T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİZEL MOTORLARDA EMİSYON OPTİMİZASYONU

Mustafa GÜÇLÜ

YÜKSEK LISANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Otomotiv Mühendisliği Programı

Danışman
Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİZEL MOTORLARDA EMİSYON OPTİMİZASYONU

Mustafa GÜÇLÜ tarafından hazırlanan tez çalışması 07.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Otomotiv Mühendisliği Programı **YÜKSEK LISANS 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 Taha ŞEN, Üye
Istanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Muammer ÖZKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan DİZEL MOTORLARDA EMİSYON OPTİMİZASYONU 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.

Mustafa GÜÇLÜ

İmza

Aileme
adanmıştır

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin yönetilmesinde, yükseköğrenim ve profesyonel iş hayatımın her aşamasında benden değerli tecrübelerini esirgemeyen, araştırmalarımda ve çalışmalarımda beni teşvik ederek yol gösteren hocam Sayın Prof. Dr. Muammer ÖZKAN'a; tezimin çalışma konusu olan dizel motorlar konusunda her türlü test ve araştırma imkânını sağlayan TÜMOSAN Motor ve Traktör A.Ş.' ne; gerçekleştirdiğim tüm başarılarda ve profesyonel kariyerimin ilerlemesinde her daim bana yardımcı olan, değerli tecrübe ve bilgilerini paylaşan ve gelişimimde büyük pay sahibi olan müdürüm Sayın Cihan BÜYÜK'e ; bana her zaman yeni ufuklar keşfettirmiş olan Prof.Dr.Mehmet YETMEZ'e ; Doç.Dr.Orkun ÖZENER'e ; araştırma görevlisi, sevgili arkadaşım Onur GEZER'e ve meslektaşım Abdullah KILIÇASLAN'a ; çalışma arladaşlarım Miraç ÖZTÜRK, Mehmet SANDIKÇI, Özgürcan MİMAROĞLU, Mehmet YILMAZ, Faruk Cabbar YILMAZ, Yusuf İslam GÜNAYDIN, Hasan KEFELİOĞLU'na ; her zaman eğitimimizi herşeyin önüne koyan şimdi armızda olmayan, çok özlediğim canım babam Ali Fettah GÜÇLÜ'ye ; fedakar canım annem Hatice GÜÇLÜ'ye ; kardeşlerim Halil İbrahim GÜÇLÜ ve Coşkun GÜÇLÜ'ye ; amcam Yaşar Güngör GÜÇLÜ'ye; en büyük şansım, yol arkadaşım, bana güç, neşe ve huzur veren , canım eşim Naime USLU GÜÇLÜ'ye en içten saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa GÜÇLÜ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

TABLO LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

1 GİRİŞ 1

1.1 Tezin Amacı . . . 1
1.2 Kapsam . . . 1
1.3 Dizel Motor Emisyonları . . . 2
1.3.1 Azot Oksit Emisyonun Çevreye Ve İnsana Olan Etkisi . . . 4
1.3.2 Azot Oksit Oluşumu . . . 4
1.3.3 Partikül Madde Emisyonun Çevreye Ve İnsana Olan Etkisi . 5
1.3.4 Partikül Madde Oluşumu . . . 6
1.3.5 Azot Oksit ve Partikül Madde Arasındaki İlişki . . . 10
1.4 Literatür Özeti . . . 12

2 KULLANILAN YÖNTEM VE MATARYELLER 13

2.1 Materyaller . . . 13
2.1.1 Modelleme Programı . . . 13
2.1.2 Test Donanımı . . . 14
2.1.3 Deney Motoru . . . 20
2.1.4 Kullanılan Yakıt . . . 20
2.2 Yöntem . . . 21
2.2.1 Motor Modelinin Kurulması . . . 22
2.2.2 DoE Tasarımı . . . 33
2.2.3 Model Doğrulama . . . 36
2.2.4 Hata Analizi . . . 40

3 Model ve Test Sonuçları **43**
3.1 Model ve Test Karşılaştırması 43
3.2 Hata Analizi 46

4 SONUÇ VE ÖNERİLER **48**

KAYNAKÇA **57**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **59**

SİMGE LİSTESİ

λ	Hava Fazlalık Katsayısı
Φ	Hava Yakıt Oranı

KISALTMA LİSTESİ

ATS	Egzoz Arıtma Sistemi
CR	Common Rail
DoE	Deney Tasarımı
ECU	Motor Kontrol Ünitesi
FAME	Yağ Asidi Metil Esteri
FID	Analizör
HCCI	Homojen Karışım Sıkıştırma Ateşlemesi
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
IRD	Analizör
KMA	Krank Mili Açısı
LTC	Düşük Sıcaklıkta Yanma
MK	Kinamatik modülüte
NO_x	Azot Oksit
PAH	Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
PCCI	Ön Karışım Şarj Sıkıştırma Ateşlemesi
PM	Partikül Madde
SOF	Yanmamış Organik Bileşikler
ULSD	Ultra-Düşük Kükürt içerikli Dizel
ÜÖN	Üst Ölü Nokta

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Geleneksel Yanma Formatı Dizel 3
Şekil 1.2 Yanma Sonu Emisyon Popülasyonu 3
Şekil 1.3 İs oluşumu 7
Şekil 1.4 İs oluşum Bölgeleri 8
Şekil 1.5 PM Kompozisyonu 10
Şekil 1.6 NO_x - İs Oluşum 11
Şekil 2.1 Kullanılan 1 Boyutlu Motor Modelleme yazılımı 14
Şekil 2.2 RUTE Test Odası 15
Şekil 2.3 Dyno 402 15
Şekil 2.4 AVL AMA I60 17
Şekil 2.5 AVL483 Plus Micro Soot 18
Şekil 2.6 AVL 735 - 753 Yakıt Ölçüm ve Şartlandırma Cihazı 19
Şekil 2.7 Puma Otomasyon Sistemi 19
Şekil 2.8 GT-Suit Ana Motor Modeli 22
Şekil 2.9 Krank Mili Tahrik Grubu 23
Şekil 2.10 Emme ve Egzoz Hatlarının Modellenmesi 24
Şekil 2.11 Kompresör Haritaları 25
Şekil 2.12 Türbin Haritaları 26
Şekil 2.13 Valf Zamanlaması 27
Şekil 2.14 Enjektör Profili 28
Şekil 2.15 Yanma Modeli 29
Şekil 2.16 Isı Trasferi Modeli 30
Şekil 2.17 Sürtünme Modeli 31
Şekil 2.18 NOx Modellemesi 32
Şekil 2.19 İs Modelleme 33
Şekil 2.20 Güç Model Doğrulama Sonuçları 36
Şekil 2.21 NO_xModel Doğrulama Sonuçları 38
Şekil 2.22 Partikül MaddeDoğrulama Sonuçları 39
Şekil 2.23 Güç-Model ile Güç-Test Hata Grafiği 40
Şekil 2.24 NOx-Model ile NOx-Test Hata Grafiği 41
Şekil 2.25 PM-Model ile PM-Test Hata Grafiği 42
Şekil 3.1 Güç Kıyaslaması 44

Şekil 3.2 NO_x Kıyaslaması 45
Şekil 3.3 Partikül Madde Kıyaslaması 45
Şekil 3.4 Test ve Model Arasındaki Güç Hata Analizi 46
Şekil 3.5 Test ve Model Arasındaki NO_x Hata Analizi 47
Şekil 3.6 Test ve Model Arasındaki PM Hata Analizi 47
Şekil 4.1 25 mg/st Optimizasyon Eğrileri 49
Şekil 4.2 35 mg/st Optimizasyon Eğrileri 50
Şekil 4.3 45 mg/st Optimizasyon Eğrileri 51
Şekil 4.4 55 mg/st Optimizasyon Eğrileri 52

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Dyno 402 Teknik Özelikler 16
Tablo 2.2 AVL 483 Plus Micro Soot Teknik Özelikler 18
Tablo 2.3 Motor Teknik Özelikleri 20
Tablo 2.4 EN590 Dizel Yakıtının Teknik Özellikleri 21
Tablo 2.5 DoE Matris Özeti 35
Tablo 2.6 DoE Doğrulama Matrisi 37
Tablo 4.1 25 mg/st Seçim Tablosu 53
Tablo 4.2 35 mg/st Seçim Tablosu 54
Tablo 4.3 45 mg/st Seçim Tablosu 55
Tablo 4.4 55 mg/st Seçim Tablosu 56

ÖZET

DİZEL MOTORLARDA EMİSYON OPTİMİZASYONU

Mustafa GÜÇLÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Günümüzde dizel motorlar yüksek termik veriminden dolayı büyük bir kullanım alanına sahiptir. Hava kirliliğinin en önemli nedenlerinden biri dizel motorlu taşıt kullanımına bağlı oluşan kirleticilerdir. PM ve NO_x emisyonları dizel motorlarında üstesinden gelinmesi gereken en temel iki problemdir. Bu iki emisyonun konvansiyonel şartlarda çalışılması durumunda oluşum açısından aralarında ters orantı barındırması her iki emisyonun da aynı anda kontrol altına alınmasını güçleştirmektedir. Artan hava kirliği ve sıkılaşan emisyon regülasyonlarıyla bir çok araç üreticisi için hibrit güç sistemleri arayışı neredeyse zorunlu hale getirmiştir.

Bu noktada dizel motorun taşıt içerisinde jeneratör motoru olarak çalıştığı, taşıtın güç ihtiyacını karşıladığı hibrit sistemler tercih edilebilir hale gelmiştir. Dizel jeneratör motorları tek devir çalışarak gerekli güç ihtiyacını sağlayabilirler. Dizel jeneratör motorunun sabit devirde kalibrasyon ihtiyacının olması, sabit devirde çalışan dizel motorların emisyon optimizasyonunda konvansiyonel yanma stratejilerinin dışındaki yöntemlerin uygulanarak emisyonların kontrol altına alınmasını kolaylaştırır.

Geleneksel dizel yanma metodolojilerinin ötesinde, Homojen Şarj Sıkıştırma Ateşlemesi (HCCI), Premiks Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemesi (PCCI) ve Module Kinematik (MK) gibi Düşük Sıcaklık Yanma (LTC) stratejileri, hem NO_x hem de PM emisyonlarının eş zamanlı olarak kontrol altına alınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, dizel motorlarda konvansiyonel çalışma stratejilerinin dışına çıkılarak, Modulated Kinetics yöntemi ile PM ve NO_x emisyonlarının kontrol

altına alınması amaçlanmıştır.

Bu çalışma 3,9 litrelik bir Common Rail (CR) dizel motor üzerinde farklı yakıt miktarları, değişen ray basınçları ve püskürtme zamanlamalarıyla ilgili analiz ve test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, emisyon optimizasyonu hedefiyle NO_x ve PM oluşum sonuçlarını değerlendirmek amacıyla yürütülmüştür. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde PM ve NO_X emisyonlarını aynı anda kontrol altında tutulabilceği kalibrasyon noktaları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Module Kinematik, NO_x Emisyonu , Partükül Madde Emisyonu

ABSTRACT

Emission Optimization In Diesel Engine

Mustafa GÜÇLÜ

Department of Mechanical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Nowadays, diesel engines have a wide area of usage due to their high thermal efficiency. One of the most significant causes of air pollution is the pollutants generated by the use of diesel engine vehicles. PM and NO_x emissions are the two fundamental problems that need to be addressed in diesel engines. The inverse correlation between these two emissions in conventional operating conditions makes it difficult to control both emissions simultaneously.

With increasing air pollution and tightening emission regulations, the search for hybrid power systems has become almost mandatory for many vehicle manufacturers.

At this point, hybrid systems where the diesel engine operates as a generator motor within the vehicle and meets the power needs of the vehicle have become a preferable option. Diesel generator engines can provide the necessary power by operating at a single speed. The need for calibration of the diesel generator engine at a constant speed makes it easier to control emissions by applying methods beyond conventional combustion strategies in emission optimization of diesel engines operating at a constant speed.

Beyond traditional diesel combustion methodologies, Low Temperature Combustion (LTC) strategies such as Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI), Premixed Controlled Compression Ignition (PCCI), and Modulated Kinetics (MK) play a significant role in simultaneously controlling both NO_x and PM emissions. In this study, it was aimed to control PM and NO_x emissions using

the Modulated Kinetics method, going beyond conventional operating strategies in diesel engines.

This study involved analysis and test work on a 3.9-liter Common Rail (CR) diesel engine with varying fuel quantities, changing rail pressures, and injection timings. These studies were conducted to evaluate NO_x and PM formation results with the goal of emission optimization. As a result of the conducted studies, calibration points that can control PM and NO_x emissions simultaneously have been determined.

Keywords: Modulated Kinetic Combustion, Retarded Injection, NO_x Emission, Particle Matter

1
GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Dizel motorlar, yüksek termik verimlilikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, yanma sonucu ortaya çıkan atık gazlar, hava kirliliğinin önemli bir kaynağıdır. Dizel motorlarda NO_x ve PM emisyonlarını aynı anda kontrol altına almak, bu emisyonlar arasındaki ters orantı nedeniyle büyük bir zorluk arz etmektedir. Emisyon düzenlemelerinin sıkılaşması ve hava kirliliğinin artması, otomotiv endüstrisini çevreci ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Bu bağlamda, elektrik ve içten yanmalı motorların kombinasyonundan oluşan hibrit sistemlerin popülerliği giderek artmaktadır. Ayrıca, güncel emisyon regülasyonlarına uyum sağlamak için büyük ve maliyetli ATS sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışma, tek devirde jeneratör olarak çalışan bir dizel motor üzerinde, geleneksel çalışma yöntemlerinden farklı bir yaklaşım olan MK konsepti ile NO_x ve PM emisyonlarını azaltmayı hedeflemekte; bu sayede hem hibrit araçlar ve jeneratör uygulamaları için çevresel açıdan sürdürülebilir bir enerji kaynağı sağlanması, hem de ATS'lerdeki pahalı ve büyük sistemlere olan bağımlılığın minimize edecek optimum ECU kalibrasyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.2 Kapsam

Bu çalışma, dizel motorların özellikle jeneratörler, hibrit sistemler ve benzeri uygulamalarda tek devirde ve farklı yük koşulları altında nasıl performans gösterdiğine odaklanmaktadır. Çalışmanın temel amacı, yüksek hava fazlalık katsayısı bulunan ve görece düşük yük koşullarında dizel motorların verimliliğini ve emisyon karakteristiklerini analiz etmektir.

Özellikle, bu uygulamalarda azot oksitler NO_x ve partikül madde (PM) emisyonlarının davranışı üzerinde durulmuş, motorun farklı işletme şartlarında emisyonlarını azaltmak ve verimliliğini artırmak için optimum çalışma koşulları

araştırılmıştır. Çalışma, bu konuda mevcut literatüre önemli katkılarda bulunmayı hedeflemekte; emisyon azaltma stratejileri, yakıt tüketimi optimizasyonu ve çevresel etkilerin azaltılması gibi alanlarda yeni perspektifler sunmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışma, dizel motor teknolojisinin daha temiz ve daha verimli bir enerji kaynağı olarak geliştirilmesine yönelik uygulamalı araştırmalar için bir temel oluşturmayı hedeflemekte ve bu alandaki teknolojik ilerlemelere katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

1.3 Dizel Motor Emisyonları

Günümüzde, endüstriyel gelişmeler ve teknolojik ilerlemeyle birlikte, dizel motorlar hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu motorlar, hem taşımacılıkta hem de enerji üretiminde mühim bir yere sahiptir. Ancak, bu motorların çevreye olan tesiri, özellikle emisyonları açısından ciddi bir mesele olarak karşımıza çıkmaktadır. Dizel motorların yaydığı zararlı gazlar, hem insan sağlığına hem de tabiatın dengesine zarar verebilmektedir [1].

Dizel motorlar, enerji üretmek amacıyla hidrokarbon bazlı yakıtlar kullanarak çalışırlar. Bu yakıtlar, arzu edilen optimum yanma reaksiyonunu gerçekleştirebilmek için atmosferik hava ile belirli bir oranda karıştırılmalıdır. Bu karışım oranı, yakıtın tam ve etkili bir şekilde yanması için gerekli olan hava miktarını belirtir ve stokiyometrik oran olarak adlandırılır. 1 kg yakıtın yanması için yaklaşık 14.37 kg hava gereklidir [2].

İçten yanmalı motorlarda Hava Fazlalık Katsayısı (HFK), motor silindirine giren hava miktarının, tam bir yanma için teorik olarak gerekli olan hava miktarına oranını ifade eder. Basitçe, hava fazlalık katsayısı, yanma için ihtiyaç duyulandan daha fazla veya daha az hava olup olmadığını gösterir. Bu oranın doğru ayarlanması, yanmanın verimliliğini ve emisyonların kontrol altına alınmasını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür.

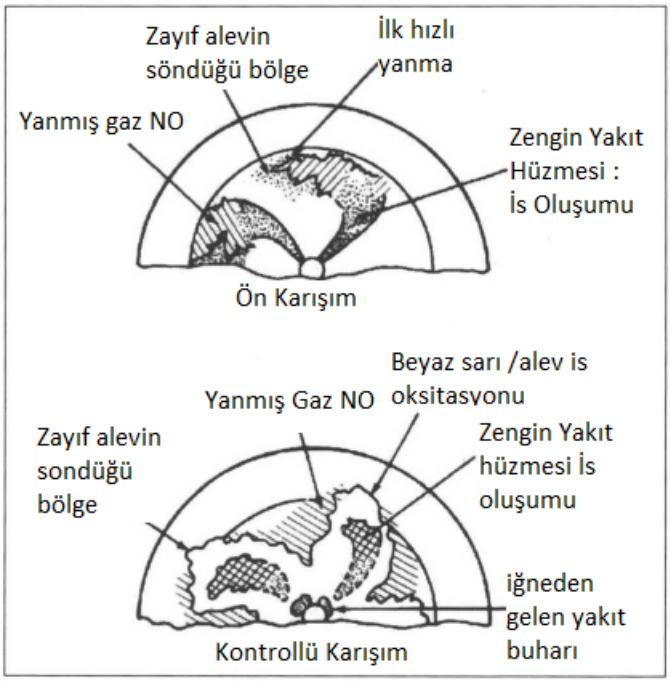
Yüksek sıcaklıkta sıkıştırılmış hava ile silindir içerisinde karşılaşan hidrokarbon temelli yakıtın stekometrik oranda tam yanma sonucunda CO_2 H2O ve N_2 oluşur [3].

Hidrokarbon'nun saf oksijenle yanmas denklem 1.1 içersinde görüldüğü gibidir.

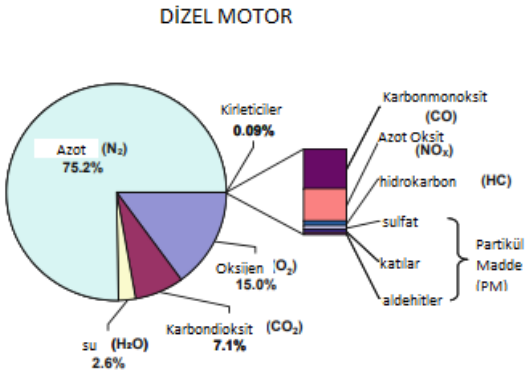
$$C_nH_{2n+2} + 3n + 1O_2 \rightarrow nCO_2 + (n+1)H_2O + \text{ısı} \tag{1.1}$$

Saf oksijen ile yanma tepkimesini temsil eder ve sonucunda karbon dioksit, su ve ısı açığa çıkacağını gösterir.

Dizel motorlarda yanma süreci heterojen bir karaktere sahiptir. Her bir yanma bölgesinde tutuşmanın eşit şekilde gerçekleşmemesi, ideal şartlarda dahi, yanma sırasında yakıtın zengin bölgelerde tutuşması sonucunda CO (karbon monoksit), HC (hidrokarbon), NO_x (azot oksit) gibi artık gazların oluşmasına neden olmaktadır [4]. Yanma formatı şekil 1.1 'de görüldüğü gibidir



Şekil 1.1 Geleneksel Yanma Formatı Dizel



Şekil 1.2 Yanma Sonu Emisyon Popülasyonu

İdael Yanma sonunda emisyon dağlımı ağırlıkları N_2 75.2% , H_2O 2.6% , CO_2 7.1% , O_2 15% ve 0,09% (CO, NO_x ,HC,PM) gibidir [3]. Yanma sonu popülasyonu şekil 1.2 olduğu gibidir.

1.3.1 Azot Oksit Emisyonun Çevreye Ve İnsana Olan Etkisi

NO_2, N_2O_2 ve benzeri bileşiklerin tamamı azot oksit (NO_x) olarak adlandırılır. Azot oksitler, kandaki hemoglobin ile birleşir ve bu birleşme CO'ye kıyasla 1000 kat daha güçlü bir bağ oluşturur. Ciğerdeki nemle birleşerek nitrik asit oluştururlar. Oluşan asidin konsantrasyonu düşük olduğu için etkisi sınırlıdır; ancak zamanla birikerek solunum yolu hastalığı olan bireyler için tehlike oluşturabilir. Ayrıca, çevresel koşullarda kararsızdır ve oksijenle birleşerek NO_2'ye dönüşür [5]. Özellikle azot dioksitin (NO_2) ozon tabakasına olan olumsuz etkisi önemlidir. Azot dioksit, atmosferde serbest halde bulunan oksijen atomları ile reaksiyona girerek ozonu parçalar [6]. Bu reaksiyon, ozonun azalmasına ve ozon tabakasının incelmesine neden olur. Azot dioksitin ozon ile etkileşimi, stratosferdeki ozon tabakasının zayıflamasına ve incelmesine yol açar. Ozon tabakasının zarar görmesi, güneşten gelen zararlı UV (ultraviyole) ışınlarının yeryüzüne daha fazla ulaşmasına ve bu durum da çeşitli sağlık sorunlarına, özellikle deri kanserine ve çeşitli ekosistemlerde değişikliklere neden olabilir. Bu nedenle, azot oksit emisyonlarının kontrol edilmesi ve azaltılması, ozon tabakasının korunması ve insan sağlığı açısından kritik bir öneme sahiptir [7].

