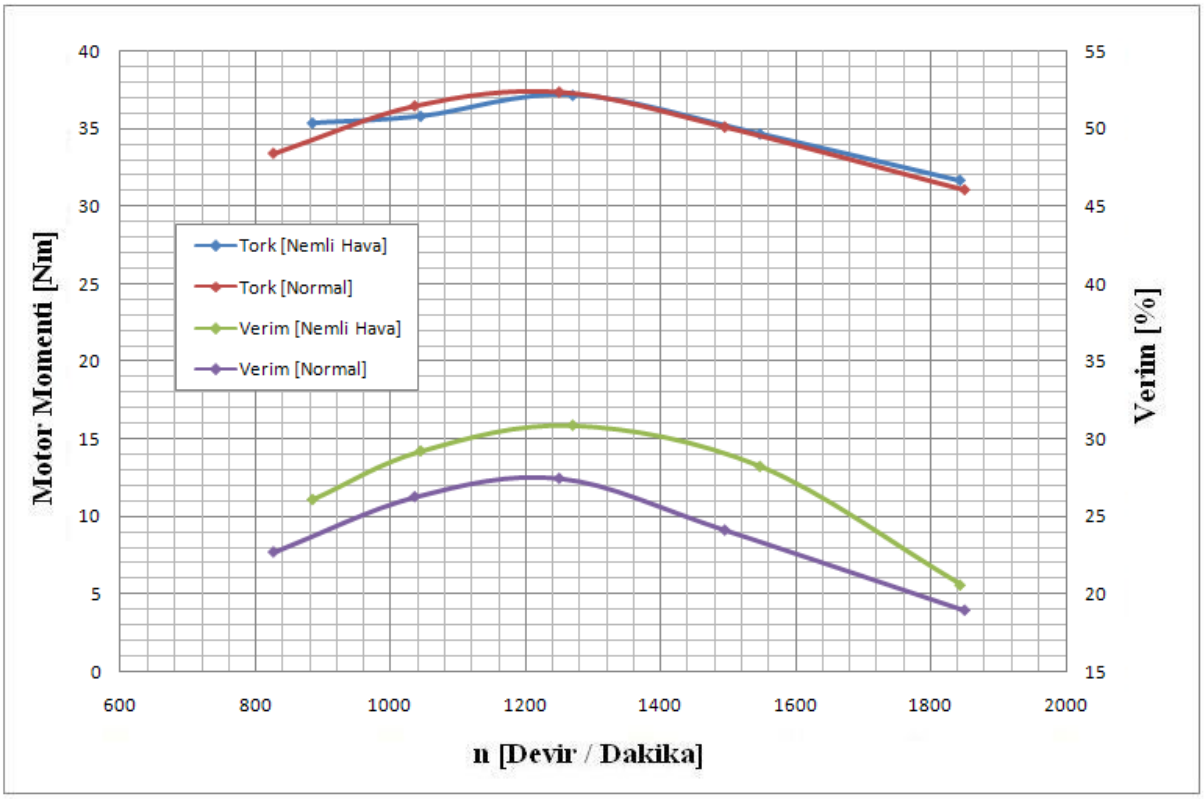
Deneyler sırasında klasik Diesel yakıtı (EN590'a uygun) kullanılmıştır. Deneyde ilk olarak nemli ve nemsiz şartlarda motorun performansı 5 farklı noktada ölçüm yapılarak belirlenmiştir. İkinci deneyde ise en yüksek momentin elde edildiği noktada, motorun nemli ve nemsiz dolgu havası ile çalıştırılması ile deney gerçekleştirilmiştir. Hassas sonuçlar elde etmek amacıyla rejim şartlarında çoklu ölçümlerle elde edilen değerlerin ortalaması alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Nemli şartlarda yapılan deneylerde emme havası içerisine aynı ve sabit debilerde, ultrasonik nemlendiriciden elde edilen nem transfer edilmiştir ve debisi yaklaşık olarak 2,5 kg su buharı / saat' tir.

Deneylerde devir sayısı, motor yükü, yakıt tüketimi, egzozdan atılan CO, CO_2, NO_x, NO, O_2, HC konsantrasyonu, λ ölçülmüş ve emme havasının nemlendirilmesi sonucunda motorun tork, güç, özgül yakıt tüketimi ve egzoz gazı derişimlerindeki değişimler tespit edilmiş ve grafikleri çizilmiştir.

