T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİZEL MOTORLARDA ÇOKLU PÜSKÜRTME STRATEJİSİNİN NO_X EMİSYONU ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Arda ALBAYRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Haziran, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİZEL MOTORLARDA ÇOKLU PÜSKÜRTME STRATEJİSİNİN NOx EMİSYONU ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Arda ALBAYRAK tarafından hazırlanan tez çalışması 29.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Orkun ÖZENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

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

Danışmanım Prof. Dr. Muammer ÖZKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Dizel Motorlarda Çoklu Püskürtme Stratejisinin NO_x Emisyonu Üzerine Etkisinin Deneysel Araştırılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Arda ALBAYRAK

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca benden desteğini esirgemeyen ve çalışmalarıma tecrübeleri ile yön veren değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Muammer ÖZKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yuksek lisans eğitimim ve tez sürecim boyunca harika işbirlikleri için, gerekli desteği ve hoşgörüyü fazlasıyla gösteren değerli meslektaşım Dr. Murat GÖNÜL' e teşekkür ederim.

Ayrıca canım annem Gülay ALBAYRAK'a, babam İrfan ALBAYRAK'a ve kız kardeşim Hatice Ayça KALKAN ALBAYRAK'a hayatımın her anında bana destek oldukları için ve karşılık beklemeden sevmenin ne demek olduğunu bana öğrettikleri için teşekkür ederim.

Eğitim ve öğretim hayatıma ilk adım attığım zaman bana okumayı ve yazmayı öğreten ilk öğretmenim sevgili Mürvet TÜRE'ye teşekkür ederim.

Arda ALBAYRAK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....vii
KISALTMA LİSTESİ.....viii
ŞEKİL LİSTESİ.....ix
TABLO LİSTESİ.....x
ÖZET.....xi
ABSTRACT.....xiii
1 GİRİŞ.....15
1.1 Literatür Özeti..... 15
1.1.1 Dizel Motor Tarihçesi..... 15
1.1.2 Dizel Motorlarda Yanma..... 17
1.1.3 Dizel Motorlarda Egzoz Emisyonlarının Oluşumu..... 19
1.1.4 Egzoz Katalistleri ile Emisyon Kontrol Yöntemleri..... 24
1.1.5 Dizel Motorlarda Yakıt Püskürtme Sistemi..... 27
1.1.6 Dizel Motorlarda Çoklu Püskürtme ile İlgili Yapılan Çalışmalar... 31
1.2 Tezin Amacı..... 35
1.3 Hipotez..... 35
2 METOT.....37
2.1 NO_x Emisyonu İçin Uygulanan Modelleme Yöntemleri..... 37
2.2 Model Seçimi..... 39
2.2.1 Gaussian Regresyon Yöntemi..... 39
2.3 Deney Tasarımı..... 39
3 HAZIRLIKLAR..... 42
3.1 Deney Motoru ve Test Düzeneği..... 42
3.1.1 Dinamometre..... 43
3.1.2 Ölçüm Cihazları..... 45
3.2 Model Kurulumu..... 49
3.3 Model Sonuçları..... 52
3.4 Deneysel Test Sonuçları..... 53
3.5 Sera Gazı Etkisinin İncelenmesi..... 59
4 SONUÇ VE ÖNERİLER.....72
4.1 Sonuçlar ve Öneriler..... 72

KAYNAKÇA..... 76
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR..... 82

SİMGE LİSTESİ

NH_3	Amonyak
m	Ana Püskürtme
N_2	Azot
NO_2	Azot Dioksit
NO	Azot Oksit
NO_x	Azot Oksitler
Cu	Bakır
R^2	Belirleme Katsayısı
C	Celsius
Fe	Demir
°	Derece
d/d	Devir/dakika
X_i,X_j	Giriş parametresi
g	Gram
H	Hidrojen
HC	Hidrokarbon
OH	Hidroksit
HO_2	Hidroperoksil Radikali
HCN	Hidrosiyanik Asit
ppm	İki kademili Ön Püskürtme ve Ana Püskürtme
NCO	İzosiyanat
CO_2	Karbondioksit
CH	Karbon Hidrojen Bağı
CO	Karbonmonoksit
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
l	Litre
mm^3	Milimetre Küp
P	Motor Gücü
N_2O	Nitröz Oksit
O_2	Oksijen
O_3	Ozon
pm	Ön ve Ana Püskürtme
Pd	Paladyum
Pt	Platin
Rh	Rodyum
h	Saat
x	Sabit Katyası
H_2O	Su
TiO_2	Titanyum Dioksit
WO_3	Tungsten Trioksit
V_2O_5	Vanadyum Oksit
X_D	Veri Sayısı
Q_i	Sinyal Gücü ve Sinyal Gürültüsü Hiper Parametresi

KISALTMA LİSTESİ

ASC	Amonyak Kayma Katalizörü
BSFC	Frene Özgü Yakıt Tüketimi
CR	Common Rail
DOC	Dizel Oksidasyon Katalizörü
DoE	Deney Tasarımı
DPF	Dizel Partikül Filtre
ECU	Motor Kontrol Ünitesi
EGR	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
IMEP	Belirtilen Ortalama Efektif Basınç
LNT	Fakir NO_x Tutucu
MAF	Kütlesel Hava Akışı
MAP	Manifold Mutlak Basıncı
NDIR	Dağıtıcı Olmayan Kızılötesi Sensör
OEM	Orjinal Ürün Üreticisi
PID	Oransal İntegral Türevsel Denetleyici
PM	Partikül Madde
SCR	Seçici Katalitik İndirgeme
SFC	Özgül Yakıt Tüketimi
SVD	Tekil Değer Ayrıştırma
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
V-SCR	Vanadyum bazlı Seçici Katalist İndirgeme
YSA	Yapay Sinir Ağı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Dizel Yanmasının Fazları[5] 18
Şekil 2.1 Model Çıktısı İçin Gaussian Modelinin Formülü 39
Şekil 2.2 Normalize Edilmiş DoE Test Noktaları 40
Şekil 2.3 Birincil ve İkincil Ön Püskürtme İlişkisi 41
Şekil 2.4 Ana Püskürtme Miktarı ve Ray Basıncı İlişkisi 41
Şekil 3.1 Normalize Edilmiş Motor Tam Yük Eğrisi 43
Şekil 3.2 Test Düzeneği Şematik Gösterimi 44
Şekil 3.3 Yakıt Tüketimi Ölçüm Cihazı 46
Şekil 3.4 Yakıt Şartlandırma Cihazı 46
Şekil 3.5 İs Emisyonu Ölçüm Cihazı 47
Şekil 3.6 NO_x Emisyonu Ölçüm Cihazı 48
Şekil 3.7 Kapalı Kutu Yanma Modelinin Şematik Olarak Gösterimi 51
Şekil 3.8 Model Test Noktaları 52
Şekil 3.9 Grup A, Çoklu Püskürtmenin NO_x Emisyonu ve Yakıt Tüketimine Etkisi 53
Şekil 3.10 Grup B, Çoklu Püskürtmenin NO_x Emisyonu ve Yakıt Tüketimine Etkisi 53
Şekil 3.11 Grup C, Çoklu Püskürtmenin NO_x Emisyonu ve Yakıt Tüketimine Etkisi 53
Şekil 3.12 Deneysel Test Çalışma Noktaları 54
Şekil 3.13 Grup A Çalışma Noktası 1, Model ve Ölçüm Sonuçları 55
Şekil 3.14 Grup A Çalışma Noktası 2, Model ve Ölçüm Sonuçları 55
Şekil 3.15 Grup A Çalışma Noktası 3, Model ve Ölçüm Sonuçları 56
Şekil 3.16 Grup B Çalışma Noktası 4, Model ve Ölçüm Sonuçları 56
Şekil 3.17 Grup B Çalışma Noktası 5, Model ve Ölçüm Sonuçları 57
Şekil 3.18 Grup B Çalışma Noktası 6, Model ve Ölçüm Sonuçları 57
Şekil 3.19 Grup C Çalışma Noktası 7, Model ve Ölçüm Sonuçları 58
Şekil 3.20 Grup C Çalışma Noktası 8, Model ve Ölçüm Sonuçları 58
Şekil 3.21 Grup C Çalışma Noktası 9, Model ve Ölçüm Sonuçları 59
Şekil 3.22 Çalışma Noktası 1, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 59
Şekil 3.23 Çalışma Noktası 2, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 60
Şekil 3.24 Çalışma Noktası 3, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 60
Şekil 3.25 Çalışma Noktası 4, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 61
Şekil 3.26 Çalışma Noktası 5, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 61
Şekil 3.27 Çalışma Noktası 6, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 62
Şekil 3.28 Çalışma Noktası 7, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 62
Şekil 3.29 Çalışma Noktası 8, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 63
Şekil 3.30 Çalışma Noktası 9, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları 63
Şekil 3.31 Dizel Oksidasyon Katalizöründeki Pt/Pd Oranının NO_2/NO_x Üzerine Etkisi[70] 65
Şekil 3.32 WHTC Çevrimi Motor Hızı ve Tork Dağılımı 69

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Deney Motoru Teknik Özellikleri 43
Tablo 3.2 Model Girdileri ve Çıktıları Arasındaki Lineer Bağlantı 50
Tablo 3.3 Model ve Modelleme Doğruluğu Karşılaştırılması 51
Tablo 3.4 Normalize Edilmiş Deneysel Çalışma Noktaları.....54
Tablo 3.5 Deneysel Test Çalışma Noktalarının Ağırlık Faktörleri 69
Tablo 3.6 CO_2 ve N_2O'nun Sera Etkisi 71

ÖZET

Dizel Motorlarda Çoklu Püskürtme Stratejisinin NO_X Emisyonu Üzerine Etkisinin Deneysel Araştırılması

Arda ALBAYRAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Günümüzde hava kirliliğin en önemli nedenlerinden biri dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticilerdir. Dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticiler insan sağlığını tehdit etmektedir. Giderek daha sıkı hale gelen ve gelecek yıllarda yürürlüğe girecek EuroVII emisyon düzenlemeleri sebebiyle; araç üreticileri, pazar gereksinimlerini karşılarken NO_x emisyonunun sınırlandırılması için yenilikçi çözümler bulmak zorunda kalmaktadırlar.

Bu çalışmada 4 zamanlı, 4 silindirli 2 litre hacimli dizel motoru ile çoklu püskürtme stratejileri uygulanarak NO_x emisyonun doğrusal olmayan davranışı ve yakıt tüketimi Gaussian regresyon metodu ile modellenmiş ve dinamometre test düzeneğinde deneysel olarak test edilmiştir. Bu süreçte çoklu püskürtme stratejisinin NO_x emisyonuna etkisini gözlemlemek amacıyla test düzeneğinde DoE adı verilen yöntem ile 2119 motor çalışma noktasında gerçek zamanlı ölçümler alınıp, kara kutu istatiksel modeli oluşturulmuştur. Gaussian regresyon metodu test dizayn noktalarında, NO_x ve CO_2 oluşumu gibi doğrusal olmayan tepkiler için bile motor özelliklerini doğru tahmin edebildiğini göstermiştir. Oluşturulan model ile incelenen 200 nokta içerisinden 9 nokta seçilmiş ve test düzeneğinde çoklu püskürtme stratejilerinin etkileri deneysel olarak da incelenmiştir. Testlerin neticesinde, ön püskürtme ve ana püskürtmenin, tek ana

püskürtme konfigürasyonuna göre NO_x'u %11,6 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Buna karşılık yakıt tüketiminin %1,5 artış gösterdiği görülmektedir. İki aşamalı ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte olduğu konfigürasyon, sadece ana püskürtmenin olduğu konfigürasyona göre NO_x emisyonu %16 azaltmaktadır. Buna karşılık yakıt tüketiminin %3,2 oranında arttığı görülmektedir.

Bu sonuçlar neticesinde, dizel araçlarda sera gazı etkisi de incelenmiştir. CO_2 bir sera gazıdır. Fakat dizel araçlar sera gazına etkisi olan farklı emisyonlar üretebilirler. Sera gazına etkisi olan bir diğer emisyon N_2O'dur. Dizel araçlarda egzoz sisteminde farklı SCR kullanımı egzoz çıkışında farklı N_2O konsantrasyonları ile sonuçlanabilir. Yapılan kabuller ile birlikte sistemde motor ve zeolit bazlı SCR kullanılması durumunda, sistemde sadece motor olması durumuna göre N_2O gazı, %16 artmıştır. Çoklu püskürtme stratejisi kullanıldığında ise N_2O'nun yarattığı sera gazı etkisinin azaltıldığı, CO_2'nun yarattığı sera gazı etkisinin arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: NO_x Emisyonu, çoklu püskürtme, Gaussian modelleme, dizel motor, sera gazı.

ABSTRACT

Experimental Investigation of the Effect of Multiple Injection Strategy on NO_X Emission in Diesel Engines

Arda ALBAYRAK

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Today, one of the most important causes of air pollution is originating by diesel engines and threates human health. Due to new regulations that will come into effect in coming years, manufacturers have to find innovative solutions to limit NOx emissions.

In this study, the nonlinear behavior of NO_x emission and fuel consumption were modeled by Gaussian method by applying multiple injection strategies with a 2L diesel engine and experimentally tested on dynamometer. In this process, in order to observe effect of multiple injection strategy on NOx emission, real-time measurements were taken at 2119 operating points with DoE method. Gaussian method has shown that it can accurately predict engine properties at test design points. With created model, 9 points were selected from 200 points examined and effects of multiple injection strategies were also examined experimentally. Consequently, it was determined that pilot and main injection reduced NO_x by %11,6 compared to only main injection configuration. But, it is seen that fuel consumption increased by %1,5. Two-stage pilot and main injection configuration reduces NO_x emissions by %16 compared to only main injection configuration. But, it is seen that it increases the fuel consumption by %3,2.

As a result of these results, the greenhouse gas effect in diesel systems was also investigated. CO_2 is a greenhouse gas. However, diesel systems can produce different emissions that have an effect on greenhouse gases. Another emission that has an effect on greenhouse gas is N_2O. The use of different SCR in exhaust system of diesel systems may result in different N_2O concentrations in exhaust oulet. In case of using motor and zeolite-based SCR in system together, N_2O gas increased by %16 compared to case of only engine in system.

Keywords: NO_x Emission, multiple injection, Gaussian Model, diesel engine, green gase

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde hava kirliliğin en önemli nedenlerinden biri motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticilerdir. Özellikle kentlerde ve büyük yerleşim merkezlerinde sayıları giderek artan taşıtlar çevre ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticiler araştırmacılar için geçmişten bu zamana ilgi odağı olmuştur.

Dizel motorlarda çoklu püskürtme stratejisinin NO_x emisyonu üzerine etkisini gözlemlemek amacıyla yapılmış deneysel ve modelsel çalışmalar, araştırmacılar tarafından farklı püskürtme stratejileri, farklı motor hızı ve torkunda incelenmiş ve geçmişten günümüze farklı kombinasyonlar kullanılarak NO_x emisyonun azaltılması için çalışmalar yapılmıştır. Yakıt tüketim oranını optimize ederek ve egzoz emisyonlarını azaltarak yakıt performansı ve zaralı emisyon düzenlemelerini yerine getirmek için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir.

1.1.1 Dizel Motor Tarihçesi

Dizel motor 1983 yılında Rudolp Diesel tarafından icat edildi ve patenti alındı. Dizel motorun icadı ile beraber buhar ve kömür endüstrisinde olan önemli üstünlük günümüze kadar azalarak devam etti. Böylelikle enerji dönüştürme sistemlerinde yeni bir rekabet başlamıştır. Dizel motor, ısı enerjisini mekanik enerjiye çeviren makinadır. Yüksek yanma sıcaklığı, basınç yüksek genişleme oranı sebebiyle, aynı miktarlı yakıt ile diğer enerji dönüştürme sistemlerine kıyasla çok daha fazla mekanik enerji ve iş üretebilir. Yanma odasında yüksek sıcaklık ve basınç elde edilerek, pülverize ve atomize yakıt damlacıklarını çevreleyen hava ile karışır. Karışım kendiliğinde tutuşması, mekanik enerjiye dönüştürülen yakıtın içindeki yüksek sıcaklıklar ve kimyasal enerji sayesinde gerçekleşir.[1] Pistonlu içten yanmalı dizel motorlar, iki zamanlı veya dört zamanlı olarak sınıflandırılabilir. Tanım olarak, iki zamanlı pistonlu motorlar, yanma döngüsünü

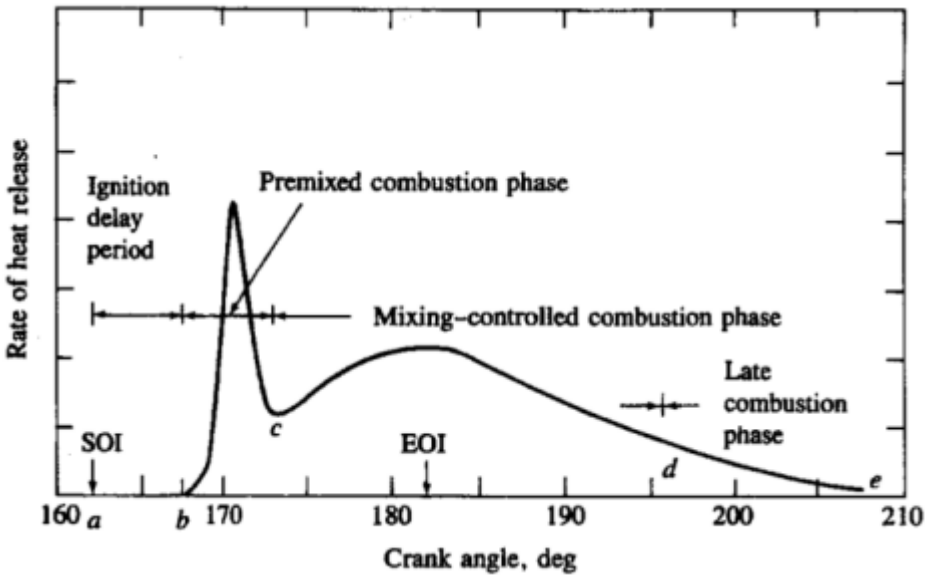
tamamlamak için iki strok gerektirir. Dört zamanlı pistonlu motorlarda yanma döngüsünü tamamlamak için dört strok gerekir. Bunlar emme zamanı, sıkıştırma zamanı, tutuşma veya yanma zamanı ve son olarak egzoz zamanıdır. Ayrıca dört zamanlı dizel motorlar, tasarımlarına göre doğrudan veya direkt püskürtme ve dolayı püskürtmeli motorlar olarak iki kısımda sınıflandırılır. Dolaylı püskürtmeli dizel motorlarda yakıt ana yanma odasında önce ön oda adı verilen odaya püskürtülür ve ilk karışım ön oda oluşur. Motorun gürültü özelliklerini iyileştirmesine rağmen, ön oda ve ana yanma odası arasındaki geçiş sebebiyle pompalama kayıplarını arttırmaktadır. Direkt püskürtmeli dizel motorlarda yakıt direkt olarak yanma odasının içerisine püskürtülür. Bu püskürtme stratejisi motor verimliliğini arttırır. Yakıt güvenliği özellikleri, yüksek verim, daha düşük sürtünme ve pompalama kayıpları, dayanıklılık ve güvenilirlik açısında diğer enerji dönüş sistemlerine kıyasla dizel motorların avantajları olarak gösterilmektedir. [2]

Araştırmacılar 19. yüzyıldan beri dizel motorlara odaklandı ve günümüzde de geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Dizel motorlar 20.yüzyıldan beri araçlar, kamyonlar, lokomotifler ve iş makinalarında daha sonrasında gemiler ve denizaltılarında kullanılmaya başlandı. Dizel motorlu ilk hafif hizmet aracı 1970'lerde tanıtıldı. Dizel motorların en önemli dezavantajı, insan sağlığı ve çevre için zararlı bileşenler yaymasıdır fakat dizel motorlu araçlar için kirletici ve zararlı gaz emisyonlarına ilişkin mevzuat giderek daha kısıtlayıcı ve sınırlayıcı hale gelmektedir. Fakat yeni emisyon düzenlemeleri ve performans gereklilikleri, yeni teknolojilerin gelişimi için ümit verici durumlardır. Geleneksel tasarım yöntemleri ve parametreleri sürekli olarak geliştirilmekte ve piyasa baskılarını karşılamak için rekabet edilmektedir. Bununla birlikte, modern motor tasarımlarıyla ilgilenenler için, yalnızca motor performansını değil, aynı zamanda emisyon profilini de kontrol eden birçok yönü iyi bilmek zorunludur. Bu bilgi, basit tasarım ilkelerinden, çeşitli motor sistemleri ve ayrıca yanma sonrası egzoz emisyon kontrol cihazları arasındaki karmaşık etkileşimlere doğru gelişmektedir.[1]

1.1.2 Dizel Motorlarda Yanma

Dizel motorlar, düşük yakıt tüketimi, güvenilirlik ve dayanıklılık özellikleriyle öne çıkmaktadır. Doğası gereği nispeten düşük HC ve CO emisyonlarına sahiptir. Bununla birlikte, aynı zamanda yüksek NOx ve PM emisyonları optimizasyon sonucu ile düşürülebilir. Performans, yakıt tüketimi ve yayılan kirleticiler yanma sürecinden kaynaklandığı için, dizel motorları iyileştireceksek, önce dizel motorlardaki yanma mekanizmalarını iyi anlamak gerekir. Dizel yanmasının sonucunda yakıtta depolanan kimyasal enerji mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu işlemi gerçekleştirmek için, yanmada oksijenin yakıtla belirli bir oranda karışması gerekmektedir. Dizel motorlarda, yakıt genellikle motor silindirine sıkıştırma strokunun sonuna yakın bir yerde, üst ölü noktadan önce krank açısında püskürtülür. Yakıt, enjektör memelerinden yüksek basınç ve yüksek hızda yanma odasına püskürtülür. Enjektörler yakıtın pülverizasyonu için çok deliklidir. Küçük parçacıklarına ayrılan yakıt, havadan ısı çeker. Pülverizasyon sayesinde atomize olmuş yakıt yüzey alanını arttırdığı için havadan daha fazla ısı çeker ve haya ile yakıt yüksek sıcaklıkta birbirine karışır. Piston ÜÖN'ya hareket etmeye devam ettikçe karışımın sıcaklığı yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşır. Bazı uygulamalarda yakıt ve hava önceden karıştırılabilinir. Bu durumda yakıtın ve havanın tutuşması, tutuşma gecikme süresinden sonra gerçekleşir. Bu ateşleme, yanmanın başlangıcı olarak kabul edilir. Yakıt-hava karışımının yanması gerçekleştikçe silindir içi basınçta artma meydana gelir. Önceden karıştırılmış yanmadan kaynaklanan artan basınç, yükün yanmamış kısmını sıkıştırır ve ısıtır. Bu sayede ateşlemeden önceki gecikmeyi azaltır. Püskürtülen yakıtın hepsi yanana kadar yanma olayı devam eder.[3] Dizel yanma, hava/yakıt oranı ile ifade edilir. Silindir içerisindeki hava genleşme süreci içerisinde de kalan yakıt ile karışmaya devam eder. Fakat egzoz valfinin açılmasıyla, fazla hava yanma sonucu ortaya çıkan ürünler ile dışarı atılır. Bu olay da dizel motorun doğası gereği oksitleyici yapısını açıklar. Buharlaşan yakıtın hava ile karışır ve yerel olarak zengin bir karışım oluşturur. Fakat yanma olayı uygun ateşleme sıcaklığına ulaşıldığında gerçekleşir. Dizel yanma sürecinde havanın ve yakıtın kimyasal ve fiziksel özellikleri birinci derecede önemlidir.[4] Dizel motorlarda yanma olayı 3 fazda incelenebilinir. Bu fazlar aşağıda listelenmiştir.

- Tutuşma gecikmesi
- Ön karışımlı yanma
- Kontrollü yanma



Şekil 1.1 Dizel Yanmasının Fazları[5]

Ateşleme gecikmesi, püskürtmenin başlaması ile yanmanın başlaması arasında geçen süredir. Başka bir deyişle, reaksiyonlarla salınan entegre ısı miktarının buharlaşan yakıt tarafından emilen ısıya eşit olduğu zamandır. Ateşleme gecikmesinin süresi kritik bir parametredir. Yanma sürecinin, mekanik stresler, motor gürültüsü ve egzoz emisyonları üzerinde önemli bir etkisi vardır.[5]

Ön karışımlı yanma, ateşleme gecikmesi süresince püskürtülen yakıtın bir bölümünün hızlıca yanmasını anlamına gelir. Yakıt kendi kendine tutuşma sıcaklığına geldiğinde yakıt açısından zengin bir karışım oluşturmak için hava ile yakıt belirli bir oranda karışmış olur. Kendi kendine tutuşma meydana geldiğinde, önceden hava ile karıştırılmış bir miktar yakıt yanar. Yanma odasında yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gözlemlenir.[6] Önceden karıştırılmış yakıtın yanma hızı kimyasal kinetik mekanizması ile açıklanılır. Dizel motorun doğası gereği oluşan gürültü önceden karıştırılmış yakıtın yanma süreci ile bağlantılıdır. Dizel motorlardan kaynaklanan gürültü bu süreçte basınç artış hızı ile orantılı olduğu genel olarak kabul edilmektedir.