1.3.2 Azot Oksit Oluşumu

Yanma sonunda havadaki azot miktarından dolayı büyük oranda NO (yaklaşık %60 – 90) oluşur[3].Havada büyük miktarda bulunan azot, oksijen ile reaksiyona girerek NO ve NO_2 oluşturur. Bu gazlar benzer etkilerinden dolayı bir NO_x olarak isimlendirilirler[8].“ Zeldovich mekanizması” olarak adlandırılan reaksiyon formülü, NO_x oluşum mekanizmasını açıklar[9].

$$O_2 \leftrightarrow 2O \tag{1.2}$$

$$O + N_2 \leftrightarrow NO + N \tag{1.3}$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \tag{1.4}$$

İkinci rekasiyon 1.3 birinci rekasiyonun 1.2 hemen ardından geldiği için yakıt bakınmından zengin karşımlarda 2. denklem zayıflar. Bu sepele yakıt bakımından zengin koşullar için “ geliştirlmiş zeldoviç mekanizması adından 1.4 denklem reaksiyona eklenmiştir [10].

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \tag{1.5}$$

Yüksek sıcaklık altında(yaklaşık olarak 1800 K) oksijence zengin koşullarda, azot ve oksijen molekülleri termal etkileşimler sonucunda reaksiyona girerler ve azot monoksit (NO) gazını üretirler.NO_x oluşumunda bölgesel alev sıcaklıkları çok önemlidir [11]. Ortalama alev sıcaklığı yüksek olmamasına rağmen lokal sıcaklıkların yüksek olması NO_x oluşumuna imkan verir. İkinci aşama olarak, ortamdaki diğer oksijen molekülleriyle NO gazı reaksiyona girerek daha yüksek oksitleri, özellikle azot dioksiti (NO_2), oluştururlar. NO_x oluşumu yanma sıcaklıkları artıkça artış gösterirler[4].

1.3.3 Partikül Madde Emisyonun Çevreye Ve İnsana Olan Etkisi

Dizel motorlarındaki partikül madde emisyonu, temel olarak yanma sırasında oluşan karbon parçacıklarından meydana gelir ve bu parçacıkların bazı organik bileşikleri de içerirler. Partikül oluşumu genellikle yetersiz hava koşullarının olduğu yanma ortamlarında, özellikle termal bozunma nedeniyle meydana gelir. Partikül madde emisyonlarının önemli bir kısmını is parçacıkları oluşturur[8]. İs emisyonlarının ufak PM halinde binlerce kilometre dolaşabilir [12]. İs emisyonlarını şu şekilde kategorize edebilir.

- Büyük parçacıklar >10 μm,
- Kaba parçacıklar 2,5 – 10 μm (PM10)
- İnce parçacıklar 1,0 – 2,5 μm (PM2,5)
- Ultra ince <1,0 μm (PM1,0)

Parçacık Maddelerin sahip oldukları boyuta göre atmosferde dolaşma süresi değişlik gösterir. PM10 salınımdan sonra birkaç saat sonra sedimantasyona uğrarken PM2.5 günlerce hatta haftalarca sonra sedimantasyona uğrar. PM bir çok sağlık problemine hava kirliliğine, su ve toprak kirliliğine sebep olarak tarım verimini etkiler eder. Bir dizi toksikolojik ve epidemiyolojik çalışma, PM'nin (partikül madde) sağlık üzerinde olumsuz etkileri olduğunu belirlemiştir. Özellikle PM maruziyeti ile akut hastalıklar arasında bir bağlantı olduğu tespit edilmiştir. Bu maruziyet, kısa vadeli sorunlar arasında göz tahrişi gibi etkilerin yanı sıra burun ve boğazda kusma, baş dönmesi, baş ağrısı, mide ekşimesi, uyuşukluk, bronşit, kronik solunum rahatsızlıkları, kardiyovasküler hastalıklar, kalp-akciğer hastalıkları ve alerjik reaksiyonlar gibi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. PM maruziyeti, nefes darlığı, ağrılı nefes alma, kanser ve erken ölüm riskini artırarak ciddi hastalıklara neden olma potansiyeline sahiptir[7]

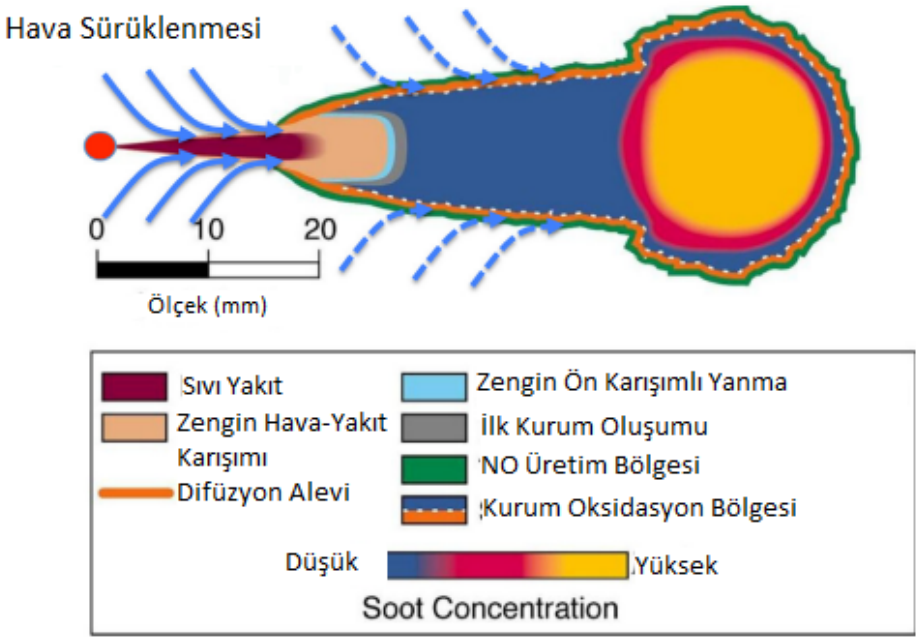
Dizel partikül madde (PM) emisyonları, atmosferde süzülen mikroskobik partikül maddeler vasıtasıyla güneş ışınlarını absorbe ederek iklim üzerinde etkili olabilir. Bu fenomen, "aerosol etkisi" olarak adlandırılmakta olup, atmosferdeki partikül sayısındaki değişimler aracılığıyla güneş ışınlarının dağılımını etkileyerek hava sıcaklığındaki değişimlere katkıda bulunabilir [13]. Dizel PM, atmosferle etkileşimde bulunarak yağış yoluyla toprak ve sulara karışabilir. Bu durum, çevresel sistemdeki diğer unsurları olumsuz etkileyerek ekosistem dengesini bozma potansiyeline sahiptir[7].

1.3.4 Partikül Madde Oluşumu

Dizel motorlardan çıkan egzoz dumanında yanma sırasında oluşan is partikülleri bulunur. Bu is partiküllerinin üzerine yanma sonrası çeşitli organik maddeler yapışır. Bu yapışan maddeler, isin ilk oluşum aşamalarında ortaya çıkan maddeler olabilir. Bu yapışan organik maddeler içinde yanmamış yakıt parçaları, oksijen içeren bileşikler (örneğin ketonlar, esterler ve asitler gibi) ve halkasal yapıda karbon bileşikleri yer alır. Ayrıca, bu organik maddelerin yanı sıra az miktarda SO_2, NO_2ve sülfat gibi inorganik bileşenler de bulunur [7] .

Bu partiküllerin bileşimi, motorun çalışma şartlarına ve özellikle de egzozun sıcaklığına bağlıdır. 500°C'nin üzerinde, bu partiküller yaklaşık 15 ile 30 nm arası boyutlarda ve az miktarda hidrojen içeren karbon tanecikleridir. Bu sıcaklığın altında, partiküller daha önce açıklanan Yanmamış Organik Bileşenler (SOF) ile kaplanır. Egzoz hattı boyunca, partiküllerin büyüklüğünde ve Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH) içeriğinde, buhar fazında bulunan organik bileşiklerin üzerine yavaş yavaş yoğunlaşması sonucunda bir artış görülür [7] .

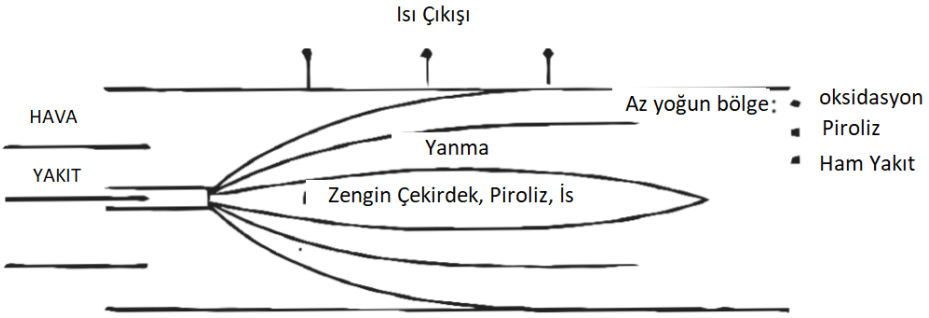
İs partikülleri, esas olarak yakıtın içindeki karbona bağlı olarak oluşur 1.3. Yakıtın türüne, moleküldeki karbon atomu sayısına ve karbon/hidrojen (C/H) oranına göre değişiklik gösterir. Örneğin, 12 ila 22 karbon atomu içeren moleküller kullanıldığında, oluşan karbon kürecikleri yaklaşık yüzbin karbon atomu içerir ve bu küreciklerin karbon/hidrojen oranı 0.1 civarındadır. Dizel motorlarda yanma sırasında is oluşumuyla ilgili temel araştırmalar çok olmasına rağmen, bu süreçlerin mekanizmaları tam olarak anlaşılamamıştır. Bunun nedeni, süreçlerin yüksek sıcaklık ve basınç altında, karmaşık bir yakıt bileşimi ve çok karışık hava akışı içeren ortamlarda tekrarlanamaz olmalarıdır. İs oluşumu üzerine yapılan araştırmalar genellikle deneysel kolaylıklar nedeniyle ön karışımlı alevler üzerine yoğunlaşmıştır ve dizel motorlarla ilgili sınırlı sayıda çalışma doğrudan enjeksiyon sistemiyle çalışan motorları incelemiştir. Bu motorlarda, yanma odasında yakıtın hava ile karıştırılma işlemi daha karmaşıktır. Ön karışımlı alevler ve dizel yanması



Şekil 1.3 İs oluşumu

sonucu oluşan is partikülleri arasında farklılıklar bulunur. İlk durumda, partiküller yaklaşık 100 milisaniye gibi daha uzun bir ikamet süresine sahiptir ve genellikle birbirine bağlı zincirler şeklinde agregatlar oluşturur. Dizel yanmada ise, çok daha kısa bir ikamet süresi (4 ila 10 milisaniye) ve yüksek basınç altında hızlı bir karışma işlemi sonucunda, bireysel küresel partiküllerin bir araya gelerek daha büyük küresel yığınlar oluşturmasına yol açar. Bu, partiküllerin birbirine yapışmasını ve daha büyük bir kütleye dönüşmesini ifade eden bir süreç olan koagülasyon ile, partiküllerin büyüme hızını artırır. Sıvı damlacıklar içinde polimerleşme (büyük moleküllerin küçük moleküllerin birleşmesiyle oluşması) ve piroliz (yüksek sıcaklıkta organik maddelerin ayrışması) yoluyla partikül oluşumu, dizel yanmada çok nadirdir veya hiç görülmez [7] .

Bu şekilde, isin oluşumu, dizel yanma süreçlerinde gaz fazında gerçekleşir ve bu süreçler 1000 ile 2800 K arasında bir sıcaklıkta ve 1 MPa basınçta meydana gelir. Yanmanın tamamlanmasını garanti altına almak için yakıtın tamamen yanması için gereken fazla hava mevcuttur. Is, 2000 ile 2400 K arasındaki dağılım alevlerinde ortaya çıkar ve en yüksek yoğunluk 2100 K'de görülür. Bu sıcaklık aralığının altında ve üstünde is konsantrasyonları ihmal edilebilir düzeydedir. Yakıtın bir fraksiyonundan katı is partiküllerinin oluşması için mevcut olan zaman sadece birkaç milisaniyedir. Ateşleme tamamlandıktan sonra, is yakıt püskürtüsünün tüm bölümlerinde 1 milisaniyeden daha kısa bir sürede belirir [14].



Şekil 1.4 İs oluşum Bölgeleri

Dizel motorlardan gelen is emisyonları, esasen aşağıdaki üç süreçten kısmen eş zamanlı olarak kaynaklanır:

- Yakıt ve havadan isin oluşum tepkimeleri, öncelikle ilk yanma fazında meydana gelir.
- Yanmış gazlardaki yakıttan is oluşum tepkimeleri, çoğunlukla ikinci yanma fazında gerçekleşir.
- Oluşan is, oksijen bakımından zengin bölgelerde okside olur ve azalır.

Dizel motorlardan çıkan is, yanma esnasında farklı kaynaklardan türeyen ve yanabilir özelliklere sahip bileşiklerden (SOF) meydana gelir. İşte bu is ve polisiklik aromatik hidrokarbonların (PAH) oluşumunun başlıca yolları şunlardır:

- Alevin kendisi, PAH üretir ve bu da orta derecede veya az miktarda is oluşumuna sebep olur.
- Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen piroliz, yani organik maddenin ısıtılarak ayrıştırılması süreci, PAH oluşumunu tetikler ve yoğun is üretimine neden olur.
- Daha düşük sıcaklıkta gerçekleşen piroliz işlemi de PAH ve oksijen içeren bileşenler üretir, ancak bu durumda is oluşumu daha azdır.
- Yakıt ve yağların buharlaşması, bu maddelerin bileşenlerini ortama ekler, ancak bu süreç is üretmez.

Ön karışımlı bir alevdeki yanmanın is oluşumuna katkısı, dağılım aleviyle kıyaslandığında azdır. 1.4, bu ürünlerin türbülanslı bir dağılım alevinde oluşum bölgelerini göstermektedir.

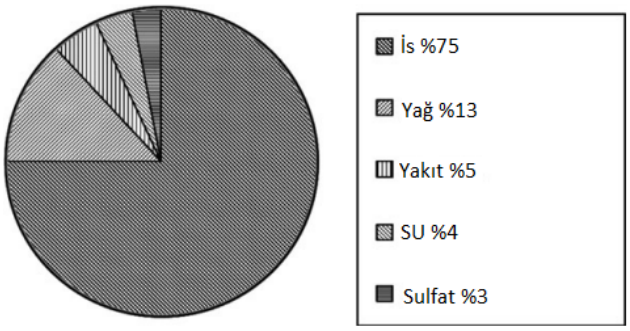
Yakıtın yanması sırasında isin oluşumunda iki temel evre bulunur:

1. Partikül oluşum evresi: Bu evre, yanma sırasında ilk katı faz partiküllerinin oluştuğu başlangıç dönemidir. Yakıt moleküllerinin yanması ya da ısı ile ayrışması (piroliz) sonucu oluşan ürünler içinde çeşitli doymamış hidrokarbonlar bulunur. Doymamış hidrokarbonlar çift bağ içeren ve doymuş olanlara kıyasla daha reaktif hidrokarbonlardır. Asetilen (C2H2) ve daha büyük molekül ağırlığına sahip asetilen homologları (asetilen yapısına benzer fakat daha fazla karbon ve hidrojen içeren bileşikler), bu ürünler arasındadır. Ayrıca polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), yani birden fazla halkadan oluşan aromatik (kararlı ve düzlemsel halka yapısına sahip) moleküller de bu aşamada önemlidir. Oluşan bu ilk partiküller çok küçüktür, çapları 2 nanometreden (nm) küçüktür ve ortalama 20 ila 30 angstrom (Å) büyüklüğünde bireysel hücrelerden oluşan kristalitler şeklinde bulunurlar. Oluşum bölgelerindeki yüksek sayılarına rağmen, isin oluştuğu en aktif bölgelerde önemli bir ağırlık faktörü temsil etmezler.

2. Partikül büyütme evresi: Bu evre, partiküllerin yüzey büyümesi, koagülasyon (partiküllerin birleşmesi) ve agregasyon (partiküllerin yapışarak büyümesi) aşamalarını içerir. Yüzey büyümesi, gaz fazında oluşan türlerin partikül yüzeyine bağlanması ve ardından bu türlerin partikül içine katılması ile gerçekleşir. Ancak, bu eklemeler, karbon-hidrojen oranlarına (H/C oranları) etki etmese de, isin kendine has özelliklerine benzer olmadığı için, dehidrojenasyon (hidrojenin çıkarılması) süreçlerini de içermesi gereklidir. Yüzey büyümesi reaksiyonları, partikül sayısını değiştirmez ancak isin kütlesel oranını artırır. Aksine, çarpışma ile meydana gelen koagülasyon, partiküllerin büyümesine yol açarak partikül sayısını azaltır. Bu şekilde oluşan partiküllerin birleşmesi, zincirlerin ve agregaların (partikül kümelerinin) oluşumuna sebep olur. Dizel bir motor içinde, bu temel partikül agregasyon evresi sıklıkla, oluşan partiküllerin havadaki oksijen ile oksidasyonu (yanma) ile eş zamanlı gerçekleşir. Bu iki zıt süreç, partiküllerin büyümesine karşıt etkide bulunabilir.

İs oluşumu kinetiği, dolaylı enjeksiyonlu bir motorun ön yanma odasında çok hızlıdır. Ön yanma odasında, üst ölü nokta (ÜÖN) sonrası krank mili dönüşünün yaklaşık 10 ila 20 derecesinde is konsantrasyonu maksimuma ulaşır ve sonra azalır. Yanma odasında, yanmanın ilk anlarında büyük miktarda is partikülü oluşur ve oksijen konsantrasyonu %5 gibi küçük bir oranın üzerine çıktığında bu partiküller kısmen yanar.

Aslında, sürecin her aşamasında, daha önce tarif edilen desenden farklı şekillerde evrilebilen ürünler oluşabilir. Hava veya oksitleyici türler tarafından oksidasyon,



Şekil 1.5 PM Kompozisyonu

is veya is öncüllerini CO ve CO_2 gibi gaz halindeki bileşiklere dönüştürebilir. Ön yanma odasında oluşan is partikülleri, transfer kanalı vasıtasıyla ana yanma odasına geçer, havaya dağılır ve kısmen yanar. Böylece, odada bulunan partikül boyutları, ön yanma odasındakinden daha küçüktür.

Egzozdaki is emisyonları, is oluşumu ve oksidasyon reaksiyonları arasındaki dengeye bağlıdır. Karbondioksit (C/O) oranı, is oluşum anında esas faktör olarak deneysel olarak bulunmuştur. Is, aşağıdaki reaksiyonla oluşur:

$$C_m H_n + yO_2 \rightarrow 2yCO + \frac{n}{2} H_2 + (m - 2y)C_s \tag{1.6}$$

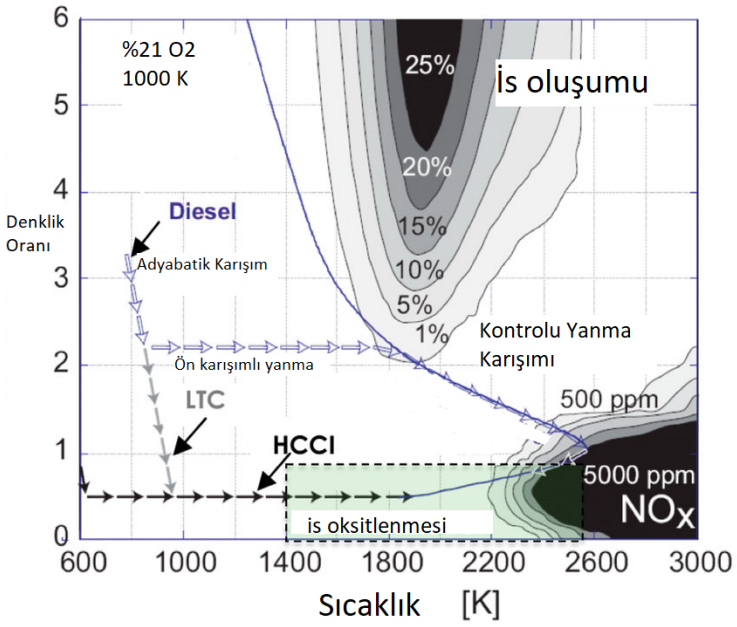
burada m karbon atomu sayısını, n ise hidrojen atomu sayısını ifade eder ve m, 2γ'den büyük olduğunda, yani C/O > 1 olduğunda is oluşur. İlgili yakıt/hava oranı şöyle verilir:

$$\Phi = 2\left(\frac{C}{O}\right)(1 + \delta) \tag{1.7}$$

burada $\delta = \frac{n}{4m}$ ve C/O = 1 için, δ 3'tür ve $\frac{n}{m} = 2$'dir. Is oluşumu için kritik C/O oranları 1'den düşüktür. Yakıtın bileşimine ve deneysel düzeneğe bağlı olarak, bu değerler 0.5 ile 0.8 arasında değişebilir. Bu kritik C/O oranı sıcaklıkla yükselir ancak basınçtan bağımsızdır. Ancak, kritik değer 5'e ulaştığında, C/O oranının değeri ile çok hızlı bir şekilde is üretimi (partiküllerin sayısından çok boyutları) artar ve yüksek basınçta bu durum güçlü bir şekilde tercih edilir. Yüksek basınç altında, is oluşumu için limit yakıt/hava oranı daha zayıf karışımlara kayar [7].