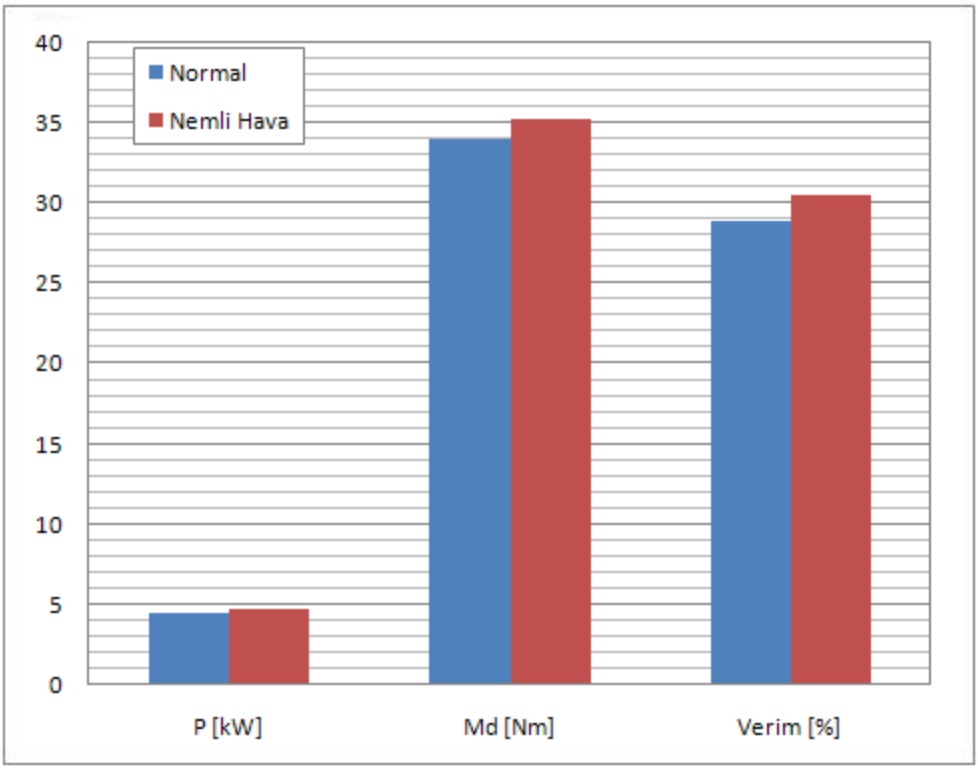
5.2.1 Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.8 Emme havasının nemlendirilmesinin motor karakteristiklerine etkisi



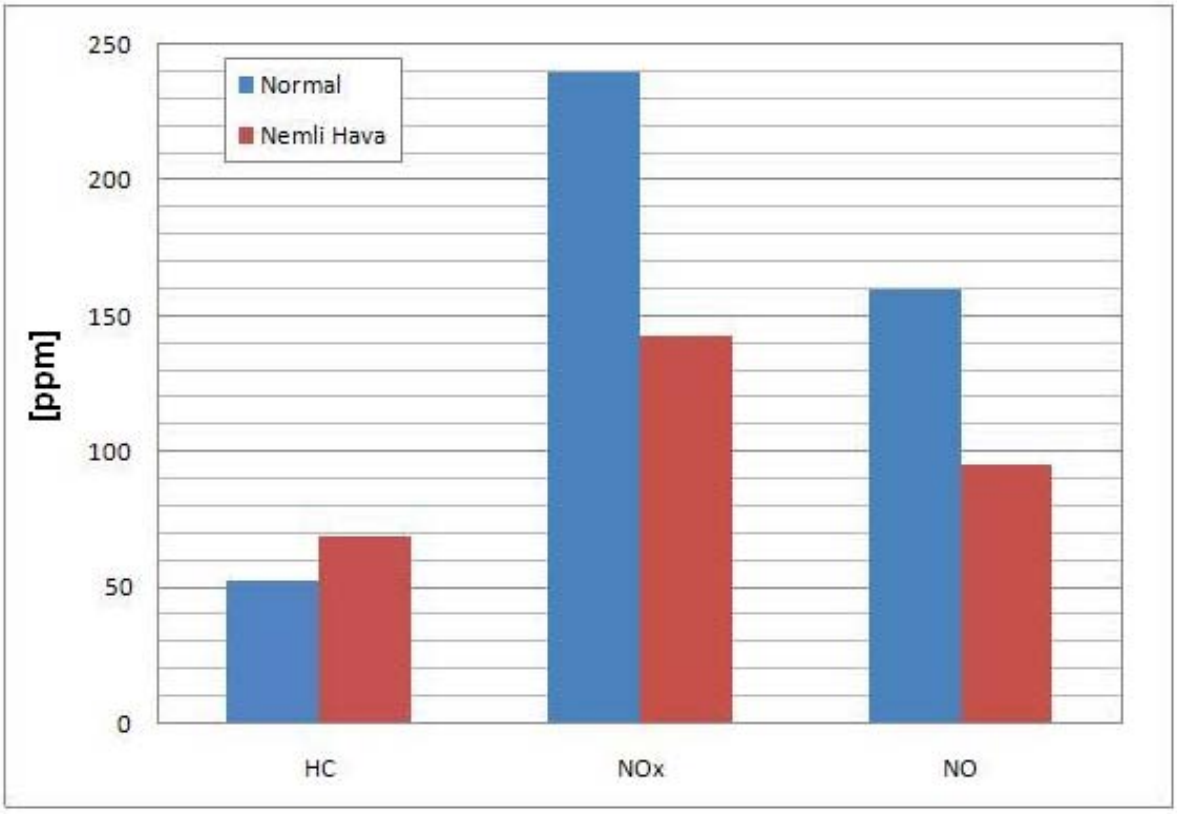
Şekil 5.9 Emme havasının nemlendirilmesinin motor karakteristiklerine etkisi