Kontrollü yanma aşaması ayrıca difüzyonlu yanma olarakta adlandırılır. Yakıtın tüketim hızı, püskürtme hızı ve ardından hava ile karıştırılmasıyla kontrol edilir. Kontrollü yanma fazında, ön karışımlı yanma fazında meydana gelen ısı tepesinden daha düşüktür.[4]

Yanma süreci üç farklı aşamadan oluşmuş gibi gözüksede, püskürtmeun bitiminden sonraki ve egzoz valfinin açılmasından önceki son aşamalardaki aktiviteyi tanımlayan dördüncü bir aşama da tanımlanabilir. Dördüncü fazda kalan yakıt ile gerçekleşen yanma, diğer fazlara göre çok daha düşük bir oranda gerçekleşir. Bu faza da art yanma adı verilir.[5]

1.1.3 Dizel Motorlarda Egzoz Emisyonlarının Oluşumu

Dizel yakıt, yüksek sıcaklıkta sıkıştırılmış hava ile doldurulmuş bir silindire püskürtülür. Bu heterojen hava/yakıt karışımının yanması sonucu oluşan emisyonlar, sadece yanma sırasında değil, aynı zamanda genleşme sırasında ve özellikle egzoz valfinin açılmasından önce de hakim olan koşullara bağlıdır. Karışım hazırlama ateşleme gecikmesi sırasında, yakıtın tutuşma kalitesi, farklı yanma sıcaklıklarında kalma süresi, genleşme süresi, genel motor tasarım özellikleri ve motor çalışma değişkenleri emisyon oluşumunda çok önemli rol oynamaktadır. Temelde farklı emisyon türlerinin sistem içerisideki yoğunluğu, bunların oluşumunun sonucudur.[2] Eğer sistemde eksik yanma sonucu oluşan eksik yanma ürünleri genleşme fazı sırasında yanabilir. Yanmamış hidrokarbonların oksitleyici gazlarla karıştırılması, yüksek yanma odası sıcaklığı ve oksidasyon işlemi için yeterli kalma süresi daha tam yanmaya izin verir.[4]

1.1.3.1 Azot Oksit(NO_x) Emisyonu

İçten yanmalı motorların egzozunda NO_X, nitrojen oksit adı verilen bir bileşik sınıfını ifade eder. Direk püskürtmeli dizel motor egzozunda, NO toplam NO_x'in %80'inden fazlasını oluşturur. NO_2'de önemli seviyelerde mevcuttur. Dizel motorlarda NO_X'in birincil kaynağı difüzyon yakma bölgesidir.[7]

Dizel motorunda iki önemli NO_X bileşiği için, yanma işleminin bir yan ürünü olarak NO oluşur ve daha sonra NO'dan NO_2 oluşur. Yanma süreçlerinde NO'dan sorumlu bir dizi farklı potansiyel oluşum mekanizması vardır. Bu farklı

mekanizmaların oluşumu, sıcaklık, basınç, alev koşulları, reaksiyona giren ana türlerin konsantrasyonlarından güçlü bir şekilde etkilenir.[10]

Hızlı NO_X oluşumu, ısı salınımının başlamasından çok sonra başlar. Isı salınımının sona ermesinden kısa bir süre sonra, hızlı NO_X oluşumu sona erer, çünkü yanmış gazın soğuk dökme gazla karışması ve yükün genişlemesi nedeniyle sıcaklıkları düşer. Diğer çalışmalar, silindir içi gazların sıcaklığının, ısı salınımının bitiminden sonra yaklaşık 1600°C'nin üzerinde kaldığı koşullarda, NO oluşumunun çok daha uzun süre devam edebilir. Dizel motorlarda NO_X-PM dengesi veya NO_X-yakıt tüketimi dengesi kritik parametrelerdir.[8]

a. Isıl NO Oluşumu

Zeldovich mekanizması olarak da bilinen termal mekanizma, 1600°C'yi aşan en yüksek yanma sıcaklıklarına sahip geleneksel dizel motorlardan kaynaklanan NO_X emisyonlarını oluşturur. Bu mekanizmada üç kimyasal reaksiyon ile ifade edilir.

$$O + N_2 \leftrightarrow NO + N \quad (1.1)$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \quad (1.2)$$

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \quad (1.3)$$

Bu mekanizma için genel reaksiyon hızı nispeten yavaştır ve sıcaklığa çok duyarlıdır. Sonuç olarak, termal NO yalnızca ısı salınımının başlamasından çok sonra önemli miktarlarda ortaya çıkar.

Denklem (1.1) ile gösterilen ileri reaksiyon hızı, bu mekanizmaya güçlü sıcaklık bağımlılığını verir. Bu nedenle, bu mekanizma, daha yüksek sıcaklıklarda ve dizel spreyinin alev bölgesinde olduğu gibi stokiyometrik değere yakın hava/yakıt karışımlarında çok önemlidir. NO_X emisyonları 1400°C 'nin altındaki sıcaklıklarda neredeyse hiç oluşmaz, ancak sıcaklık 1700°C 'nin üzerine çıktıkça hızlı br şekilde oluşur. Bu mekanizmanın sıcaklık hassasiyeti ayrıca, genleşme stroku sırasında yanma odasındaki sıcaklık düştükçe NO konsantrasyonunun düştüğü anlamına gelir. Isı salınımı sona erdikten kısa bir süre sonra donabilir. Termal mekanizma dizel yanması için en önemli mekanizma olarak kabul edilebilir.[8]-[12]

b. Birincil NO Oluşumu

NO'nun bir başka oluşum mekanizması Fenimore mekanizmasıdır. Bu mekanizma ile dizel yanma işleminin difüzyon kısmında az miktarda NO oluşmaktadır ve hızlıdır. Hızlı NO için en önemli yol, yakıttan hidrokarbon radikallerinin moleküler nitrojen ile hızlı reaksiyonu ile başlatılır ve daha sonra NO oluşturmak üzere reaksiyona giren aminlerin veya siyano bileşiklerinin oluşumuna yol açar.

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N \tag{1.4}$$

HCN oluşturmak için yüksek konsantrasyonda hidrokarbon radikallerinin olduğu ve O ve OH konsantrasyonlarının, HCN'nin aşağıdaki reaksiyon dizisi yoluyla NO'ya ilerlemesine neden olacak kadar yüksek olduğu, stokiyometriden daha yüksek yakıt konsantrasyonlarında yanma meydana geldiğinde, NO oluşur.[13]

$$HCN + O \leftrightarrow NCO + H \tag{1.5}$$

$$NCO + H \leftrightarrow NH + CO \tag{1.6}$$

$$NH + H \leftrightarrow N + H_2 \tag{1.7}$$

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \tag{1.8}$$

c. N_2O Oluşumu

Dizel yanmasında oluşan diğer bir NO mekanizması NO_2'dur. Yüksek basınçlarda, N_2 ile O atomu reaksiyonu, üç reaksiyon yoluyla nitröz oksit oluşumuna neden olabilir.

$$O + N_2 + x \leftrightarrow N_2O + x \tag{1.9}$$

Reaksiyonların basınca duyarlı olduğunu ve bu nedenle yüksek basınçlarda oluşumu artmaktadır. NO_2 genellikle şu yollarla N_2'ye geri döner.

$$H + N_2O \leftrightarrow N_2 + OH \tag{1.10}$$

$$O + N_2O \leftrightarrow N_2 + O2 \tag{1.11}$$

Ek olarak hava-yakıt oranının zayıf olduğu koşullar altında, O'nun N_2O ile reaksiyonu sonucu da NO oluşabilir.

$$N_2O + O \leftrightarrow NO + NO \tag{1.12}$$

Denklem (1.13) eşitliğinde denge koşulu gösterilmiştir.

$$O_2 + x \leftrightarrow 2O + x \tag{1.13}$$

Ayrıca önemli bir O kaynağıdır. Daha yüksek basınçlarda ve daha düşük sıcaklıkta, denklem (1.9) ile ifade edilen üç gövdeli başlatma reaksiyonu, denklem (1.1) ile ifade edilen termal mekanizmanın reaksiyonu ile rekabet eder hale gelir.[9]

d. NO_2 Oluşumu

NO_2, NO'dan hızla oluşabilir.

$$NO + HO_2 \leftrightarrow NO_2 + OH \tag{1.14}$$

NO_2 yalnızca yaklaşık 1000°C'nin altındaki sıcaklıklarda motordan atmosfere atılmak üzere kalacaktır. Tipik alev bölgesi sıcaklıkları gibi daha yüksek sıcaklıklarda, reaksiyon yoluyla hızla NO'ya geri dönecektir.

$$NO_2 + O \leftrightarrow NO + O_2 \tag{1.15}$$

Daha düşük sıcaklıklarda, yanmamış yakıt molekülleri, bir reaksiyon yoluyla NO_2 oluşturmak için gereken HO_2 radikallerini oluşturacaktır.

$$RH + O_2 \leftrightarrow R + HO_2 \tag{1.16}$$

Bir dizel motorda, yanma ürünlerinden NO ve yanma sürecinden kaçan az miktarda yanmamış yakıtın mevcut olacağı düşük motor yüklerinde meydana gelebilir. Motorun egzozunda kalan NO_2 oranı, sıcaklıktan, başlangıçtaki NO seviyesinden ve yakıt özelliklerinden etkilenir.[14]

1.1.3.2 Partikül Madde

Partikül madde, yakıt ve hava ile birlikte motora indüklenen organik ve inorganik maddelerden kaynaklanır. PM'nin ana bileşenlerinden biri, dizel motorlarda heterojen yanma sürecinden kaynaklanan karbonlu maddedir. Küçük parçacıklar veya yanma çekirdekleri, hem difüzyon hem de önceden karıştırılmış alevlerin bir sonucu olarak ve önceden karıştırılmış alevler durumunda hem zengin hem de zayıf koşullarda oluşur. Karbonlu partikül, stokiyometrik değere yakın olan yakıt ve hava karışımının yanmasından ziyade difüzyon yanmasından kaynaklanır. Ateşleme başladıktan sonra daha fazla yakıt enjekte edildiğinde difüzyon yanması

artacaktır. Daha fazla difüzyonlu yanma için, ateşleme gecikmesi süresi boyunca püskürtülen yakıtın tam karışmamış kısmıdır. Bu nedenle difüzyon yanmasını etkileyebilecek faktörler, tutuşma gecikme süresi ve içinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar ile püskürtme hızı ve süresidir. Daha yüksek ilk püskürtme oranları, yakıtın önceden karıştırılmış kısmını artırma ve karbonlu partikülü azaltma eğilimindedir. Daha uzun püskürtme süreleri, ateşlemenin başlamasından sonra püskürtülen yakıtı artırarak difüzyon yanmasını artırma eğilimindedir.

PM oluşumunun kontrolü oksidasyon ile de sağlanır. Yanma işlemi için mevcut sürenin arttırılması, tamamlanmamış yanma ürünlerinin karıştırılacak zayıf bölgeler bulmasını sağlar. Silindirde yüksek sıcaklık varlığında oksidasyon artar. Karbonlu partikül emisyonları azalır. Ek olarak düşük motor devirleri yanma ve oksidasyon süreci için daha fazla zaman sağlar. Diğer PM emisyon kaynakları; aşırı yakıt ikmali, zayıf yanma, soğuk motorda yanmanın başlaması, enjektör meme sayısı ve yakıt kalitesidir.[4]

1.1.3.3 Hidrokarbon

Hidrokarbonlar, silindir içerisinde eksik yanmanın sonucu egzozdan dışarı atılan organik madde olarak özetlenebilir. Kimyasal olarak C_nH_m olarak ifade edilir. Doğrudan püskürtmeli dizel motorlardaki HC'lerin esas kaynakları, yakıt ve havanın aşırı veya az karıştırılması, zayıf karışım oluşumu ve yanma odası yüzeylerinde soğuk söndürme katmanları oluşmasıdır. Optimize edilmiş dizel motorları için HC oluşumu enjektörden damlayan yakıt ve ateşleme gecikmesi süresi boyunca oluşan zayıf karışımlardır. Ek olarak HC oluşumunda yanma odası yüzeylerinde oluşabilen sıvı filmleri ve yakıt ile havanın tam karışımını sağlamanın artan zorluğu yüksek nominal güç yoğunluğu elde etmek için gereken daha zengin toplam yakıt-hava oranlarıda etkilidir. Motor tasarımının yanı sıra çalışma değişkenleri hidrokarbon moleküllerinin oluşumunda ve oksidasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu değişkenler hava-yakıt oranı, motor yükü, art püskürtme ve ikincil püskürtmeler veya çoklu püskürtme stratejileri, enjektör basıncı, enjektör zamanlamasıdır. [2]

1.1.3.4 Karbonmonoksit

CO, oksidasyon eksikliği sebebiyle eksik yanma sonucu oluşan hidrokarbonların ara ürünü olan zehirli bir gazdır. Yanma tamamlanmaya devam ederken, CO ve çeşitli oksitleyiciler arasındaki rekombinasyon reaksiyonları yoluyla CO'nun CO_2 'ye oksidasyonu gerçekleşir. Yakıtça zengin karışımların yanması soncunda yüksek CO emisyonları meydana gelir. Ancak dizel motorlarda yanma yakıtça fakirdir. Ek olarak yeterli miktarda havaya sahip olduğundan, dizel yanması sırasında ortaya çıkan CO normalde düşüktür. Doğrudan püskürtmeli dizel motorlarda, CO'nun CO_2'ye dönüşümünün sebebi yüksek yanma sıcaklığı, oksijen miktarı ve yakıt-hava karışım oranıdır. Ancak oluşumunu etkileyen en önemli parametre hava/yakıt oranıdır.[2]

1.1.4 Egzoz Katalistleri ile Emisyon Kontrol Yöntemleri

Dizel motor tarafından yayılan kirleticiler egzoz borusundan atmosfere bırakılmadan önce kirleticileri azaltan bir dizi bileşene yanma sonrası iyileştirme sistemleri adı verilir. Amacı, çevreye zararlı emisyonların kirletici özelliklerini azaltmaktır. Bu bölümde dizel yakıtlı sistemlerde yaygın olarak kullanılan yanma sonrası iyileştirme sistemlerinden bahsedilmiştir.

1.1.4.1 Dizel Oksidasyon Katalizörü

Dizel oksidasyon katalizörü(DOC), emisyon düzenlemeleri geldiği günden itibaren zararlı emisyonları azaltmak için dizel egzoz sistemlerinin önemli bir üyesidir. DOC'nin ana işlevleri CO, yanmamış HC ve NO'nun oksidasyonudur. Hidrokarbonun oksidasyonu sırasında egzoz içerisinde ekzoterm oluşur. Bu ekzoterm sayesinde DPF içerisinde zararlı emisyonların azaltılmasına yardımcı olur.

DOC’nin sistem içerisindeki mimari ve konfigürasyonu, zararlı emisyonların azaltılma performansını iyileştirmek için incelenmiştir. DOC'nin sistemdeki konumu, katalizörün sıcaklığını ve dolayısıyla oksidasyon performansını etkiler. Motor ile DOC arasındak uzun mesafe olursa, katalizörün girşindeki sıcaklık düşer. Ek olarak potansiyel gerçekleşebilecek termal hasar sebebiyle konumlandıralacak mevcut alan da dikkate alınmalıdır. Genellikle dizel araç sistemlerinde DOC, motordan sonraki ilk egzoz katalizörüdür. Genel olarak, mevcut sistemde DOC,

HC'ler, CO ve NO'nun düşük sıcaklıkta oksidasyonunu sağlar. Ayrıca DPF rejenerasyonu için gerekli olan ekzotermi sağlar.[15]

1.1.4.2 Dizel Partikül Filtre

Dizel partikül filtresi, egzoz borusundan geçen partikül madde veya kurum gibi zararlı emisyonları azaltmak için kullanılan yanma sonrası iyileştirme sistemidir.[11] Filtrede tutulan zararlı egzoz gazlarının filtreyi tıkamasını önlemek için filtrenin düzenli olarak temizlenmesi gerekir, aksi takdirde yüksek geri basınç motora zarar verebilir. Normal bir araç çalışması sırasında, kurumu düzenli olarak temizler. Filtre malzemesi olarak genellikle seramik kullanılır. Dizel partikül filtresini yatay bir kesip alıp incelediğimizde bal peteğine benzer bir yapıda olduğunu gözlemleriz. DOC sebebiyle sağlanan ekzoterm ile DPF tarafından tutulan emisyonlar yakılarak temizlenir.[16]

1.1.4.3 Seçici Katalitik İndirgeme

SCR, dizel motorlu araçlarda NO_x emisyonlarını indirgemek için kullanılan sistemlerden bir tanesidir. NO_x emisyonlarını azaltmak için birçok farklı SCR katalizör çeşidi kullanılmaktadır.[17]

N_2O, sera gazı etkisi olan ve zararlı NO_x emisyonlardan bir tanesidir. Dizel araçların egzoz sistemlerinde farklı SCR katalizörlerinin kullanımı egzoz çıkışında farklı N_2O konsantrasyonları ile sonuçlanır.

a. Vanadyum Bazlı SCR

Vanadyum bazlı SCR, titanyum dioksit(TiO_2) destekli vanadyum pentoksit(V_2O_5) katalizörleri, NO_X'un indirgenmesi için başarıyla kullanılmıştır.

Euro V-VI uygulamalarında gösterildiği gibi maliyet ve performans avantajları nedeniyle, V-SCR katalizörleri artık bazı ABD Tier 4 otoyol dışı sistemlere entegrasyon için de değerlendirilmektedir.[18] Genellikle vanandyum bazlı SCR katalizörü, vanadyum pentoksit(V_2O_5) ve titanya ile birlikte kullanılan tungsten trioksitten(WO_3) meydana gelir. 300-450°C egzoz sıcaklık aralığında NO_X azaltımı için yüksek aktivite ve kükürt zehirlenmesine karşı üstün direnç avantajları göstermiştir. Fakat teknolojinin gelişmesi ile birlikte yeni geliştirilen V-SCR katalizörleri eskisine göre daha yüksek sıcaklıklara dayanmakta ve herhangi bir

işlev kaybına uğramamaktadır. Bu nedenle, egzoz sıcaklığı 650°C'ye kadar olan sistemlerde ve bazı Avrupa OEM uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır.[19] Düşük kükürt oranına sahip dizel yakıtının kullanıldığı pazarlarda V-SCR katalizörleri tercih edilebilinir.

Hem dizel partikül filtresinin hem de SCR katalizörünün gerekli olduğu daha zorlu uygulamalarda, özellikle SCR katalizörü DPF'nin aşağı akışına yerleştirildiğinde, aktif DPF rejenerasyonunun V-SCR katalizörünü ciddi şekilde devre dışı bırakabileceğine dikkat edilmelidir. Ek olarak, V_2O_5 gibi toksik vanadyum bileşiklerinin bu katalizörlerden yüksek sıcaklıkta atmosfere salınması zararlıdır.[20] Bu sebeple, termal olarak kararlı ve çevre dostu V-SCR katalizörlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

V-SCR katalizörleri için, doğal olarak kükürt zehirlenmesine karşı üstün toleransları ve yağlayıcı zehirlenmesine karşı iyi toleransları nedeniyle, dizel kükürt içeriğinin sıkı bir şekilde düzenlenmediği uygulamalarda kullanılabilinir. Ayrıca, bu SCR katalizörleri HC zehirlenmesine karşı dirençlidir. Son gelişmeler ile birlikte termal yıpranmanın haricinde NO_X indirgeme verimliliği açısından olumlu sonuçlar vermektedir.[21]

b. Zeolit SCR

Daha katı emisyon standartlarını karşılamak için sistemde hem DPF hem de SCR katalizörleri kullanıldığında, genellikle tercih edilen NO_X indirgeme teknolojisidir. Geçiş metalleri, zeolit SCR katalizörlerini teşvik etti. Özellikle bakır(Cu) ve demir (Fe) içeren formülasyonlar, verimli NO_X indirgeme aktiviteleri ve otomotiv uygulamaları için üstün termal dayanıklılıkları nedeniyle NO_X emisyonlarının azıltılması için kullanılır.[21]

c. Cu ve Fe Zeolit SCR

Cu-zeolit(CuZ) ve Fe-zeolit(FeZ) SCR katalizörleri, düşük sıcaklık koşullarındaki performansları, egzoz gazının hızlı olduğu durumlarda yüksek verimleri ve sağlam yüksek sıcaklık dayanıklılığı nedeniyle tercih edilir.[21]

1.1.4.4 Fakir NO_x Tutucu

Temelde LNT, dizel motorlu araçların egzoz sisteminde NO_x emisyonlarını indirgemek için kullanılan sistemlerden bir tanesidir. LNT, yakıtça fakir çalışma şartlarında NO_x emisyonlarını kendi içerisinde tutar. Yakıtça zengin çalışma şartlarında tutulan zararlı NO_x emisyonlarını bir takım kimyasal tepkimeler sonucunda zararsız hale indirger.[75] Bu sistem genellikle ağır ticari dizel araçlarda içerisinde bulundurduğu platin gibi değerli metallerin maliyeti ve performansı açısından pek tercih edilmez.

1.1.5 Dizel Motorlarda Yakıt Püskürtme Sistemi

1990'ların başından itibaren dizel motorlu araçlar da yakıt sistemlerini geliştirmek için çeşitli projeler başlatıldı. Yakıt ekonomisi ve güç yoğunluğunun avantajlarından dolayı araçların doğrudan püskürtmeli sistemi kullanacağı düşünüldü. Dizel motorların performansında püskürtme sistemleri önemli bir paya sahiptir. Dizel motorlarda elde edilen önemli gelişmeler ile yakıt püskürtme teknolojilerinin gelişmesi paraleldir. Sistemin temel amacı, dizel motorunun silindirlerine yakıt sağlamaktır. Fakat performans, emisyon ve gürültü konularında fark yaratan yakıtın nasıl püskürtüldüğüdür. Dizel püskürtme sistemleri yüksek püskürtme basınçlarına sahiptir. Bu özellik, sistem tasarımlarının ve malzemelerinin daha yüksek gerilimlere dayanacak şekilde seçilmesi ve aynı zamanda motorun dayanıklılık hedeflerine uygun sürelerde performans göstermeye devam etmesi gerektiği anlamına gelir. Sistemin verimli çalışması için üretim süreçleri şüphesiz önemlidir. Fakat üretim maliyetlerinin yanı sıra, dizel motorlarda uygulanan püskürtme stratejileri ve kontrol algoritmaları ile toplam maliyet azaltılabilinir. Böylelikle maliyetleri azaltarak, gereksinimleri karşılayacak bir sistem inşa edilinebilinir.[2]

1.1.5.1 Yakıt Püskürtme Sisteminin Amacı

Yakıt püskürtme sisteminin temel amacı, bir motorun silindirlerine yakıt sağlamaktır. Bu, sistemin genel amacı olsa da, temel öneme sahip özel hedefleri güç gereksinimini karşılamak için doğru miktarda yakıt sağlanması ve yakıtın silindire zamanında verilmesi, yani püskürtme zamanlaması ve kontrolü olarak tanımlanabilir. Fakat verimli yanma elde etmek için istenilen zamanda ve istenilen

miktarda yakıt vermek tek başına yeterli değildir. Püskürtülen yakıtın hava ile hangi oranda karıştığı çok önemlidir. Bu sebeple, yakıtın pülverizasyonu yani yakıtın ufak damlacıklar halinde silindir içerisinde dağılımı, iyi tasarlanmış bir yakıt püskürtme sisteminin önemli hedefi olmalıdır. Tüm bunlara rağmen pülverize edilmiş yakıt, doğru miktarda ve doğru zamanda püskürtülmüş yakıt dağıtımı bile düşük yanma verimliliğine yol açabilir. Diğer önemli parametre yakıt-hava karışımının oranıdır. Küçük damlacıklara ayrılmış yakıt yanma verimliliği için önemi bir parametre olsa da silindir içerisindeki hava miktarıda yanma verimliliği için önemlidir. Bu amaca ulaşmak için daha iyi hava kullanımı sağlanmalıdır. Bu sebeple, silindir içerisindeki homojen yakıt-hava karışımı, yakıtın silindir içerisideki dağılımı göz önünde bulundurularak çoklu püskürtme stratejisi ile gerçekleştirilebilinir. Dizel yakıt püskürtme sisteminin birincil amaçları, püskürtme stratejileri, atomizasyon, penetrasyon ve püskürtme kalite kontrolüdür. Geçmişten günümüze daha sıkı halen gelen emisyon sınırlandırmları ile birlikte daha iyi performans için yakıt püskürtme sistemlerinin önemi her geçen gün artmaktadır. Gerçekten de modern dizel yakıt püskürtme sistemleri, hava ve yakıt karışımına katkıda bulunmalarının haricinde ölçme, zamanlama ve püskürtme görevlerini de yerine getirmelidir. [22]

1.1.5.2 Common Rail Sistemi

Common Rail sisteminde yakıt, ray adı verilen bir akümülatörden enjektörlere dağıtılır. Ray, yüksek basınçlı yakıt pompası tarafından desteklenmektedir. Raydaki basınç ve silindirlerdeki püskürtmenin ne zaman başlayacağı ve ne zaman biteceği elektronik olarak kontrol edilir. Sistemin başlıca avantajları aşağıda listelenmiştir.

- Yakıt basıncının ayarlanması, motor devrinden ve yükünden bağımsızdır. Böylelikle püskürtme zamanlamasının kontrol edilmesinde esneklik sağlar.
- Düşük motor devirlerinde ve yüklerinde bile yüksek püskürtme sağlanılabilinir.
- Bu sistem ile birlikte püskürtmeyi kademelendirmek mümkündür. Azaltılmış NO_x emisyonlarını azaltmada ve motordan kaynaklanan gürültüyü önlemek ön püskürtme sayesinde gerçekleştirilebilinir.

- Art püskürtme yeteneği sayesinde, yanma sonrası iyileştirme sistemlerinden DPF ve SCR gibi emisyon azaltmak için kullanılan teknolojiler ile birlikte uyumlu olarak kullanılabilinir.