1.3.5 Azot Oksit ve Partikül Madde Arasındaki İlişki

NO_x (oksitlenmiş azot bileşikleri) ve PM (partikül madde) emisyonlarının oluşum mekanizmalarındaki karşılıklı ters orantı, bu iki emisyon türünün aynı anda etkili



Şekil 1.6 NO_x - İs Oluşum

bir şekilde kontrol altına alınmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Dizel motorlarının yönetilmesi, özellikle NO_x ve PM emisyonları açısından, karmaşık bir mühendislik ve kontrol zorluğu ortaya koymaktadır [8] .

NO_x, yüksek sıcaklık ve basınç altında yanma sırasında azot ve oksijenin reaksiyonu sonucu oluşan bir grup bileşikten türemektedir. Diğer taraftan, PM emisyonları, yanma sürecindeki yakıtın yanmamış kalıntıları ve yanma ürünlerinin bir araya gelmesiyle ortaya çıkmaktadır. Bu iki emisyon türünün kontrol edilmesi, motor performansını etkileyen karmaşık bir dengeleme gerektirmektedir [3].

Dolayısıyla, dizel motorlarının yönetilmesi açısından karşılaşılan en önemli emisyon sorunları, NO_x ve PM emisyonlarıdır. Bu sorunlarla başa çıkmak, sadece motor verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini de sağlamak için gelişmiş emisyon kontrol stratejilerinin ve teknolojilerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Şekil 1.6 görülebilceğiz üzere NO_X ve is oluşum bölgeleri farklılık göstermektedir.

PM emisyonlarını azaltan stratejiler NO_x emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır . Yüksek sıcaklıklar ve yeterli hava yakıt karışımında oluşmuş bir yanma mekanizması NO_x emisyonlarının artmasına, is emisyonlarının düşmesine sebep olurken. Düşük sıcaklıkta ve yeterli hava yakıt karışımının olmadığı yanma NO_x emisyonlarını azaltırken, PM emisyonlarının artmasına sebep olur [15]. Ayrıca dizel motor doğası gereği hetrojen olarak gerçekleşen yanma sırasında alevin yakıt olarak zengin bölgelerinde is oluşumu görülür [14] .

1.4 Literatür Özeti

Günümüzde dizel motorlar yüksek termal verimleriyle yol ve yol dışı taşıtlarda tercih edilmektedir. Bununla birlikte dizel motorlar oluşturdukları atık gazlarla hava kirliliğine büyük oranda sebep olmaktadırlar. Özelikle yanma sonucu oluşan NO_x ve PM emisyonlarını aralarındaki ters orantıdan dolayı kontrol altına almak çözülmesi gereken bir problemdir. Emisyon regülasyonlarının sıkılaşmasıyla birlikte atık gazların bertaraf edilmesi için çeşitli ATS'ler kullanılmaktadır [16].

Dizel motorların egzoz gazlarını arıtmak için kullanılan ATS'ler hem çok maliyetli oluşu hem de büyük oluşlarıyla sürdürülebilirlik açısından problem oluşturmaktadır. Bu sebeplerden ötürü emisyonları silindir içerisinde yanma stratejileriyle optimum hale getirmek hem çevreci hem de sürdürülebilir bir yaklaşım olacaktır [17].

Geleneksel yanma dışındaki homogeneous charge compression ignition (HCCI), premixed charge compression ignition PCCI ve modulated kinetics MK gibi yöntemlerle silindir içi maksimum sıcaklıkları düşürerek LTC ile NO_x ve PM kontörlü yapılması hedeflenmektir. [MK1] 1999 yılında Nissan Motor CO. LTD 'den Shuji Kimura, Osamu Aoki, Hiroshi Ogawa and Shigeo Muranaka ve Musashi Institute of Technology'den Yoshiteru Enomoto'nın yaptığı "New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines" isimli çalışmayla MK konseptiyle LTC ve yanma öncesi ön karışımlı hava- yakıt karakteriyle yakıt tüketiminde artış olmadan NO_x ve duman emisyonlarında düştüğü ortaya koyulmuştur [18].

2001 yılında Nissan Motor CO. LTD 'den Shuji Kimura, Osamu Aoki, Yasuhisa Kitahara and Eiji Aiyoshizawa'nın yaptığı "Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards" SAE yayının da MK konseptiyle NO_x ve PM emisyonlarında aynı anda düşüş görülmüştür [19].

2
KULLANILAN YÖNTEM VE MATARYELLER

Bu çalışmanın bu bölümünde, tez kapsamında ele alınacak olan test altyapısı ve simülasyon olanakları detaylı bir şekilde incelenecektir. Bu inceleme süreci, ilgili materyallerin kullanımı ile entegre bir şekilde gerçekleştirilerek, araştırma metodolojisinin temelini oluşturacaktır. Öncelikle, test altyapısının bileşenleri, işlevselliği ve bu altyapının araştırma sürecine katkısı ele alınacak; ardından simülasyon imkanlarının kapsamı, bu imkanların sağladığı avantajlar ve sınırlılıklar üzerinde durulacak. Bu çerçevede, araştırmada kullanılacak olan yöntemler, test senaryoları ve simülasyon süreçleri detaylandırılacak, bu süreçlerin araştırmanın genel hedefleri ile nasıl uyum sağladığı açıklanacaktır. Ayrıca, bu bölümde, test altyapısı ve simülasyon araçlarının kullanımı ile elde edilen verilerin analizi ve yorumlanmasının nasıl gerçekleştirileceği üzerinde durulacak, böylece çalışmanın bilimsel ve metodolojik bütünlüğü sağlama yolunda atılan adımlar sunulacaktır.

2.1 Materyaller

2.1.1 Modelleme Programı

Çalışmada motor modellemesi, içten yanmalı motorların geliştirilmesi sürecinde yaygın olarak tercih edilen GAMA Technologies firmasının GT Suite yazılımının bir parçası olan GT Power modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GT Power, kullanıcılarına detaylı ve kapsamlı bir motor modelleme yeteneği sunmakta olup, bu sayede içten yanmalı motorların performans parametreleri ve emisyon seviyeleri üzerinde derinlemesine analiz yapma olanağını sağlar. Program, motorun çeşitli çalışma koşulları altında nasıl tepki vereceğinin simülasyonunu yaparak, motor tasarımı ve geliştirmesi süreçlerinde kritik bilgiler sunar. Bu özellikleri sayesinde, GT Power, motor mühendisliği ve tasarımı alanında, özellikle içten yanmalı motorların performansının ve çevresel etkilerinin optimize edilmesi konusunda vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Bu çalışmada, GT Power modülünün sunduğu bu gelişmiş özellikler kullanılarak, motorun performans ve emisyon profilleri üzerinde ayrıntılı analizler yapılmış, bu analizler motor tasarımının geliştirilmesi



Şekil 2.1 Kullanılan 1 Boyutlu Motor Modelleme yazılımı

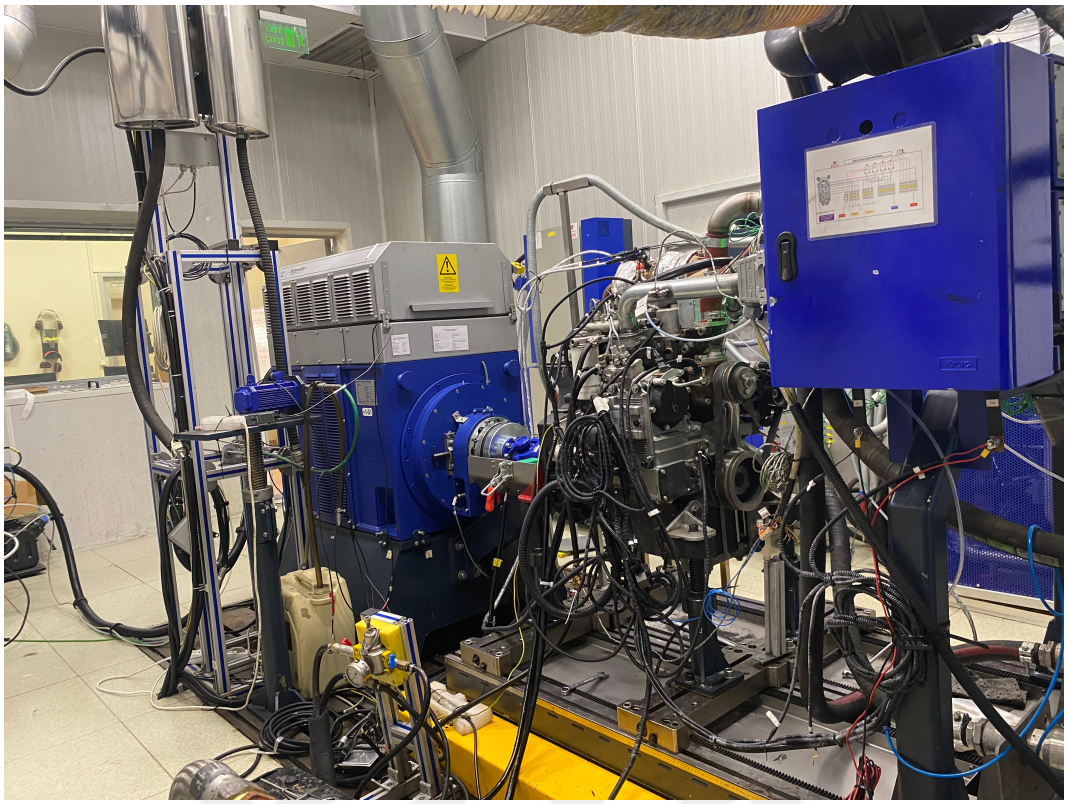
ve optimizasyonu süreçlerine önemli katkılar sağlamıştır.

2.1.2 Test Donanımı

Deney çalışmaları, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Enerji Enstitüsü bünyesinde yer alan Motor Mükemmeliyet Merkezi'nde yürütülmüştür. Şekil 2.2 numaralı fotoğrafta test odasının genel bir görüntüsü görülebilir. Bu merkezde bulunan Test Odası, motor testleri ve araştırmaları için özel olarak tasarlanmıştır ve AVL firması tarafından kurulmuştur. Test Odası, uluslararası standartlarda bir akreditasyona sahip olup, çeşitli regülasyon testlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli tüm teknik donanıma ve yetkinliğe sahiptir. Bu özellikleriyle Test Odası, içten yanmalı motorların performans ölçümleri, emisyon testleri ve diğer ilgili test işlemlerinin yüksek doğruluk ve güvenilirlikle gerçekleştirilmesine olanak tanır. Bu çalışma kapsamında, Test Odası'nın sunduğu bu imkanlar sayesinde, motor deneyleri ve testleri detaylı ve standardize edilmiş bir şekilde yürütülmüş, böylece elde edilen verilerin bilimsel geçerlilik ve güvenilirliği maksimize edilmiştir.

2.1.2.1 Motor Dinamometresi

Motor tork ölçümü sürecinde, "Dyno Road 402" 2.3 adlı bir aktif dinamometre kullanılmıştır. Bu cihaz, motor testleri sırasında motor torkunu ölçmek için tasarlanmış özel bir ekipmandır. Dyno Road 402, yüksek hassasiyetli ölçümler yapabilme kapasitesine sahip olup, motorun çıkış torkunu gerçek zamanlı olarak kaydedebilme yeteneğine sahiptir. Cihazın teknik özellikleri arasında, geniş bir tork ölçüm aralığı, yüksek ölçüm doğruluğu, ve motorun farklı çalışma koşullarında stabil ölçümler yapabilme kapasitesi yer almaktadır. Ayrıca, Dyno Road 402'nin kullanıcı dostu arayüzü ve veri kayıt özellikleri, test süreçlerinde verimliliği artırmakta ve analizlerin kolaylıkla yapılmasına imkan tanımaktadır. Bu dinamometre, motor tork ölçümü ve analizi için kritik bir araç olarak, çalışmanın doğruluğunu ve güvenilirliğini artıran önemli bir faktör olmuştur.



Şekil 2.2 RUTE Test Odası



Şekil 2.3 Dyno 402

Tablo 2.1 Dyno 402 Teknik Özelikler

Başlık	Bilgi
Motor Dyno Türü	DynoRoad 402-10-SX
Motor Türü	INDY 544-2/0934-1BS1-1
Laboratuar Numarası	TC2
Nominal Tork	4500 rpm'e kadar 9340 - 800 nm
Nominal Devir	4500 rpm
Nominal Güç	440 kW
Maksimum Devir	10000 rpm
Atalet Momenti	0,687 kgm2
Ağırlık	1347 kg

2.1.2.2 AVL AMA I60 Emisyon Ölçüm Cihazı

NO_x ölçümü için kullanılan "AMA i 60", kombine egzoz gaz emisyon ölçüm sistemi olarak tanımlanabilir. Bu sistem, içerisinde yer alan farklı analizörler sayesinde THC, CH_4, CO, NOx, CO_2 ve O_2 gibi çeşitli gazları ölçebilmektedir. Bu ölçüm işlemi sırasında, numune alınan egzoz gazlarının analizörlere ulaştırılması esnasında herhangi bir yoğuşma olmaması için gazlar, 190°C ısıtılmış hatlar kullanılarak taşınmaktadır.

AMA i 60 sistemine özgü bir özellik olarak, bazı gazların analizörlerde ölçülmeden önce şartlandırma ünitesinde şartlandırılması işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem, özellikle IRD gibi analizörlerde kullanılır ve ölçüm sürecinde gazın içindeki su buharının bertaraf edilerek kuru ölçüm yapılmasını sağlar. Ancak, FID (THC-CH_4) ve CLD (NO, NO_x) analizörlerine giden gazlar bu şartlandırma ünitesine yönlendirilmemektedir. Bu sistemsel yaklaşım, egzoz gazlarının daha doğru ve güvenilir bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır, böylece motorun emisyon profili hakkında detaylı ve kesin bilgiler elde edilir. AMA i 60'ın bu gelişmiş özellikleri, emisyon ölçümü ve analizi çalışmalarında önemli bir rol oynamakta ve motor geliştirme süreçlerinde kritik veriler sağlamaktadır.



Şekil 2.4 AVL AMA I60

2.1.2.3 AVL 483 Plus Micrasoot Duman Ölçüm Cihazı

İs emisyonlarının ölçümü için AVL 483 Plus Micro Soot cihazının kullanılarak ölçülmüştür **??**. Bu cihaz, motor egzozundan kaynaklanan is emisyonlarını hassas bir şekilde ölçmek için tasarlanmıştır. AVL 483 Plus Micro Soot, özellikle motor testleri ve emisyon analizi alanlarında yaygın olarak kullanılan bir cihazdır ve teknik özellikleri ile bu ölçümleri yüksek doğruluk ve güvenilirlikle gerçekleştirmektedir.

Tablo 2.2 AVL 483 Plus Micro Soot Teknik Özelikler

Başlık	Bilgi
Maksimum Kapasite	Max 50 mg/m3 Çözünürlük
Seyreltme Oranı	43862
Data Kapasite	10 Hz (Dijital) , 100 Hz (Analog)
Örnekleme Zamanı	:< 1 sn



Şekil 2.5 AVL483 Plus Micro Soot

2.1.2.4 Yakıt Ölçüm ve Şartlandırma Sistemi

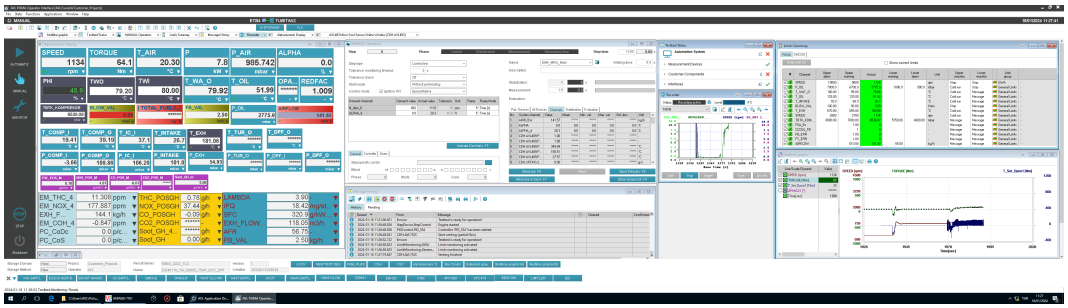
AVL753C ise, motor test sistemlerinde kullanılan bir yakıt şartlandırma sistemidir. Bu cihaz, motora giden yakıtın sıcaklığını kontrol eder ve yakıt içerisinde oluşabilecek hava kabarcıklarını algılayarak bu kabarcıkları bertaraf etmeyi amaçlar. AVL753C'nin bu özelliği, motor test süreçlerinde yakıt akışının istikrarını ve güvenilirliğini artırmakta önemli bir rol oynar 2.6. AVL735 ile entegre bir şekilde çalışan AVL753C, yakıt debi ölçümünde hassasiyeti ve yakıt şartlandırma süreçlerinde etkinliği artırmada kritik bir işlev görür. Bu iki cihazın birleşimi, motor test ve analiz sistemlerinde yüksek düzeyde doğruluk ve güvenilirlik sağlayarak, motor performansı ve emisyon testlerinin daha etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine katkıda bulunur.



Şekil 2.6 AVL 735 - 753 Yakıt Ölçüm ve Şartlandırma Cihazı

2.1.2.5 Otomasyon Sistemi

AVL PUMA Open 2, kullanılan otomasyon sistemi, otomotiv test sistemleri için geliştirilmiş, yüksek düzeyde kullanıcı dostu ve verimli bir platform sunmaktadır. Bu sistem, test yatak çalışmalarını ofis ortamında planlama ve analiz etme imkanı sağlayarak, test yatağındaki zamanı verimli bir şekilde kullanmayı mümkün kılar. Modern ve sezgisel araçları ile test çalıştırmalarının kolaylıkla oluşturulmasını ve parametre setlerinin hızlı bir şekilde işlenmesini destekler. Ayrıca, test yatağı üzerindeki cihazları ve test süreçlerini güvenilir ve doğru bir şekilde kontrol edebilme yeteneği sunar. Bu özellikler, otomasyon sisteminin hem yeni hem de deneyimli kullanıcılar için son derece kullanışlı olmasını sağlar.



Şekil 2.7 Puma Otomasyon Sistemi

2.1.3 Deney Motoru

Bu çalışmada, TÜMOSAN Motor ve Traktör tarafından geliştirilen yeni nesil Common ray (CR) S8000 motoru kullanılmıştır. Motor teknik özelikleri **??** tabloda olduğu gibidir.

Common Rail motorlar, modern dizel motor teknolojisinde yaygın olarak kullanılan bir yakıt enjeksiyon sistemidir. Bu sistemde, yakıt yüksek basınç altında bir ray (bar) içinde saklanır ve motorun ihtiyacına göre doğrudan silindirlere enjekte edilir. Common Rail motorlar, daha düşük yakıt tüketimi ve emisyon seviyeleri ile daha yüksek performans ve motor verimliliği sunar. Ayrıca, motorun çalışma sesini azaltır ve daha pürüzsüz bir motor çalıştırma sağlar. Bu teknoloji, dizel motorların çevresel etkilerini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır.

Common Rail motorlar, gelişmiş dizel yakıt enjeksiyon sistemine sahiptir. Bu sistemde, yakıt yüksek basınç altında bir 'ray' (common rail) içinde depolanır ve elektronik kontrol ünitesi (ECU) tarafından yönetilen enjektörler aracılığıyla her silindire hassas bir şekilde enjekte edilir. Bu yaklaşım, motorun yanma sürecini optimize eder, yakıt verimliliğini artırır ve emisyonları azaltır. Common Rail motorlar, gelişmiş performans, düşük gürültü seviyesi ve daha iyi egzoz emisyon kontrolü sağlar. Ayrıca, bu motorlar daha yumuşak ve dengeli bir çalışma sunar, bu da kullanıcı konforunu artırır.

Tablo 2.3 Motor Teknik Özelikleri

Başlık	**Bilgi**
Motor Hacmi	3,9 lt
Silindir Sayısı	4
Çap * Strok	104 * 115
Anma Gücü	125 HP @ 2200 rpm
Anma Torku	530 @ 1400 rpm
Aspirasyon	Turboşarj
Sıkıştırma Oranı	17
Yakıt Enjeksiyon Sitemi	CR
Soğutma Sistemi	Sıvı

2.1.4 Kullanılan Yakıt

Bu çalışmada kullanılan dizel yakıt, Avrupa Birliği standartlarına uygun EN590 spesifikasyonlarına sahiptir. EN590, otomotiv dizel yakıtlarının sahip olması gereken fiziksel ve kimyasal özellikleri tanımlar. Bu standart, daha temiz yanma, düşük emisyon ve motor verimliliği sağlamak için tasarlanmıştır. Düşük kükürt içeriği ve yüksek setan sayısı gibi özellikleri ile EN590, motorların çevresel etkilerini azaltmada ve performansını artırmada önemli bir rol oynamaktadır [20].