Şekil 5.10 Emme havasının nemlendirilmesinin motor karakteristiklerine etkisi

Çizelge 5.3 Emme havasının nemlendirilmesinin motor karakteristiklerine etkisi

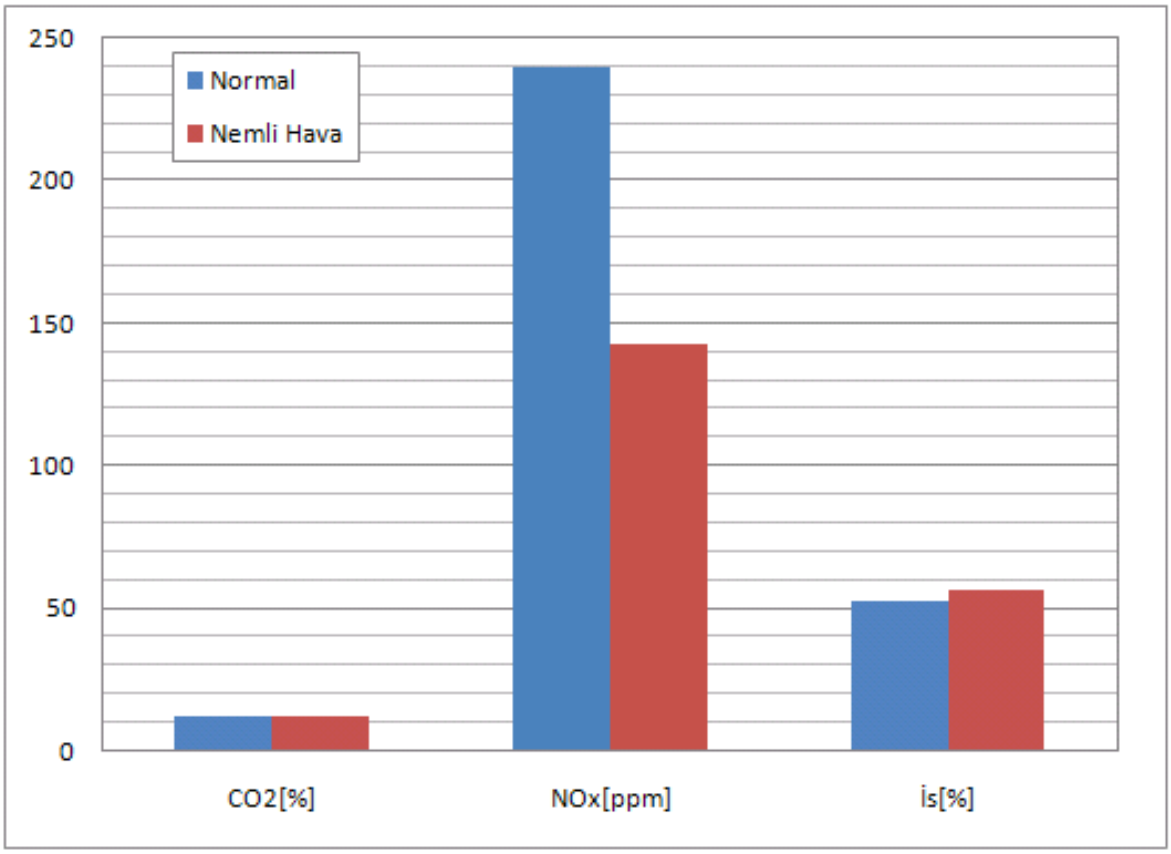
	Normal	**Nemli Hava**	**%**
P [kW]	4,52	4,7	4
Md [Nm]	33,97	35,3	4
Verim [%]	28,9	30,4	5