Common rail, PM ve HC emisyonlarının azaltılması için de önemli avantajlar sunmaktadır.

Motor gürültü seviyelerinin iyileşmesi ve NO_X emisyonlarının azalması optimize edilmiş ön püskürtmenin kullanılması ile sağlanır. Bütün bu avatajlar Common Rail sisteminde ön püskürtme miktarının istikrarlı dağıtılması ile mümkündür. Motorun bütün yük ve hız aralığında küçük pilot yakıt miktarlarının istikrarlı dağıtımını yapabilen CR sistemi ile gerçekleştirilmiştir.[23] Common Rail sisteminin başlıca elemanları yüksek basınçlı yakıt pompası, ortak ray ve enjektörlerdir. Enjektörlerdeki püskürtme zamanlaması elektronik kontol ünitesi(ECU) tarafından kontrol edilir.

Common Rail sisteminin çalışma prensibinde, düşük basınçlı pompa yakıtı depodan alır. Yakıt deposundan alınan yakıt bir filtreden geçirilerek yüksek basınç pompasına iletilir. Bir valf yardımıyla yüksek basınç pompasına iletilen yakıtın miktarı kontrol edilir. Motor tarafından tahrik edilen yüksek basınç pompası bir basınç regülatörü aracılığıyla Common Rail ray hattına sabit bir basınçta yakıtı iletir. Ray hattı üzerinde bulunan bir basınç sensörü vasıtasıyla yakıt basıncı ölçülür. Yakıt basıncı verisi, ECU tarafından hem basınç regülatörü hem de valf için kullanılarak ray hattı üzerindeki yakıt basıncı kontrol edilir. Gereğinden fazla olan yakıt, basınç regülatöründen tekrar yakıt deposuna geri beslenir. Ek olarak ray hattı sayesinde yüksek basınç pompasının ve püskürtme işleminin sebep olduğu istenmeyen anlık basınç değişimleri azaltılmıştır. Bu sayede enjektörlere hep sabit basınçta yakıt sağlanır. Common Rail sistemi sayesinde çeşitli püskürtme stratejileri uygulanılabilinir.[23]

1.1.5.3 Common Rail Sisteminin Fonksiyonları

Common Rail yakıt püskürtme sistemi, ECU ile entegre olarak, modern güç aktarma organlarının gereksinimlerini karşılamak için yakıt dağılımı yani çoklu püskürtme imkanı ve püskürtme zamanlaması gibi önemli işlevleri yerine getirir.

Geçmişten günümüze yakıt püskürtme sistemlerinin amacı yakıt dağıtımını ve püskürtme zamanlamasını kontrol ederek, yakıt ekonomisini ve zararlı emisyonları optimize etmektir. Ek olarak yakıt dağıtımı, püskürtme basıncının ve süresinin bir fonksiyonudur.

CR püskürtme sistemi, ön püskürtmelere ve art veya ikincil püskürtmelere de izin verir. Ön püskürtmelerin temel amacı, CR püskürtme sistemine sahip dizel motorlarda, motor gürültüsünün ve emisyonların azaltılmasıdır. Sürüş koşullarına bağlı olarak özellikle şehir içi günlük kullanımda motordan kaynaklanan gürültüyü azaltmak için genellikle ilk püskürtülen ön püskürtme küçük, ikincil püskürtülen ön püskürtme daha büyük olmak üzere iki kademeli ön püskürtme stratejisi uygulanır. Common Rail sistemlerindeki kontrol stratejileri, birden fazla ön, ana ve birden fazla art püskürtme kullanımına olanak tanır. Bu yetenek ile birlikte sistemlerin kontrol stratejileri esnek hale gelmiştir. Egzoz gazının sıcaklığını artırmak art püskürtme ile mümkündür. Dizel partikül filtreleri veya NO_x indirgemeye yardımcı sistemlerin kullanılması için avataj sağlamaktır.[26]

a. Ön(Pilot) Püskürtme

Ön püskürtmenin temel işlevi motor gürültüsünü azaltmak ve NO_x emisyonlarını azaltmaktır. Bu ön püskürtmeler tipik olarak ana püskürtmenin belirli bir yüzdesini oluşturur.[25]-[30]

b. Ana Püskürtme

Ana püskürtme olayı, motor çevrimi için yakıtın büyük kısmını sağlar. Ana püskürtmeden önce gerçekleşen püskürmelere ön püskürtme, ana püskürtmeden sonra gerçekleşen püskürtmelere art püskürtme adı verilir. Ön ve art püskürtmelerde ana püskürtmeye göre az miktarda yakıt sağlanır. Modern dizel motorlarda, yakıt her zaman yanma odasına tek seferde püskürtülmez. Ancak motor hızına ve yüküne bağlı olarak püskürtme ayrı püskürtmelere bölünebilinir.[24]-[30]

c. Art Püskürtme

Art püskürtme temelde egzoz gaz sıcaklığını artırmak ve egzoz gazındaki HC bileşenini artırmak için kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde emisyon azaltmaya

yardımcı egzoz elemanları ile uyumlu olarak çalışabilir. Bu sistemlere örnek olarak, NO_x indirgemeye yardımcı seçici indirgeme katalizörleri ve PM gibi zararlı emisyonları temizlemek için kullanılan dizel partikül filtreleridir. Egzoz sıcaklıkları yeteri kadar yüksek değilse, aktif rejenerasyon gerçekleşmeden sadece pasif rejenerasyon ile istenilen emisyon azaltılması sağlanamayabilinir. Art püskürtme ile, filtrenin tam rejenerasyonunu sağlamak için egzoz sıcaklığını periyodik olarak artırarak aktif temizleme stratejsi kullanılabilinir.[28]-[29]-[30]

1.1.5.4 Yakıt Püskürtme Kontrolü

Püskürtmeler genellikle ön, ana ve art püskürtmeler dahil olmak üzere birkaç aşamaya ayrılır. Püskürtme zamanlaması ÜÖN'ya göre, püskürtme miktarı ise strok başına mm^3 olarak ile tanımlanır. Sıkıştırma stroku için referans olarak bir kam sinyali kullanılır. Püskürtmenin krank milinin dönüşü ile senkronizasyonu, volandan alınan krank mili hız sinyaline dayanır. Hız sinyali ise volan dişlerinin sayılmasına dayanır. Volan sensöründen gelen veriler, motor devri kontrolü, yakıt dağıtımı ve ayrıca volan hızı düzensizliklerini tespit etmek için de kullanılabilir.

Dizel motorlu araçlarda yakıt miktarının hesaplanması gaz pedalına uygulanan tepkilere bağlıdır. Gaz pedalı ile istenilen yakıt miktarı belirlenir. Kontrol ünitesi yakıt miktarı ayar noktası ve ray basıncından, enjektörler için darbe uzunluğu hesaplar. Zamanlama kontrolü için ilerleme açısı, motor devri kullanılarak zaman aralığına dönüştürülür. Enjektörlerin açılma ve kapanma gecikmeleri kalibrasyon ve yazılımsal olarak kompanse edilebilinir.[27]

1.1.6 Dizel Motorlarda Çoklu Püskürtme ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Isıl verimililiğe sahip bir dizel motorda, yakıt doğrudan sıkıştırma stroğunun sonuna doğru yanma odasına püskürtülür. Bu durumda yanma odasında istenilen homojenliğin yakalanmadığı yakıt-hava karışımı elde edilir..Yüksek sıcaklık bölgesinde NO_x oluşumu ve yakıt açısından zengin karışım olan bölgelerde partikül madde oluşumu sorunu vardır.[31]-[32] Birçok araştırmacı, DPF, SCR ve DOC gibi son işlem ekipmanlarını emisyonları azaltmak için kullanmıştır.[33] Bunun ile birlikte dizel egzoz emisyonlarını azaltmak için basınçlı püskürtme ve çoklu püskürtme stratejisi de uygulanmıştır.[34]-[35] Çoklu püskürtme stratejsinin en büyük avantajı motorun haricinde ilave sistemler kullanmadan

yanma sonucu oluşan emisyonların optimizasyonunu sağlamaktır. Bu avantajı sebebiyle araştırmacıların ilgisi, geçmişten günümüze korunmaktadır. Genel olarak, çok aşamalı püskürtme, ana püskürtmenin iki veya daha fazla püskürtmeye bölündüğü, böylece yanma odasındaki hava ile yanma alevinin çevresi arasındaki reaksiyon bölgesini genişleten bir yöntem anlamına gelir. Reaksiyon bölgesine genişlelerek daha homojen bir karışım elde edilir ve yakıtça zegin bölgeler azaltılır. Ayrıca çok kademeli püskürtme stratejisi, ana püskürtmenin tutuşma gecikmesini azaltır. Böylelikle, çok kademeli püskürtmeli stratejisi ile yanmanın tek püskürtmeli ana püskürtme yanmasına nazaran NO_X ve PM emisyonunu azaltmada yardımcı olduğu söylenebilinir.[36]-[37] Bu nedenle, bir çok araştırmacı, dizel motorlarda yakıt tüketimini optimize etmek ve dizel motorlardan kaynaklı zararlı emisyonları azaltmak için çoklu püskürtme stratejisine halen ilgi duymaktadır.

Bu tez kapsamında sadece ana püskürtme, ön ve ana püskürtme, iki aşamalı ön püskürtme ve ana püskürtme stratejileri incelenmiştir. Çoklu püskürtme stratejisi, iki veya daha fazla parçaya püskürtme olarak adlandırılır. Ana püskürtmeden önceki püskürtme olayları, ön püskürtme olarak adlandırılır. Bu yapılan çalışmalar geçmişten günümüze uygulanması zorunlu emisyon limitlerinin azaltılması ve daha sınırlandırıcı olması sebebiyle önem arz etmektedir.

Yakıt püskürtme stratejisi, yakıt tüketimi hedeflerini göz ardı etmeden dizel motorda emisyonları ve yanma gürültüsünü aynı anda azaltmada önemli bir rol oynayabilir.[38]-[39] Tek bir yakıt püskürtmesi, küçültülmüş boyutta çok sayıda ayrı yakıt püskürtme olayıyla değiştirmek için benimsenen çoklu püskürtme stratejisi, modern enjektörlerle donatılmış CR sistemleri kullanılarak kolayca uygulanabilir.[40] Bu enjektörler sayesinde oluşan basınç salınımlarına karşın küçük miktarda püskürtülen yakıtın kontrolü de mümkündür.

Birçok farklı çoklu püskürtme konfigürasyonu mevcuttur. Özellikle düşük sıcaklıkta yanma stratejilerinde, ön püskürtme kullanan ilk temel konfigürasyon, ana püskürtmeden önce bir miktar yakıt püskürtülerek uygulanabilir. Geleneksel dizel yanma sistemlerinde ön püskürtme ile elde edilen kütle, ana püskürtme ile elde edilen kütleye göre küçüktür.[39] Diğer bir konfigürasyon, ana püskürtmenin

tamamlanması ile birlikte art püskürtme adı verilen son bir püskürtmedir. Ön püskürtmenin yakıt tüktimi, yanma gürültüsü ve emisyonlar açısından etkileri mevcuttur.[41] İs emisyonları, ana püskürtmenin süresinden önemli ölçüde etkilenir. Aslında dizel motorlarda hem hava fazlalık katsayısı oranı hem de yerel silindir içi sıcaklığın yüksek olması nedeniyle ana yanma sonunda önemli derece kurum emisyonu oluşmaktadır. Özellikle uzun ana püskürtme süreleri düşünüldüğünde, ana püskürtmenin enerji verme süresinde küçük bir azalma bile önemli derecede kurum emisyonunu azaltabilir.[42] Çoklu püskürtme konfigürasyonlarında ana püskürtmenin kısaltılmış zamansal uzunluğu daha az kurum üretir. Ayrıca, doğru şekilde planlandığı takdirde, ana püskürtme sonrası yakıttan gelen kurumun katkısı, art püskürtülecek yakıtın ana püskürtmeye dahil edildiği duruma göre daha düşük olabilir.[43] Ana püskürtmenin yanması ile art püskürtme yanması arasındaki etkileşimin optimizasyonu ve ayrıca burada üretilen kurumun en aza indirilmesi için enjekte edilen sonraki kütleye bağlı olan optimum bir bekleme süresi mevcuttur.[45] Yapılan çalışmalarda kurum emisyonunun azalımı, art püskürtmenin başlaması ile ana yayıcı alevin küçük bir bölgesinde kademeli olarak püskürtülmesi ile elde edilir.[44]

Art püskürtme, ana püskürtmeye yakın ve aşamalı olarak yapılırsa, yanmanın ağırlık merkezi ÜÖN'ya doğru hareket eder ve alev sıcaklıkları yükselir. Böylece art püskürtmenin olmadığı duruma göre daha yüksek NO_x emisyonları ve daha düşük CO emisyonları elde edilir. Art püskürtmenin zamanlaması, ana püskürtmeden yeterince uzakta gerçekleşirse, NO_x emisyonları, art püskürtme olmayan duruma kıyasla iyileşirken, yakıt ekonomisi açısından kötüleşir ve bu da daha yüksek özgül yakıt tüketimi değerlerine yol açar.[46] Çoklu püskürtme stratejilerinde bir çok farklı kombinasyonun farklı etkileri olabileceği için DoE ile optimize edilmiş kalibrasyon değişiklikleri kullanılması gerektiğini bildirmiştir.[47]

Roh ve diğerleri [48], bir dizel motorunda ön püskürtmenin yanma olayına ve emisyonlara etkisini araştırmışlardır. Ön püskürtme sırasında maksimum yanma basıncının önemli ölçüde azaldığını ve silindirdeki yanma basıncının artış hızının da azaldığını bildirdiler.

Park ve diğerleri [49], rölanti durumunda ve düşük devir bölgesinde ön püskürtme stratejisi uygulandığında, ana püskürtme sırasında yanma odasında yüksek sıcaklıkta yanma alanı oluştuğunu ve havanın azalması nedeniyle partikül maddenin arttığını bildirdiler.

Huang ve diğerleri [50], dizel motorda düşük devirlerde ön püskürtmenin yanma olayına etkisini incelediler. Ön püskürtme ve ana püskürtme arasındaki püskürtme zamanlamasının azaltılmasının yakıt tüketimini ve NO_x emisyonlarını azaltabileceğini vurguladılar.

Suan ve diğerleri [51], bir dizel motorda çoklu püskürtme stratejisi uygulayarak ve püskürtme zamanlamalarını, püskürtme basınçlarını göz önünde bulundurarak bir araştırma sunmuşlardır. Genel olarak püskürtme zamanlamasının artması ile NO_x ve HC emisyonlarında artış gözlemlemişlerdir. Fakat CO ve is emisyonlarında önemli azalmalar saptamışlardır. Ek olarak, sabit bir püskürtme aralığı ile püskürtme zamanlamasının gecikmesi NO_x, CO ve HC emisyonlarını azaltırken kurum emisyonunu artırdığını söylemişlerdir.

Nehmer ve diğerleri [52], ön püskürtme miktarını ve püskürtme zamanlamasını 1600 d/d motor devri ve 0.45 eşdeğerlik oranı ile değiştirerek ön püskürtme stratejisinin etkisini gözlemlemişlerdir. Az miktarda ön püskürtme ile kurum emisyonu sabit kalırken NO_X emisyonunun azaltılabileceğini bulmuşlardır. Ayrıca, ön püskürtme ile ana püskürtme arasındaki püskürtme zamanlamasının emisyon özellikleri açısından önemli bir etkisi olmadığını söylemişlerdir.

Tow ve diğerleri [53], iki aşamalı bir pilot püskürtme sistemi ile 1.82 atm giriş basıncı ve 1.15 atm giriş basıncı altında tek bir püskürtme sistemi ile karşılaştırıldığında, 1600 d/d motor hızında maksimum tork yüklerinde kurum ve NO_x 'in sırasıyla %50 ve %30 azaltılabileceğini bildirmiştir.

Babu ve diğerleri [54], çoklu püskürtme yöntemi kullanıldığında kurumun oksidasyonunun yanmadan sonra daha kuvvetli bir şekilde meydana gelmesi nedeniyle, kurum seviyesini korurken NO_X'i azaltmanın mümkün olduğunu öne sürmüşlerdir.

Okude ve diğerleri [55], farklı miktardaki püskürtmelerin ve püskürtme zamanlamasının ön püskürtme özelinde etkilerini araştıran bir çalışma

gerçekleştirdi. Ön püskürtme yoluyla emisyonun azaltılmasının, bir pilot püskürtme stratejisi ile emisyonu daha da azaltmak için dikkate alınması gereken önemli bir faktör olduğunu bildirdiler.

Lee ve diğerleri [56], çoklu püskürtmelerin emisyonlar üzerindeki etkisi, bir ağır hizmet dizel motorunda, geniş bir püskürtme zamanlama aralığı, çeşitli püskürtme miktar oranları ve çeşitli bekleme süreleri ile tek pilotlu püskürtme ve çift pilotlu püskürtme stratejilerine odaklanılarak araştırıldı. Çift pilot püskürtme kullanıldığında önceden daha iyi karıştırılmış karışım oluşumu nedeniyle, çift pilotlu püskürtme, tek pilotlu püskürtmeye kıyasla NO_X ve kurum emisyonlarını sırasıyla %73 ve %84 oranında azaltılabilir olduğunu söylemişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde hava kirliliğin en önemli nedenlerinden biri dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticilerdir. Tez çalışmasının amacı, giderek daha sıkı hale gelen ve gelecek yıllarda yürürlüğe girecek EuroVII emisyon düzenlemeleri sebebiyle; pazar gereksinimlerini karşılarken azot oksit(NO_x) emisyonunun sınırlandırılması ve dizel motordan kaynaklı zararlı emisyonların sera gazı etkisi için yenilikçi çözümler ve yaklaşımlar sunmaktır. Kullanılan çoklu püskürtme stratejileri ile NO_x emisyonu ve yakıt tüketim davranışları deneysel olarak çevrim dışı optimizasyon aracı kullanılarak elde edilmiştir. Güvenilir ve tutarlı bir dizel yanma modeline sahip olmak, en iyi motor performansını sağlamak ve pazarda rekabetçi olmak için emisyon hedeflerini, donanım dayanıklılık sınırlarının karşılanmasını kolaylaştırır. En optimum yakıt tüketimini elde etmek için çevrim dışı optimizasyon araçları veya modellemeler önemli bir araçtır. Veriye dayalı bu tür modeller, motor tepkilerini bilgisayar ortamında doğru bir şekilde modelleme yeteneği sunar. Bu yetenek kalibrasyon çabasını ve test süresini önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olur. Bu süreç, geliştirme ve test maliyetlerini azaltır.

1.3 Hipotez

Dizel motorlu vasıta kullanımı, yanma prosesinde yüksek enerji verimliliği sayesinde ağır ticari ve orta ticari hizmet sektöründe oldukça popülerdir fakat dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticiler insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu kirleticlerden en önemlisi NO_x emisyonlarıdır. NO_x emisyonlarının

doğrusal olmayan davranışlarını tahmin edebilmek, insan sağlığına zararlı ve sera gazı etkisi olan emisyonların gerçekçi bir şekilde azaltılması için güvenilir ve tutarlı bir dizel yanma modeline sahip olmak hedeflenmektedir. Bu model, en iyi motor performansını sağlamak ve pazarda rekabetçi olmak için emisyon hedeflerini, donanım dayanıklılık sınırlarının karşılanmasını kolaylaştırır.

Bu sebep ile NO_x emisyonlarının doğrusal olmayan davranışı çoklu püskürtme stratejileri uygulanarak gözlemlenmiş ve modellenmiştir. Bu çalışmada çoklu püskürtme stratejisini sadece ana püskürtme, ön ve ana püskürtme, iki aşamalı ön püskürtme ve ana püskürtme olarak üç farklı strateji tanımlanmıştır. Çoklu püskürtme stratejisinin NO_x emisyonuna etkisini gözlemlemek amacıyla test düzeneğinde deney tasarımı yöntemi ile motor çalışma noktalarında gerçek zamanlı ölçüm alınmıştır. Bu ölçümler Gaussian regresyon modelininin kurulması içinde kullanılmıştır. Bu yetenek ile birlikte insan sağlığına zararlı ve sera gazı etkisi olan emisyonların azaltılması için kalibrasyon çabasını ve test süresini önemli ölçüde azaltması hedeflenmektedir.

Dizel motorlarda çoklu püskürtme stratejisi uygulanarak yakıt tüketimi ve sera etkisinden ne kadar ödün vererek NO_x emisyonlarının indirgenebildiğini kurulan model ve deneysel testler ile karışılaştırılmalı ortaya konulmuştur.

NO_x emisyonunu indirgediği bilinen sistemler egzoz sisteminde kullanıldığında bile NO_x emisyonlarından bir tanesi olan N_2O'nun sera gazı etkisinin araştırılması hedeflenmektedir. İnsan sağlığına zararlı NO_x emisyonunu azaltmamıza rağmen sera gazı etkisi olan N_2O emisyonunun davranışının gözlemlenmesi hedeflenmektedir.

2
METOT

Tez çalışmam süresince verilerimi elde ettiğim motor, test, ölçüm sistemleri ve modelleme yöntemleri bu bölümde anlatılacaktır.

2.1 NO_x Emisyonu İçin Uygulanan Modelleme Yöntemleri

Dizel motor NO_x modeli ile ilgili mevcut çalışmalar, sistem hakkındaki bilgilere dayalı olarak siyah, gri ve beyaz kutu modellemesi olmak üzere üç ayrı grupta toplanabilir. Kara kutu modelinde model, herhangi bir temel fiziğe başvurmadan, gerçekleştirilen deney verilerini kullanarak girdi ve çıktı arasında ilişki kurar.[57] Bu yöntem, sistemin iç fenomeni hakkında tam olarak tanımlanmış bilgi ve formülasyon gerektirmez. Gri kutu modellemede, modelin kurulması için deney verilerinin ve sistem hakkındaki kısmi bilgilerin entegrasyonu kullanılır.[58] Son olarak, fiziksel dinamiği tam olarak bilinen sistemler için beyaz kutu modelleme kullanılabilir.

Bir dizel motorda, yanmanın fiziksel formülasyonu ve NO_x emisyon modellemesi, doğrusal olmayan davranış nedeniyle çok karmaşıktır. Beyaz ve gri kutu modelleme süreçleri sırasında, doğruluk maliyeti sorunlarıyla birlikte gelen çeşitli basitleştirmeler ve varsayımlar dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, dizel motor NO_x emisyon modellemesi üzerine mevcut çalışmalar, veriye dayalı kara kutu yaklaşımlarını yaygın olarak kullanmaktadır.

Henningsson ve diğerleri [59], 6 silindirli ağır hizmet motoru için bir lineer durum-uzay modeli tanıttı. Yakıt miktarları ve püskürtme zamanlamaları, turboşarj konumu ve EGR oranı girdi olarak verilmiştir. Çıkış değişkenleri olarak seçilen IMEP, NO_x, kurum ve tepe basınç türevleridir.

Benatzky ve diğerleri [60] polinom statik kara kutu modelleme kullanarak bir arazi ağır hizmet motoru için bir NO_x modeli önerdi. Giriş regresörlerini değiştirerek üç farklı yaklaşım kullandılar. İlk yaklaşım, yalnızca ECU aracılığıyla elde edilebilecek parametreleri içerir. Bu yaklaşımın arkasındaki ana sebep,

tasarlanan NO_x modelinin geçerliliğini ve uygulanabilirliğini üretim ECU'sunda kontrol etmektir. Girdi olarak motor devri, enjekte edilen toplam yakıt miktarı ve ana püskürtme başlangıcı, hava kütle akışı, emme manifoldu basıncı, egzoz manifoldundaki oksijen konsantrasyonu ve ray basıncı alınır. İkinci yaklaşımda, doğrudan ECU parametrelerini kullanmak yerine, tekil değer ayrıştırma(SVD) adı verilen bir analizde silindir giriş basıncı ölçümü kullanılır. Son yaklaşım olarak, motor devri, ısı salınımı ve basınç izleri HRL yönteminde birleştirilmiştir. Yazarlar, modellerinde daha iyi bir kalite elde etmek için bu üç yöntemi hem karşılaştırdılar hem de birleştirdiler. Her bir yaklaşım geçerli bir doğruluğu sağlayamasa da, yaklaşımların kombinasyonu daha tatmin edici sonuçlar verir.

Grahn ve diğerleri [61], bir dizel binek otomobilin NO_x modelinin yerel bir doğrusal regresyon modelini oluşturmak için 2B arama tabloları kullanmıştır. Yazarlar, sistem yapısının B-spline fonksiyonu olarak tanımlanabileceğini vurguladılar ve kararlı durum koşullarında NO_x emisyonları için modellerinde ortalama % 5'lik bir bağıl hata gösterdiler.

Roy ve diğerleri [62], bir dizel aracın NO_x, kurum ve frene özgü yakıt tüketimini(BSFC) modellemek için yapay sinir ağı(YSA) yapısını kullanır. Her silindirin yakıt miktarı, yakıt püskürtme basıncı ve EGR oranı girdi olarak kullanılır. Elde edilen ortalama karekök hataları, kararlı durum döngülerinde umut verici derecede düşüktür.