EN590, Avrupa Birliği ve diğer Avrupa ülkelerinde satılan tüm otomotiv dizel yakıtların karşılaması gereken bir standarttır. Bu yakıt türü, aynı zamanda ultra-düşük kükürt içerikli dizel (ULSD) olarak da bilinir. EN590 standardı, yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirler. Bu standart, özellikle dizel yakıtın kükürt içeriği, setan sayısı ve soğuk filtre tıkanma noktası gibi özellikler üzerinde durur. Ayrıca, EN590 standardı, yakıtlarda en fazla %7 oranında Yağ Asidi Metil Esteri (FAME) içerebileceğini belirtir. Bu standart, yakıtın motor performansını, emisyon seviyelerini ve genel verimliliğini iyileştirmek için tasarlanmıştır [21].

EN590, dizel yakıtların Avrupa Birliği'nin yeni emisyon standartları ile uyumlu olmasını sağlamak için geliştirilmiştir. Bu standardın bir sonucu olarak, 2007 yılından bu yana Avrupa Birliği'nde EN590 standardına uygun dizel yakıt, Ultra Düşük Kükürt İçerikli Dizel (ULSD) olarak adlandırılmaktadır. Standart, dizel yakıtların kükürt içeriğini azaltmayı hedeflemektedir, çünkü kükürt yakıtta bir yağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Tablo 2.4 EN590 Dizel Yakıtının Teknik Özellikleri

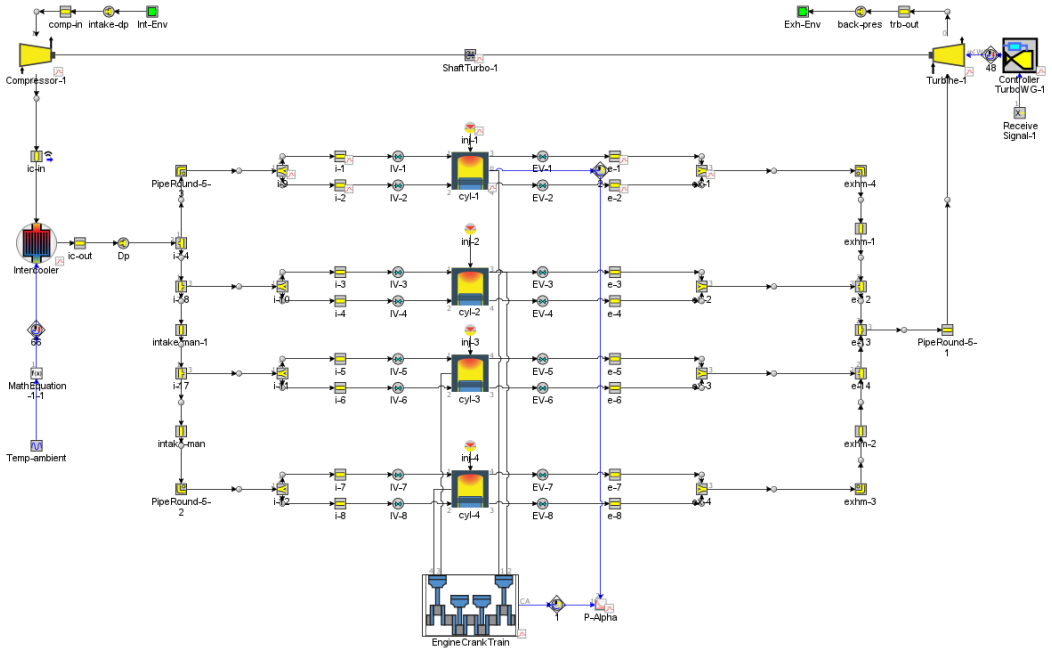
Özellik	**Değer**
Kükürt İçeriği	Maksimum 10 ppm
Cetane Sayısı	Minimum 51
Yoğunluk (15°C'de)	820 - 845 kg/m³
Viskozite (40°C'de)	2.0 - 4.5 mm²/s
Parlama Noktası	Minimum 55°C
Su İçeriği	Maksimum 200 mg/kg
Toplam Kirlilik	Maksimum 24 mg/kg
FAME İçeriği	Maksimum 7%

2.2 Yöntem

Öncelikle, literatürde yapılan araştırmaların ışığında, emisyon değişim trendlerini analiz etmek amacıyla kapsamlı bir Deney Tasarımı (DoE) gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı motor yükleri ve püskürtme zamanlamaları kullanılarak krank mili açısı ile ilişkilendirilen Partikül Madde (PM) ve Azot Oksit (NOx) emisyonlarının değişim eğilimleri incelenmiştir. Ayrıca, bu çalışmalar, farklı yakıt basınçları için de yürütülerek, yakıt basıncının emisyon oluşum mekanizmaları üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Öncelikli olrak oluşturulan DoE'den seçilen 48 nokta aile motor modeli doğrulanmıştır. Bu doğrulamanın ardından DoE de belirtilen bu noktaların dışındaki 132 nokta için modelden çalıştırımıştır. En son olarak bu model çıktıları testen alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır edilmiştir.

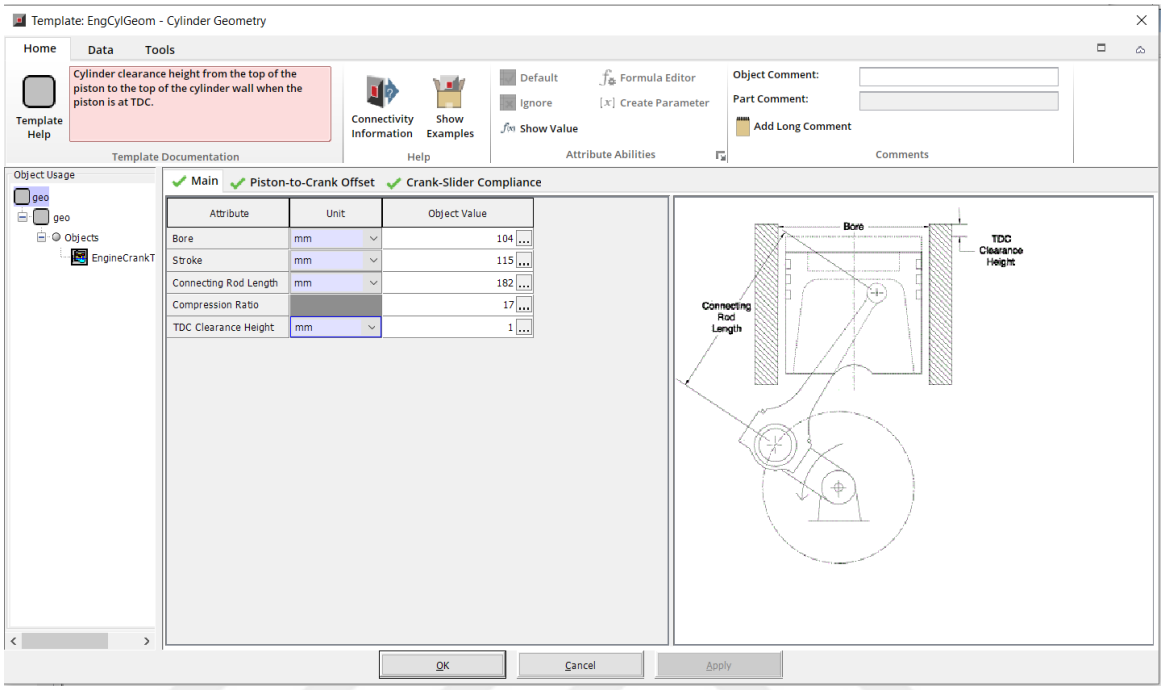
2.2.1 Motor Modelinin Kurulması

Şekil 2.8 TÜMOSAN CR S8000 motorunun bütünsel bir modelini göstermektedir. Bu model, motorun tüm bileşenlerini kapsamlı bir şekilde temsil etmektedir. Model, tedarikçiler tarafından sağlanan ilgili bileşenlerin detaylı çizimleri dikkate alınarak son hali verilmiştir.



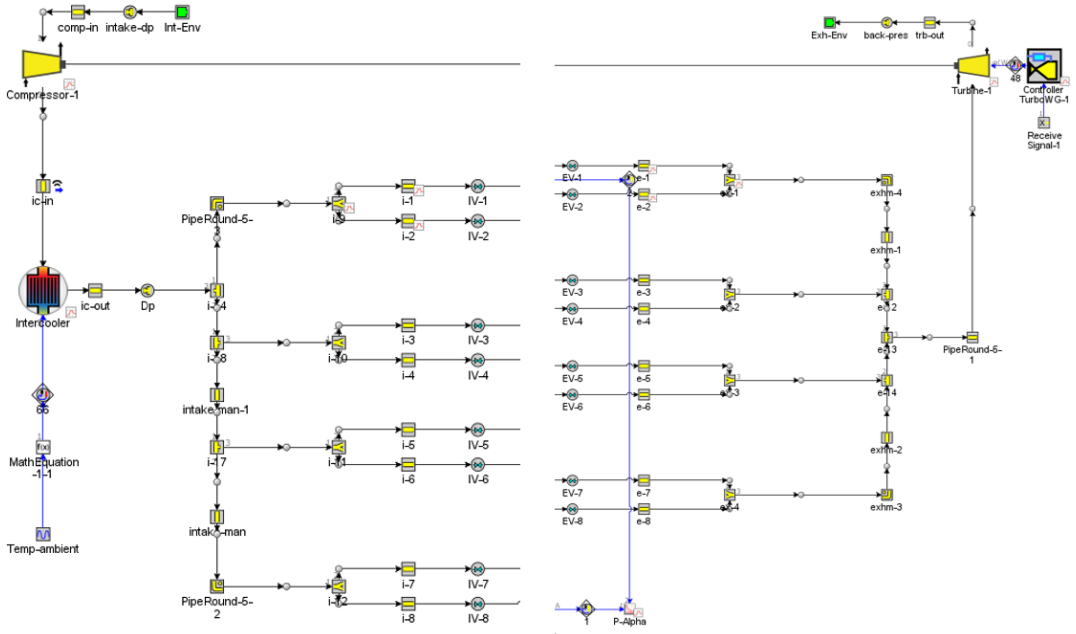
Şekil 2.8 GT-Suit Ana Motor Modeli

Temel motor boyutları 2.9 , motorun çapı, stroku, sıkıştırma oranı, biyel uzunluğu ve ölü hacmi gibi kritik özelliklerini içermektedir. Söz konusu özellikler, motorun teknik özelliklerine ilişkin veri tabanından alınarak modelin oluşturulmasında temel alınmıştır.



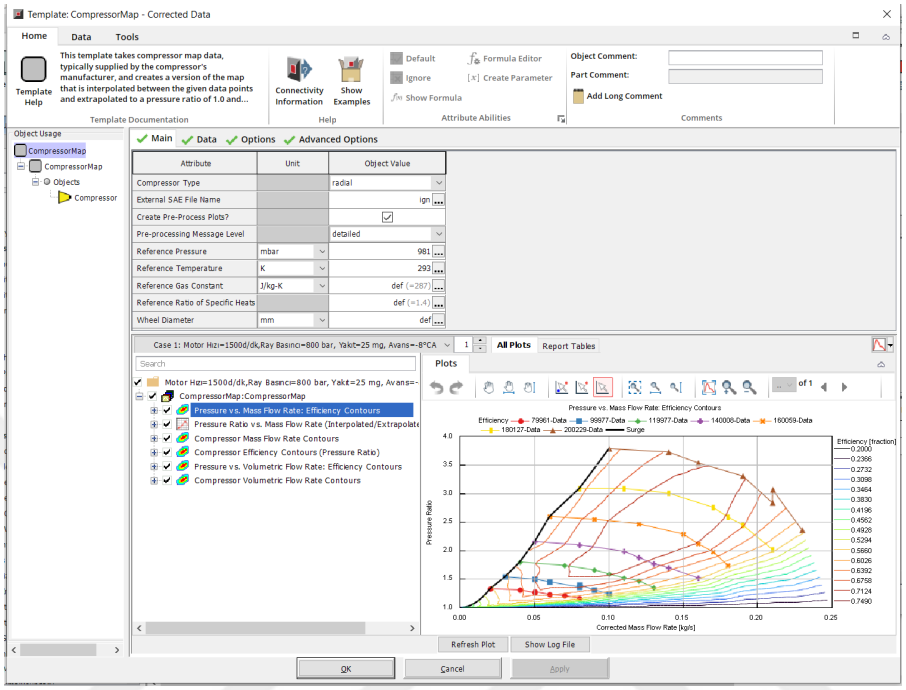
Şekil 2.9 Krank Mili Tahrik Grubu

Şekil 2.10 gösterildiği gibi, motorun egzoz ve emme sistemi, 3D modellerden elde edilen bilgilerle boyutlandırılarak modellenmiştir. Bu süreçte, sistemlerin detaylı boyutsal özellikleri dikkate alınmış ve bu bilgiler, modelin doğru bir şekilde oluşturulması için kullanılmıştır.



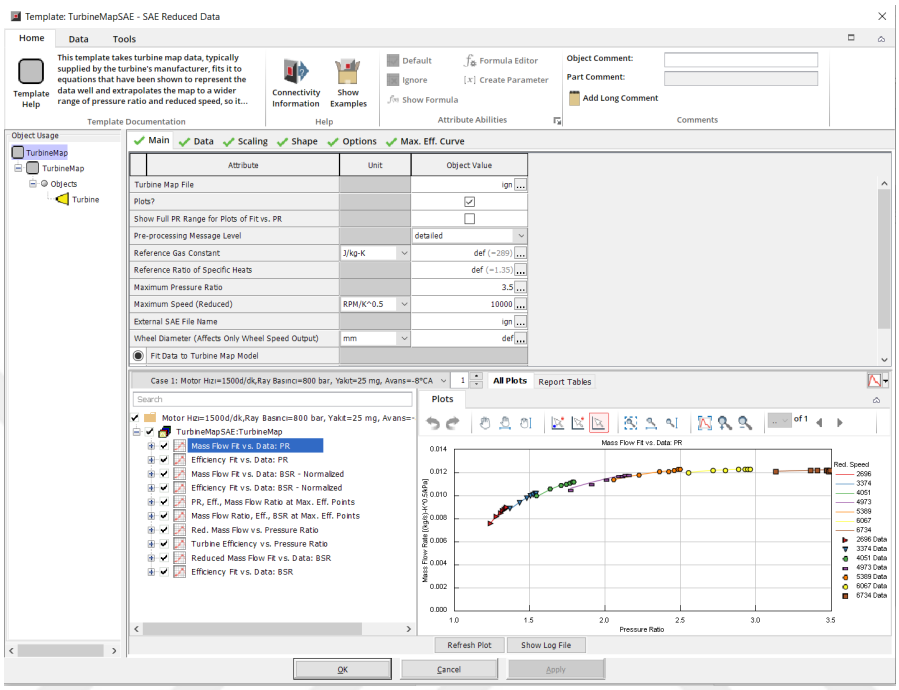
Şekil 2.10 Emme ve Egzoz Hatlarının Modellenmesi

2.11 gösterildiği üzere, turboşarjın kompresör haritaları, turboşarj üreticisinden temin edilen haritalar yardımıyla hazırlanmıştır. Bu bilgiler, modelin oluşturulmasında temel alınarak, türbinin performans parametrelerini ve işletme karakteristiklerini doğru bir şekilde yansıtacak biçimde modele entegre edilmiştir.



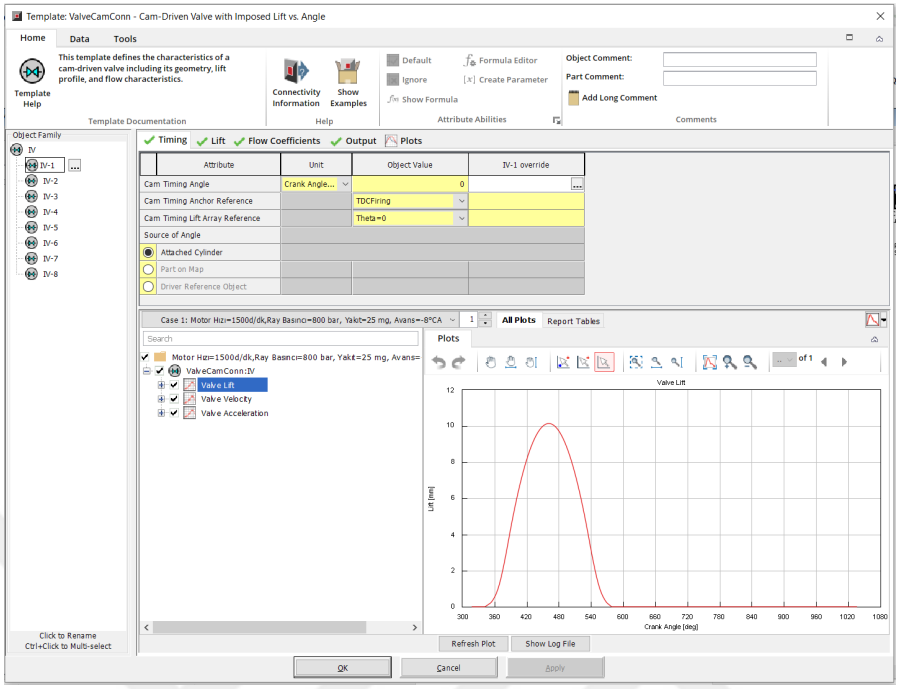
Şekil 2.11 Kompresör Haritaları

Şekil 2.12 'da gösterildiği üzere, turboşarjın türbin haritaları, turboşarj üreticisinden temin edilen basınç artış oranı, debi ve hız bilgileri ile hazırlanmıştır. Bu bilgiler, modelin oluşturulmasında temel alınarak, türbinin performans parametrelerini ve işletme karakteristiklerini doğru bir şekilde yansıtacak biçimde modele entegre edilmiştir.



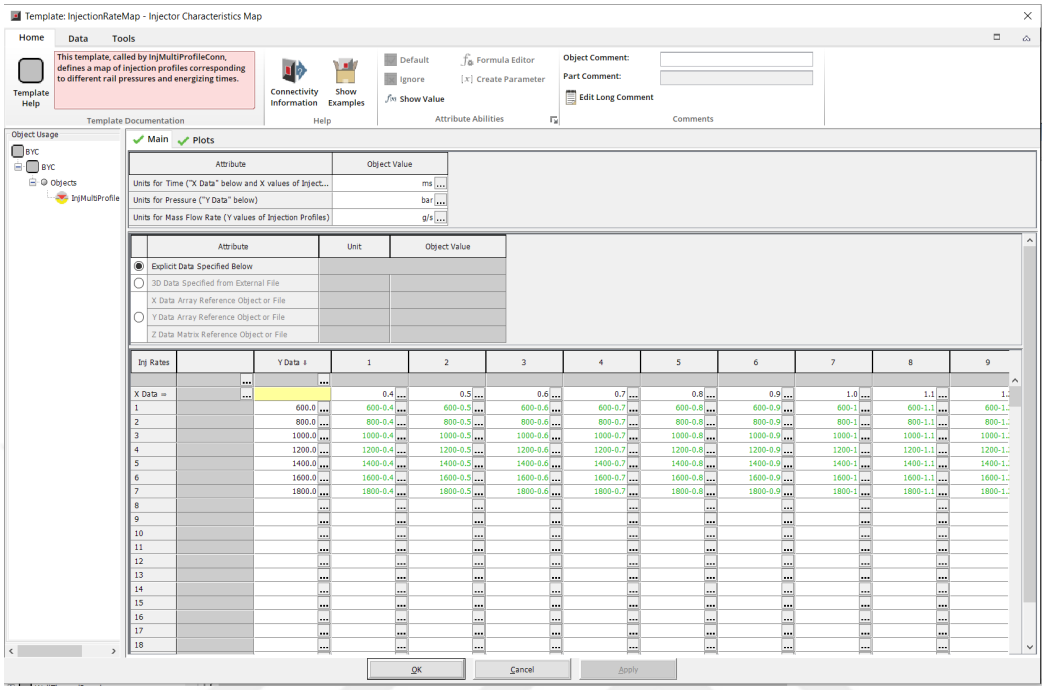
Şekil 2.12 Türbin Haritaları

Egzoz ve emme valf zamanlamasının modellenmesi için, kam milinin 3D tadasından alınan ölçülerler kullanılarak 2.13 olduğu gibi modellenmiştir.



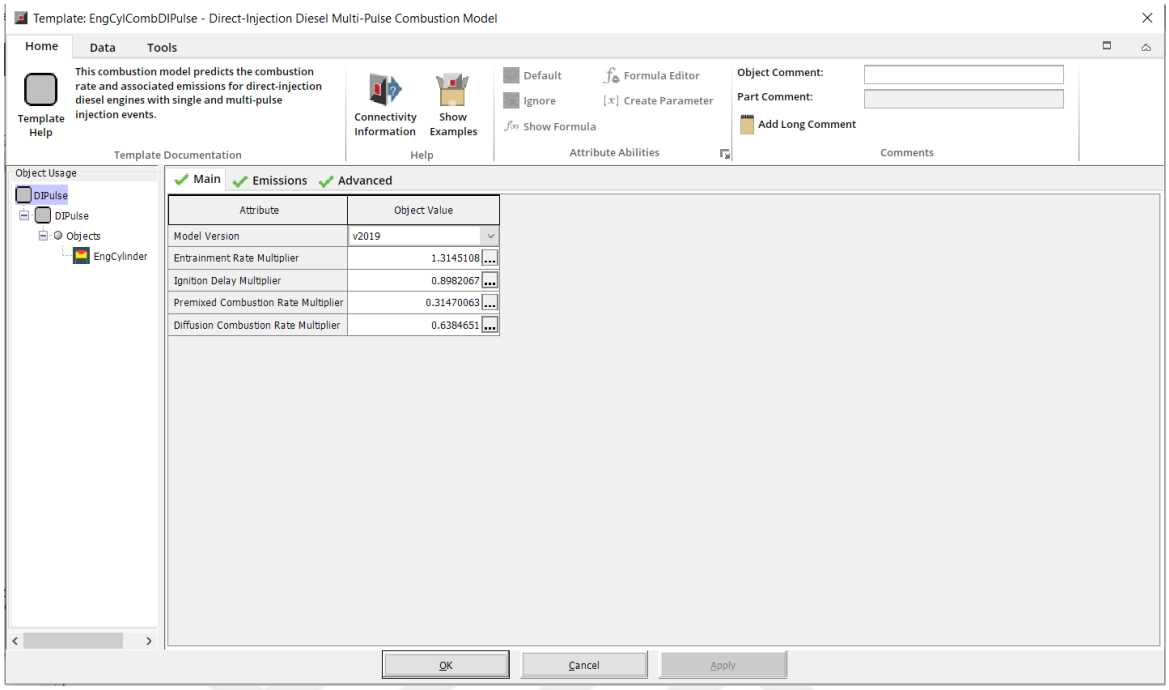
Şekil 2.13 Valf Zamanlaması

Enjektörün datasından alınan boyutsal bilgiler modele eklenmiştir. Ayrıca enjektör püskürtme profili enjektör üretecinden alınan haritalarla şekil 2.14 olduğu gibi modellenmiştir.