Şekil 5.11 Emme havasının nemlendirilmesinin emisyonlara etkisi (n=1270 d/dk; Pme=5,6 kPa)

Çizelge 5.4 Emme havasının nemlendirilmesinin emisyonlara etkisi (% olarak)

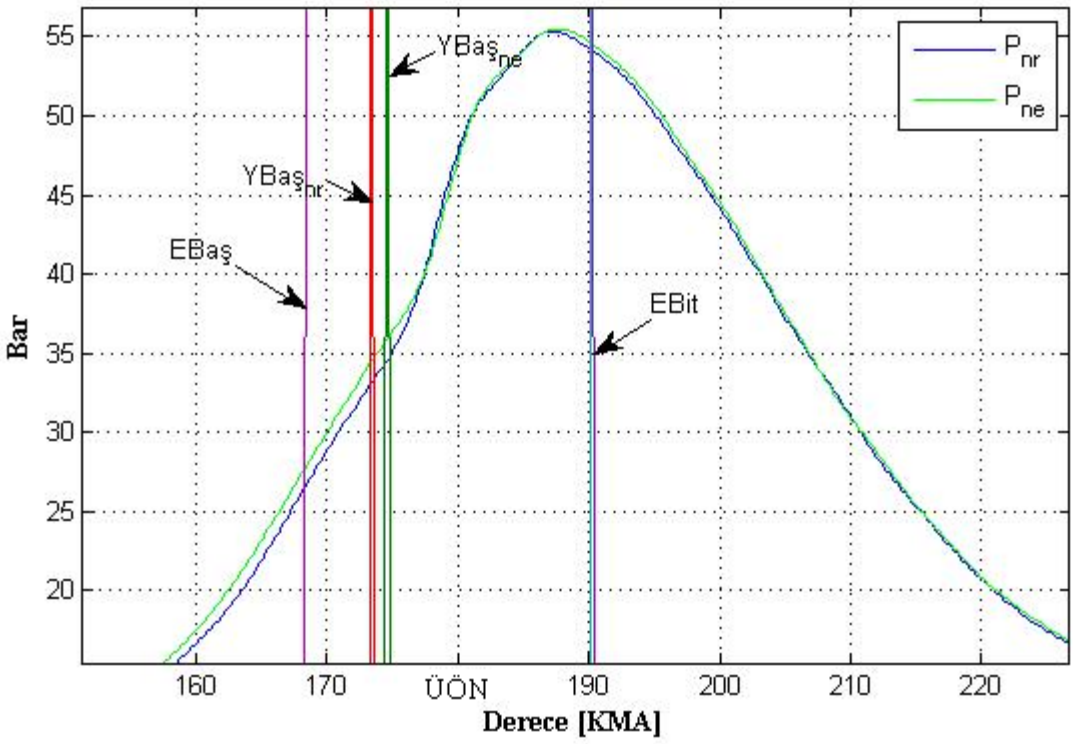
	Normal	**Nemli Hava**	**%**
HC [ppm]	53	69	30
NO_x [ppm]	240	143	-40
NO [ppm]	160	95	-41