NO_x modeli üzerinde yukarıda tartışılan çalışmalar göz önüne alındığında, genellikle polinomlar veya sinir ağları kullanılır, ancak her iki türün de geçici manevralarda önemli dezavantajları vardır. Bu da kalibrasyon işleminde kullanımlarını uygulanamaz hale getirir. Polinomlar yaygın olarak kullanılan yöntemdir ve çok sayıda ticari araçta mevcuttur. Polinom regresyonunun Gaussian regresyonuna kıyasla önemli avantajı basit bir yapıya sahip olmaları ve anlaşımasının kolay olmasıdır. Ayrıca, polinom regresyon hesaplama açısından ucuzdur ve motor kontrol ünitelerini uygulamak kolaydır. Polinom regresyonu ile istatistiksel testler kullanarak fazla uyumdan kaçınmak ve anlamlı olmayan parametreleri ortadan kaldırmak mümkündür. Polinom regresyonunun ana dezavantajı ise verilerin yanlış tahmin edilmesidir. Polinom modelleri, ölçüm

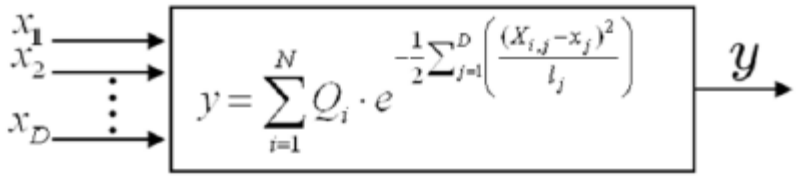
verilerinin bölgesi dışındaki yüksek (pozitif veya negatif) değerleri çok hızlı bir şekilde hesaba katma istekliliğindedir. Ayrıca, düşük dereceli polinomlar, doğrusal olmayan herhangi bir motor davranışına yaklaşmak için yeterince esnek değildir. Yüksek dereceli polinomlar dalgalı olma eğilimindedir. Sinir ağları, herhangi bir karmaşık sistem davranışını tanımlayabilir, ancak aşırı model oluşturmayı önlemek için ek doğrulama verilerine ihtiyaç vardır ve model yapılandırması yüksek uzmanlık gerektirir. Tartışılan dezavantajların bir sonucu olarak, DoE yöntemleri sadece deneysel amaçlar için uygulandı ve az sayıda kullanım durumu ile sınırlı kaldı.

2.2 Model Seçimi

Yeni bir yaklaşım, Gaussian süreçlerine dayalı makine öğrenimi yöntemlerinin kullanılmasıdır. Bu çalışmada, avantajların ve dezavantajların bir sonucu olarak, motor çıkışı NO_X oluşumunun temel parametrelerini bulmak için Gaussian regresyon modeli seçilmiştir. Gaussian süreçlerinde tamamen veriye dayalı modelleme yöntemi kullanılacaktır.

2.2.1 Gaussian Regresyon Yöntemi

Fonksiyon seti, sinyal gücü ve hata payı, her bir girdi boyutu için uzunluk ölçeği olan hiperparametreler ile karakterize edilir. Ayrıca girdiye göre çıktının değişim oranını da tanımlar. Hiperparametreler, maksimum optimizasyon doğruluğunu elde etmek için eğitim verilerine göre belirlenir. Girdilerin çeşitliliğine dayalı bir y çıktısının tahmin algoritması için son formül, Şekil 2.1'de örtüşen Gaussian çekirdek fonksiyonları bir toplam olarak tanımlanabilinir. [63]



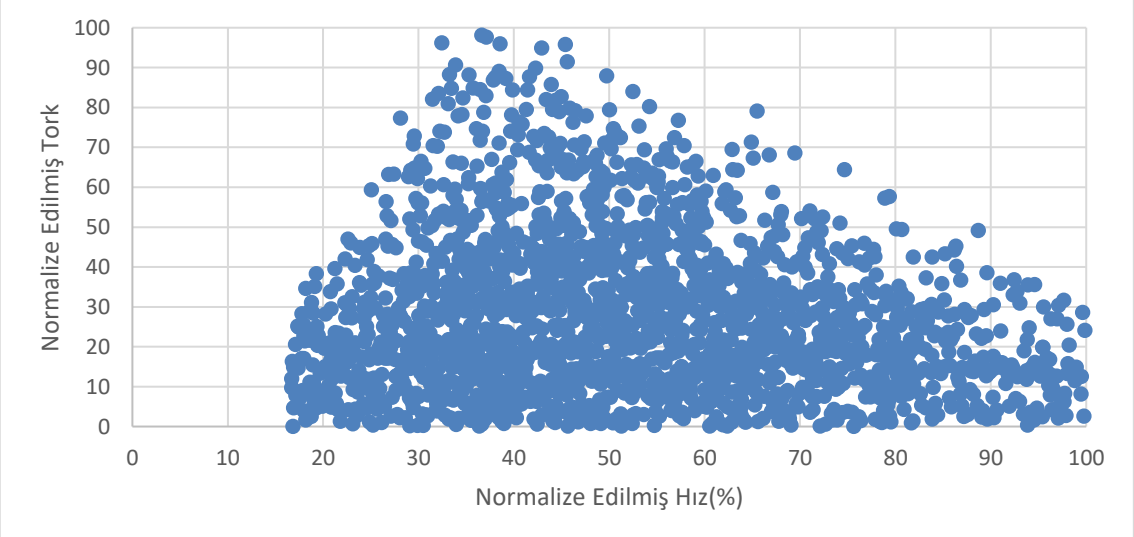
Şekil 2.1 Model Çıktısı İçin Gaussian Modelinin Formülü

2.3 Deney Tasarımı

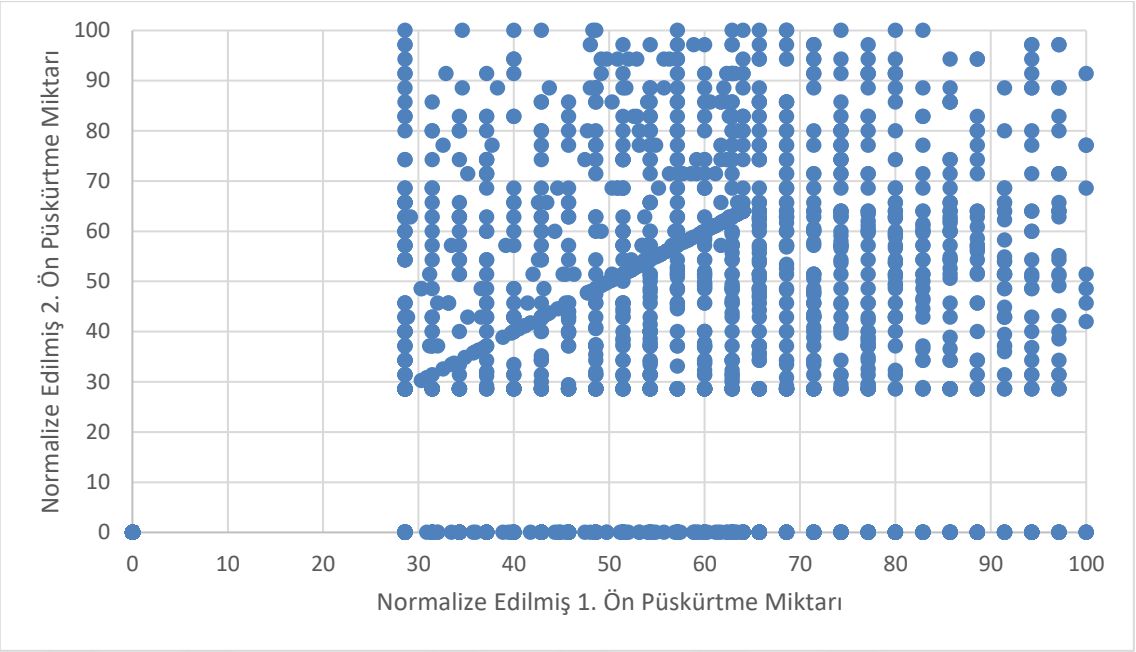
DoE yöntemi, sistemin tepkisini etkileyen çeşitli koşulların değişimine göre sistemin davranışını anlamayı amaçlayan bir görev tasarlama sürecidir. Sonuçları

doğrudan çıktıları etkileyen tanıtılan koşullarla karşılaştırarak bir sistemin davranışını keşfetmek için motor emisyonu ve performans kalibrasyonu işlemi için kullanılan en uygun teknik olarak kabul edilmektedir.

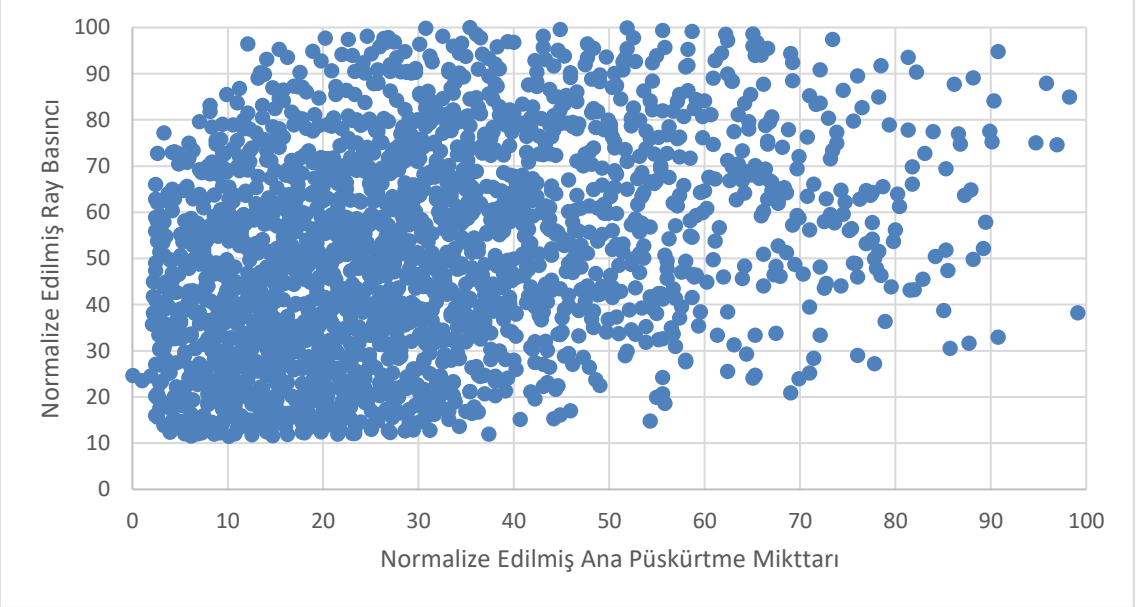
Kara kutu istatistiksel modelleme teknikleriyle birleştirilmiş DoE testi, NO_x ve kurum oluşumu gibi doğrusal olmayan tepkiler için bile motor özelliklerini doğru bir şekilde tahmin etme yeteneğine sahiptir. Veriye dayalı bu tür modeller, motor tepkilerini bilgisayar ortamında doğru bir şekilde modelleme yeteneği sunar ve bu da kalibrasyon çabasını ve test süresini önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olur. Bu süreç, geliştirme ve test maliyetlerini azaltan hemen hemen her motor kalibrasyon koşulunun çevrimdışı optimizasyonunu sağlar. DoE testini yürütmek için birkaç yöntem olmasına rağmen, en popüler prosedür, test parametrelerinin önceden belirlenmiş noktalara ayarlanıldığı, motor durana kadar bekleyen ve çıktıların ölçülmesini içeren kararlı durum ölçümüdür. Her noktanın kararlı hale gelmesi için harcanan süre göz önüne alındığında, kararlı durum testi, dinamik DoE testine göre daha uzun sürer ancak daha iyi doğruluk sağlar. Model doğruluğu temel olarak girdi uzayındaki eğitim verilerinin yerel yoğunluğuna bağlı olduğundan, veri noktalarının eşit dağılımı arzu edilir. Bu, Sobol dizisi gibi bir boşluk doldurma DoE test planı ile başarılabilir.[15] Bu çalışma için, farklı giriş parametreleri boşluk doldurma metodu ile model doğruluğunu arttırmak amacıyla kararlı durum DoE yöntemi kurulmuştur.



Şekil 2.2 Normalize Edilmiş DoE Test Noktaları



Şekil 2.3 Birincil ve İkincil Ön Püskürtme İlişkisi



Şekil 2.4 Ana Püskürtme Miktarı ve Ray Basıncı İlişkisi

3
HAZIRLIKLAR

Çoklu püskürtme stratejisinin NO_x emisyonuna etkisi gözlemlemek amacıyla kurulan Gaussian regresyon modeli dinamometre adı verilen test düzeneğinde deney tasarımı(DoE) adı verilen yöntem ile 2119 motor çalışma noktasında gerçek zamanlı ölçüm alınmış ve model oluşturulmuştur. Bu model ile 200 farklı çalışma noktasında çoklu püskürtme statejisinin NO_x emisyonuna etkisi incelenmiştir. Bu 200 nokta içerisinden 9 nokta özelinde ayn test düzeneğinde ölçümler alınmış ve deneysel olarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3.1 Deney Motoru ve Test Düzeneği

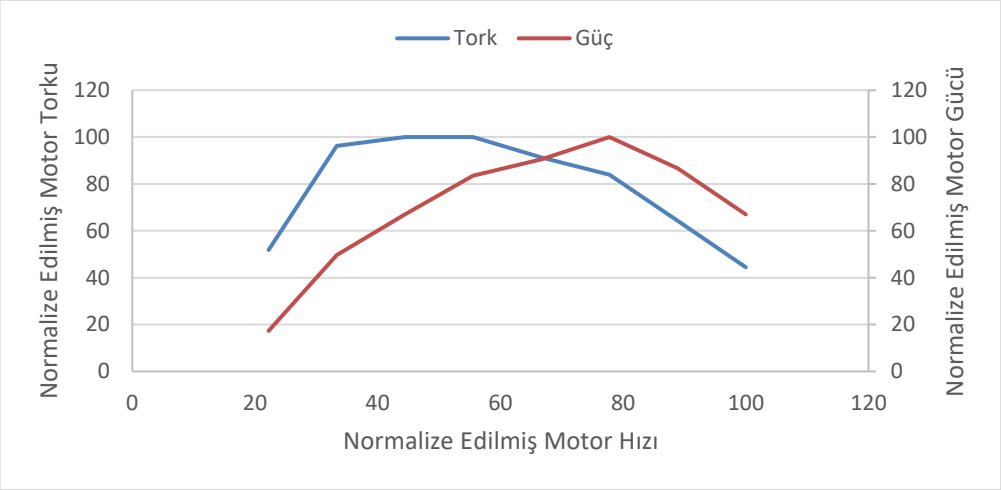
Çalışmalar esnasında 4 silindirli, 4 zamanlı, 2 litre silindir hacimli, değişken geometlili çift turboşarjlı, su soğutmalı, EGR sistemli ve yüksek basınç ortak ray yakıt püskürtme sistemine sahip orta boy ticari dizel motoru kullanılmıştır.

Ek olarak deney motoru dinometre adı verilen ve motor yönetim kontrolörlerinin kalibrasyonu, yanma davranışına ilişkin ayrıntılı araştırmalar gibi çeşitli motor geliştirme faaliyetleri için bir test ortamının parçası olarak kullanılan düzenekte test edilmiştir. Bu çalışma sırasında kullanılan deney motorun özellikleri ile ilgili bilgiler tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 1 Deney Motoru Teknik Özellikleri

Motor Özellikleri	Değerler
Yakıt Tipi	Dizel
Silindir Sayısı	4
Silindir Hacmi	2
Silindir Çapı	84 mm
Strok	90 mm
Sıkıştırma Oranı	16.5:1

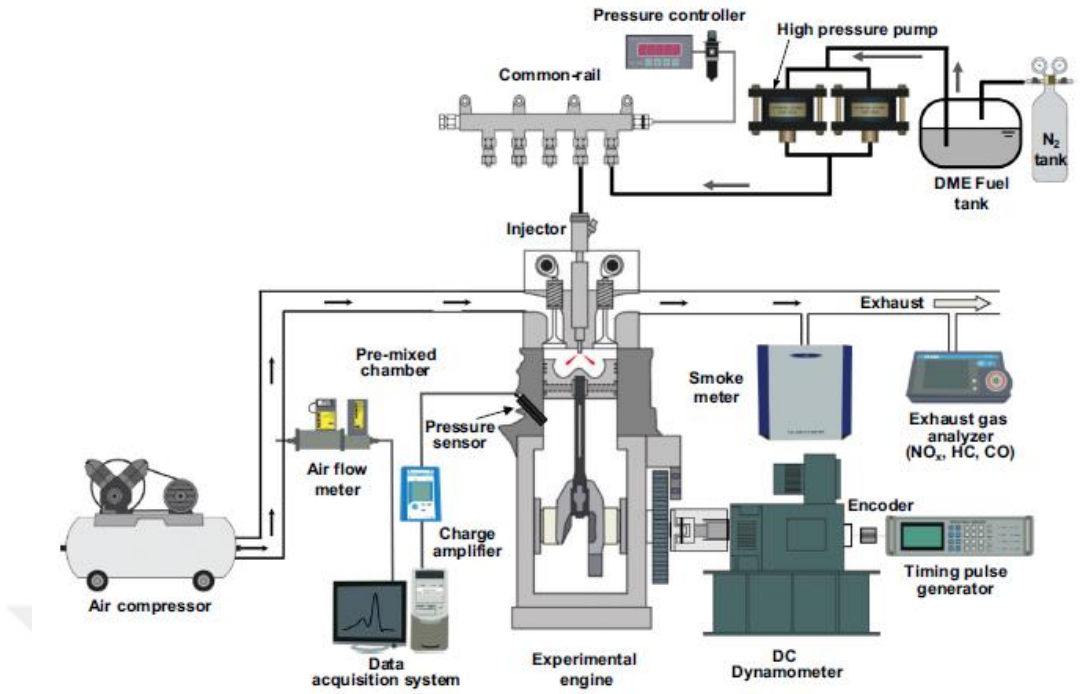
Deney motoruna ait normalize edilmiş tam yük eğrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Normalize Edilmiş Motor Tam Yük Eğrisi

3.1.1 Dinamometre

Deney motorunda yürütülen çalışmalar dinamometre adı verilen motorun tork ve hızını ölçerek motor gücünü hesaplamak için kullanılan aynı zamanda motor performansının doğrulanması, yakıt tüketimi ve emisyonların doğrulanması içinde kullanılan test odalarında yapılmıştır. Deney motoru üzerinde yürütülen çalışmalar sırasında yakıt yolu ve püskürtme parametleri değerleri kontrol ünitesi vasıtasıyla kalibrasyon parametrelerin değiştirilmesi ve sonuçlarını görülebilmesi için ATI Vision uygulaması kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Test Düzeneği Şematik Gösterimi

Motor deneyleri sırasında AVL firmasının DynoExact APA 204/8 dinamometresi kullanılmıştır. Bu dinamometre maksimum 220 kW güce sahip asekron frenleyici tiptedir. Dinamometreler motorun tork ve hızı ölçerek motorun gücünü hesaplamak için kullanılır. Aynı zamanda emisyonların doğrulanması içinde önemlidir. Dinamometrede tork ve hız gibi konum istekleri için AVL PUMA programından faydalanılır. Dinamometre, AC motorun frekansı ayarlanarak aynı anda hız ve tork kontrol edilerek kullanılabilir. Kontrol ünitesine bağlı AVL PUMA ve ATI Vision programları arasında veri alışverişi olmaktadır.

Bu test sistemlerinde, sıcaklık koşullandırma sistemi, harici bir su deposundan gelen soğutulmuş su ile sağlanır. Soğutma suyu sırasıyla yakıt, motor soğutma sıvısı ve yağlayıcı yağ koşullandırma sistemlerine dağıtılır. Döngülerdeki ısı eşanjörü ve bir adet akış kontrol valfi yardımıyla soğutucu ve yağlayıcı sıcaklıkları kontrol edilebilir. Kontrol valflerini PID kontrolör destekler. Böylelikle talep edilen sıcaklık istenilen değere kolaylıkla ayarlanır. Bu test sisteminde silindir içerisine girecek havanın sıcaklığı da kontrol edilir. Motorun çalışma durumundan bağımsız olarak istenilen sıcaklık ve nem, verilen sıcaklıkta uygun doğrulukla kontrol edilebilir.

Motor deneyleri sırasında yapılan ölçümler aşağıda listelenmiştir.

- Dinamometre tork ölçümü
- Motor hızı
- Ana püskürtme yakıt miktarı
- Ana püskürtme zamanlaması
- Birincil ön püskürtme yakıt miktarı
- Birincil ön püskürtme zamanlaması
- İkincil ön püskürtme yakıt miktarı
- İkincil ön püskürtme zamanlaması
- Ray basıncı
- Emme manifold hava giriş basıncı
- Hava debisi
- Motor soğutma sıvısı sıcaklığı
- Yakıt miktarı
- Motor gücü
- Motor çıkış azot oksit(NO_x) miktarı
- Motor çıkış is miktarı
- Motor çıkış karbondioksit(CO_2) miktarı

3.1.2 Ölçüm Cihazları

Tez çalışmam süresince verilerimi elde ettiğim test ve ölçüm sistemleri bu bölümde anlatılacaktır. Test esnasında alınan motor çalışma noktalarında ölçüm öncesi motorun stabilizasyonu sağlanmıştır.

3.1.1.1 Yakıt Tületimi Ölçümü

Deney motoru ile yapılan çalışmaları sırasında motor yakıt tüketimi, AVL firmasına ait AVL 735S yakıt tüketimi ölçüm cihazı kullanmıştır. Bu cihaz Corriolis prensibi ile ölçüm yapmaktadır. Cihazın ölçüm aralığı 0-125 kg/h'dır. Ölçüm hassasiyeti ise %0.12'dir.[64]



Şekil 3.3 Yakıt Tüketimi Ölçüm Cihazı

3.1.1.2 Yakıt Şartlandırıcısı

Yakıt sıcaklığını kontrol etmek ve giriş yakıtının şartlandırılması için AVL firmasına ait AVL 753C şartlandırıcı kullanışmıştır. İlk adım olarak dizel yakıt, ortam sıcaklığında harici bir depodan sağlanır. Daha sonra ölçüm ekipmanını olası hasarlardan korumak için yakıt filtreleri kullanılır. Yakıt akışını istenen basınçta stabilize etmek için bir yakıt regülatörü de kurulur. Yakıt tüketimini ölçmek için regülatörden sonra yakıt kütle debimetresi bağlanır. Son adım olarak, motor testi için istenen sıcaklığa ulaşmak için yakıt şartlandırma sistemine girer. Bu cihazın sıcaklık stabilizasyonu 0.02°C'dir.[67] Yapılan çalışmalar ve testler sırasında yakıt sıcaklığı 35°C olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.4 Yakıt Şartlandırma Cihazı

3.1.1.3 Hava Debisi Ölçümü

Hava debisinin ölçümü için MAF sensörü haricinde ölçüm yapabilen ABB SensyFlow tipi hava akışını ölçen cihazı kullanılmıştır. Sensyflow FMT700-P,

havanın doğrudan kütle akış ölçümü içindir. Ölçüm, çalışma basıncı ve sıcaklığından bağımsızdır. Ölçüm sistemi, bir akış ölçer sensörü, bir ölçüm bölümü ve bir besleme biriminden oluşur.[65]

Sensör bir ölçüm tüpü olarak tasarlanmıştır. Ölçüm elemanlarını kendi içerisinde bulundurur. Ölçüm bölümü, uygun boyutta giriş ve çıkış bölümlerinden bağlanabilen bir hava filtresi veya akış düzenleyiciden oluşur.

3.1.1.4 Hava Giriş Basınç Ölçümü

Manifold mutlak basınç sensörü sayesinde motorun elektronik kontrol ünitesine anlık olarak manifold basıncı verisi sağlanır. Bu veriler, hava yoğunluğunu hesaplamak ve hava kütle akış hızını tespit etmek için kullanılır. Motorda emme manifoldundaki havanın basıncını ölçmek için, manifold mutlak basınç(MAP) sensörüden faydalanışmıştır.

3.1.1.5 İs Emisyon Ölçümü

Motor deneyleri sırasında kurum emisyonlarının ölçümü için AVL markasına ait AVL 415S is ölçer cihazı kullanılmıştır. Filtre kağıdından çekilen egzoz hacmi, bir orifis akış ölçer ile ölçülür. Efektif uzunluk hesaplanır. İs sebebiyle kağıdının kararması, optik bir reflektometre ile tespit edilir. Egzoz gazındaki kurum içeriği, kağıdın kararması ve efektif uzunluğundan belirlenir.[66]



Şekil 3.5 İs Emisyonu Ölçüm Cihazı

3.1.1.6 NO_x Emisyon Ölçümü

Motor deneyleri sırasında NO_x emisyonlarının ölçülmesi için AVL firmasına ait AVL AMA i60 cihazı kullanılmıştır. AVL AMA i60, gelişmiş gaz analizörleri ve kompakt, modüler bir tasarım ile karakterize edilen üst düzey bir emisyon tezgahıdır.[67] NO_2'den NO'ya dönüşüm yöntemi ile yalnızca NO tespit edilebildiğinden, toplam NO_X'in doğru bir okumasını elde etmek için NO_2'nin NO'ya dönüştürülmesi gereklidir.

$$NO_2 + C \longrightarrow NO + CO \tag{3.1}$$

$$NO_2 + C \longrightarrow 2NO + CO_2 \tag{3.2}$$

Kemilüminesans ya da kimyasal ışıldama, madde içinde gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucu çok az miktarda ısıl ışıma ve ışık ışıması durumudur. Bir NO molekülü ozonla reaksiyona girdiğinde, kararsız bir durumda NO_2'ye oksitlenir.

$$NO + O_3 \longrightarrow {NO^*}_2 + O_2 \tag{3.3}$$

Kararsız NO_2* ışık yayar ve yayılan ışık miktarı ölçülerek numunedeki NO_X konsantrasyonu belirlenebilir.

$${NO^*}_2 \longrightarrow NO_2 + \text{ışık } emisyonu \tag{3.4}$$



Şekil 3.6 NO_x Emisyonu Ölçüm Cihazı

3.1.1.7 CO_2 Emisyon Ölçümü

Motor deneyleri sırasında CO_2 emisyonlarının ölçülmesi için AVL firmasına ait AVL AMA i60 cihazı kullanılmıştır. Dağınık olmayan kızılötesi sensör, genellikle gaz

dedektörü olarak kullanılan basit bir spektroskopik sensördür.[67] Bir numunedeki her bileşen gaz, belirli bir frekansta bir miktar kızılötesini emecektir. Bir NDIR(Nondispersive infrared sensor) sensörü, egzoz gazından bir kızıl ötesi ışını parlatarak ve numune tarafından gerekli dalga boyunda emilen kızıl ötesi miktarını ölçerek numunedeki hacimsel CO veya CO_2 konsantrasyonunu ölçebilir.