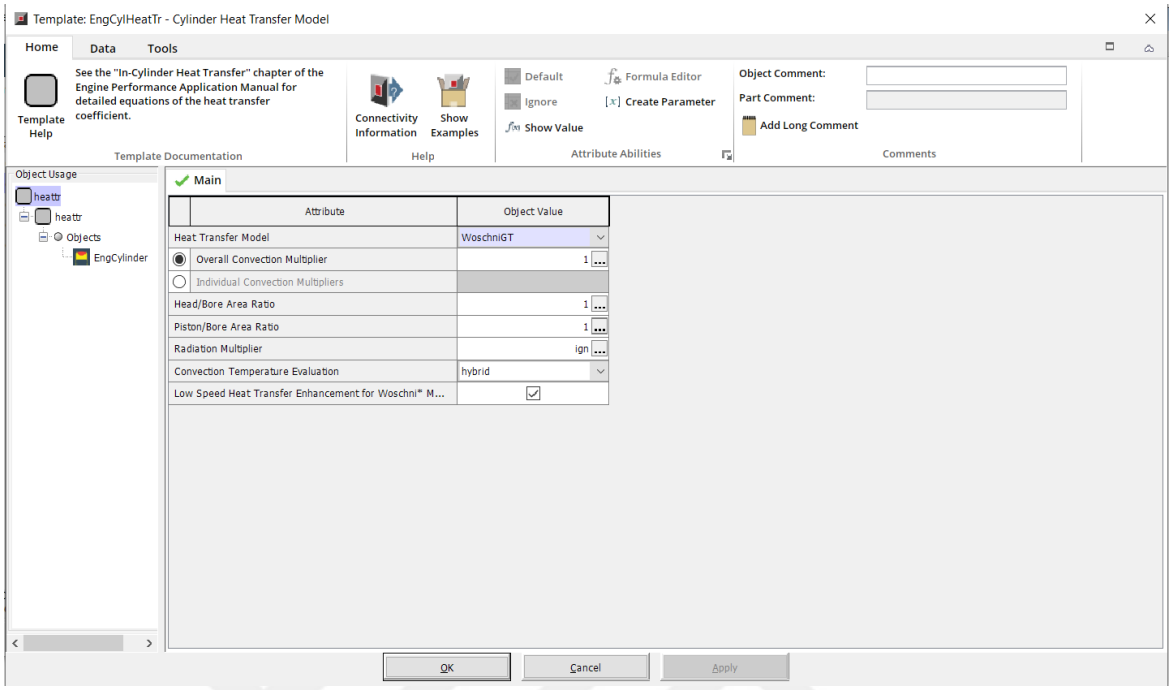
Şekil 2.14 Enjektör Profili

Yanma modeli olarak DI-Wiebe Yanma modeli seçilmiştir. Ölçümü yapılan silindir içi basınçlar ile model doğrulanarak şekil 2.15 olduğu gibi modellenmiştir.



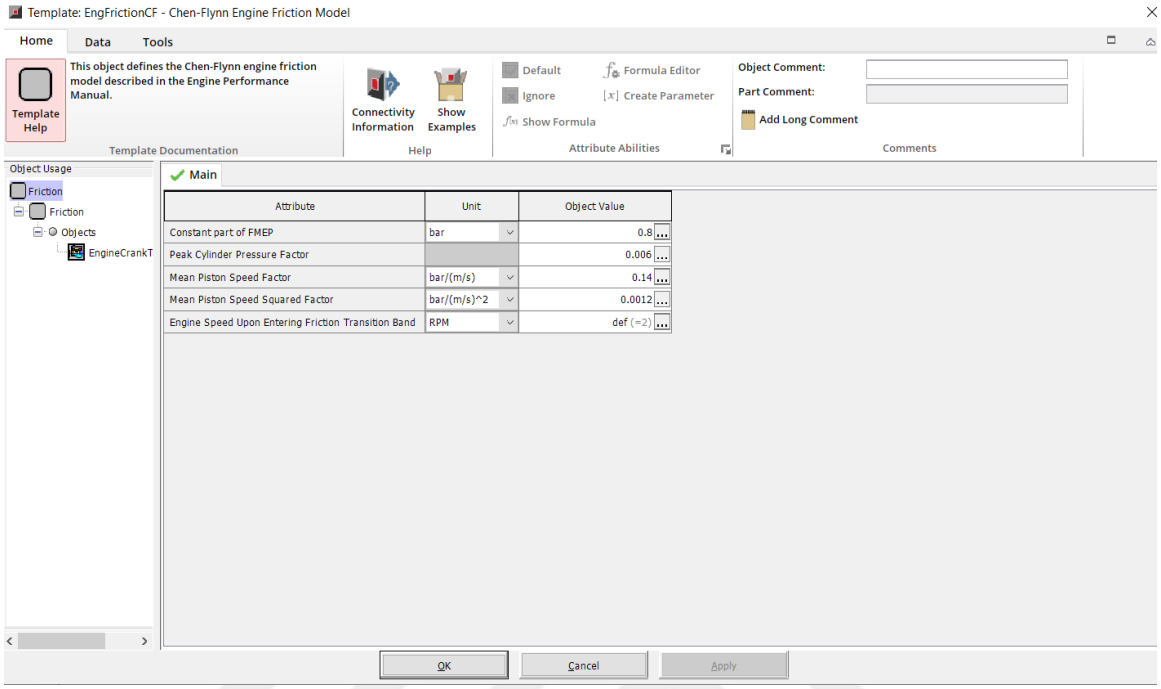
Şekil 2.15 Yanma Modeli

G.F. Hohenberg tarafından geliştirilen ısı transferi modeli, modeldeki ısı transferini temsil etmek amacıyla şekil 2.16 olduğu gibi kullanılmıştır.

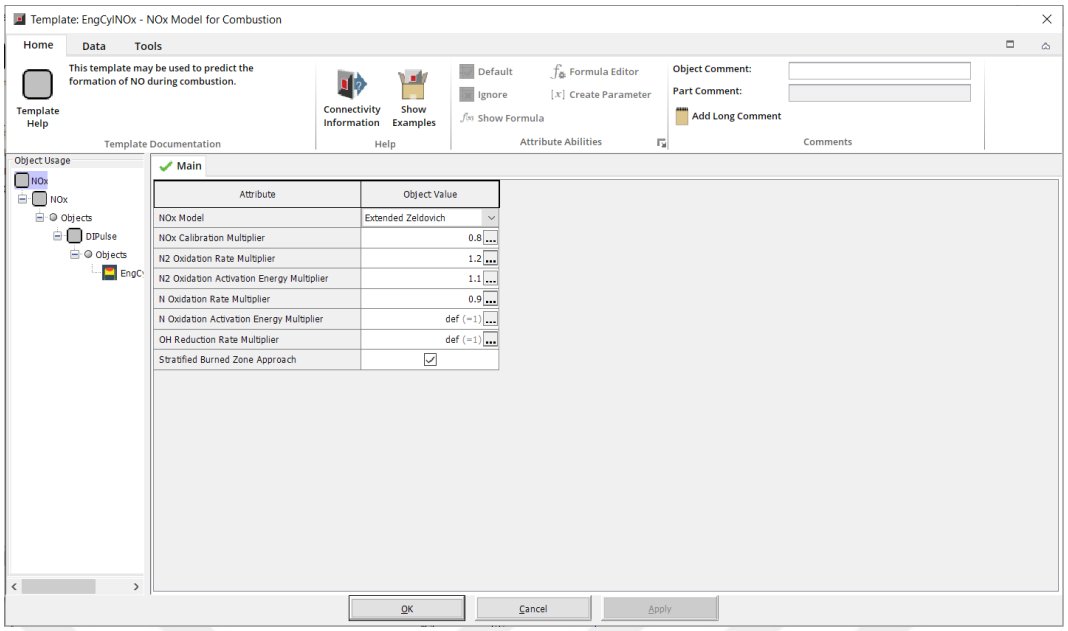


Şekil 2.16 Isı Trasferi Modeli

Sürtünme modeli olarak ise, içerisinde, silindir içi basınç ve ortalama piston hazınında dâhil olduğu Chen-Flynn sürütünme modeli tercih edilerek şekil 2.17 olduğu gibi modellenmiştir.

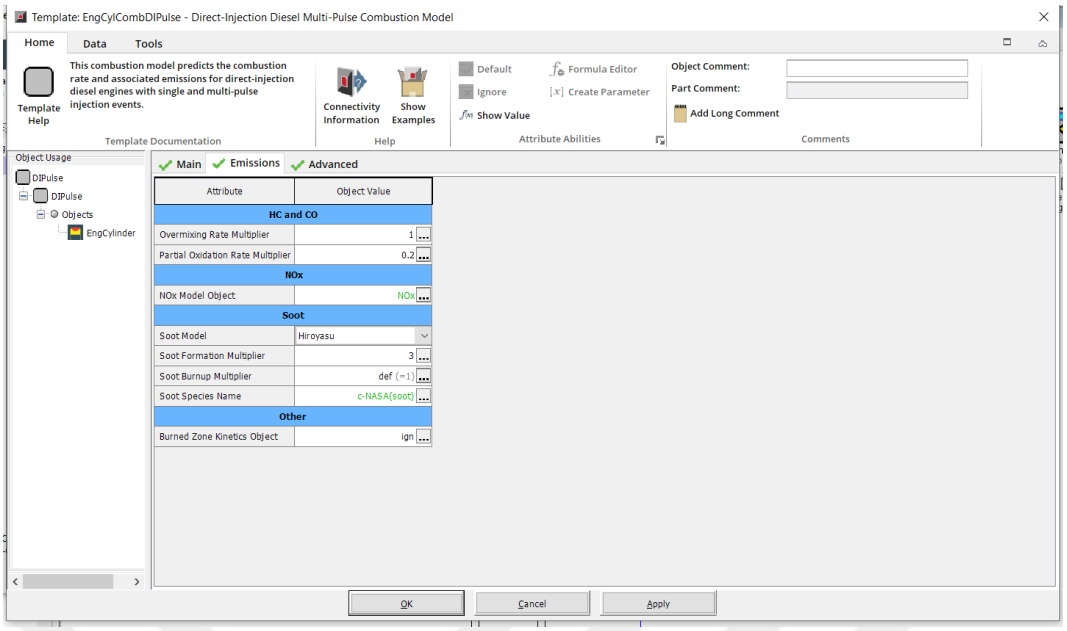


Şekil 2.17 Sürtünme Modeli



Şekil 2.18 NOx Modellemesi

NOx emisyonları şekil 2.18 de olduğu gibi Zeldoviç mekanizması kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 2.19 İs Modelleme

İs emisyonları şekil 2.19 de olduğu gibi hiroyasu yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

2.2.2 DoE Tasarımı

Bu çalışmada ele alınan Deney Tasarımı (DoE) matrisi, motor performansını etkileyen dört temel parametrenin (motor hızı , ray basıncı, yakıt miktarı ve püskürtme avansı) birbiriyle olan ilişkilerini sistematik bir şekilde inceler. Matris, bu parametrelerin çeşitli kombinasyonlarını içererek, her birinin motor performansına ve emisyonlarına etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelenmesi için oluşturulmuştur.

DoE Matris özetinin verildiği Tablo 2.5 içeriğinde görüleceği üzere, matriste, "Motor Hızı" sabit bir değer (1500 d/dk) olarak belirlenmiştir. "Ray" basıncı, 800, 1000 ve 1200 bar olarak artan bir sıralama takip eder. Her bir ray basıncı seviyesi için, "Yakıt Miktarı" değişkeni dört farklı değer alır (25, 35, 45, 55 mg/st).

Matristeki her bir satır, "Püskürme Avansı Açısı" parametresinin -8°KMA'dan başlayarak 20°KMA'ya kadar 2°KMA'lık artışlarla değiştiğini gösterir. Bu sıralama tamamlandığında, "Yakıt Miktarı" parametresine geçilir ve bu değer 25, 35, 45, 55 mg/st olarak artan bir düzende ayarlanır. Her bir yakıt miktarı için tüm avans açıları sıralanarak, bu iki parametrenin birlikte etkileri detaylı bir şekilde incelenir. Bu aşamadan sonra, "Ray Basıncı" parametresi değiştirilir ve bu değer 800, 1000, 1200 bar olarak belirlenir. Her bir ray basıncı değeri için, yakıt miktarı ve avans açısı

parametreleri tekrar sıralanarak, bu üç parametrenin birbiri üzerindeki etkileşimleri, motor performansı ve emisyonları üzerindeki toplu etkileri analiz edilir.

Özet tabloda, bu parametre kombinasyonlarının tamamını göstermek yerine, her bir parametre grubunun temel karakteristiklerini yansıtan örnek veri noktaları seçilmiştir. Bu seçim, veri setinin genel yapısını ve trendlerini okuyucuya açıklamak amacıyla yapılmıştır. Örneğin, her ray basıncı değeri için başlangıç, orta ve bitiş noktaları gösterilmiş ve bu sayede her parametre aralığının genel bir görünümü sunulmuştur. Bu yaklaşım, matrisin tüm detaylarını sunmaktan ziyade, ana trendleri ve varyasyonları vurgulamak için tercih edilmiştir.

Sonuç olarak, özetlenmiş DoE matrisi, kapsamlı veri setinin genel bir özetini sunarken, her bir parametrenin motor performansı üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak incelemek için gerekli temel bilgileri sağlamaktadır. Bu şekilde, okuyucu matrisin genel yapısını ve ana parametreler arasındaki ilişkileri kolayca anlayabilir, hangi DoE numarasının hangi senaryoya ait olacağını tespit edebilir.

Literatür incelemesinin ardından, MK yönteminin motorların düşük yük noktalarında etkin olduğu anlaşılmıştır [22]. Geleneksel metodlara alternatif sunan , MK yöntemi, özellikle üst ölü noktadan sonraki alanda etkisini göstermektedir. Bu yöntem, PM ve NO_X emisyonlarını aynı anda kontrol altına alabilme kapasitesine sahiptir. Çalışmanın bir diğer odak noktası ise, MK yönteminin işleyişi ve üst ölü noktadan sonra nasıl çalıştığının yanı sıra, emisyon değişim trendlerini detaylı bir şekilde incelemektir. Bu amaçla, -8 °KMA'dan başlayarak 20 °KMA'na kadar uzanan geniş bir aralıkta DOE matrisi oluşturulmuştur. Bu geniş aralık, emisyon değişimlerini daha detaylı gözlemleyerek, optimum noktayı belirleme hedefine yöneliktir.

Bu çalışmada, DoE matrisi iki temel amaç için kullanılmıştır: model doğrulaması ve modelin test edilmesi. Model doğrulaması sürecinde, matrisin '-2', '0', '2', ve '4' krank açısı noktaları hem geleneksel hemde MK yöntemini temsil etmesi açısından tercih edilmiştir. . Bu noktalar, motor modelinin gerçek işletme şartlarıyla uyumluluğunun ve tahminlerinin doğruluğunun değerlendirilmesinde temel referanslar olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan, bu noktalar ana DoE matrisinden çıkarıldığında, geriye kalan tüm noktalar modelin çeşitli senaryolarda test edilmesi için ayrılmıştır. Bu geniş çaplı test süreci, modelin farklı işletme şartları altında güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Böylelikle hem modelin doğruluğu hem de geniş bir kullanım aralığında performansı kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Tablo 2.5 DoE Matris Özeti

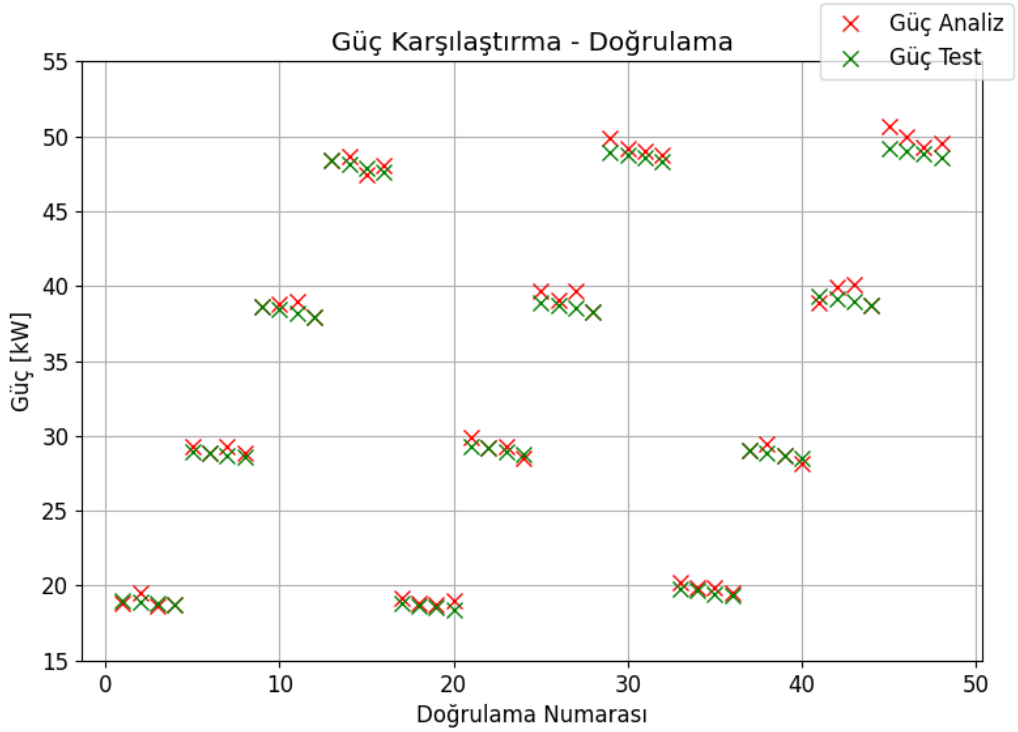
DoE Numarası	**Motor Hızı (rpm)**	**Ray (bar)**	**Yakıt Miktarı (mg/st)**	**Püskürtme Açısı (°KMA)**
1	1500	800	25	-8
2	1500	800	25	-6
3	1500	800	25	-4
4	1500	800	25	-2
5	1500	800	25	0
...	...	...	...	...
20	1500	800	35	0
21	1500	800	35	2
...	...	...	...	...
40	1500	800	45	10
41	1500	800	45	12
...	...	...	...	...
60	1500	800	55	20
61	1500	1000	25	-8
...	...	...	...	...
80	1500	1000	35	0
81	1500	1000	35	2
...	...	...	...	...
100	1500	1000	45	10
101	1500	1000	45	12
...	...	...	...	...
120	1500	1000	55	20
121	1500	1200	25	-8
...	...	...	...	...
140	1500	1200	35	0
141	1500	1200	35	2
...	...	...	...	...
160	1500	1200	45	10
161	1500	1200	45	12
...	...	...	...	...
180	1500	1200	55	20

2.2.3 Model Doğrulama

Bu bölümde GT-SUITE yazılımında geliştirilen motor modelinin doğrulama süreci açıklanmaktadır. Model doğrulama süreci, oluşturulan tablo 2.6 içersinde belirtilen DoE Model Doğrulama matrisi referans alınarak yapılmıştır. Bu matris, motorun performans ve emisyon karakteristiklerini kapsamlı bir şekilde incelemek üzere toplam 48 farklı çalışma noktasını içermektedir. Her bir noktada, motorun çeşitli operasyonel parametreleri altında elde edilen deneysel veriler toplanmış ve bir veri seti oluşturulmuştur.

Oluşturulan bu veri seti, motorun hem performans bilgilerini (örneğin güç çıkışı gibi) hem de emisyon profillerini (NOx, Partikül Madde (PM) emisyonları gibi) içermektedir. Bu veri toplama süreci, modelin işletme şartlarındaki performansını ortaya koymak ve simüle etmek için oluşturulmuştur.