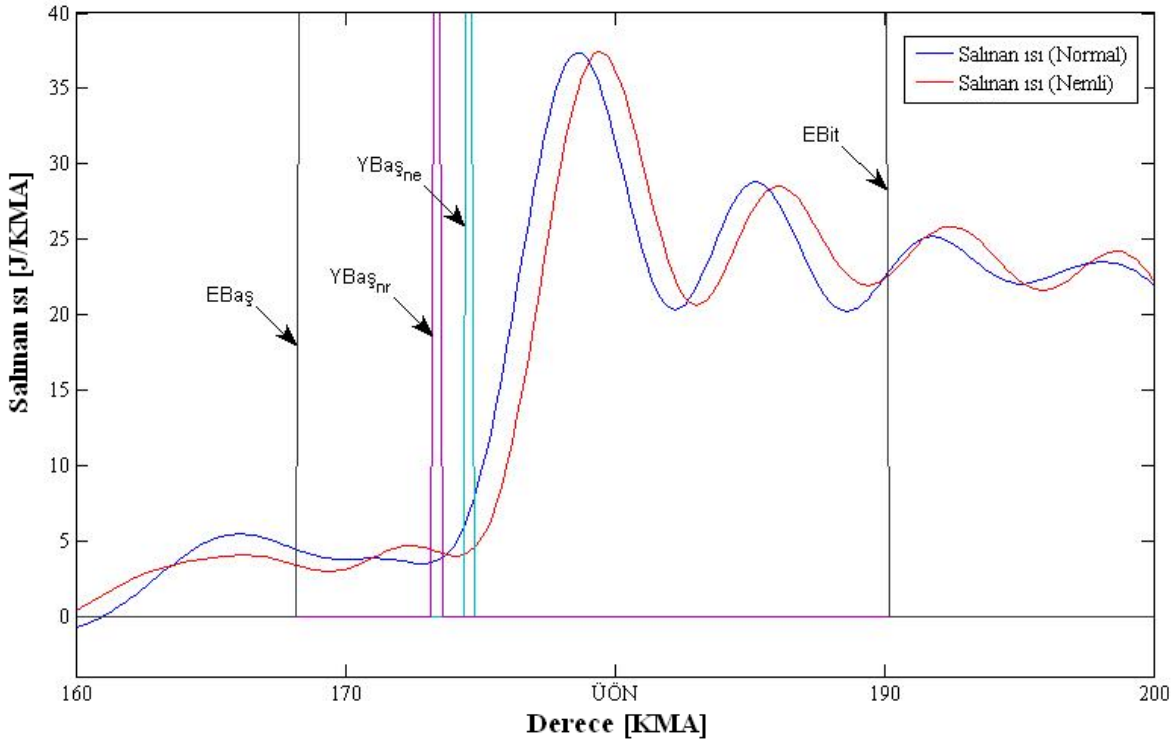
Şekil 5.12 Emme havasının nemlendirilmesinin emisyonlara etkisi (n=1270 d/dk; Pme=5,6 kPa)

Çizelge 5.5 Emme havasının nemlendirilmesinin emisyonlara etkisi (% olarak)

	Normal	**Nemli Hava**	**%**
CO_2 [%]	12,53	12,55	0,16
NO_x [ppm]	240	143	-40
İs [%]	53	57	8



Şekil 5.13 Silindir içi basıncın krank açısı ile değişimi(n=1270 d/dk; Pme=5,6 kPa)



Şekil 5.14 Silindir içi salınan ısı miktarının krank açısı ile değişimi(n=1270 d/dk; Pme=5,6 kPa)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Silindir içine su göndererek NO_x ve is emisyonlarını azaltmak amacıyla literatürde değişik yöntemler uygulanmıştır. Diesel-su emülsiyon yönteminde yakıt içerisine %20 oranında su katılmasının, yakıt tüketiminde artış meydana getirmeden, NO_x emisyonunu yaklaşık %20 ve is emisyonunu yaklaşık %50 civarında azalttığı bildirilmiştir. Emme havası içerisine su gönderme yöntemlerinin (emme havası içerisine ve turbo nozuluna su püskürtülmesi) her ikisinin de NO_x emisyonu üzerinde aynı etkiye sahip olduğu ve yakıtın %20'si oranında suyun hava içerisine püskürtülmesiyle yaklaşık %15 NO_x azalımı sağlandığı bildirilmiştir. Ancak is emisyonu üzerinde etkili olmadığı ve su miktarının artmasıyla is emisyonunda yaklaşık %4 artış olduğu ifade edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada, emme havasının ultrasonik olarak nemlendirilmesiyle NO_x emisyonunda %40 oranında bir azalma elde edilmiştir. Buna karşın CO_2 emisyonunda kayda değer bir artış görülmemiş, verimde ise artış olduğu tespit edilmiştir. Nemlendirilme sonucunda havanın yoğunluğunun artmasıyla, volumetrik verim artmış ve bu nedenle de genel verimde artış görülmüştür. NO_x emisyonlarındaki bu azalma eksoz emisyonlarının yanma sonrası iyileştirilmesine de önemli bir katkı sağlayacaktır.