3.2 Model Kurulumu

Modelleme aşamasında ETAS ASCMO adlı bir paket programı uygulanmaktadır. Deney tasarımından elde edilen verilerle motor çıkışı NO_X formülasyonuna ve yakıt tüketimi hesabına katkıda bulunan girdiler bulunmaya çalışılır. DoE, optimum değerler için reaksiyon alanını tarama amacıyla, aynı anda farklı faktörlerin varyasyonuna izin veren, reaksiyon ve proses optimizasyonuna yönelik istatistiksel bir yaklaşımdır. Motor çıkışı NO_X oluşumu çok doğrusal olmayan bir süreçtir ve birçok parametreden etkilenebilir. Kararlı durum operasyonlarında, tüm ayar noktaları sabitlendiğinden ve motor çıkış NO_X'i bu özel hava ve yakıt yolu ayar noktaları için neredeyse sabit kaldığından, motor çıkışı NO_X üretiminin modellenmesi çok daha kolaydır. Kurulacak olan modelde parametrelerin NO_X oluşumuna ve aynı zamanda yakıt tüketimine doğrudan etkisi olan parametrelerin seçilmesi modelin yüksek doğruluk ve yüksek hassasiyette çalışması için kritiktir. Farklı parametrelerin etkilerini kendi aralarında yüksek doğruluk ile karşılaştırmak, en iyi R^2 sonuçlarını elde etmek için on iki farklı giriş seti seçilir. Kurulacak model için kullanılan model girdi parametreleri aşağıda sıralanmıştır.

- Motor hızı
- Motor torku
- Ana püskürtme yakıt miktarı
- Ana püskürtme zamanlaması,
- Birincil ön püskürtme yakıt miktarı
- Birincil ön püskürtme zamanlaması
- İkincil ön püskürtme yakıt miktarı
- İkincil ön püskürtme zamanlaması
- Ray basıncı
- Emme manifold hava giriş basıncı

- Silindir içerisine alınan hava miktarı
- Motor soğutma sıvısı sıcaklığı

Model kurulumu sırasında seçilen girdilerin, çıktılara olan etkisi tablo 3.2'de gösterilmiştir. Girdi ve çıktı parametrelerinin arasındaki lineer bağlantı gösterilmiştir. Negatif değerler birbirleri arasında negatif bağlantı olduğunu gösterir. Değer ne kadar yüksekse girdilerin, çıktılar üzerinde daha fazla etkili olduğunu gösterir.

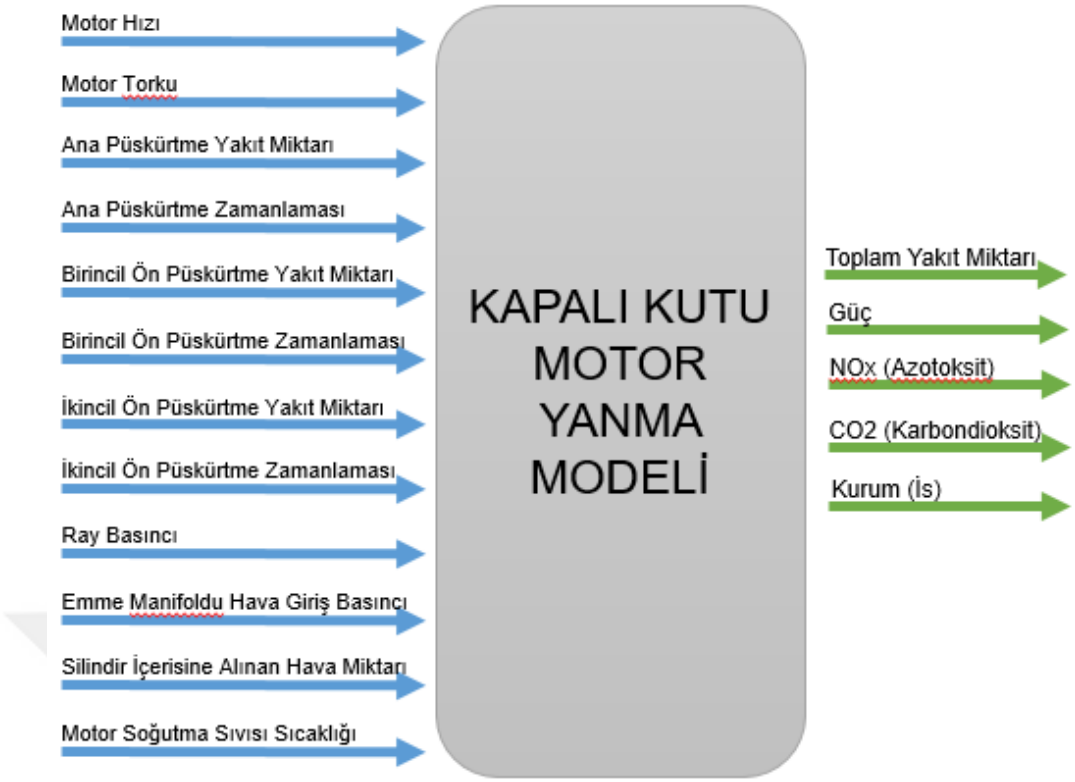
Tablo 3.2'de 1 numara motor hızını, 2 numara motor torkunu, 3 numara ana püskürtme zamanlamasını, 4 numara ray basıncını, 5 numara birincil ön püskürtme miktarını, 6 numara birincil ön püskürtme zamanlamasını, 7 numara ikincil ön püskürtme miktarını, 8 numara ikincil ön püskürtme zamanlamasını, 9 numara emme manifoldu hava giriş basıncını, 10 numara hava miktarını, 11 numara toplam yakıt miktarını, 12 numara gücü, 13 numara NO_x miktarını, 14 numara is miktarını temsil etmektedir.

Tablo 3.2 Model Girdileri ve Çıktıları Arasındaki Lineer Bağlantı

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1,0	-0,2	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,2	0,0	0,1
2	-0,2	1,0	-0,2	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1	0,8	0,8	1,0	0,9	0,4	0,2
3	0,1	-0,2	1,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	0,3	-0,1
4	0,3	0,3	-0,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,0
5	0,0	0,1	0,0	0,0	1,0	0,7	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,0	0,3	0,3	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	0,3	1,0	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	0,3	0,8	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
9	0,1	0,8	-0,3	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,4	0,1
10	0,0	0,8	-0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9	1,0	0,8	0,7	0,5	-0,1
11	-0,1	1,0	-0,3	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1	0,8	0,8	1,0	0,9	0,4	0,3
12	0,2	0,9	-0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,7	0,9	1,0	0,4	0,3
13	0,0	0,4	0,3	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1	0,4	0,5	0,4	0,4	1,0	-0,2
14	0,1	0,2	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,2	1,0

Kurulacak model için kullanılan model çıktı parametreleri aşağıda sıralanmıştır.

- Ölçülen toplam yakıt miktarı
- Ölçülen Güç
- Ölçülen NOx miktarı
- Ölçülen CO2 miktarı
- Ölçülen is miktarı



Şekil 3.7 Kapalı Kutu Yanma Modelinin Şematik Olarak Gösterimi

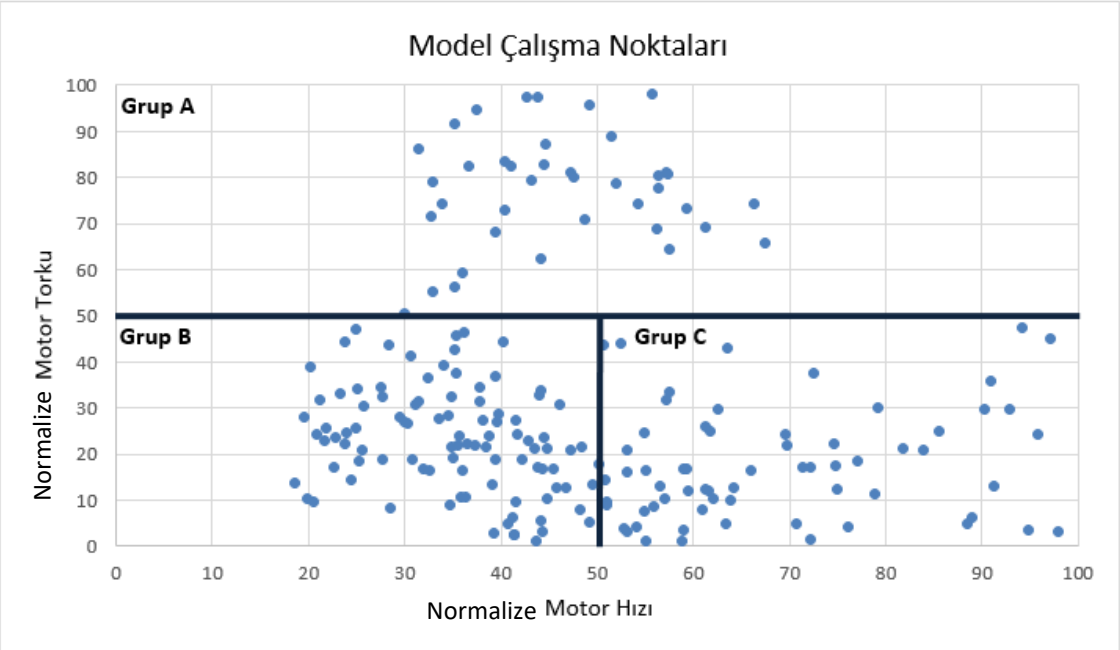
Test düzeneğinden elde edilen toplam verinin %90'ı model oluştumak için kullanılmıştır. Test düzeneğinden elde edilen noktaların %10'u oluşturulan modelin validasyonu için kullanışmıştır. Oluşturulan model ve model validasyonunun R^2 değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Model ve Modelleme Doğruluğu Karşılaştırılması

	Model Doğruluğu	**Modelleme Doğruluğu**
Model Çıktıları	R^2	
Toplam Yakıt Miktarı	0,9982	0,9483
Güç	1	0,9865
NO_x	0,9661	0,9231
CO_2	0,998	0,9844
Kurum(İs)	0,7522	0,6521

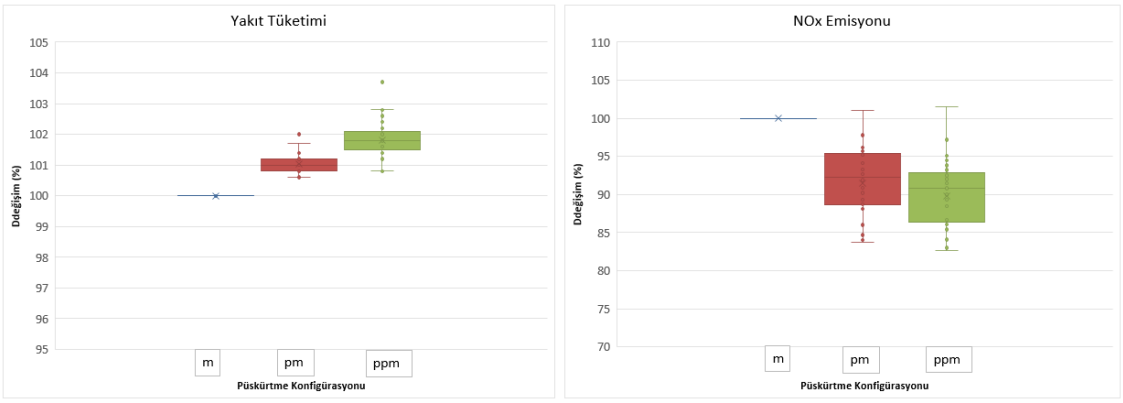
3.3 Model Sonuçları

Çoklu püskürtme stratejisinin model üzerinde yakıt tüketimine etkisi ve NO_X emisyonu üzerine etkisi esmisyon çevrimlerde sık görülen ve rastgele seçilen 200 farklı çalışma noktası için 3 farklı püskürtme konfigürasyonunda incelenmiştir. Bu çalışmalar sırasında motor hızı, motor devri, EGR oranları, yakıt püskürtme zamanlamaları gibi NO_X miktarı etkileyecek parametreler sabit tutulmuş, sadece püskürtme sayıları değiştirilmiş ve etkileri gözlemlenilmiştir.

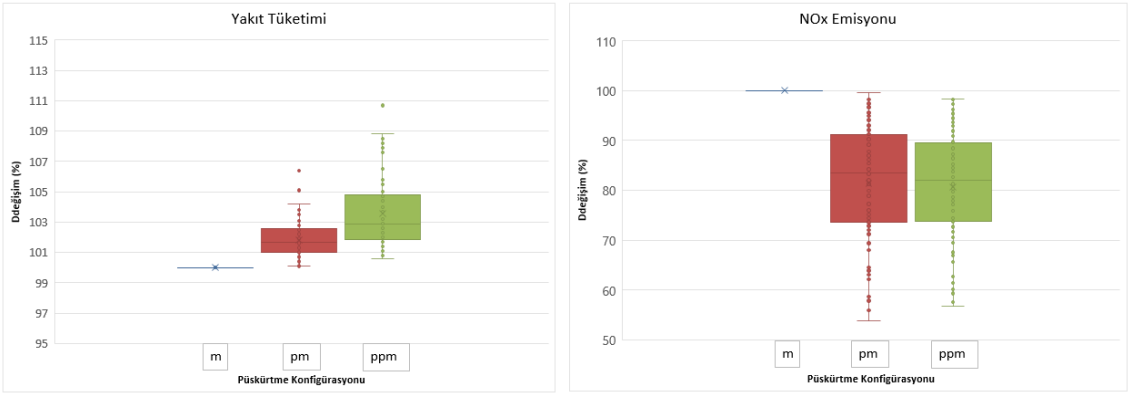


Şekil 3.8 Model Test Noktaları

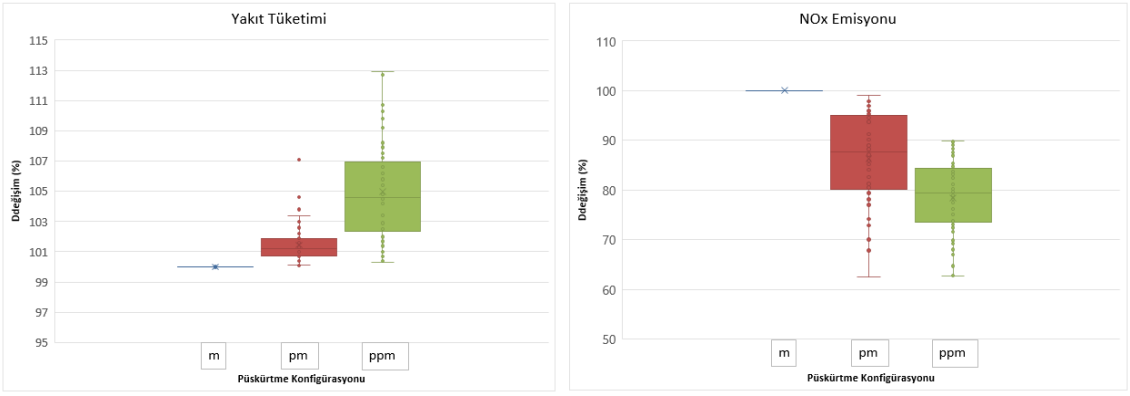
Kurulan model sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde çalışma noktaları 3 farklı grup halinde grup A, grup B, grup C olarak ele alınmıştır. Çıkan sonuçlara göre bölünen gruplarda, elde edilen sonuçların yönelimleri ortaya çıkarılmıştır. Çalışma noktalarındaki yakıt tüketimi ve buna karşılık gelen NO_X emisyon değerleri üç grup halinde şekil 3.9, şekil 3.10 ve şekil 3.11'te gösterilmiştir. Sadece ana püskürtmenin olduğu konfigürasyon m ile gösterilmiştir. Birincil ön püskürtme ve ana püskürtmenin olduğu konfigürasyon pm ile gösterilmiştir. İki aşamalı ön püskürtme ve ana püskürtmenin olduğu konfigürasyon ppm ile gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Grup A, Çoklu Püskürtmenin NO_x Emisyonu ve Yakıt Tüketimine Etkisi



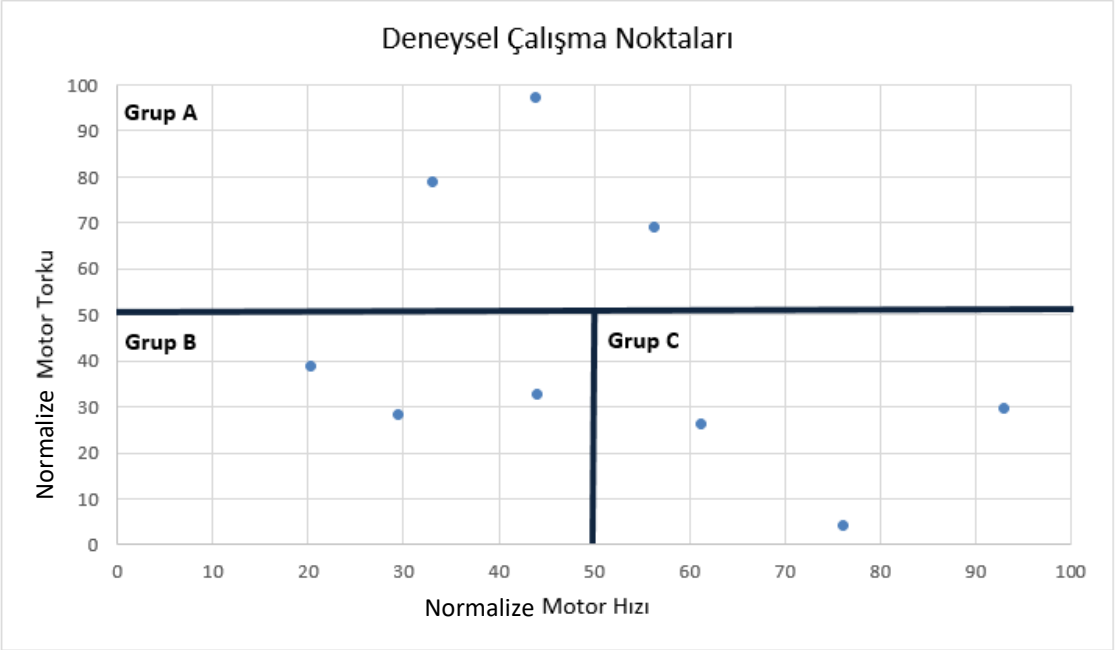
Şekil 3.10 Grup B, Çoklu Püskürtmenin NO_x Emisyonu ve Yakıt Tüketimine Etkisi



Şekil 3.11 Grup C, Çoklu Püskürtmenin NO_x Emisyonu ve Yakıt Tüketimine Etkisi

3.4 Deneysel Test Sonuçları

Yukarıda bahsedilen fenomen aynı test düzeneği ve kurgusunda deneysel olarak test edilmiştir. 9 nokta üzerinde gerçek ölçümler alınmıştır. Bu 9 nokta model çalışmaları içinden rastgele seçilen 200 nokta içerisinden seçilmiştir.



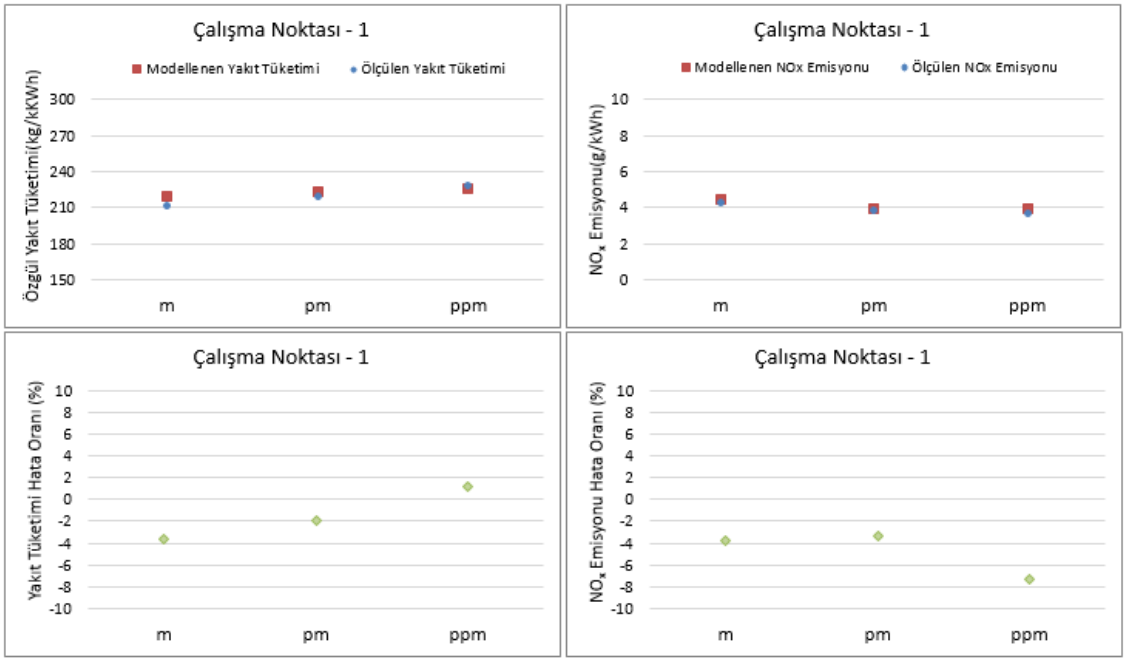
Şekil 3.12 Deneysel Test Çalışma Noktaları

Bu 9 adet noktasın 3 tanesi grup A'dan, 3 tanesi grup B'den, 3 tanesi grup C'den rastgele seçilmiştir. Tablo 3.4'te rastgele seçilen 9 nokta gösterilmiştir.

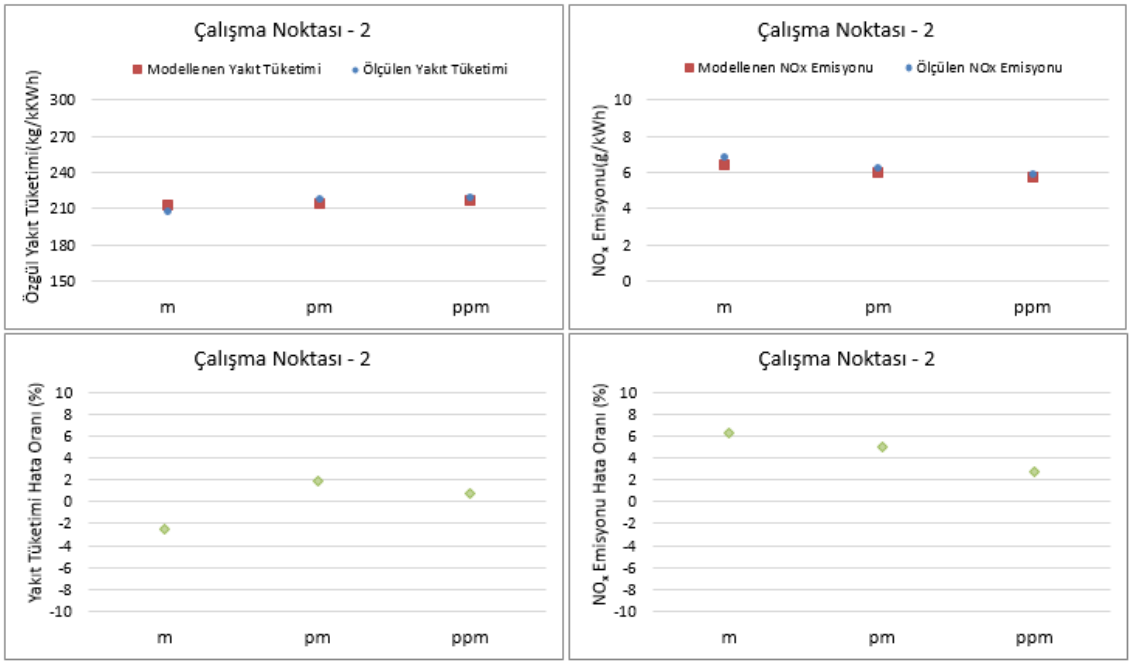
Tablo 3.4 Normalize Edilmiş Deneysel Çalışma Noktaları

ÇALIŞMA NOKTASI	GRUP	MOTOR HIZI	MOTOR TORKU
1	A	56,40	68,67
2	A	44,03	96,98
3	A	33,13	78,71
4	B	20,43	38,49
5	B	29,60	27,84
6	B	44,10	32,56
7	C	61,35	25,82
8	C	76,28	3,93
9	C	93,10	29,38

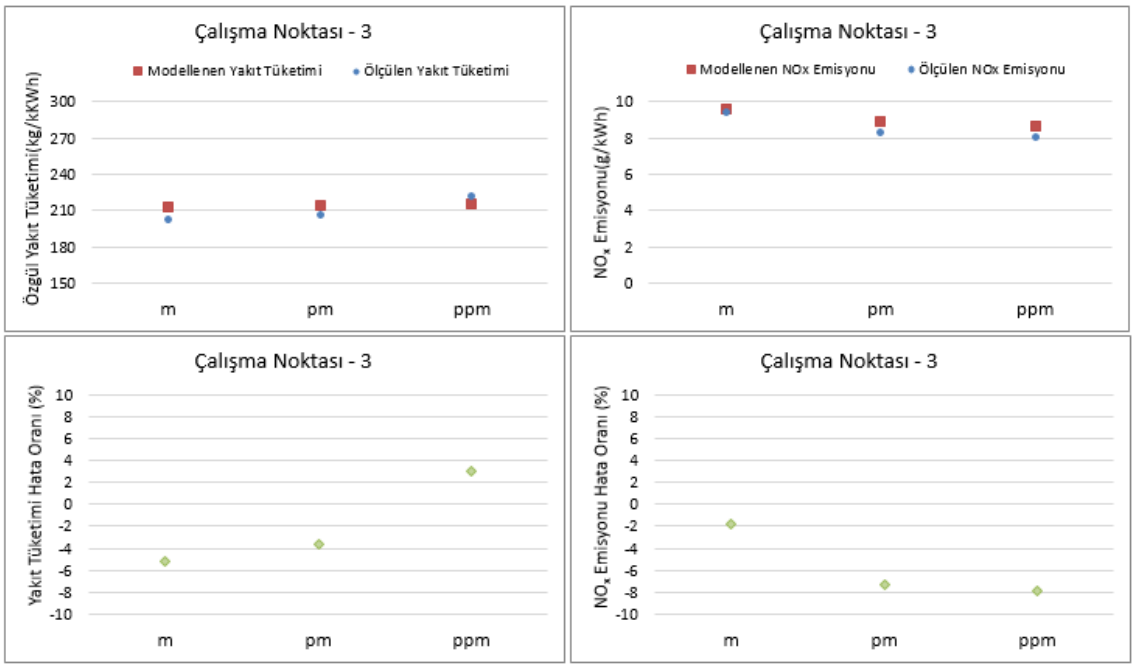
9 nokta için model ve ölçüm sonuçları her bir çalışma noktası için ayrı ayrı aşağıda gösterilmiştir.