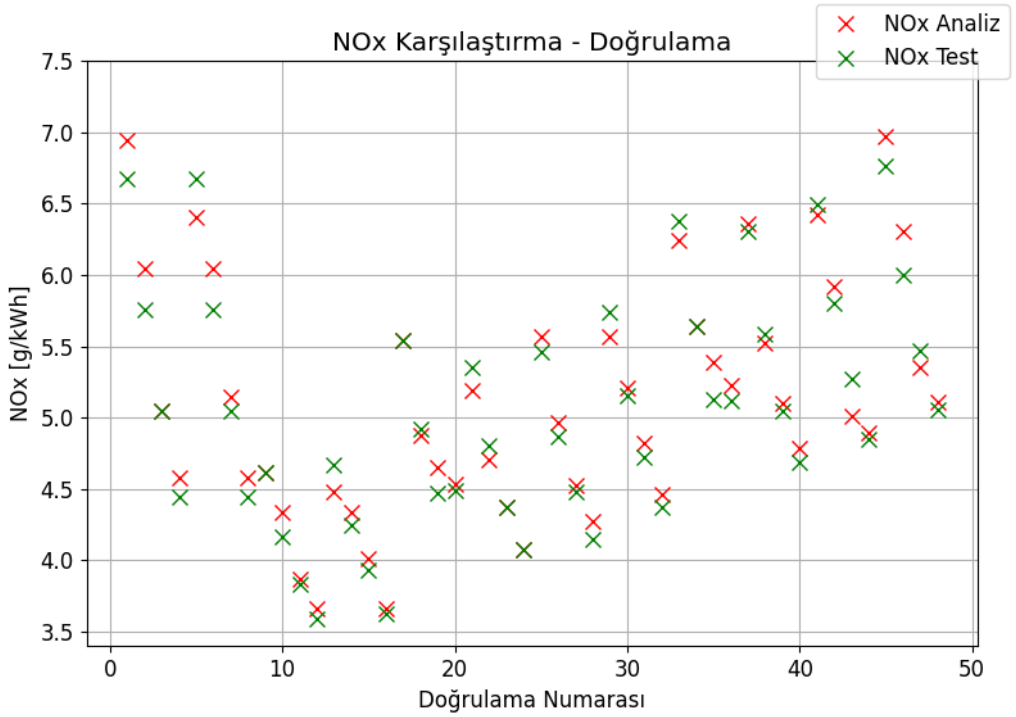
Daha sonra, bu 48 farklı çalışma noktasını kullanarak GT-SUITE yazılımı içerisinde model kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kalibrasyon süreci, modelin NOx ve PM emisyonları ile güç çıkışı gibi kritik çıktılarını deneysel verilerle uyumlu hale getirmeyi amaçlamıştır.



Şekil 2.20 Güç Model Doğrulama Sonuçları

Tablo 2.6 DoE Doğrulama Matrisi

DoE DS	**DoE Numarası**	**Motor Hızı (rpm)**	**Ray (bar)**	**Yakıt Miktarı (mg/st)**	**Püskürtme Açısı (°KMA)**
1	4	1500	800	25	-2
2	5	1500	800	25	0
3	6	1500	800	25	2
4	7	1500	800	25	4
5	19	1500	800	35	-2
6	20	1500	800	35	0
7	21	1500	800	35	2
8	22	1500	800	35	4
9	34	1500	800	45	-2
10	35	1500	800	45	0
...	...	...	...	...	...
16	52	1500	800	55	4
17	64	1500	1000	25	-2
18	65	1500	1000	25	0
19	66	1500	1000	25	2
20	67	1500	1000	25	4
21	79	1500	1000	35	-2
22	80	1500	1000	35	0
23	81	1500	1000	35	2
24	82	1500	1000	35	4
...	...	...	...	...	...
30	110	1500	1000	55	0
31	111	1500	1000	55	2
32	112	1500	1000	55	4
33	124	1500	1200	25	-2
34	125	1500	1200	25	0
35	126	1500	1200	25	2
...	...	...	...	...	...
41	154	1500	1200	45	-2
42	155	1500	1200	45	0
43	156	1500	1200	45	2
44	157	1500	1200	45	4
45	169	1500	1200	55	-2
46	170	1500	1200	55	0
47	171	1500	1200	55	2
48	172	1500	1200	55	4

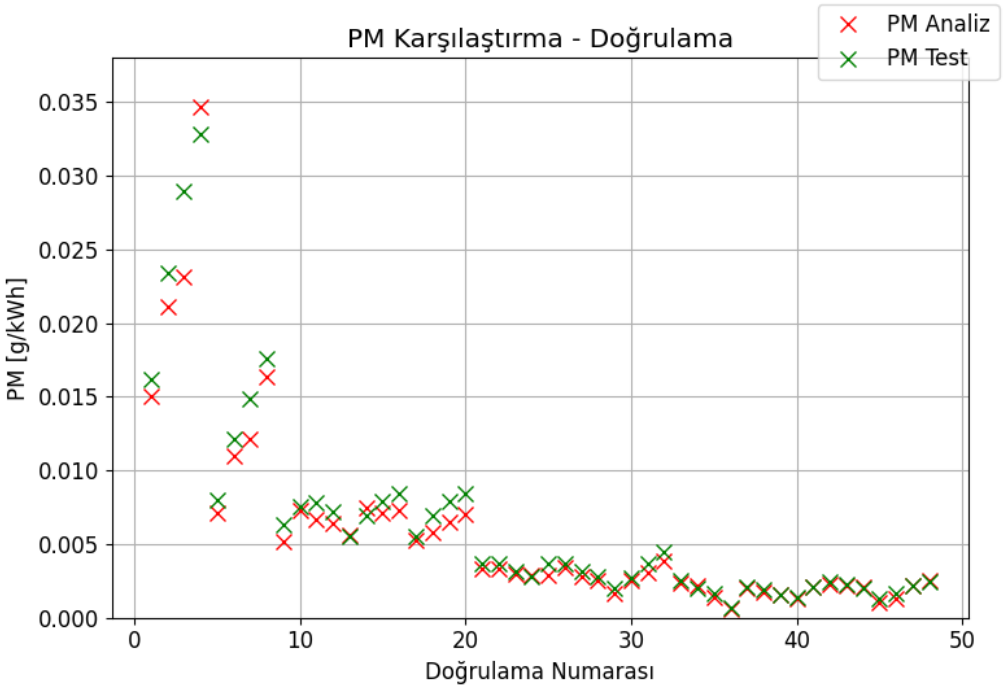


Şekil 2.21 NO_xModel Doğrulama Sonuçları

Motor modellemesi ve doğrulama süreçlerinde, güç değeri önemli bir yere sahiptir. Tek boyutlu motor modellemesinde bu değer, en mühim çıktılardan biri olarak kabul edilir. Model doğrulama sürecinde, bu güç değeri üzerinde özellikle durulur. Modelin ürettiği güç değerinde bir sapma olursa, diğer tüm ölçütler bir kenara bırakılarak, bu değerin doğruluğunu sağlamak için gereken düzeltmeler yapılır. Bu süreç, motorun farklı ray basıncı, yakıt enjeksiyon avansı gibi değişkenler ile farklı yakıt miktarlarında dahi, test sonuçlarına yakın bir değer elde edilene kadar devam eder. Motor modeli içindeki ilgili optimizasyon parametrelerinin hepsi, bu yakınsamayı sağlamak amacıyla hassasiyetle kalibre edilir. Bu sonuçlar Şekil 2.20 üzerindeki grafikte gösterilmektedir.

Bu detaylı kalibrasyon işlemi, motor modelinin test verileri ile ne derece uyumlu olduğunu gösterir. Bu uyum, çalışmanın ilerleyen aşamalarının tümünde bu modelin kullanılacağını düşündüğümüzde oldukça gereklir. Verilerin analizi ve çıkan sonuçlar, modelleme noktasının güncellenmesi gerektiğinde, bu güç değerinin doğruluğunu nasıl etkilediğini ortaya koyar.

Motor modelleme ve doğrulama süreçlerinde, güç optimizasyonu bir "gerek şart" olarak ele alınırken, asıl odak noktası, bu çalışmanın aynı zamanda özgün araştırma alanlarından biri olan NOx (Azot Oksitler) değerlerinin optimizasyonudur. Güç değerlerinin iyileştirilmesi süreci ile paralel olarak, NOx değerlerinin



Şekil 2.22 Partikül MaddeDoğrulama Sonuçları

optimizasyonu gerçekleştirilmiştir..

Bu kısımda, Zeldovich mekanizmasının parametreleri üzerinde gerçekleştirilen optimizasyon süreci, NOx değerlerinin test neticeleriyle ne derece uyumlu olduğunu tespit etmek için kullanılmıştır. Motor modelinin NOx emisyon değerleri, Şekil 2.21 üzerindeki grafikte sahada elde edilen verilerle mukayese edilmiş ve modelin bu verilere ne kadar yakın olduğu değerlendirilmiştir. Yapılan bu tetkikler neticesinde, model çıktılarının test sonuçları tarafından belirlenen aralıklar içinde kaldığı anlaşılmıştır. Bu durum, modelin teknik açıdan kabul edilebilir bir doğrulukta olduğunu gösterir.

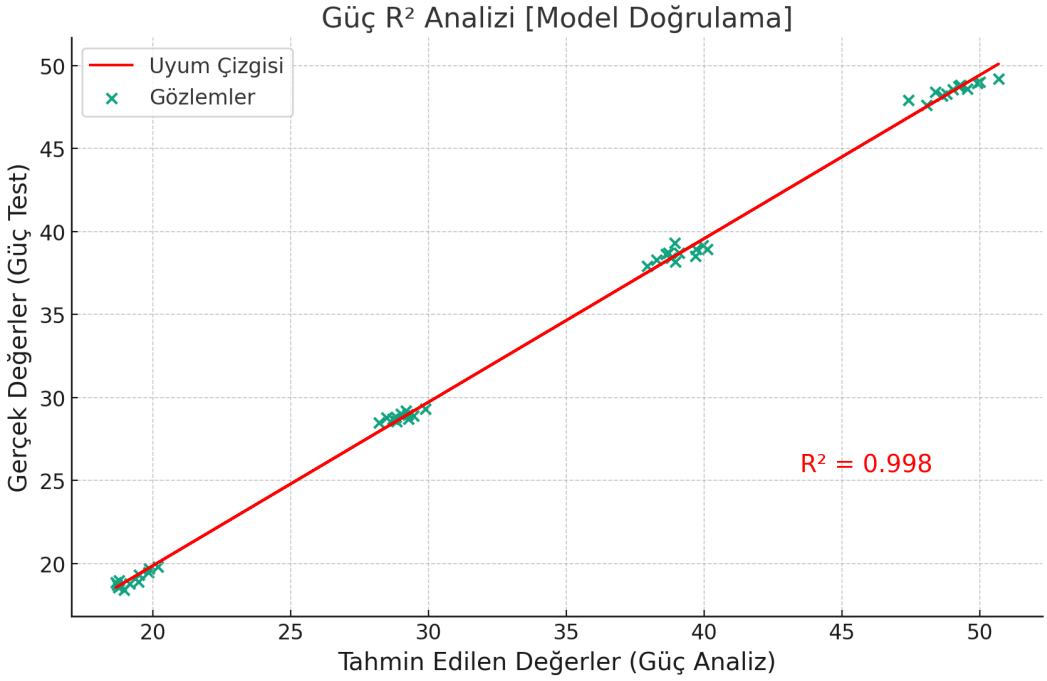
Motor modelleme sürecinde Partikül Madde (PM) optimizasyonu, NOx ve Güç gibi parametrelere nazaran daha zorlu bir süreçtir. Mevcut tek boyutlu modellerde PM hesaplama yöntemleri, diğer parametreler kadar kuvvetli bir yapıya sahip değildir. Bu sebeple, PM ile ilgili doğrulama süreçlerinde, neredeyse mükemmel sonuçlar elde etmek büyük ehemmiyet taşır. Aksi takdirde, modelin test aşamasında önemli farklılıklar ortaya çıkabilir.

Partikül Madde optimizasyon sürecinin sonunda Şekil 2.22 üzerinde gösterilen grafikte elde edilen model çıktıları ile, test sonuçları kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmalar, doğrulama sürecinin ne derece başarılı olduğunu ortaya koyar. Analiz edilen eğriler, PM değerlerinin modelleme ve test safhalarında tutarlılık

gösterdiğini ve doğrulama sürecinin başarıyla tamamlandığını işaret eder. Bu durum, PM optimizasyonunun motor modellemesi alanındaki önemini ve zorluklarını vurgular.

2.2.4 Hata Analizi

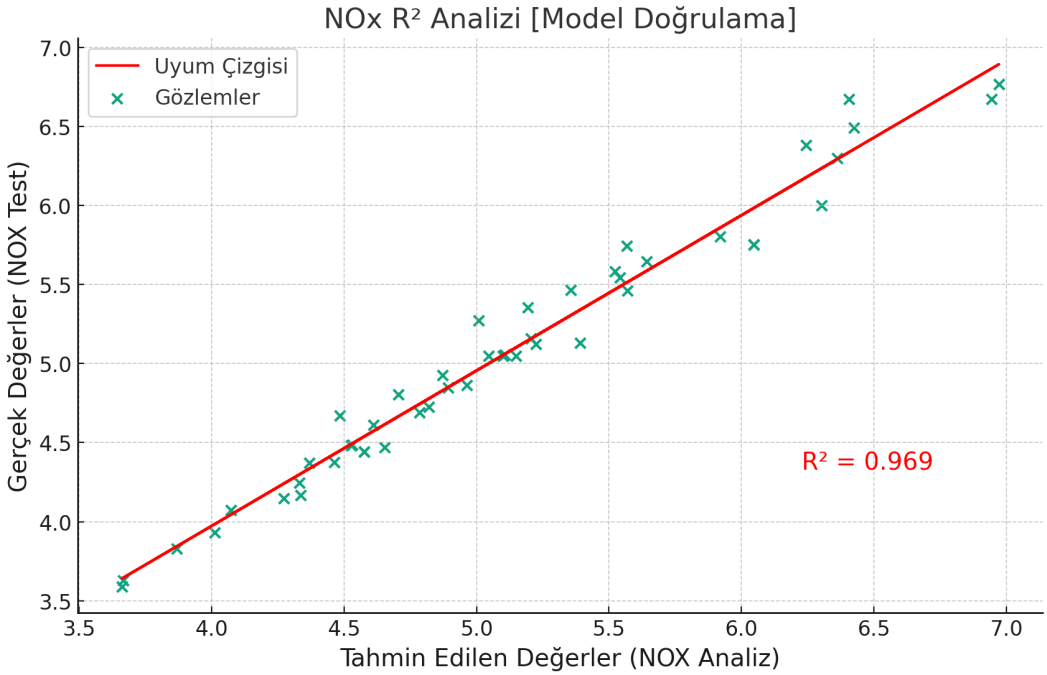
Bu çalışmada, iki farklı veri seti arasındaki uyumluluğu ve doğruluğu değerlendirmek için hata analizi yapılmıştır. Hata analizinde, "Güç Analiz" ve "Güç Test" olarak adlandırılan iki veri seti karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın amacı, "Güç Analiz" verilerinin "Güç Test" verilerine ne kadar yakın olduğunu belirlemektir.



Şekil 2.23 Güç-Model ile Güç-Test Hata Grafiği

R^2 istatistiksel regresyon modellerinde, modelin bağımsız değişkenler tarafından açıklanan bağımlı değişken varyansının oranını gösteren bir metriktir. Değerleri 0 ile 1 arasında değişir; 0, modelin verileri hiç açıklamadığını, 1 ise verilerin tamamını açıkladığını gösterir. Oran 1'e ne kadar yakında kıyaslanan değerlerin o kadar örtüştüğü anlamını taşır. Kısaca açıklanabilen varyasyonun, açıklanamayan varyasyona oranı şeklinde ifade edilir.

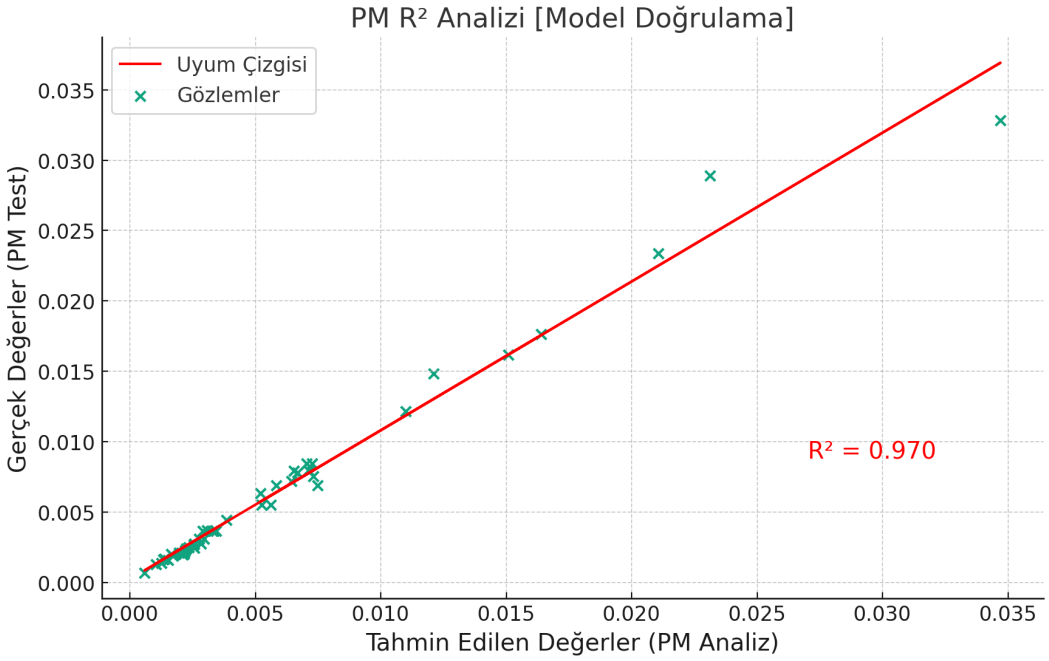
R^2 regresyon yöntemiyle yapılan hesaplamada şekil 2.23 içersinde görülen grafiktende anlaşılacağı üzere $R^2 = 0.998$ gibi bir yüksek doğruluk değerine sahiptir. Bu "Güç Analiz" verilerinin "Güç Test" verilerine oldukça yakın olduğunu ve yüksek bir doğruluk derecesine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.24 NOx-Model ile NOx-Test Hata Grafiği

NO_x emisyonu için model ve test sonuçları kıyaslandığında, regresyon oranı 0.969 bulunmuştur. Bu, "NOX Analiz" verilerinin, "NOX Test" verilerinin doğruluk oranını ifade eder. ilgili regresyon şekil 2.24içersinde gösterilmektedir.

PM için yapılan R² analizinin sonucu Şekil 2.25 içersinde görüldüğü üzere 0.970 olarak belirlenmiştir. Bu anlamda modelin PM hesaplamasının güvenlir durumda oluduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.25 PM-Model ile PM-Test Hata Grafiği

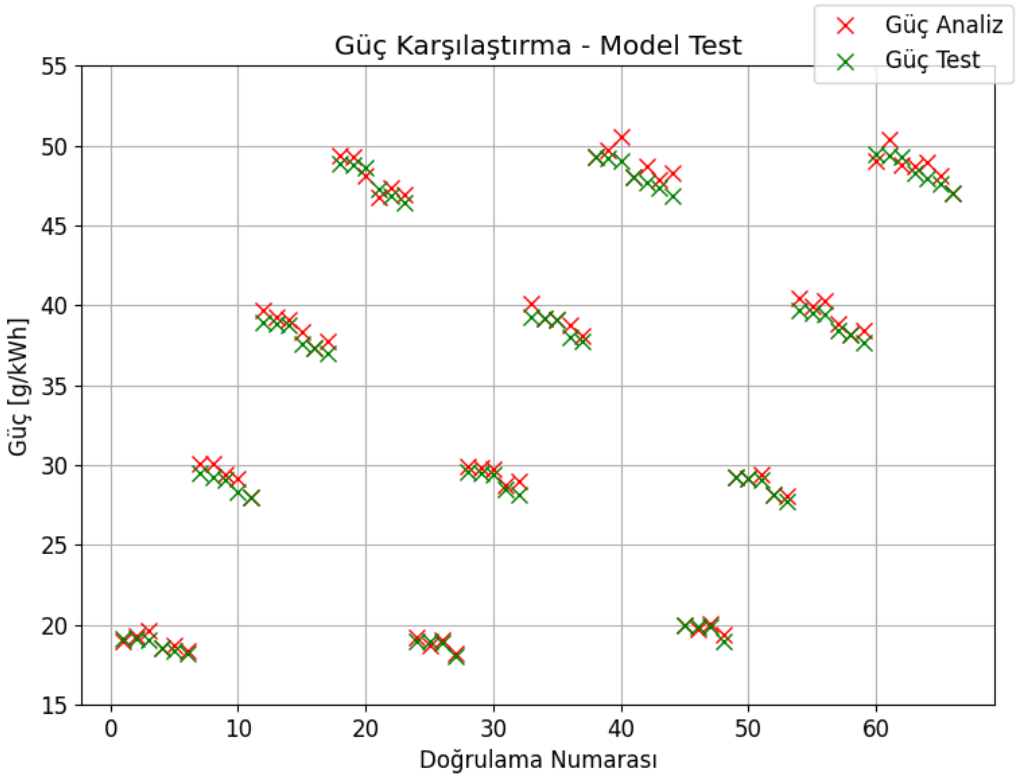
3
Model ve Test Sonuçları

Araştırmamızın bu kısmında, motor emisyonlarının azaltılması yolundaki çabalarımızın somut sonuçlarını gözler önüne sermeyi amaçlıyoruz. Bu amaçla, Design of Experiments (DoE) metodolojisiyle oluşturduğumuz deney planında belirlenen özel noktaların gerçek dünya test sonuçları ile geliştirdiğimiz modelin tahminleri arasındaki uyumu detaylı bir şekilde inceliyoruz. Bu karşılaştırma, modelimizin gerçek işletme şartlarında ne derece etkin ve doğru olduğunu göstermek açısından kritik bir öneme sahiptir. Aynı zamanda, emisyon azaltma stratejilerimizin pratikteki uygulanabilirliğini ve etkilerini de değerlendirme fırsatı sunmaktadır. Deney noktalarından elde edilen veriler ve model çıktıları arasındaki bu analiz, çalışmamızın güvenilirliğini ve sektördeki uygulama potansiyelini artıracaktır. Böylece, motor emisyonlarını azaltma yolunda atılan adımların bilimsel temellerini sağlamlaştırarak, hem teknolojik gelişmeleri hem de çevresel sorumlulukları desteklemiş olacağız

3.1 Model ve Test Karşılaştırması

Bu çalışmada, motor emisyon hedeflerine ulaşma sürecinde Deney Tasarım (DoE) matrisi metodolojisi kullanılarak elde edilen verilerin bir kısmı model doğrulama, bir kısmı ise model testi için ayrılmıştır. Model test sonuçlarının, model tahminleri ile yakın bir uyum göstermesi, çalışmanın güvenilirliğini artırmaktadır. Bu tutarlılık, her ne kadar çalışmanın ana odak noktası motorun güç çıktısını maksimize etmek olmasa da, güç değerlerinin test ve model sonuçları arasında gözlemlenen uyum, motorun emisyon hedeflerine ulaşmasında kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, ekte sunulan grafik, test ve model verileri arasındaki bu uyumu ve güç değerlerinin emisyon hedeflerine olan etkisini göstermektedir.