Sistemin NO_x emisyonu açısından avantajı yanında bir takım uygulama zorlukları mevcuttur. Nemlendirme için gerekli suyun temin edilmesine ihtiyaç vardır. Bu sorun suyun depolanması ile veya stasyonel motorlara su besleme hattı bağlanması ile çözülebilir.

KAYNAKLAR

[1]. HAŞİMOĞLU C. , İÇİNGÜR Y. , ÖĞÜT H. , "Diesel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi", Turkish J. Eng. Env. Sci. , 26 (2002)-127–135, TÜBİTAK, 2002.

[2]. "Emission Control Technologies for Diesel-Powered Engines", Manufacturers of Emission Controls Association (MECA), December 2007.

[3]. Clean Air Technology Center, "Nitrojen Oxides (NOx), Why and How They are Conntrolled", EPA–456/F–99-006R, November 1999.

[4]. MARK J. , MOREY C. , "Diesel Passenger Vehicles and the Environment", Union of Concerned Scientists, April 1999.

[5]. SAMEC N. , KEGL A. , DIBBLE W. R. , "Numerical and Experimantal Study of Water/Oil Emulsified Fuel Combustion in A Diesel Engine", Fuel 81 (2002) 2035–2044.

[6]. CANFIELD C. A. , "Effects of Diesel-Water Emulsion Combustion on Diesel Engine NOx Emissions", Universty of Florida, 1999.

[7]. SAMEC N. , DIBBLE W. R. , CHEN J. Y. , PAGON A. , "Reduction of NOx and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine", F20001075

[8]. BEDFORD F. , RUTLAND C. , DITTRICH P. , RAAP A. , WIRBELEIT F. , "Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion", Society of Automotive Engineers 2000–01–2938, 2000.

[9]. DENİZ, O. "Diesel Motorlarda Su-Motorin Emülsiyonlarının Motor Performansına Etkilerinin Araştırılması", Doktora Tezi, 1985.

[10]. KOLCHIN, A. DEMIDOV, V. ,"Design of Automotive Engines", Translated from the Russian by P. ZABOLOTNYI.

Ashley, S. 1997. "Diesel Cars Come Clean," Mechanical Engineering. August. pp.52-56.**

Borat, O., Balcı, M., ve Sürmen, A., Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları-3, Ankara, 25, 1994.*

Bunting, B, M.J. Cunningham, and R.K. Miller. 1998. "A Diesel Perspective on Lean NOx Catalysts." Presentation at the 1998 Diesel Engine Emissions Reduction Workshop. Castine, Maine. July.**

Çakıroğlu, M., "Motorlu Taşıt Trafiğinde Egzoz Emisyonları", 1.Ulusal Ulaşım

Sempozyumu, İstanbul, 565-573, 1996.*

De Vita, A., 1989, “Multi-Cylinder D.I. Diesel Engine Tests with Unstabilized Emulsion of Water and Ethanol in Diesel Fuel,” SAE Paper 890450.***

Dickey, D.W., T.W. Ryan, and A.C. Matheaus. 1998. “NOx Control in Heavy-Duty Diesel Engines-What is the Limit?” SAE No. 980174.**

Ergeneman, M., Arslan, H., ve Mutlu, M., Taşıt Eksozundan Kaynaklanan Kirleticiler, Kutlar, O.A. (Editor), Birsen Yayınevi, İstanbul, 4-8, 1998.*

Fleisch, T., C. McCarthy, A. Basu, C. Udovich, P. Charbonneau, W. Slodowske, S. Mikkelsen, and J.M. McCandless. 1995. “A New Clean Diesel Technology: Demonstration of ULEV Emissions on a Navistar Diesel Engine Fueled with Dimethyl Ether.” SAE No. 950061.**

Glasstone, Samuel. 1982. Energy Deskbook. US, Department of Commerce, National Technical Information Service. Oak Rigdge, Tenn.: DOE. April**

Hammer, T. and S. Broer. 1998. "Plasma Enhanced Selective Catalytic Reduction of NOx for Diesel Cars." SAE No. 982428.**

Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 586-592, 1988.*

Hoelzer, J., J. Zhu, C.L. Savonen, K.C.C. Kharas, O.H. Bailey, M. Miller, and J. Vuichard. 1997. "Integrated Diesel Engine NOx Reduction Technology Development," Proceedings of the 1997 Diesel Engine Emissions Reduction Workshop. La Jolla, CA. July 28-31. Washington, DC: DOE**.