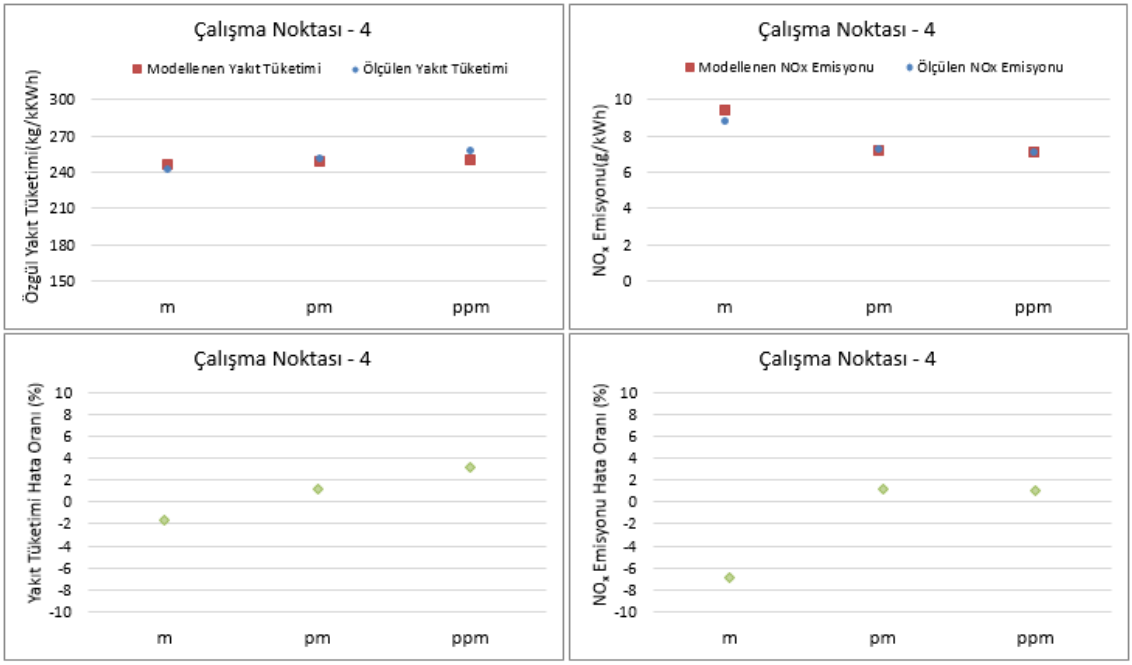
Şekil 3.13 Grup A Çalışma Noktası 1, Model ve Ölçüm Sonuçları



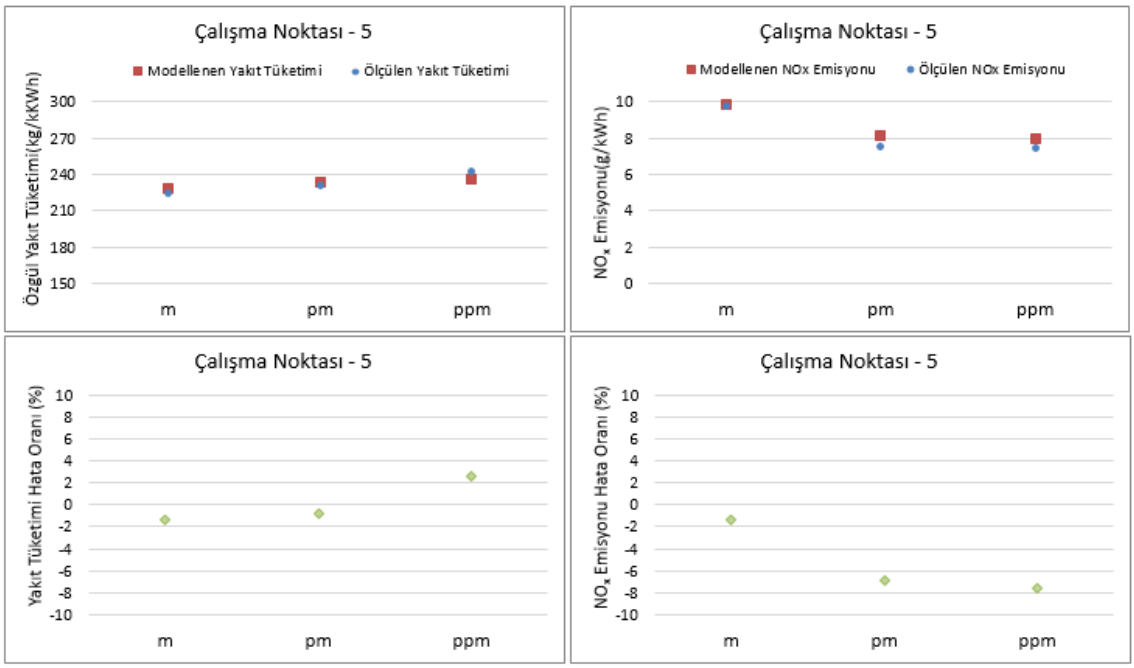
Şekil 3.14 Grup A Çalışma Noktası 2, Model ve Ölçüm Sonuçları



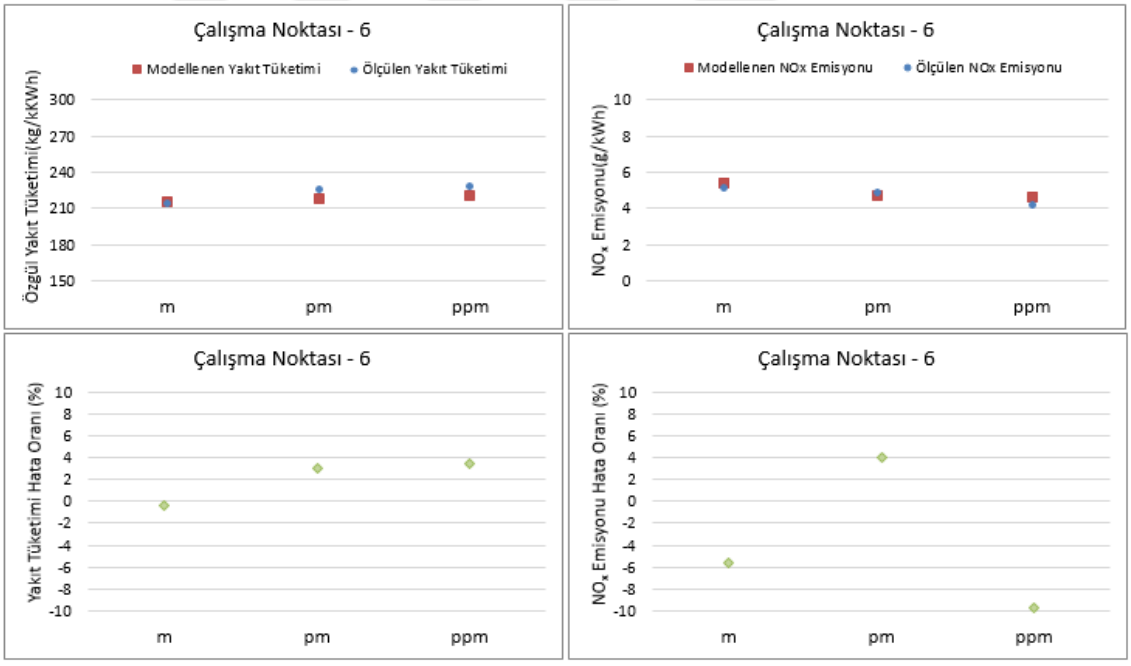
Şekil 3.15 Grup A Çalışma Noktası 3, Model ve Ölçüm Sonuçları



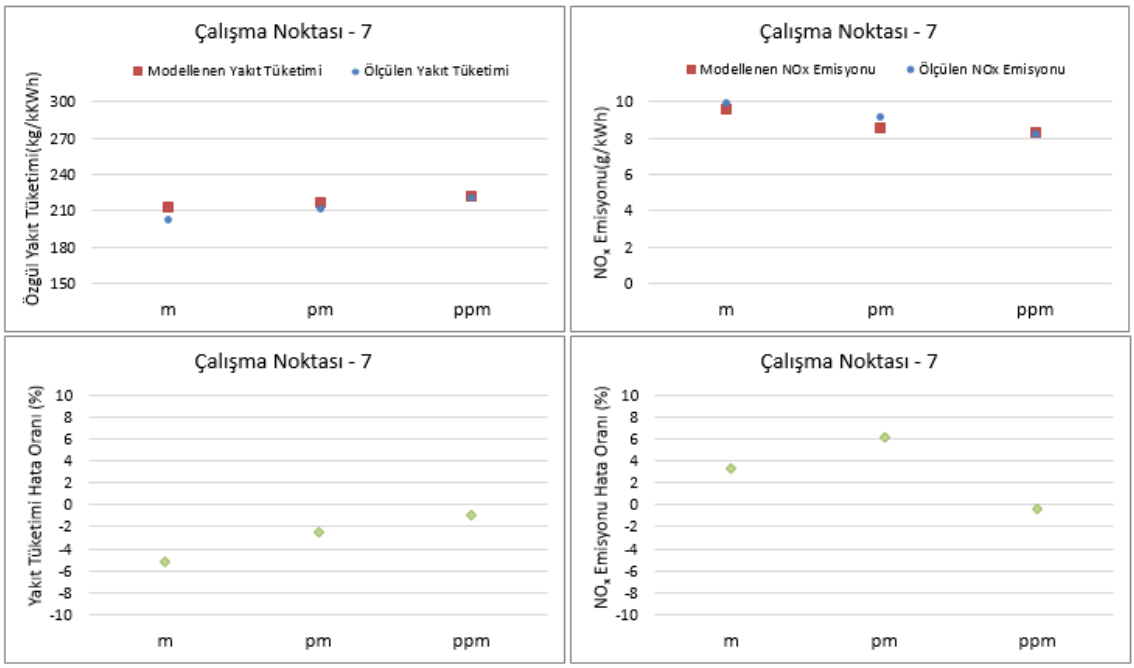
Şekil 3.16 Grup B Çalışma Noktası 4, Model ve Ölçüm Sonuçları



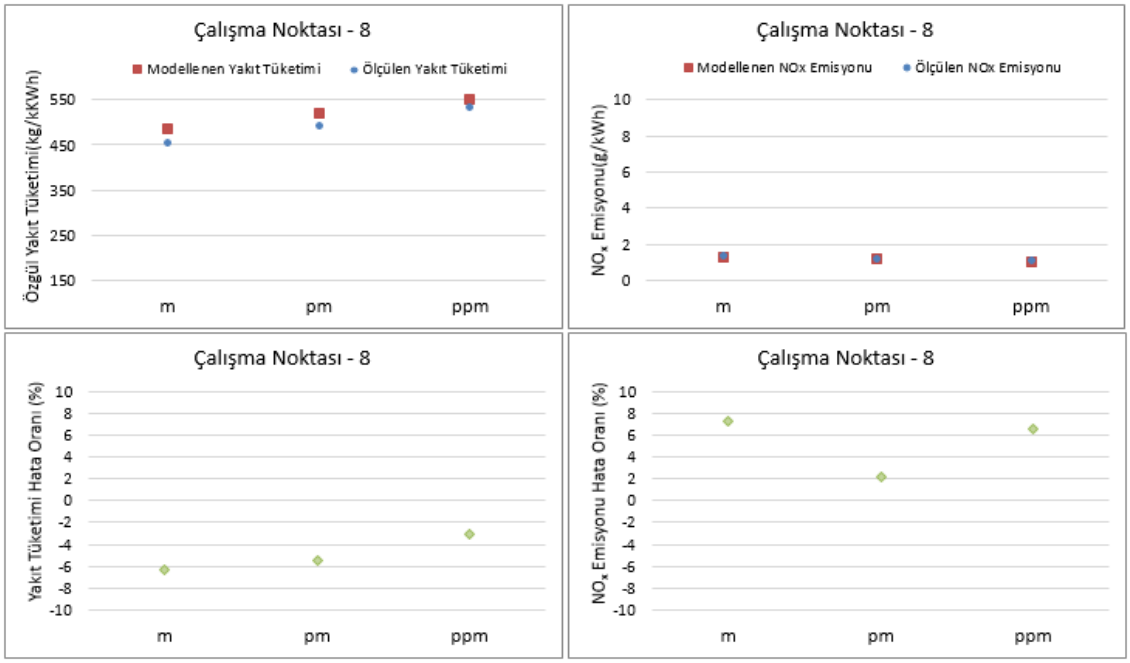
Şekil 3.17 Grup B Çalışma Noktası 5, Model ve Ölçüm Sonuçları



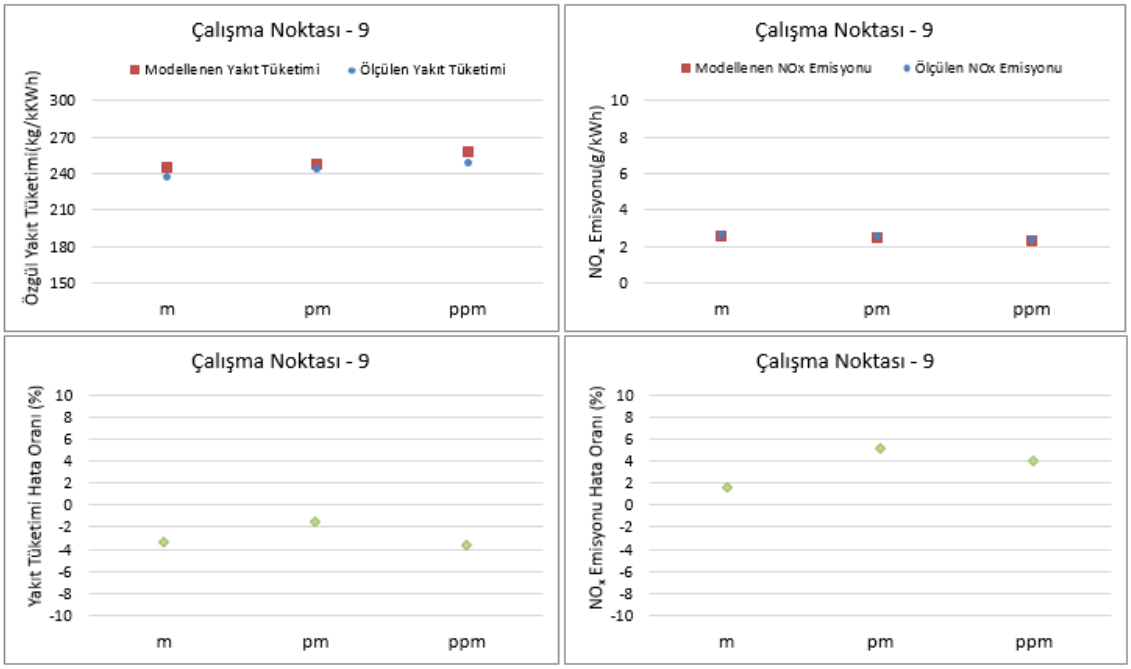
Şekil 3.18 Grup B Çalışma Noktası 6, Model ve Ölçüm Sonuçları



Şekil 3.19 Grup C Çalışma Noktası 7, Model ve Ölçüm Sonuçları



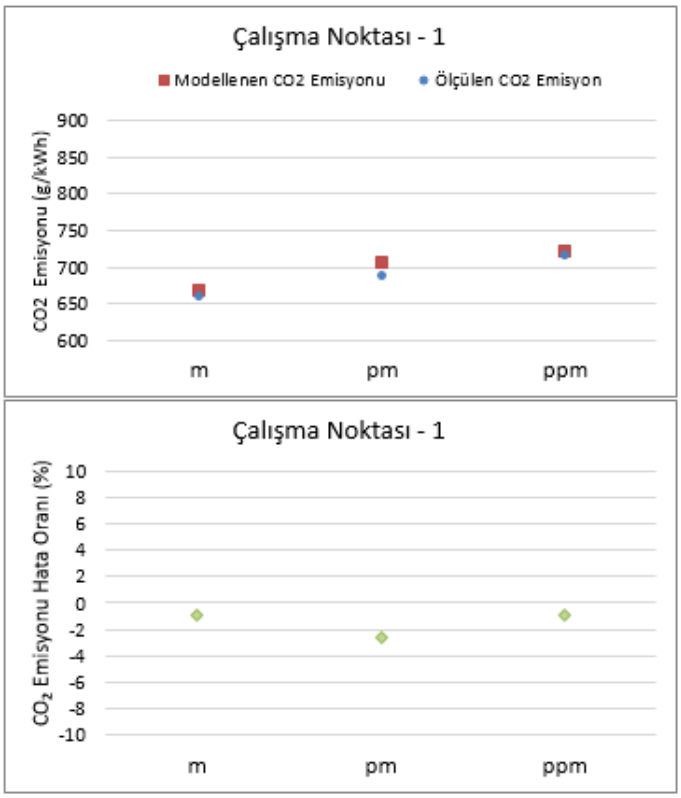
Şekil 3.20 Grup C Çalışma Noktası 8, Model ve Ölçüm Sonuçları



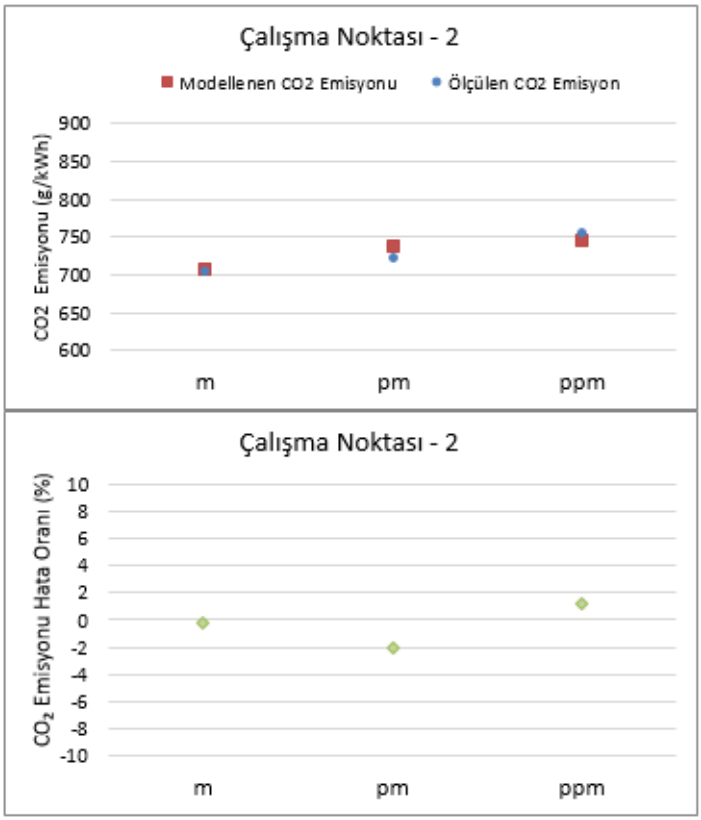
Şekil 3.21 Grup C Çalışma Noktası 9, Model ve Ölçüm Sonuçları

3.5 Sera Gazı Etkisinin İncelenmesi

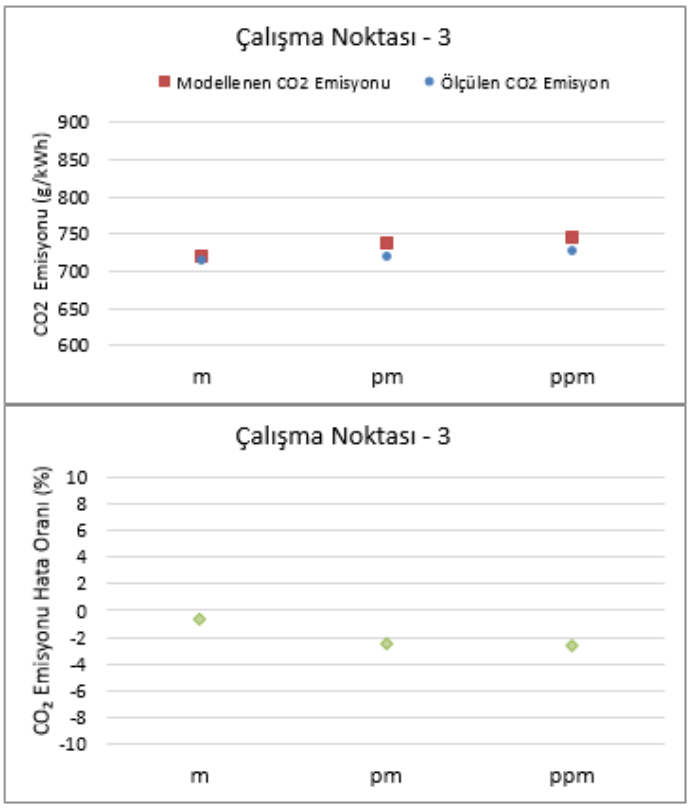
Yukarıda bahsedilen 3 tanesi grup A'dan, 3 tanesi grup B'den, 3 tanesi grup C'den rastgele seçilmiş toplam 9 nokta için CO_2 gazı etkisi incelenmiştir.