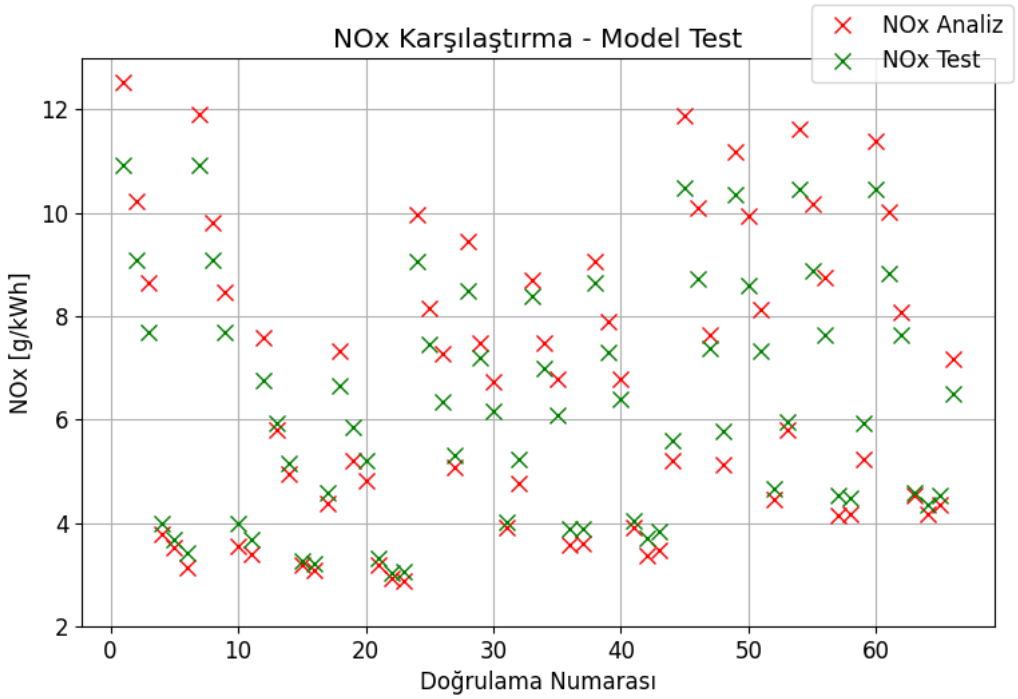
Araştırmamızın sonuçlarından biri, Şekil 3.2 eğride görüleceği üzere NOx emisyon değerlerinin birbiriyle uyumlu olmasıdır. Bu örtüşme, modelimizin gerçek işletme şartlarını yansıtma kapasitesine dair önemli bir gösterge olarak değerlendirilebilir.



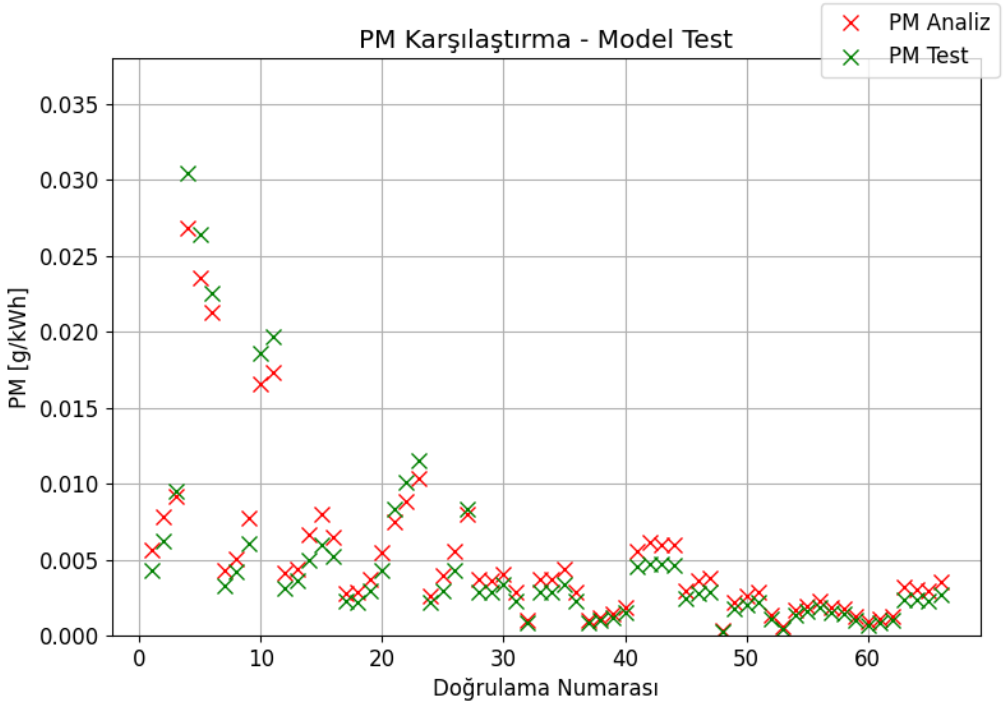
Şekil 3.1 Güç Kıyaslaması

Bu uyum, özellikle motor emisyonlarının azaltılmasına yönelik yapılan bu çalışma kapsamında oluşturulan modelin, kullanılabilirliğine dair bir referans teşkil eder.

Çalışmamızın 3.3 bölümünde, partikül madde emisyonlarına yönelik bulgularımızı ele alıyoruz. Burada, hem literatürdeki hem de analiz yazılımlarındaki partikül madde hesaplama metodlarının, NOx ve güç modeleri gibi tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.3 üzerindeki grafikten anlaşılacağı üzere, partikül madde emisyonlarındaki davranışsal özelliklerde herhangi bir olumsuzluk gözlemlenmemiştir, bu da modelimizin bu alanda da güvenilir olduğunu göstermektedir. Özellikle, partikül madde değerlerinin sıfıra çok yakın olması, bu değerlerin hesaplanmasında belirli zorluklar doğurmakta ve bu da sonuçların bir miktar sapmasına yol açabilmektedir. Bu durum, partikül madde emisyonlarının tahmininde ve analizinde hassas bir yaklaşım gerektirdiğini ve bu alandaki mevcut metodolojilerin sürekli geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.2 NO_x Kıyaslaması

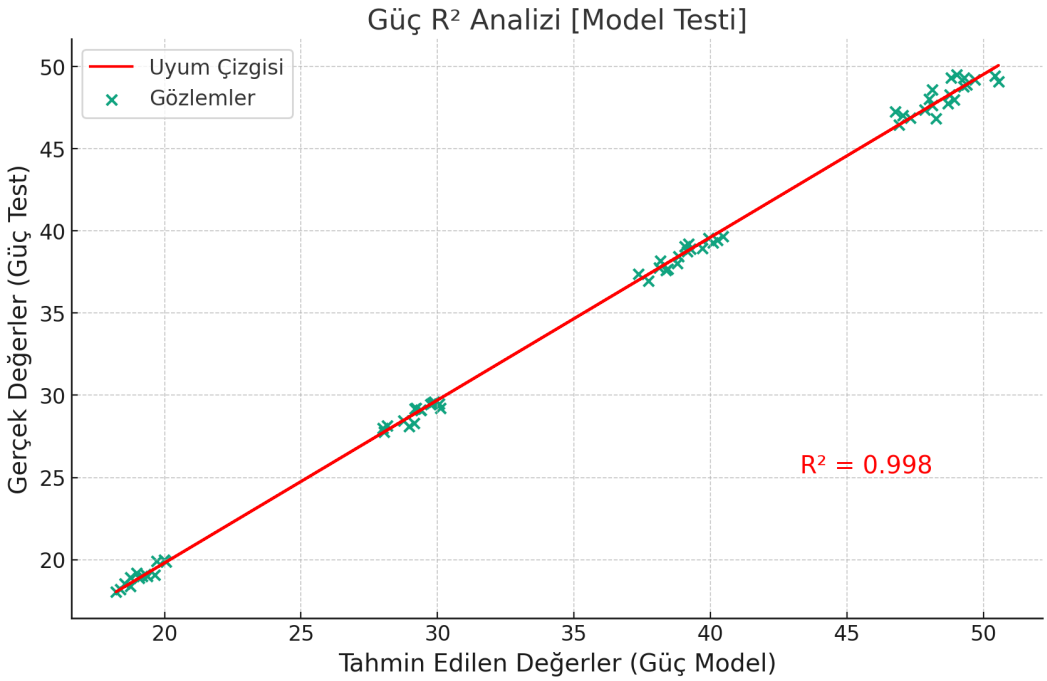


Şekil 3.3 Partikül Madde Kıyaslaması

3.2 Hata Analizi

R^2 regresyon modellerinde, modelin bağımsız değişkenler tarafından açıklanan bağımlı değişken varyansının oranını gösteren bir metriktir. Değerleri 0 ile 1 arasında değişir; 0, modelin verileri hiç açıklamadığını, 1 ise verilerin tamamını açıkladığını gösterir. Oran 1'e ne kadar yakında kıyaslanan değerlerin o kadar örtüştüğü anlamını taşır. Kısaca açıklanabilen varyasyonun, açıklanamayan varyasyona oranı şeklinde ifade edilir.

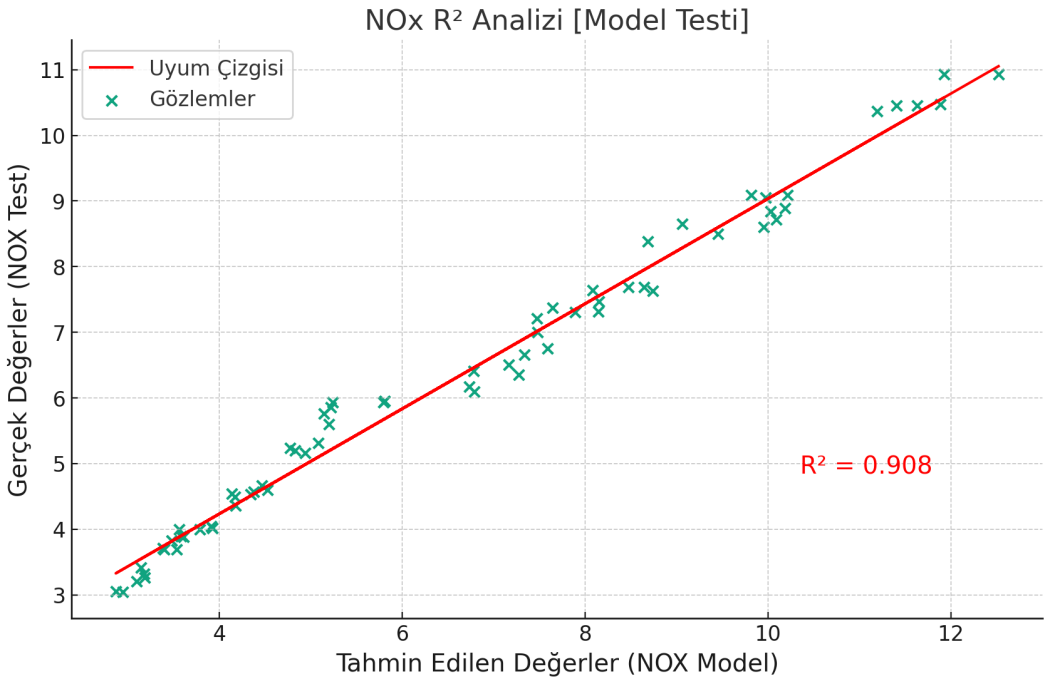
R^2 regresyon yöntemiyle yapılan hesaplamada şekil 3.4 içersinde görülen grafiktende anlaşılacağı üzere $R^2 = 0.998$ gibi bir yüksek doğruluk değerine sahiptir. Bu "Güç Analiz" verilerinin "Güç Test" verilerine oldukça yakın olduğunu ve yüksek bir doğruluk derecesine sahip olduğunu göstermektedir.



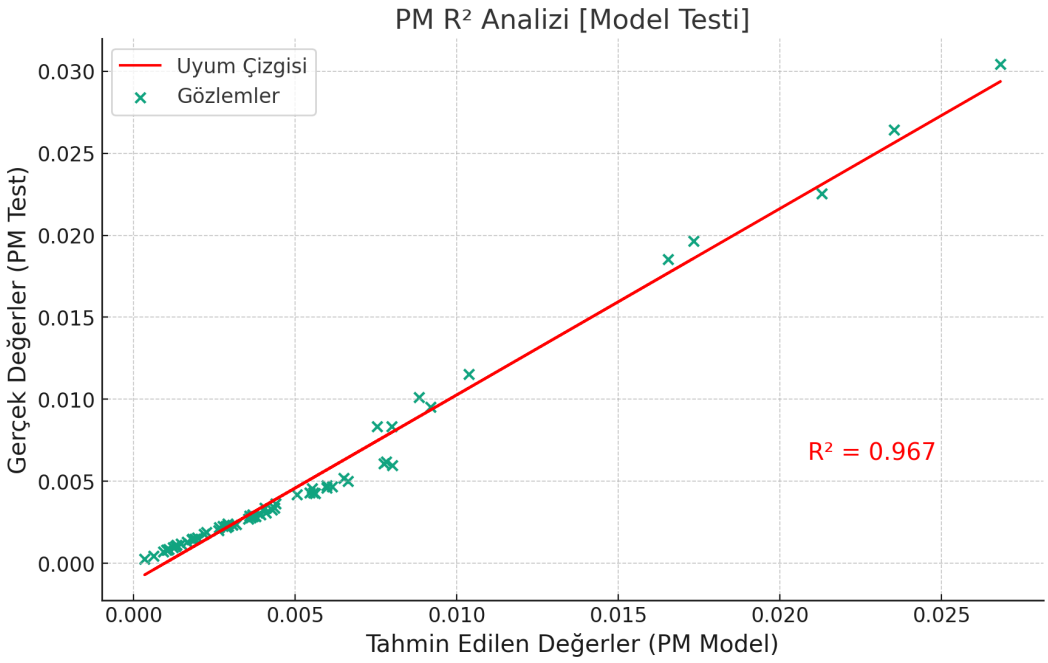
Şekil 3.4 Test ve Model Arasındaki Güç Hata Analizi

NO_x emisyonu için model ve test sonuçları kıyaslandığında, regresyon oranı 0.908 bulunmuştur. Bu, "NOX Analiz" verilerinin, "NOX Test" verilerinin doğruluk oranını ifade eder. ilgili regresyon şekil 3.5içersinde gösterilmektedir.

PM için yapılan R^2 analizinin sonucu Şekil 3.6 içersinde görüldüğü üzere 0.967 olarak belirlenmiştir. Bu anlamda modelin PM hesaplamasının güvenlir durumda oluduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.5 Test ve Model Arasındaki NO_x Hata Analizi



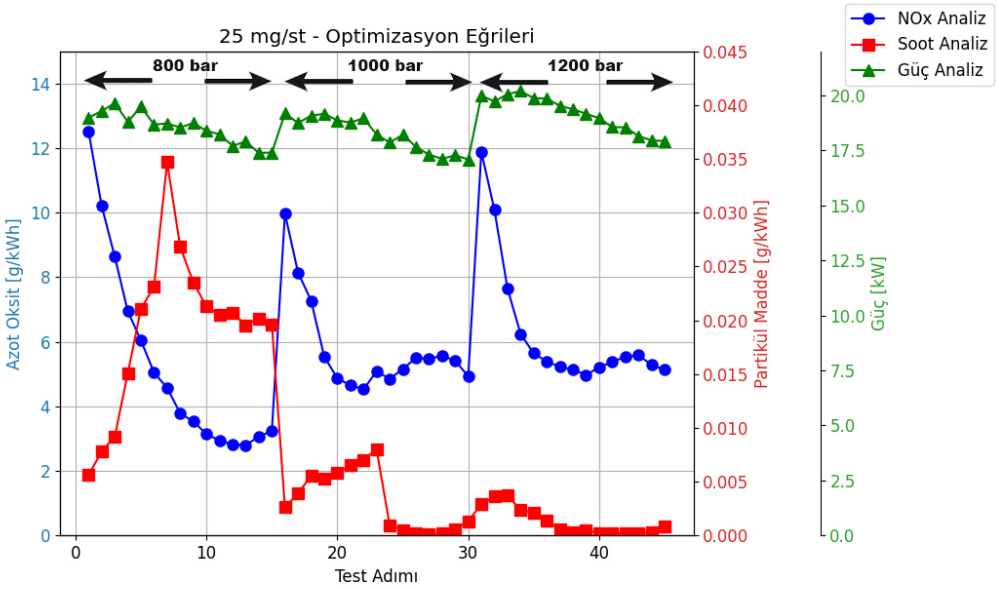
Şekil 3.6 Test ve Model Arasındaki PM Hata Analizi

4
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, içten yanmalı motorların verimliliğini ve çevresel etkilerini iyileştirmeyi hedefleyen kapsamlı bir araştırmanın parçasıdır. İlk olarak, motorun çalışma parametrelerinin incelenmesi için geniş kapsamlı bir deney matrisi oluşturulmuş ve bu matris kapsamında detaylı testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin amacı, motor performansını çeşitli koşullar altında değerlendirmek ve bu verileri daha sonra oluşturulacak olan modelin temeli olarak kullanmaktır. Test sürecinin tamamlanmasının ardından, elde edilen veriler, tek boyutlu bir motor modeli oluşturmak ve bu modeli doğrulamak için kullanılmıştır. Modelin doğruluğu, deney matrisindeki test edilmemiş noktalarla yapılan karşılaştırmalar sonucunda kanıtlanmış ve modelin hata oranları, motor performansını değerlendirme ve iyileştirme açısından kabul edilebilir seviyelerde bulunmuştur.

Araştırmanın bu evresinin ardından, elde edilen model, Partikül Madde (PM), NO_x ve Güç gibi kritik çıktıları incelemek üzere kullanılmıştır. Bu çıktılar, yakıt miktarı baz alınarak detaylı bir optimizasyon sürecine tabi tutulmuş ve bu süreç, çalışmanın temel hedeflerinden biri haline gelmiştir. Bu hedef, Güç, yakıt tüketimi, NO_x ve PM değerleri arasında ideal bir denge bulmak ve bu dengenin motor performansı üzerindeki etkilerini analiz etmektir. Bu dengeyi bulmak, motor teknolojisinin hem verimliliğini hem de çevresel etkilerini iyileştirmek açısından kritik önem taşımaktadır.

Çalışmanın veri analizi bölümünde, farklı yakıt miktarları (25, 35, 45, 55mg) esas alınarak bir kategorizasyon yapılmıştır. Bu kategoriler içinde, her bir yakıt miktarı için ulaşılabilecek en yüksek güç noktasının belirlenmesi hedeflenmiştir. Ancak bu süreçte sadece güç değil, aynı zamanda NO_x ve PM değerleri de büyük önem taşımaktadır. Bu emisyon değerlerinin herhangi birinin veya her ikisinin aşırı yüksek olduğu durumlarda, bu noktalar maksimum güç noktası olsa bile, optimum olarak kabul edilmemekte ve yerine güç ile emisyonlar arasındaki yüzde değişim dikkate alınarak yeni kalibrasyon noktaları seçilmektedir.