Işıksoluğu, M.A., “Dizel Motorlu Taşıtların Egzoz Gazındaki Duman Koyuluğu ve Ölçümde Karşılaşılan Sorunlar”, Mühendis ve Makine Dergisi, 38, 453, 22-25, 1997.*

Kapus, P., and H. Ofner. “Development of a Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether.” SAE No. 950062.**

Kimura, S., Y. Matsui, and M. Koike. 1998. "New Combustion Concept for Simultaneous Reduction of NOx and Particulate Emissions from Small DI Diesel Engines." Presented at the June 1998 Congress of the International Federation of Automotive Engineering Societies. http://www.sia.fr/publications.nsf**

Krieger, R.B., R.M. Stewart, K.A. Pinson, N.E. Gallopoulos, D.L. Hilden, D.R. Monroe, R.B. Rask, A.S.P. Solomon, and P. Zima. 1997. “Diesel Engines: One Option to Power Future

Personal Transportation Vehicles," Proceedings of the 1997 Diesel Engine Emissions Reduction Workshop. La Jolla, California. July 28-31. Washington, DC: DOE.**

Lee, R., J. Pedley and C. Hobbs. 1998. "Fuel Quality Impact on Heavy Duty Diesel Emissions: - A Literature Review." SAE No. 982649.**

Maricq, M.M, R.E. Chase, D.H. Podsiadlik, W.O. Siegl and E.W. Kaiser. 1998. "The Effect of Dimethoxy Methane Additive on Diesel Vehicle Particulate Emissions." SAE No. 982572.**

Montagne, X., Herrier, D., and Guibet, J.-C., 1987, "Fouling of Automotive Diesel Injectors—Test Procedure, Influence of Composition of Diesel Oil and Additives," SAE Paper 872118.***

National Research Council (NRC). 1998. Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles, Fourth Report. Washington, DC: National Academy Press. p 26.**

Penetrante, B.M., R.M. Brusasco, B.T. Merritt, W.J. Pitz, G.E. Vogtlin, M.C. Kung, H.H. Kung, C.Z. Wan, and K.E. Voss. 1998. "Plasma-Assisted Catalytic Reduction of NOx." SAE No. 982508.**

Penetrante, B.M., M.C. Hsiao, B.T. Merritt, and G.E. Vogtlin. 1997. "Fundamental Limits on NOx Reduction by Plasma." SAE No. 971715.**

Ramavajjala, M., V. Palekar, R. Slone, and G. Yowell. 1997. "Fuel Additives for In-Cylinder NOx Reduction from Diesel Engines," Proceedings of the 1997 Diesel Engine Emissions Reduction Workshop. La Jolla, CA. July 28-31. Washington, DC: DOE.**

Sawyer, R.F. and J.H. Johnson. 1995. "Diesel Emissions and Control Technology" in Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emissions, Exposure, and Health Effects. Cambridge, Mass.: Health Effects Institute. April.**

Ulrich, A. and Kessler, A., 1992, "Method and Apparatus for Producing a Water-in-Fuel-Emulsion and Emulsifier-Free Water-in-Fuel-Emulsion," U.S. Patent 5,125,367, United States Patent and Trademark Office.***

* Bu kaynaklar [1] kaynağında geçmektedir ve yazar tarafından doğrudan görülmemiştir.

** Bu kaynaklar [4] kaynağında geçmektedir ve yazar tarafından doğrudan görülmemiştir.

***Bu kaynaklar [6] kaynağında geçmektedir ve yazar tarafından doğrudan görülmemiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.02.1985	
Doğum yeri	Yozgat	
Lise	1998-2002	E.Akdağ Anadolu Öğretmen Lisesi
Lisans	2002-2006	Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

2007-Devam ediyor	Delta Makina Sanayi ve Ticaret Ltd.Şti.