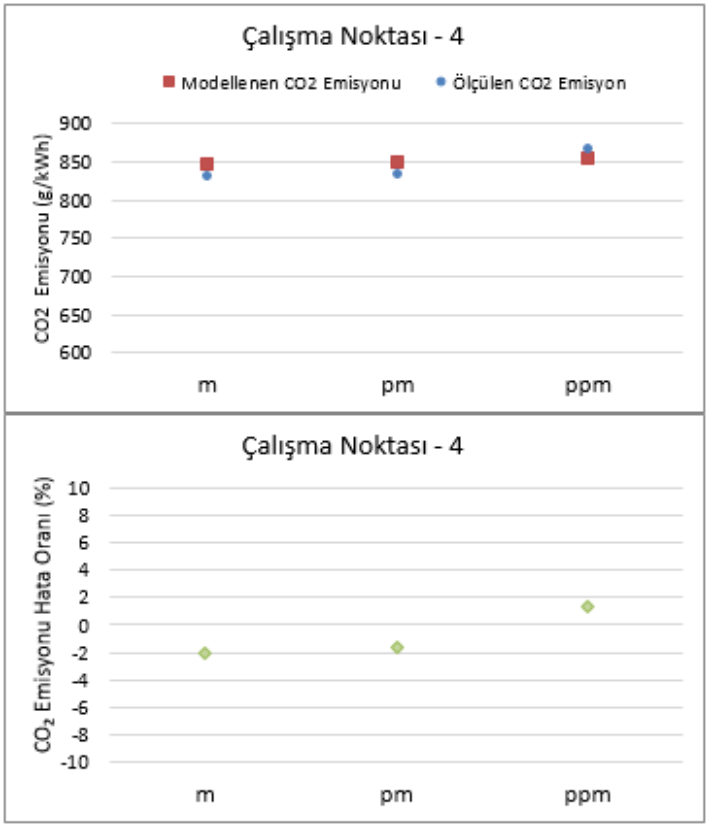
Şekil 3.22 Çalışma Noktası 1, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları



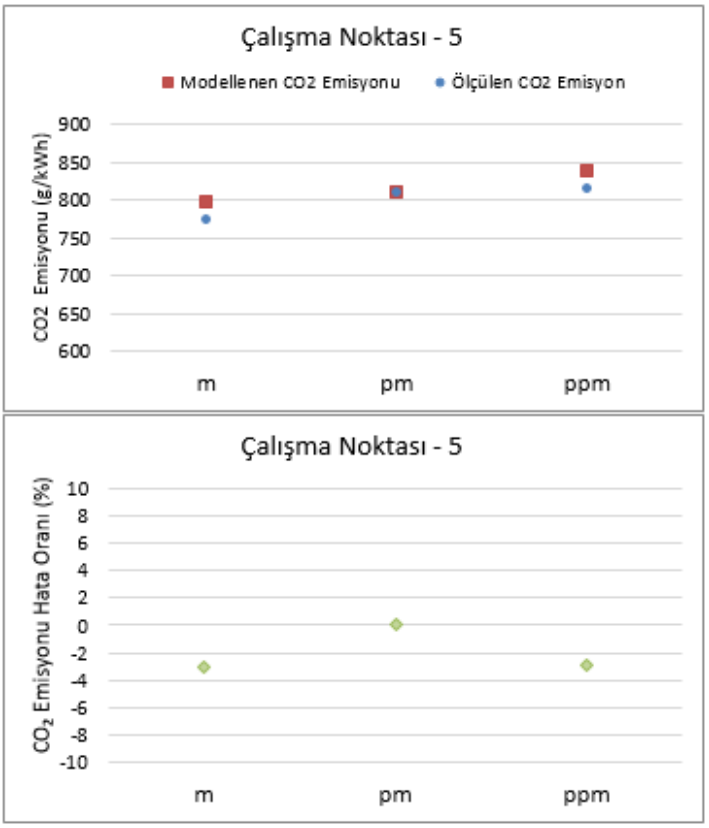
Şekil 3.23 Çalışma Noktası 2, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları



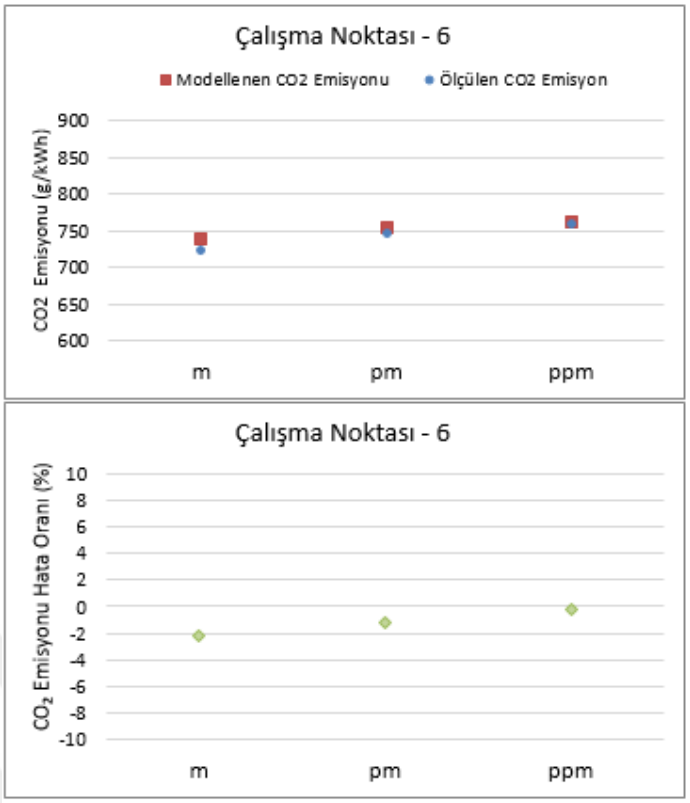
Şekil 3.24 Çalışma Noktası 3, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları



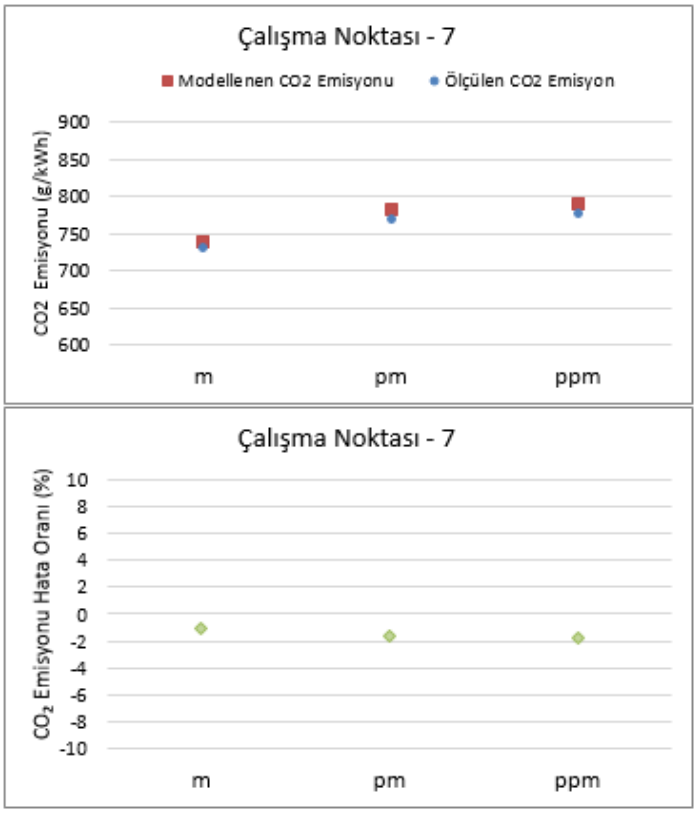
Şekil 3.25 Çalışma Noktası 4, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları



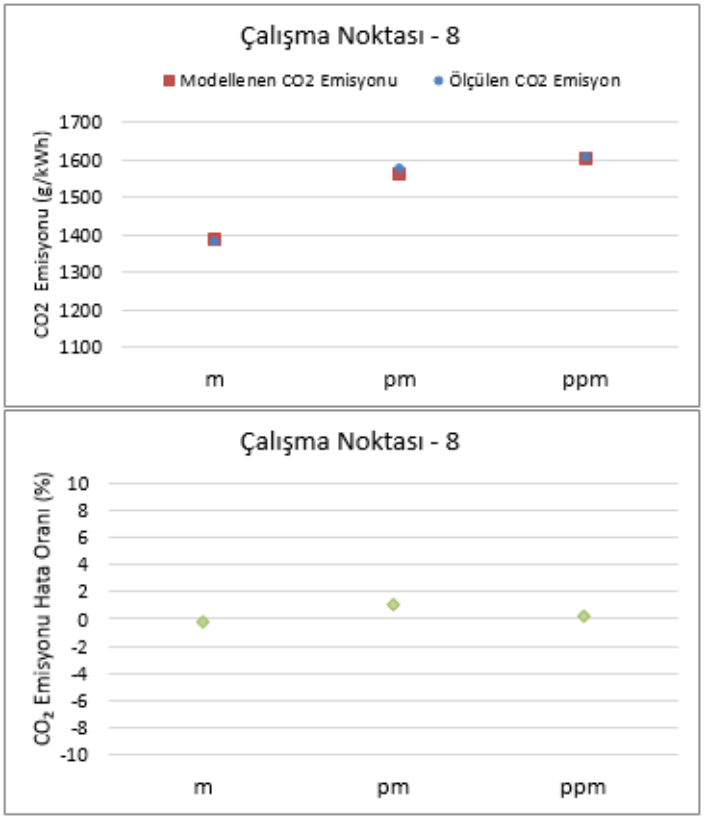
Şekil 3.26 Çalışma Noktası 5, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları



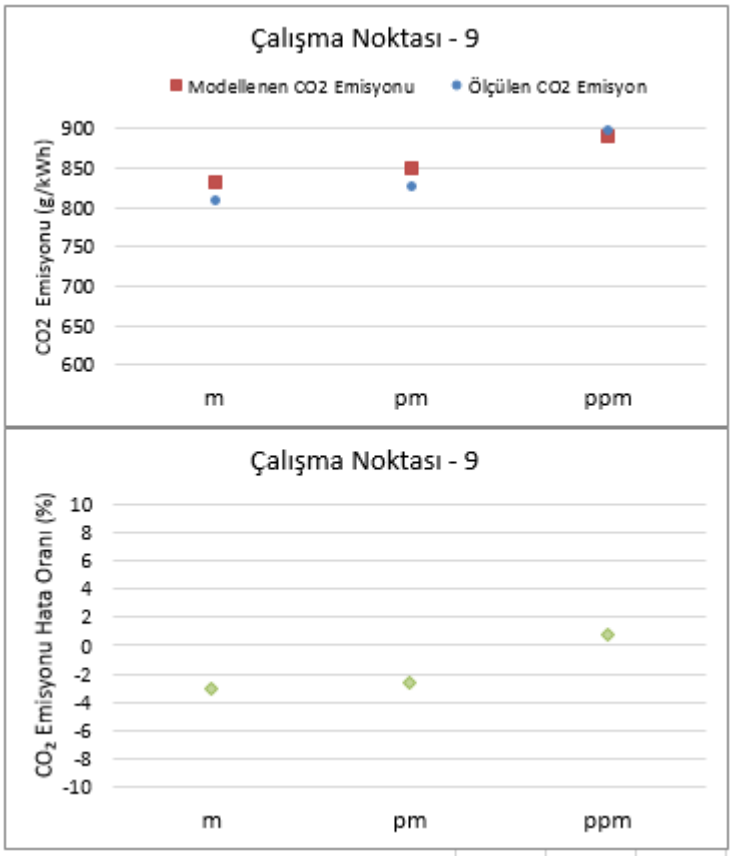
Şekil 3.27 Çalışma Noktası 6, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları



Şekil 3.28 Çalışma Noktası 7, Modellenen CO2 ve Ölçülen CO2 Sonuçları



Şekil 3.29 Çalışma Noktası 8, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları



Şekil 3.30 Çalışma Noktası 9, Modellenen CO_2 ve Ölçülen CO_2 Sonuçları

CO_2 bir sera gazıdır. Fakat dizel araçlar sera gazına etkisi olan farklı emisyonlar üretebilir. Sera gazına etkisi olan bir diğer emisyon N_2O'dur. Küresel ısınma potansiyeli, atmosferdeki herhangi bir sera gazı tarafından emilen ısıdır. Aynı kütledeki karbondioksit tarafından emilecek olan ısının katları olarak ifade edilir. Küresel ısınma potansiyeli(GWP), bir gazın emisyonları nedeniyle belirli bir süre boyunca emilen ısının bir ölçüsüdür. CO_2 tanım olarak, referans olarak kullanılan gaz olduğundan, kullanılan zaman periyodundan bağımsız olarak 1 GWP'ye sahiptir. Diğer gazlar için bu, gaza ve zaman çerçevesine bağlıdır. Karbondioksit eşdeğeri GWP'den hesaplanır. N_2O, 100 yıllık bir zaman ölçeği için CO_2'nin 273 katı GWP'ye sahiptir. [68]

Dizel araçlarda egzoz sisteminde farklı SCR katalistlerinin kullanımı egzoz çıkışında farklı N_2O konsantrasyonları ile sonuçlanabilir.

SCR sistemlerinde NO_x emisyonunun indirgenmesi için NH_3 gereklidir. Sitemlerin NO_X emisyonunu indirgemesi için NH_3'ün iki farklı yapısı kullanılabilinir. Bunlar su bazlı NH_3 ve saf susuz NH_3'dür.

Aşağıda denklem (3.5) ve hızlı SCR reaksiyonu ile ifade edilen denklem (3.9)'da gösterildiği gibi, SCR sisteminde bir dizi kimyasal reaksiyon meydana gelir. Aşağıda bahsedilen denklemlerdeki reaksiyonların asıl amacı NO_x'i, azot elementine indirgemektir. Denklem (3.6)'da standart SCR reaksiyonu ifade edilmektedir. Denklem (3.7) ve denklem (3.9) ile verilen reaksiyonlar, nitrojen dioksit reaktanı içerir. Denklem (3.9)'da belirtilen reaksiyon hızlı SCR katalist reaksiyonu olarak tanımlanır. Bu reaksiyon, düşük sıcaklıktaki SCR katalistindeki NO_2 oranı ile ilgilidir. Normal olarak, dizel egzoz da dahil olmak üzere çoğu egzoz gazındaki NO_2 konsantrasyonları düşüktür. SCR sistemlerinde, özellikle düşük sıcaklıklarda NO_x indirgenmesininin verimiliğini arttırmak için NO_2 genellikle bilerek artırılır. Bu bilinçli yapılan bir stratejidir.[19]

$$6NO + 4NH_3 \longrightarrow 5N_2 + 6H_2O \quad (3.5)$$

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (3.6)$$

$$6NO_2 + 8NH_3 \longrightarrow 7N_2 + 12H_2O \quad (3.7)$$

$$2NO_2 + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 3N_2 + 6H_2O \quad (3.8)$$

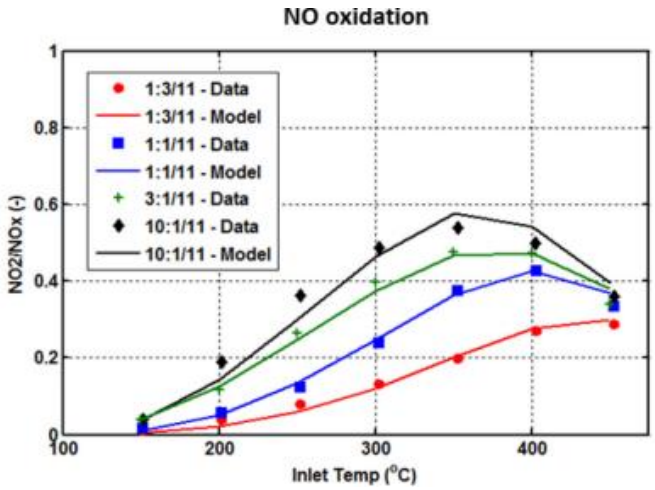
$$NO + NO_2 + 2NH_3 \longrightarrow 2N_2 + 3H_2O \quad (3.9)$$

Dizel egzozunda her zaman bir miktar nem bulunur. Yapılan SCR modellerinde veya laboratuvar testlerindeki süreçlerde sistemin girdisi olarak mutlaka su buharı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yaklaşım daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için önemlidir. Hızlı SCR reaksiyonu SCR verimini arttıran en önemli reaksiyonlardan bir tanesidir. Literatürde hızlı SCR reaksiyonu olarak bilinir fakat standart SCR reaksiyonuna göre sistemde NO_2 bulunması gerekmektedir. NO_2 içeriği, besleme gazındaki NO konsantrasyonunu aşacak şekilde artırılırsa, N_2O oluşum yolları da mümkündür, Denklem (3.10) ve denklem (3.11) NO_2 oluşumunu göstermektedir.

$$8NO_2 + 6NH_3 \longrightarrow 7N_2O + 9H_2O \quad (3.10)$$

$$4NO_2 + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 4N_2O + 6H_2O \quad (3.11)$$

Sistemdeki NO_2 bulunması SCR veriminin arttırdığı gibi sistemde N_2O oluşumuna sebep olan reaksiyonu başlatmasına sebep olur. Dolayısıyla sisteminin N_2O üretimi ve sistemin SCR performansı SCR katalistine ulaşan NO_2/NO_x oranına bağlıdır. SCR katalistinin girişindeki NO_2/NO_x oranı DOC katalisti üzerindeki Pt/Pd oranını değiştirerek aşağıdaki grafiği referans alarak ayarlanılabilinir.[69]



Şekil 3.31 Dizel Oksidasyon Katalizöründeki Pt/Pd oranının NO_2/NO_x Üzerine Etkisi[70]

SCR sistemlerinde meydana gelen istenmeyen süreçler, sistemde bol miktarda bulunan oksijen ile rekabetçi, seçici olmayan reaksiyonları içerir. Bu reaksiyonlar sonucunda istenmeyen ikincil emisyonlar üretebilir veya bu reaksiyonlar sebebiyle

gereğinden fazla NH_3 tüketilebilinir. Bu reaksiyonlara örnek olarak denklem (3.12) ve denklem (3.13) ile verilen NH_3 kısmi oksidasyonu, sırasıyla N_2O veya elemental nitrojen üretebilir. Denklem (3.14) ile ifade edilen reaksiyonda NH_3'ün tam oksidasyonu sırasında NO üretebilir. [70]

$$4NO_2 + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 4N_2O + 6H_2O \quad (3.12)$$

$$4NH_3 + 3O_2 \longrightarrow 2N_2 + 6H_2O \quad (3.13)$$

$$4NH_3 + 5O_2 \longrightarrow 4NO + 6H_2O \quad (3.14)$$

SCR katalistleri üzerlerinde NH_3 yükü tutmaktadır ve NO_X çevrimini tuttukları NH_3 yükü ile yapmaktadır. Kapasitenin üzerindeki üre dozlaması çevreye NH_3 salınımı ile sonuçlanır. Bu sebeple, üre dozlama stratejilerindeki control hatalarının kapatılabilmesi için ASC kullanılmaktadır. Fakat, NH_3'ün oksitlenmisi sırasında atmosfere N_2O salınabilmektedir. İyi bir NH_3 load modeli ile N_2O salınımı önlenebilmektedir.

Chang Pyo Cho ve diğerleri [71], DOC ve DPF yüklü gerçek bir dizel motor kullanılarak, yaygın olarak kullanılan Fe-zeolit SCR ve vanadium bazlı V_2O_5-WO_3/TiO_2 SCR katalizörlerinin NO_x azaltım ve N_2O emisyon performansları çeşitli çalışma koşulları altında incelenmiştir. Egzoz gazının sıcaklığı 400°C'nin altındaki sıcaklıklarda %50'nin üzerinde NO_2/NO_x oranına varken, 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda NO_2/NO_x oranı daha düşüktü. Bunun sebebi sistemde kullanılan DOC'nin özelliğidir. Bu koşullar altında Fe-zeolit ve V_2O_5-WO_3/TiO_2 katalizörlerinin NO_2/NO_X oranından ve egzoz sıcaklığından belirgin şekilde etkilendiği bulundu. Her iki SCR'da da verimli NO dönüşümleri elde edilse de, V_2O_5-WO_3/TiO_2 katalizöründe, 250°C ile 320°C arasında NO_2 dönüşümünün azaldığını tespit edildi. V_2O_5-WO_3/TiO_2 katalizörü, düşük NH_3 depolama kapasitesi nedeniyle nispeten sık NH_3 kayması sergiledi.

Fe-zeolit katalizörü için, NH_3, NO_2 ve O_2 sebebiyle yan reaksiyonlar oluşmuştur. Bu yan reaksiyonlar sebebiyle verimli NO_X indirgemeleri için üretilen N_2O emisyonunda ciddi artış söz konusudur. Bu olay zincirinin vanadyum bazlı V_2O_5-WO_3/TiO_2 SCR katalizörü için gözlenmediklerini söylemişlerdir.

Vanadyum SCR'da denklem (3.10) ve denklem (3.11)'deki gibi N_2O üretimine sebep olmamaktadır. Fakat vanadium SCR'un NO_x Çevrimi ve termal dayanımı düşüktür. Dolayısıyla istenilen NO_x çevrimi vanadyum ile sağlanabilinirse ve üre dozlama kontrolü başarılı ise en düşük N_2O üretimi olacaktır. Fakat vanadyum SCR katalistleri ile istenilen NO_x çevriminin sağlanması her zaman mümkün değildir.

NO_x emisyonlarının indirgenmesine yardımcı olan bir diğer sistem LNT'dir. LNT temelde üç proses ile tanımlanabilinir. Bunlar, fakir çalışma durumlarında NO_x emisyonlarının tutulması, zengin çalışma durumlarında NO_x emisyonlarının bırakılması ve bırakılan NO_x emisyonlarının N_2 ve CO_2'ye dönüştürülmesidir.[75] NO_x emisyonlarının tutulma prosesi denklem (3.15) ve denklem (3.16)'da ifade edilmektedir.

$$NO + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow NO_2 \tag{3.15}$$

$$\frac{1}{2}BaCO_2 + NO_2 + \frac{1}{4}O_2 \longrightarrow \frac{1}{2}Ba(NO_3)_2 + \frac{1}{2}CO_2 \tag{3.16}$$

NO_x emisyonlarının bırakılma prosesi denklem (3.17) ve denklem (3.18)'de ifade edilmektedir.

$$Ba(NO_3)_2 \longrightarrow BaO + 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2 \tag{3.17}$$

$$BaO + CO_2 \longrightarrow BaCO_3 \tag{3.18}$$

Bırakılan NO_x emisyonlarının dönüştürülme prosesi denklem (3.19) ve denklem (3.20)'de ifade edilmektedir.[75]

$$NO_2 \longrightarrow NO + \frac{1}{2}O_2 \tag{3.19}$$

$$CO + NO \longrightarrow CO_2 + \frac{1}{2}N_2 \tag{3.20}$$

LNT içerisindeki gerçekleşen her bir prosesteki kimyasal reaksiyonları incelediğimiz zaman sera gazı etkisi olan N_2O emisyonunun oluşmadığını gözlemlemekteyiz.

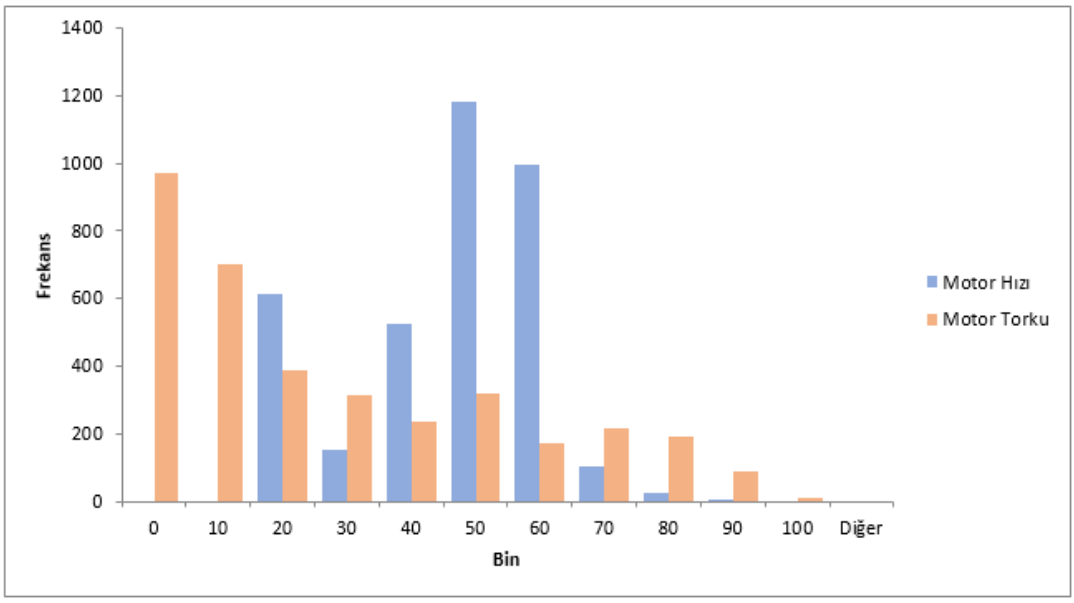
Matarrese ve diğerleri [72], LNT katalistindeki N_2O emisyonunu oluşumu hakkında bir araştırma yapmışlardır. NO_x indirgenmesi için en optimum sıcaklıklardan 300°C civarında N_2O emisyonun kayda değer derecede oluşmadığını 250°C civarında N_2O oluşumu çok sınırlı olduğunu söylemişlerdir. Bununla birlikte, N_2O emisyonları, sıcaklığın artmasıyla önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. Yan reaksiyonlar sonucu sınırlı N_2O'nun fakir çalışma durumundan zengine ve zengin çalışma durumundan fakire geçişlerde gerçekleştiğini ortaya çıkartmışlardır.

Tüm bu bilgiler ışığında, 9 nokta için farklı püskürtme stratejilerinde N_2O ve CO_2 emisyonlarının sera gazı etkisi incelenmiştir.

UN ECE GRPE tarafından geliştirilen GTR tarafından tanımlanan WHSC testi kararı hal motor dinamometresi çevrimidir. Hız ve tork kriterlerine göre 13 nokta ağırlık faktörü belirtilerek emisyonlar matematiksel olarak hesaplanır.

WHTC testi ise, BM ECE GRPE tarafından geliştirilen GTR tarafından tanımlanan geçici bir motor dinamometresi test çevrimidir. Çevrim, dünya çapındaki gerçek ağır ticari araç kullanım modeline dayanmaktadır. WHTC, 1800 s süreli bir testtir. WHTC test çevriminin deney motoru ile koşulmuş motor hızı ve tork dağılımı Şekil 3.32'de gösterilmiştir.

Bu kapsamda, 9 nokta için ağırlıklı faktör göz önününde bulundurularak bir çevrim yaratılmıştır. Ağırlıklı faktör oluşturulurken WHSC testinde uygulanan yöntem ve WHTC çevriminin motor hızı ve tork dağılımı göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 3.32 WHTC Çevrimi Motor Hızı ve Tork Dağılımı

Bu çalışmada 9 nokta için yukarıda bahsedilen benzer yaklaşımlar göz önünde bulundurularak ağırlık faktörlü bir çevrim varsayılmıştır. Her bir nokta için varsayılan ağırlıklı faktörler Tablo 3.5'te gösterilmektedir.