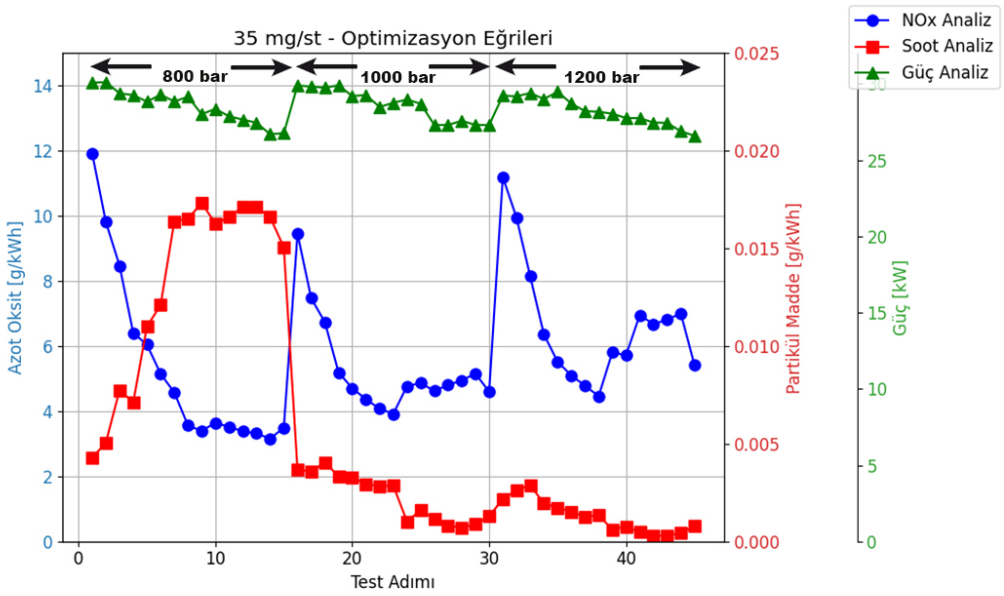


Şekil 4.1 25 mg/st Optimizasyon Eğrileri

Sonuç olarak, bu çalışma çerçevesinde farklı yakıt türleri için dört adet optimum çalışma noktası belirlenmiştir. Bu optimum noktalar, özellikle 1500 rpm motor hızıyla çalışan jeneratörler, hibrit sistemler ve benzeri uygulamalar için pratik öneriler sunmaktadır. Araştırma sonuçları, detaylı grafiklerle desteklenmiş olup, bu grafikler sayesinde motor performansı ve emisyon karakteristiklerinin nasıl iyileştirilebileceğine dair değerli bilgiler sunmaktadır. Bu çalışma, motor teknolojilerinin gelecekteki gelişimine yönelik önemli bir katkı sağlamakta ve içten yanmalı motorların hem verimliliğini hem de çevresel etkilerini iyileştirmeye yönelik yeni yollar açmaktadır. Bu bağlamda, elde edilen bulgular, motor mühendisleri ve çevre bilimcileri için değerli bir kaynak oluşturmakta ve ilgili alanlarda gelecekte yapılacak araştırmalara temel teşkil etmektedir.

Bu çalışma, içten yanmalı motorların performans ve emisyon özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan bir optimizasyon sürecini inceler. Şekil 4.1'deki 25mg/st yakıt enjeksiyonu için hazırlanan optimizasyon eğrileri, 31 numaralı DoE noktasından itibaren motor gücünün çevrim boyunca yüksek seviyelere ulaştığını göstermiştir. Özellikle 39 numaralı DoE noktasında, motor gücü maksimum değere göre %5.39 daha düşükken, NO_x emisyonlarındaki azalma %25.53 değerine ulaşmıştır. Ayrıca, Partikül Madde (PM) emisyonları da bu noktada çevrim boyunca en düşük seviyelere inmiştir.

Bu bulgular ışığında, 16 numaralı DoE noktası, 39 numaralı noktaya benzer bir güç seviyesine sahip olmasına rağmen, yüksek NO_x emisyonları sebebiyle tercih edilemez bir nokta olarak değerlendirilmiştir. Diğer yandan, 25 numaralı DoE



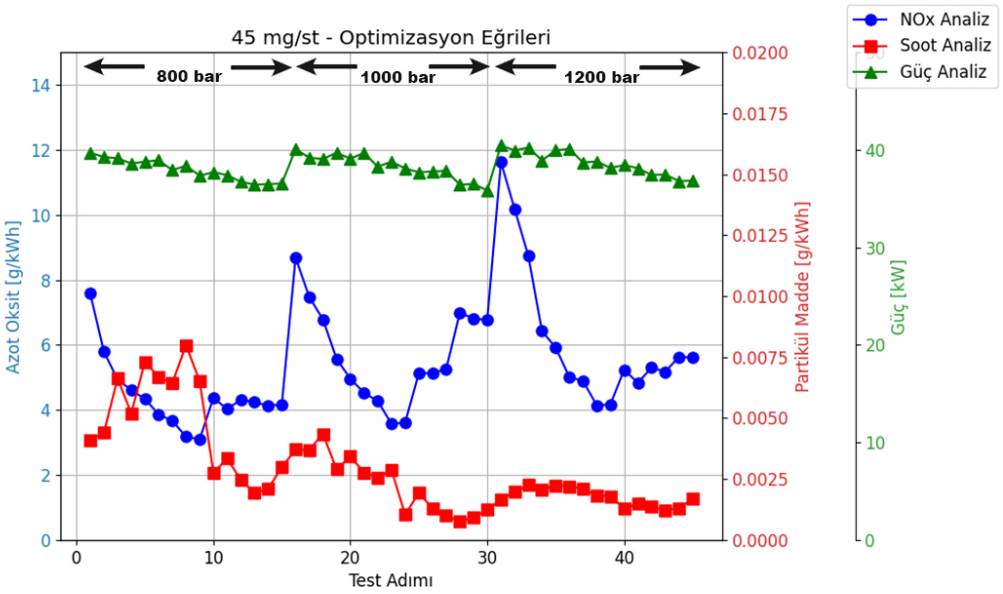
Şekil 4.2 35 mg/st Optimizasyon Eğrileri

noktası, 39 numaralı noktaya yakın NO_x emisyon seviyelerine sahip olmakla birlikte, düşük güç seviyesi nedeniyle optimal bir seçenek olarak görülmemiştir. Bu çalışma aralığı için en uygun çalışma noktası olarak 39 numaralı DoE noktası belirlenmiştir. DoE matrisine detaylı bir bakış atıldığında, kalibrasyon noktası olarak 1200 bar ve 8 °KMA değerlerinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.2'da gösterilen 35 mg/st için hazırlanan optimizasyon eğrileri, özellikle 16 numaralı DoE (Design of Experiments) noktasında başlayan ve motor gücünün en yüksek seviyelere ulaştığı bir trendi vurgulamaktadır. Dikkat çekici olan bir diğer nokta ise, 24 numaralı DoE adımıdır. Bu adımda, motor gücü maksimum güç seviyesine göre %3.08 daha düşük olmasına rağmen, NOx emisyonlarında %49.5 ve PM (Partikül Madde) emisyonlarında ise %66'lık bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu veriler ışığında, 24 numaralı DoE noktası, performans ve emisyon dengesi açısından optimum bir nokta olarak değerlendirilebilir.

Alternatif olarak incelenen 23 numaralı DoE noktası, yüksek NOx emisyon seviyeleri nedeniyle tercih edilebilir bir seçenek olarak görülmemektedir. Benzer şekilde, 38 numaralı DoE noktası, 24 numaralı noktaya benzer NOx emisyon seviyelerine sahip olmasına rağmen, düşük motor gücü nedeniyle optimal bir seçenek olarak değerlendirilmemiştir. Bu çalışma çerçevesinde, 24 numaralı DoE noktası 1000 bar ve 8 ° KMA değerleriyle optimum çalışma noktası olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.3'da gösterilen 45 mg/st için hazırlanan optimizasyon eğrileri detaylı



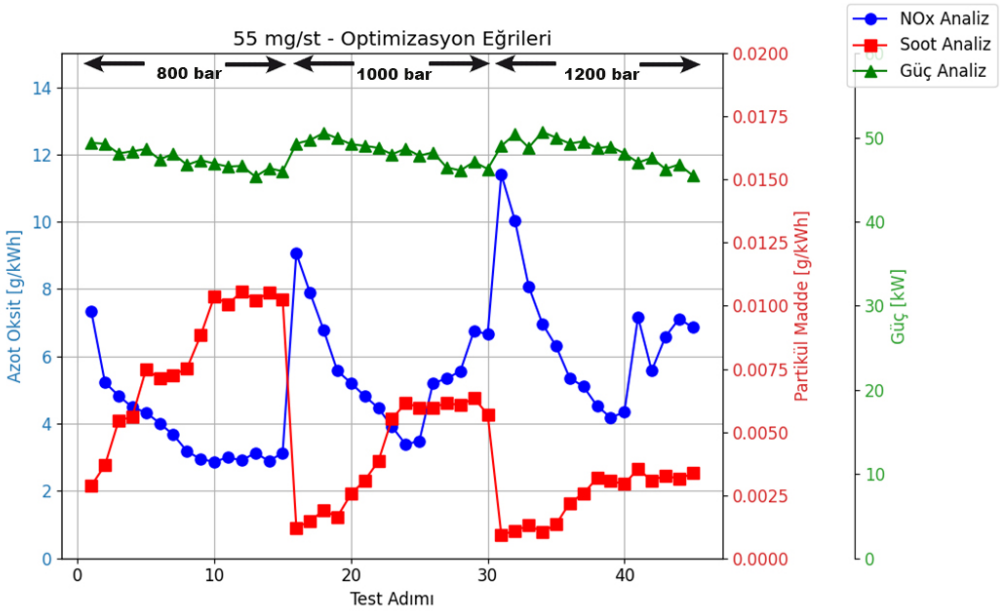
Şekil 4.3 45 mg/st Optimizasyon Eğrileri

bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, 23 numaralı DoE (Design of Experiments) noktası, yüksek güç seviyesi ve düşük emisyon trendiyle öne çıkmıştır. Bu nokta, alternatif olarak değerlendirilebilecek 39 numaralı DoE noktasına göre %14 daha düşük NOx emisyon seviyesine sahiptir. Ayrıca, Partikül Madde (PM) emisyonları, yüksek hava fazlalık kaysayısı sayesinde zaten düşük değerlerde seyretmektedir, bu da 23 numaralı noktanın PM emisyonları açısından da uygun olduğunu göstermektedir.

En yüksek güç seviyesine kıyasla gözlemlenen bu dramatik emisyon düşüşü, 23 numaralı DoE noktasının öne çıkmasını sağlamıştır. Emisyonlardaki bu düşüşler ve buna rağmen göreceli olarak düşük güç kaybı, 23 numaralı DoE noktasını bu çalışma kapsamındaki optimum nokta olarak belirlemiştir

Şekil 4.4 incelendiğinde, 32 numaralı Design of Experiments (DoE) noktasındaki güç artışının dikkat çekici olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, bu noktaya oldukça yakın olan ve %3.49 daha düşük güce sahip 39 numaralı DoE noktası, dramatik emisyon düşüşleriyle daha fazla ilgi çekmiştir. Özellikle, NOx emisyonları, 39 numaralı DoE noktasında, en yüksek gücün olduğu noktaya göre yaklaşık %50 oranında bir düşüş yaşamıştır. Ayrıca, yüksek hızlı frekanslı kombüsyon (HFC) sayesinde, PM (Partikül Madde) emisyonları da oldukça düşük seviyelerde seyretmektedir.

39 numaralı DoE noktası, benzer güç seviyesine sahip alternatif bir nokta olan 21 numaralı DoE noktası ile kıyaslandığında, emisyon seviyeleri açısından avantajlı bir



Şekil 4.4 55 mg/st Optimizasyon Eğrileri

konumda bulunmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma için 39 numaralı DoE noktası, performans ve emisyon dengesi göz önünde bulundurularak optimum nokta olarak seçilebilir.

Tablo 4.1 25 mg/st Seçim Tablosu

TestAdımı	DoE Numarası	Motor Hızı	Rail	Yakıt Miktarı	Püskürtme Açısı
1	1	1500	800	25	-8
2	2	1500	800	25	-6
3	3	1500	800	25	-4
4	4	1500	800	25	-2
5	5	1500	800	25	0
6	6	1500	800	25	2
7	7	1500	800	25	4
8	8	1500	800	25	6
9	9	1500	800	25	8
10	10	1500	800	25	10
11	11	1500	800	25	12
12	12	1500	800	25	14
13	13	1500	800	25	16
14	14	1500	800	25	18
15	15	1500	800	25	20
16	61	1500	1000	25	-8
17	62	1500	1000	25	-6
18	63	1500	1000	25	-4
19	64	1500	1000	25	-2
20	65	1500	1000	25	0
21	66	1500	1000	25	2
22	67	1500	1000	25	4
23	68	1500	1000	25	6
24	69	1500	1000	25	8
25	70	1500	1000	25	10
26	71	1500	1000	25	12
27	72	1500	1000	25	14
28	73	1500	1000	25	16
29	74	1500	1000	25	18
30	75	1500	1000	25	20
31	121	1500	1000	25	-8
32	122	1500	1200	25	-6
33	123	1500	1200	25	-4
34	124	1500	1200	25	-2
35	125	1500	1200	25	0
36	126	1500	1200	25	2
37	127	1500	1200	25	4
38	128	1500	1200	25	6
39	129	1500	1200	25	8
40	130	1500	1200	25	10
41	131	1500	1200	25	12
42	132	1500	1200	25	14
43	133	1500	1200	25	16
44	134	1500	1200	25	18
45	135	1500	1200	25	20

Tablo 4.2 35 mg/st Seçim Tablosu

Test Adımı	DoE Numarası	Motor Hızı	Ray	Yakıt Miktarı	Püskürtme Açısı
1	16	1500	800	35	-8
2	17	1500	800	35	-6
3	18	1500	800	35	-4
4	19	1500	800	35	-2
5	20	1500	800	35	0
6	21	1500	800	35	2
7	22	1500	800	35	4
8	23	1500	800	35	6
9	24	1500	800	35	8
10	25	1500	800	35	10
11	26	1500	800	35	12
12	27	1500	800	35	14
13	28	1500	800	35	16
14	29	1500	800	35	18
15	30	1500	800	35	20
16	76	1500	1000	35	-8
17	77	1500	1000	35	-6
18	78	1500	1000	35	-4
19	79	1500	1000	35	-2
20	80	1500	1000	35	0
21	81	1500	1000	35	2
22	82	1500	1000	35	4
23	83	1500	1000	35	6
24	84	1500	1000	35	8
25	85	1500	1000	35	10
26	86	1500	1000	35	12
27	87	1500	1000	35	14
28	88	1500	1000	35	16
29	89	1500	1000	35	18
30	90	1500	1000	35	20
31	136	1500	1200	35	-8
32	137	1500	1200	35	-6
33	138	1500	1200	35	-4
34	139	1500	1200	35	-2
35	140	1500	1200	35	0
36	141	1500	1200	35	2
37	142	1500	1200	35	4
38	143	1500	1200	35	6
39	144	1500	1200	35	8
40	145	1500	1200	35	10
41	146	1500	1200	35	12
42	147	1500	1200	35	14
43	148	1500	1200	35	16
44	149	1500	1200	35	18
45	150	1500	1200	35	20

Tablo 4.3 45 mg/st Seçim Tablosu

Test Adımı	DoE Numarası	Motor Hızı	Ray	Yakıt Miktarı	Püskürtme Açısı
1	31	1500	800	45	-8
2	32	1500	800	45	-6
3	33	1500	800	45	-4
4	34	1500	800	45	-2
5	35	1500	800	45	0
6	36	1500	800	45	2
7	37	1500	800	45	4
8	38	1500	800	45	6
9	39	1500	800	45	8
10	40	1500	800	45	10
11	41	1500	800	45	12
12	42	1500	800	45	14
13	43	1500	800	45	16
14	44	1500	800	45	18
15	45	1500	800	45	20
16	91	1500	1000	45	-8
17	92	1500	1000	45	-6
18	93	1500	1000	45	-4
19	94	1500	1000	45	-2
20	95	1500	1000	45	0
21	96	1500	1000	45	2
22	97	1500	1000	45	4
23	98	1500	1000	45	6
24	99	1500	1000	45	8
25	100	1500	1000	45	10
26	101	1500	1000	45	12
27	102	1500	1000	45	14
28	103	1500	1000	45	16
29	104	1500	1000	45	18
30	105	1500	1000	45	20
31	151	1500	1200	45	-8
32	152	1500	1200	45	-6
33	153	1500	1200	45	-4
34	154	1500	1200	45	-2
35	155	1500	1200	45	0
36	156	1500	1200	45	2
37	157	1500	1200	45	4
38	158	1500	1200	45	6
39	159	1500	1200	45	8
40	160	1500	1200	45	10
41	161	1500	1200	45	12
42	162	1500	1200	45	14
43	163	1500	1200	45	16
44	164	1500	1200	45	18
45	165	1500	1200	45	20

Tablo 4.4 55 mg/st Seçim Tablosu

Test Adımı	DoE Numarası	Motor Hızı	Ray	Yakıt Miktarı	Püskürtme Açısı
1	46	1500	800	55	-8
2	47	1500	800	55	-6
3	48	1500	800	55	-4
4	49	1500	800	55	-2
5	50	1500	800	55	0
6	51	1500	800	55	2
7	52	1500	800	55	4
8	53	1500	800	55	6
9	54	1500	800	55	8
10	55	1500	800	55	10
11	56	1500	800	55	12
12	57	1500	800	55	14
13	58	1500	800	55	16
14	59	1500	800	55	18
15	60	1500	800	55	20
16	106	1500	1000	55	-8
17	107	1500	1000	55	-6
18	108	1500	1000	55	-4
19	109	1500	1000	55	-2
20	110	1500	1000	55	0
21	111	1500	1000	55	2
22	112	1500	1000	55	4
23	113	1500	1000	55	6
24	114	1500	1000	55	8
25	115	1500	1000	55	10
26	116	1500	1000	55	12
27	117	1500	1000	55	14
28	118	1500	1000	55	16
29	119	1500	1000	55	18
30	120	1500	1000	55	20
31	166	1500	1200	55	-8
32	167	1500	1200	55	-6
33	168	1500	1200	55	-4
34	169	1500	1200	55	-2
35	170	1500	1200	55	0
36	171	1500	1200	55	2
37	172	1500	1200	55	4
38	173	1500	1200	55	6
39	174	1500	1200	55	8
40	175	1500	1200	55	10
41	176	1500	1200	55	12
42	177	1500	1200	55	14
43	178	1500	1200	55	16
44	179	1500	1200	55	18
45	180	1500	1200	55	20

KAYNAKÇA

[1] M. Ozkan, O. Ozener, I. Yavasliol, "Optimization of fuel consumption of a bus used in city line with regulation of driving characteristics," *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 89–95, 2012.

[2] P. Kasprzyk, J. Hunicz, A. Rybak, M. S. Gęca, M. Mikulski, "Excess air ratio management in a diesel engine with exhaust backpressure compensation," *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6701, 2020.

[3] K. G. Johnson, K. Mollenhauer, H. Tschöke, *Handbook of diesel engines*. Springer Science & Business Media, 2010.

[4] M. K. Khair, W. A. Majewsky, *Diesel emissions and their control*. SAE International, 2006.

[5] F. Kelen, "Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri," *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 19, no. 1-2, pp. 80–87, 2014.

[6] G. P. Chossière *et al.*, "Public health impacts of excess nox emissions from volkswagen diesel passenger vehicles in germany," *Environmental Research Letters*, vol. 12, no. 3, p. 034 014, 2017.

[7] P. Degobert, *Automobile et pollution*. Editions OPHRYS, 1995.

[8] O. Özener, "Diesel motorlarında pilot püskürtmenin performans ve emisyon açısından optimizasyonu," 2013.

[9] I. B. Zeldovich, *Okislenie azota pri gorenii*. Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1947.

[10] C. Büyük, *İçten yanmalı dizel motorlar için yanma ve performans parametrelerini hesaplayan bilgisayar yazılımının geliştirilmesi*, 2018.

[11] A. Dederichs, M. Balthasar, F. Mauss, "Modeling of nox and soot formation in diesel combustion," *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 54, no. 2, pp. 245–249, 1999.

[12] S. J. Wilson, M. R. Miller, D. E. Newby, "Effects of diesel exhaust on cardiovascular function and oxidative stress," *Antioxidants & redox signaling*, vol. 28, no. 9, pp. 819–836, 2018.

[13] Z. D. Ristovski *et al.*, "Respiratory health effects of diesel particulate matter," *Respirology*, vol. 17, no. 2, pp. 201–212, 2012.

[14] T. Kamimoto, H. Kobayashi, "Combustion processes in diesel engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 17, no. 2, pp. 163–189, 1991.

[15] A. Dederichs, M. Balthasar, F. Mauss, “Modeling of nox and soot formation in diesel combustion,” *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 54, no. 2, pp. 245–249, 1999.

[16] W. Kang, B. Choi, S. Jung, S. Park, “Pm and nox reduction characteristics of lnt/dpf+ scr/dpf hybrid system,” *Energy*, vol. 143, pp. 439–447, 2018.

[17] J. O’Connor, M. Musculus, “Effects of exhaust gas recirculation and load on soot in a heavy-duty optical diesel engine with close-coupled post injections for high-efficiency combustion phasing,” *International Journal of Engine Research*, vol. 15, no. 4, pp. 421–443, 2014.

[18] S. Kimura, O. Aoki, H. Ogawa, S. Muranaka, Y. Enomoto, “New combustion concept for ultra-clean and high-efficiency small di diesel engines,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 1999.

[19] S. Kimura, O. Aoki, Y. Kitahara, E. Aiyoshizawa, “Ultra-clean combustion technology combining a low-temperature and premixed combustion concept for meeting future emission standards,” *Sae Transactions*, pp. 239–246, 2001.

[20] F. Murphy, K. McDonnell, E. Butler, G. Devlin, “The evaluation of viscosity and density of blends of cyn-diesel pyrolysis fuel with conventional diesel fuel in relation to compliance with fuel specifications en 590: 2009,” *Fuel*, vol. 91, no. 1, pp. 112–118, 2012.

[21] T. Hulkkonen, H. Hillamo, T. Sarjovaara, M. Larmi, “Experimental study of spray characteristics between hydrotreated vegetable oil (hvo) and crude oil based en 590 diesel fuel,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2011.

[22] T. Lee, R. D. Reitz, “The effect of intake boost pressure on mk (modulated kinetics) combustion,” *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, vol. 46, no. 3, pp. 451–459, 2003.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Experimental Investigation Of The Behavior Of Modulated Kinetic Combustion Strategy İn A Diesel Engine At Different Engine Loads