Tablo 3.5 Deneysel Test Çalışma Noktalarının Ağırlık Faktörleri

ÇALIŞMA NOKTASI	GRUP	MOTOR HIZI	MOTOR TORKU	Çalışma Saati(hr)
1	A	56,4	68,67	0,06
2	A	44,03	96,98	0,05
3	A	33,13	78,71	0,06
4	B	20,43	38,49	0,17
5	B	29,6	27,84	0,22
6	B	44,1	32,56	0,2
7	C	61,35	25,82	0,16
8	C	76,28	3,93	0,04
9	C	93,1	29,38	0,04

Bu çevrim sonucunda çoklu püskürtme uygulanan sistemde CO_2 ve N_2O emisyonlarının sera gazı etkisi hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken 100 yıllık

zaman ölçeği dikkate alınmıştır. Çünkü N_2O, 100 yıllık bir zaman ölçeği için CO_2'nin 273 katı küresel ısınma potansiyeline sahiptir.[68]

Testler sırasında kullanılan dizel motoru hafif ticari amaç için kullanılacak araca aittir. Bu motor ile oluşturalan çevrimin koşulması durumunda enerji tüketimi 30 kWh olarak hesaplanmıştır. Sera gazı etkisini incelemek için atmosfere atılan CO_2 miktarı ve N_2O miktarı 100 yıllık zaman ölçeğinde kümülatif olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken deney motorunun oluşturulan çevrimi haftalık 6 defa koşacağı kabulü yapılmıştır.

Dizel motorlarda yanma sonucu ortaya çıkan NO_x emisyonlarının %0.3'ü ile %0.8'i N_2O'dur.[73]-[74] Yapılan bu çalışmada yanma sonucu motor çıkışta oluşan NO_x emisyonunun %0.5'i kadar N_2O oluştuğunun kabulü yapılmıştır.

NO_x emisyonlarının indirgenmesi için egzoz sisteminde çeşitli SCR sistemleri kullanılmaktadır. Performans açısından üstün olan SCR sistemlerinden bir taneside zeolit bazlı SCR sistemleridir. Zeolit bazlı SCR sistemlerinde NO_x emisyonlarının en iyi indirgendiği 300°C civarındaki egzoz gaz sıcaklığında NO_x emisyonunu %90 ile %100 oranında azaltmaktadır.[76] Yapılan bu çalışmada sistemde SCR olması durumunda egzoz çıkışındaki NO_x'in motor çıkıştaki NO_x'e göre %95 oranında azaltıldığı kabulü yapılmıştır.

Sistemde zeolit bazlı SCR kullanılması durumunda egzoz çıkışındaki azaltılmış NO_x emisyonunun %8 ile %16'i N_2O'dur.[76] Yapılan bu çalışmada azaltılmış NO_x emisyonu içerisindeki N_2O'nun %12 olduğu kabulü yapılmıştır.

Bu kapsamda Tablo 3.6'da sera etkisi olan emisyonların farklı püskürtme konfigürasyonlarında 100 yıllık zaman zarfındaki kümülatif değerleri ton olarak gösterilmektedir.

Tablo 3.6 CO_2 ve N_2O'nun Sera Etkisi

Sistem	Sera Gazı Emisyonları	Püskürtme Konfigürasyonu		
		m	pm	ppm
Motor	CO_2 (ton)	742,2	766,5	780,7
Motor	N_2O (ton)	9,9	8,4	8,2
Motor + Zeolit SCR	N_2O (ton)	11,8	10,0	9,8

Yapılan çalışmalar ve kabuller ile birlikte sera gazı etkisi olan CO_2 ve N_2O sadece ana püskürtmenin kullanıldığı stratejide 100 yıllık zaman zarfında motordan 752,1 ton gaz atmostefere karışmaktadır. Bu değer motor ve sadece zeolit bazlı SCR sisteminin kullanılması durumunda 754 tondur. CO_2 ve N_2O ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanılduğı stratejide 100 yıllık zaman zarfında motordan 774,9 ton sera etkisi olan gaz atmostefere karışmaktadır. Bu değer motor ve sadece zeolit bazlı SCR sisteminin kullanılması durumunda 776,5 tondur. CO_2 ve N_2O iki kademeli ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanılduğı stratejide 100 yıllık zaman zarfında motordan 788,9 ton sera etkisi olan gaz atmostefere karışmaktadır. Bu değer motor ve sadece zeolit bazlı SCR sisteminin kullanılması durumunda 790,5 tondur.

4
SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar ve Öneriler

Tez çalışmasında, çoklu püskürtme stratejisinin NO_x emisyonuna etkisi gözlemlemek amacıyla kurulan Gaussian Regresyon modeli dinamometre adı verilen test düzeneğinde deney tasarımı(DoE) adı verilen yöntem ile 2119 motor çalışma noktasında gerçek zamanlı ölçüm alınmıştır. Test düzeneğinden elde edilen toplam verinin %90'ı model oluştumak için kullanılmıştır. Test düzeneğinden elde edilen noktaların %10'u oluşturulan modelin validasyonu için kullanışmıştır. Bu model ile 200 farklı çalışma noktasında çoklu püskürtme statejisinin NO_x emisyonuna etkisi incelenmiştir. Bu 200 nokta içerisinden 9 nokta özelinde test düzeneğinde ölçümler alınmış ve deneysel olarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tez çalışmasında paylaşılmış tüm veriler göz önünde bulundurulduğunda;

- Kapalı kutu Gaussian Regresyon yöntemi ile oluşturulan model motor çıkış NO_x değerlerini tahminlemede başarılı sonuçlar elde etmiştir. Doğruluma testinde NO_x emisyonun hata oranı maksimum %9,71, ortalama %4,71'dir
- Kapalı kutu Gaussian Regresyon yöntemi ile oluşturulan model yakıt tüketim değerlerini tahminlemede başarılı sonuçlar elde etmiştir. Doğruluma testinde yakıt tüketiminin hata oranı maksimum %6,35, ortalama %2,72'dir
- Kapalı kutu Gaussian Regresyon yöntemi ile oluşturulan model CO_2 değerlerini değerlerini tahminlemede başarılı sonuçlar elde etmiştir. Doğruluma testinde yakıt tüketiminin hata oranı maksimum %3, ortalama %1,31'dir
- Kapalı kutu Gaussian Regresyon yöntemi ile oluşturulan modeler motor çıkış is değerlerini tahminlemede istenilen başarılı sonuçlara ulaşılamamıştır.

Kapalı kutu Gaussian Regresyon yöntemi ile oluşturulan model daha önce koşmuş bir testin sonuçlarıyla çalıştırılabilir ve çıktılar gözlemlenebilir.

Çoklu püskürtme stratejisi farklı motor çalışma noktlarında ayrı bir yönelim verdiği için sonuçlar 3 farklı bölgede incelenmiştir. Bu doğrultuda;

- Grup A'ya ait çalışma noktalarında ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyon, sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre NOx emisyonunu ortalama %7 oranında azaltığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık yakıt tüketimi ortalama %1 artırdığı gözlemlenmiştir.
- Grup A'ya ait çalışma noktalarında iki kademeli ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyon, sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre NOx emisyonunu ortalama %9 oranında azaltığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık yakıt tüketimi ortalama %1.8 oranında artırdığı gözlemlenmiştir.
- Grup B'ye ait çalışma noktalarında ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyon, sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre NO_x emisyonunu ortalama %16 oranında azaltığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık yakıt tüketimini ortalama %2 artırdığı gözlemlenmiştir.
- Grup B'ye ait çalışma noktalarında iki kademeli ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyon, sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre NO_x emisyonunu ortalama %18 oranında azaltığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık yakıt tüketimi ortalama %2.9 oranında artırdığı gözlemlenmiştir.
- Grup C'ye ait çalışma noktalarında ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyon, sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre NO_x emisyonunu ortalama %12 oranında azaltığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık yakıt tüketimi ortalama %1.1 artırdığı gözlemlenmiştir.
- Grup C'ye ait çalışma noktalarında iki kademeli ön püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyon, sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre NO_x emisyonunu ortalama %21 oranında azaltığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık yakıt tüketimi ortalama %4.9 oranında artırdığı gözlemlenmiştir.

Nihayetinde doğru veri seti ile eğitilmiş, doğru girdiler ile beslenmiş bir kapalı kutu modelinin daha önce koşmuş bir testin sonuçlarıyla ile çalıştırılabilir ve çıktılar elde edilebilir olduğu deneysel yöntemler ile ispatlanmış, gerçeğe çok yakın tahminlemeler yapabileceği kanıtlanmıştır. Bu sayede motor kalibrasyonunu geliştirme aşamlarında hem maliyet hem de zamandan kazanç sağlanabilinir.

Bu çalışmanın sonuçlarını sera gazı etkisi açısından incelediğimiz zaman dizel araçlar sera gazına etkisi olan CO_2 ve N_2O emisyonlarını üretebilirler.

- Bu doğrultuda çoklu püskürtme stratejisinde yakıt tüketiminin artması ile birlikte motordan çıkan CO_2 gazı, ön ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyonda sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre %3 artmıştır. CO_2 gazı, iki kademeli ön püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyonda sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre %5 artmıştır.
- Çoklu püskürtme stratejisinde NO_x'in azalması birlikte motordan çıkan N_2O gazı, ön ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyonda sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre %15,9 azalmıştır. N_2O gazı, iki kademeli ön püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyonda sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre %17,1 azalmıştır.
- Toplamda motordan çıkan CO_2 ve N_2O gazı, ön ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyonda sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre %2,9 artmıştır. İki kademeli ön püskürtmenin birlikte kullanıldığı konfigürasyonda sadece ana püskürtmenin kullanıldığı konfigürasyona göre %4,6 artmıştır.
- Yapılan kabuller ile birlikte sistemde motor ve zeolit bazlı SCR kullanılması durumunda, sistemde sadece motor olması durumuna göre N_2O gazı, %16 artmıştır.

Sonuç olarak sera gazı etkisi için, çoklu püskürtme stratejisi kullanıldığında NO_x emisyonunu indirgenmesine bağlı N_2O'nun yarattığı sera gazı etkisinin azaltıldığı ve CO_2'nun yarattığı sera gazı etkisinin arttırıldığı gözlemlenmiştir. NO_x emisyonunu indirgediği bilinen sistemler kullanldığı zaman bile N_2O etkisinden dolayı ek sera gazı etkisi yaratılabilinmektedir. Sera gazı etkisini gözlemlemek

amacıyla yapılan kabuller yerine gerçek zamanlı ölçümler alınarak bir yapı kurulunabilinir.

KAYNAKÇA

[1] H. Tschoke and K. Mollenhauer, Eds., Handbook of diesel engines, 2010th ed. Berlin, Germany: Springer, 2014.

[2] W. W. Pulkrabek, Engineering fundamentals of the internal combustion engine, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2004.

[3] P. Belardini, C. Bertoli, A. Ciajolo, A. D'Anna, and N. Del Giacomo, "Three dimensional calculations of DI diesel engine combustion and comparison whit in cylinder sampling valve data," in SAE Technical Paper Series, 1992.

[4] J. Heywood, Internal combustion engine fundamentals. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 1988.

[5] P. F. Flynn et al, "Diesel combustion: An integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics, and empirical validation," in SAE Technical Paper Series, 1999.

[6] O. Özener, "Dizel Motorlarında Pilot Püskürtmenin Performans ve Emisyon Açısından Optimizasyonu," Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013

[7] J. E. Dec, "A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging," in SAE Technical Paper Series, 1997.

[8] J. E. Dec and R. E. Canaan, "PLIF imaging of NO formation in a DI diesel engine," in SAE Technical Paper Series, 1998

[9] A. M. Mellor, J. P. Mello, K. P. Duffy, W. L. Easley, and J. C. Faulkner, "Skeletal mechanism for NO_x chemistry in diesel engines," in SAE Technical Paper Series, 1998.

[10] Y. Kitamura, A. Mohammadi, T. Ishiyama, and M. Shioji, "Fundamental investigation of NO_x formation in diesel combustion under supercharged and EGR conditions," in SAE Technical Paper Series, 2005.

[11] T. V. Johnson, "Review of diesel emissions and control," SAE Int. J. Fuels Lubr., vol. 3, no. 1, pp. 16–29, 2010

[12] Y. B. Zeldovich, "The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions"," Acta Physicochimica USSR, 1946.

[13] C. P. Fenimore, "Formation of Nitric Oxide from Fuel Nitrogen in Ethylene Flames"," Combustion and Flame, pp. 19–289, 1972.

[14] J. Klimstra and J. E. Westing, NO_2 From Lean-Burn Engines-On Its Lower Sensitivity to Leaning Than NO. İn SAE Technical Paper 1995.

[15] S. William, Ed., "Epling a a Department of Chemical Engineering," University of Waterloo, Waterloo, 2011

[16] A Review of Diesel Particulate Filter Technologies Magdi K. Khair Southwest Research Institute, June 23-25, 2003

[17] T. V. Johnson, “Review of diesel emissions and control,” SAE Int. J. Fuels Lubr., vol. 3, no. 1, pp. 16–29, 2010

[18] T. Maunula, A. Viitanen, T. Kinnunen, K. Kanniainen, Design of Durable Vanadium-SCR Catalyst System for Heavy-duty Diesel Applications, 2013. Available at: http://papers.sae.org/2013-26-0049/

[19] T. Maunula, T. Kinnunen, K. Kanniainen, A. Viitanen, and A. Savimaki, “Thermally Durable Vanadium-SCR Catalysts for Diesel Applications,” in SAE Technical Paper Series, 2013.

[20] Z. G. Liu, N. A. Ottinger, and C. M. Cremeens, “Methods for quantifying the release of vanadium from engine exhaust aftertreatment catalysts,” SAE Int. J. Engines, vol. 5, no. 2, pp. 663–671, 2012.

[21] B. Guan, R. Zhan, H. Lin, and Z. Huang, “Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NO_x from diesel engine exhaust,” Appl. Therm. Eng., vol. 66, no. 1–2, pp. 395–414, 2014.

[22] Diesel Fuel Injection. [Online]. Available: https://dieselnet.com/tech/diesel_fi.php. [Erişim Tarihi: 12-Şubat-2022].

[23] Common rail fuel injection. [Online]. Available: https://dieselnet.com/tech/diesel_fi_common-rail.php. [Erişim Tarihi: 12-Şubat-2022].

[24] C. Barba, C. Burkhardt, K. Boulouchos, and M. Bargende, “A phenomenological combustion model for heat release rate prediction in high-speed DI diesel engines with common rail injection,” in SAE Technical Paper Series, 2000.

[25] T. Tanaka, “Study on pilot injection of DI diesel engine using common-rail injection system,” JSAE rev., vol. 23, no. 3, pp. 297–302, 2002.

[26] N. Guerrassi and P. Dupraz, “A common rail injection system for high speed direct injection diesel engines,” in SAE Technical Paper Series, 1998.

[27] A. E. Catania, A. Ferrari, and M. Manno, “Development and application of a complete multijet common-rail injection-system mathematical model for hydrodynamic analysis and diagnostics,” J. Eng. Gas Turbine. Power, vol. 130, no. 6, p. 062809, 2008.

[28] Y. Wu, P. Wang, S. Muhammad Farhan, J. Yi, and L. Lei, “Effect of post-injection on combustion and exhaust emissions in DI diesel engine,” Fuel (Lond.), vol. 258, no. 116131, p. 116131, 2019

[29] N. A. Henein, M.-C. Lai, I. P. Singh, L. Zhong, and J. Han, “Characteristics of a common rail diesel injection system under pilot and post injection modes,” in SAE Technical Paper Series, 2002

[30] K. Cung, A. Moiz, J. Johnson, S.-Y. Lee, C.-B. Kweon, and A. Montanaro, “Spray–combustion interaction mechanism of multiple-injection under diesel engine conditions,” Proc. Combust. Inst., vol. 35, no. 3, pp. 3061–3068, 2015

[31] O. Kaario, E. Antila, and M. Larmi, “Applying soot phi-T maps for engineering CFD applications in diesel engines,” in SAE Technical Paper Series, 2005

[32] B. Wu, Q. Zhan, X. Yu, G. Lv, X. Nie, and S. Liu, “Effects of Miller cycle and variable geometry turbocharger on combustion and emissions in steady and transient cold process,” Appl. Therm. Eng., vol. 118, pp. 621–629, 2017

[33] T. Sandalcı, Taşıt ve Çevre-Ders notu, Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul, 2011.

[34] C. S. Aalam, C. G. Saravanan, and B. P. Anand, “Impact of high fuel injection pressure on the characteristics of CRDI diesel engine powered by mahua methyl ester blend, Appl,” Appl. Therm. Eng, vol. 106, pp. 702–711, 2016

[35] K. Mathivanan, J. M. Mallikarjuna, and A. Ramesh, “Influence of multiple fuel injection strategies on performance and combustion characteristics of a diesel fueled HCCI engine - an experimental investigation,” Exp. Therm. Fluid Sci, vol. 77, pp. 337–346, 201

[36] M. Badami, F. Mallamo, F. Millo, and E. E. Rossi, Influence of Multiple Injection Strategies on Emissions, Combustions Noise and BSFC of a DI Common Rail Diesel Engine. in SAE Technical Paper 2002

[37] S. H. Park and S. H. Yoon, “Injection strategy for simultaneous reduction of NOx and soot emissions using two-stage injection in DME fueled engine,” Appl. Energy, vol. 143, pp. 262–270, 2015

[38] M. Zheng and R. Kumar, “Implementation of multiple-pulse injection strategies to enhance the homogeneity for simultaneous low-NO_x and -soot diesel combustion,” Int. J. Therm. Sci., vol. 48, no. 9, pp. 1829–1841, 2009

[39] Q. Fang, J. Fang, J. Zhuang, and Z. Huang, “Influences of pilot injection and exhaust gas recirculation(EGR) on combustion and emissions in a HCCI-DI combustion engine,” Appl. Therm. Eng., vol. 48, pp. 97–104, 2012.

[40] A. Ferrari, A. Mittica, and E. Spessa, “Benefits of hydraulic layout over driving system in piezo-injectors and proposal of a new-concept CR injector with an integrated Minirail,” Appl. Energy, vol. 103, pp. 243–255, 2013

[41] S. d’Ambrosio and A. Ferrari, “Potential of double pilot injection strategies optimized with the design of experiments procedure to improve diesel engine emissions and performance,” Appl. Energy, vol. 155, pp. 918–932, 2015

[42] J. M. Desantes, J. Arrègle, J. J. Lopez, and A. Garcia, A comprehensive study of diesel combustion and emissions with post injection. SAE Paper No. 2007

[43] Z. Han, A. Uludogan, G. J. Hampson, and R. D. Reitz, “Mechanism of soot and NOx emission reduction using multiple injection in a diesel engine,” SAE Paper No, no. 960633, 1996

[44] S. Mendez and S. Thirouard, “Using multiple injection strategies in diesel combustion: potential to improve emissions, noise and fuel economy tradeoff in low CR engines,” SAE Int J Fuels Lubr, vol. 1, no. 1, pp. 662–667, 2008

[45] S. Kang, S. Lee, and C. Bae, “Effects of multi-stage split injection on efficiency and emissions of light-duty diesel engine,” Energies, vol. 15, no. 6, p. 2219, 2022.

[46] H. Choi et al., “Comparison of the effects of multiple injection strategy on the emissions between moderate and heavy EGR rate conditions: part 2-post injections,” J. Mech. Sci. Technol., vol. 27, no. 7, pp. 2217–2223, 2013

[47] S. d’Ambrosio and A. Ferrari, “Potential of multiple injection strategies implementing the after shot and optimized with the design of experiments procedure to improve diesel engine emissions and performance,” Appl. Energy, vol. 155, pp. 933–946, 2015

[48] H. G. Roh, D. Lee, and C. S. Lee, “Impact of DME-biodiesel, diesel-biodiesel and diesel fuels on the combustion and emission reduction characteristics of a CI engine according to pilot and single injection strategies,” J. Energy Inst., vol. 88, no. 4, pp. 376–385, 2015

[49] C. Park, S. Kook, and C. Bae, “Effects of multiple injections in a HSDI diesel engine equipped with common rail injection system,” in SAE Technical Paper Series, 2004.

[50] H. Huang, Q. Wang, C. Shi, Q. Liu, and C. Zhou, “Comparative study of effects of pilot injection and fuel properties on low temperature combustion in diesel engine under a medium EGR rate,” Appl. Energy, vol. 179, pp. 1194–1208, 2016.

[51] S. Park, H. J. Kim, D. H. Shin, and J.-T. Lee, “Effects of various split injection strategies on combustion and emissions characteristics in a single-cylinder diesel engine,” Appl. Therm. Eng., vol. 140, pp. 422–431, 201

[52] D. A. Nehmer and R. D. Reitz, “Measurement of the effect of injection rate and split injections on diesel engine soot and NO_x emissions,” in SAE Technical Paper Series, 1994.

[53] T. C. Tow, D. A. Pierpont, and R. D. Reitz, “Reducing particulate and NOx emissions by using multiple injections in a heavy duty D.i. diesel engine,” in SAE Technical Paper Series, 1994

[54] A. K. Babu and G. Devaradgane, “Control of Diesel Engine Pollutants by Split Injection Method Using Multizone Model,” in SAE Small Engine Technology Conference, 2001

[55] K. Okude, S. Shiino, K. Yamada, and Y. Matsumoto, Effects of Multiple Injections on Diesel Emissions and Combustion Characteristics, presented at SAE Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition. 2007

[56] J. Lee, J. Jeon, J. Park, and C. Bae, “Effect of multiple injection strategies on emission and combustion characteristics in a single cylinder direct-injection optical engine,” in SAE Technical Paper Series, 2009

[57] Q. Zhao and T. Hastie, “Causal Interpretations of Black-Box Models”,” Journal of Business & Economic Statistics, vol. 39, no. 1

[58] J. Asprion, O. Chinellato, and L. Guzzella, “A fast and accurate physics-based model for the NO_x emissions of Diesel engines”,” Applied Energy, vol. 103, pp. 221–233, 2013.

[59] M. Henningsson, K. Ekholm, P. Strandh, P. Tunestål, and R. Johansson, “Dynamic mapping of diesel engine through system identification,” in Identification for Automotive Systems, London: Springer London, 2012, pp. 223–239.

[60] C. Benatzky, S. Stadlbauer, S. Formentin, A. Schilling, and D. Alberer, “Indicated pressure-based data-driven diesel engine NO_x modeling”,” International Journal of Engine Research, vol. 15, no. 8, pp. 934–943, 2014

[61] M. Grahn, K. Johansson, and T. Mckelvey, “Data-driven emission model structures for diesel engine management system development” International Journal of Engine Research, vol. 15, no. 8, pp. 906–917, 2014

[62] S. Roy, R. Banerjee, and P. Bose, “Performance and exhaust emissions prediction of a CRDI assisted single cylinder diesel engine coupled with EGR using artificial neural network” Applied Energy, vol. 119

[63] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, Gaussian Processes for Machine Learning (Adaptive Computation and Machine Learning).

[64] “AVL fuel mass flow meter and fuel temperature control,” AVL. [Online]. Available: https://www.avl.com/-/avl-fuel-mass-flow-meter-and-fuel-temperature-control. [Accessed: 05-Mart-2022].

[65] “AVL fuel mass flow meter and fuel temperature control,” AVL. [Online]. Available: https://www.avl.com/-/avl-fuel-mass-flow-meter-and-fuel-temperature-control. [Accessed: 05-Mart-2022].

[66] “Maintenance guide 415s | AVL.” [Online]. Available: https://www.avl.com/documents/10138/885893/Maintenance+Guide+415S. [Accessed: 12-Jun-2022].

[67] “AVL AMA I60 Exhaust Measurement System,” AVL. [Online]. Available: https://www.avl.com/testing-solutions-for-tractors/ /asset_publisher/gYjUpY19vEA8/content/avl-ama-i60-exhaust-measurement-system. [Accessed: 05-Mart-2022].

[68] EPA. [Online]. Available: https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials. [Accessed: 12-Mart-2022].

[69] M. Yaritza, P. M. J. López-De Jesús, and E. Matthey, Eds., The Effect of Pt:Pd Ratio on Heavy-Duty Diesel Oxidation Catalyst Performance: An Experimental and Modeling Study Bijesh M. Shakya, Balaji Sukumar

[70] B. Guan, R. Zhan, H. Lin, and Z. Huang, “Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NO_x from diesel engine exhaust,” Appl. Therm. Eng., vol. 66, no. 1–2, pp. 395–414, 2014

[71] C. P. Cho, Y. D. Pyo, J. Y. Jang, G. C. Kim, and Y. J. Shin, "NO_x reduction and N 2 O emissions in a diesel engine exhaust using Fe-zeolite and vanadium based SCR catalysts," Appl. Therm. Eng., vol. 110, pp. 18–24, 2017.

[72] R. Matarrese, L. Castoldi, S. Morandi, and L. Lietti, "Pathways for N_2O formation/reduction during operation of commercial LNT catalysts," Top. Catal., vol. 62, no. 1–4, pp. 18–26, 2019.

[73] P. Degobert, Automobiles and Pollution. Paris, France: Editions Technip, 1995.

[74] Control of Combustion Generated Nitrogen Oxide Emissions Technology Driven by "BOWMAN Department of Mechanical Engineering Stanford University Stanford, CA 94305-3032 USA

[75] P. Forzatti, L. Lietti, I. Nova, and E. Tronconi, "Diesel NO_x aftertreatment catalytic technologies: Analogies in LNT and SCR catalytic chemistry," Catal. Today, vol. 151, no. 3–4, pp. 202–211, 2010

[76] C. P. Cho, Y. D. Pyo, J. Y. Jang, G. C. Kim, and Y. J. Shin, "NO_x reduction and N_2O emissions in a diesel engine exhaust using Fe-zeolite and vanadium based SCR catalysts," Appl. Therm. Eng., vol. 110, pp. 18–24, 2017.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. A. Albayrak, M. Özkan, ‘Experimental Investigation of the Effect of Multiple Injection Strategy on NOx Emission in Diesel Engines’, III. International Science and Innovation Congress INSI, ISBN: 978-605-71214-7, 2022.