T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MODEL BAZLI MOTOR KALİBRASYON ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

Cihan BÜYÜK

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Otomotiv Mühendisliği Programı

Danışman
Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MODEL BAZLI MOTOR KALİBRASYON ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

Cihan BÜYÜK tarafından hazırlanan tez çalışması 07.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Otomotiv Mühendisliği Programı **DOKTORA 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 _____

Prof. Dr. Tarkan SANDALCI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Osman Taha ŞEN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Muammer ÖZKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Model Bazlı Motor Kalibrasyon Algoritması Geliştirilmesi 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.

Cihan BÜYÜK

İmza

Bu çalışma, TÜMOSAN Motor ve Traktör A.Ş. tarafından, Ar-Ge çalışmaları kapsamında desteklenmiştir.

İMDAT BÜYÜK'e
Adanmıştır.

TEŞEKKÜR

Her başarımın mimarı kıymetli Babam İmdat BÜYÜK'e; daimi destekçim Annem Fatma BÜYÜK'e; Bu çalışmanın 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; tüm çalışmalarımda bana önderlik eden, imkan sağlayan ve destek olan, tecrübelerinden istifade ettiğim ve örnek aldığım Sayın Muzaffer ALBAYRAk'a; profesyonel kariyerimi şekillendirirken kendisini bir örnek olarak aldığım, tecrübesi ve tavsiyeleri ile her daim yanımda olan Sayın Kurtuluş ÖĞÜN'e; tezimin çalışma konusu olan dizel motorlar konusunda her türlü test ve araştırma konusunda destek olan TÜMOSAN Motor ve Traktör A.Ş. firmasına; kardeşlerin en iyisi ve en hayırlısı olan, sevgisini ve desteğini daima hissettiğim Caner BÜYÜK'e; hayatımın her anında yanımda olan, moral ve yaşama sevinci vererek iş ve öğrenim hayatıma fedakârca destek olan sevgili eşim Ekin Gizem BÜYÜK'e ve kızım Duru Mira BÜYÜK'e en içten saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Cihan BÜYÜK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ xii

ŞEKİL LİSTESİ xiii

TABLO LİSTESİ xvi

ÖZET xvii

ABSTRACT xix

1 GİRİŞ 1

1.1 Amaç 1

1.2 Kapsam 2

1.3 Yöntem 3

1.4 Literatür Özeti 4

2 MATEMATİKSEL MOTOR MODELİ 9

2.1 Krank Açısı Bazlı Silindir İçi Parametrelerin Hesabı 9

2.2 Ön Hesaplamalar 9

2.2.1 Enerjinin Korunumu - Termodinamiğin 1. Yasası 9

2.2.2 Yakıtın Hesaplanması 11

2.2.3 İş Gazının Hesaplanması 11

2.2.4 Hava Miktarının Hesaplanması 11

2.2.5 Emme Süreci Silindir İçi Parametrelerinin Hesabı 12

2.3 Krank Açısına Bağlı Parametrelerin Hesabı 13

2.3.1 Krank Açısı Cinsinden Silindir Hacminin Hesabı 13

2.3.2 Tutuşma Gecikmesi 13

2.3.3 Dizel Yanma Modeli 15

2.3.4 Isı Transferi Modeli 19

2.3.5 Motor Sürtünme Modeli 20

2.3.6 Krank Açısına Bağlı Silindir Basıncı ve Sıcaklığının Modellenmesi 21

2.3.7 N_2O Diazot Monoksit ve NO_x Azot Oksit Emisyon Modeli 23
2.4 Model Çıktıları . . . 29
2.4.1 Yanma Sonu Ürünlerin Bileşim Miktarı . . . 29
2.4.2 Artık Gaz Değerleri . . . 30
2.4.3 Moleküler Değişim Katsayısı . . . 33
2.4.4 Motor Performans Değerleri . . . 33
2.4.5 İndike Büyüklükler . . . 37
2.4.6 Efektif Büyüklükler . . . 38

3 YAZILIM GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI 40
3.1 Yazılım Mimarisinin Oluşturulması . . . 40
3.2 Yazılım Arayüz Güncellemesinin Yapılması . . . 42

4 YAZILIM MİMARİSİ 47
4.1 Arayüz Yapısı ve Kullanımı . . . 47
4.2 Algoritmanın Yapısı . . . 54

5 TEST HAZIRLIKLARI 57
5.1 Test Motorunun Hazırlanması . . . 57
5.2 Test odası ölçüm sistemleri ve ekipmanları . . . 59
5.2.1 Emis havası şartlandırma sistemi . . . 59
5.2.2 Torkmetre . . . 60
5.2.3 Dinamometre . . . 60
5.2.4 Motor Yağı Şartlandırma Sistemi . . . 61
5.2.5 Yakıt Şartlandırma Sistemi . . . 62
5.2.6 Emisyon Ölçüm Sistemi . . . 64
5.2.7 Enjektör Akım Probu . . . 66
5.2.8 Hava Debimetresi . . . 66
5.2.9 Su Debimetresi . . . 67
5.2.10 Silindir İçi Basınç Sensörü . . . 67
5.2.11 Motor Üzerinde Bulunan Diğer Sensörler . . . 69
5.3 Test Motorunun Entegrasyonu . . . 71

6 TEST AŞAMASI 72
6.1 Test Adımlarının Belirlenmesi . . . 72
6.2 Testlerin Gerçekleştirilmesi . . . 74
6.3 Motor Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi . . . 74
6.4 Azot Oksit Ölçümleri . . . 76
6.4.1 Diazot Monoksit N_2O Ölçümleri . . . 77
6.4.2 Diğer Azot Oksit NO_x Ölçümleri . . . 81

7 DEĞERLENDİRME VE SONUÇ **85**
7.1 Emisyon Sonuçlarının Motor Modeli ile Kıyaslanması 85
7.1.1 Diazot Monoksit N_2O Sonuçlarının Motor Modeli ile Kıyaslanması 85
7.1.2 Azot Oksit Sonuçlarının, Motor Modeli ile Kıyaslanması . . 86
7.2 Kalibrasyon Algoritması Çıktılarının Değerlendirilmesi 91
7.3 Sonuç 94

KAYNAKÇA **97**

A YAZILIM **99**
A.1 Ana Program 99
A.2 Performans Eğrisi Belirleme Hesabı 111
A.3 Karar Algoritması 113

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **117**

SİMGE LİSTESİ

Pm_e	Ortalama Efektif Basınç
δ_1	Emilen Dolgu Yoğunluğu
δ_2	Atmosfer Şartında Gaz Yoğunluğu
k	Orantı Katsayısı
m_y	Yakıt Kütlesi
V_h	Strok Hacmi
ρ_h	Havanın Yoğunluğu
η_e	Efektif Verim
H_u	Yakıtın Alt Isıl Değeri
W_c	Çevrim İşi
n	Motor Deviri
P_e	Efektif Güç
N_e	Efektif Motor Gücü
U	Gazların İç Enerjisi
Q_H	Yanma İle Açığa Çıkan Isı
Q_W	Soğutma İle Atılan Isı
ω	Krank Mili Dönme Hızı
λ_s	Biyel Eğikliği
α	Krank Mili Dönme Açısı
g_c	Çevrim Başına Püskürtülen Yakıt Miktarı
x	Yanan Yakıt Kesri
α_z	Krank Mili Dönme Açısı Cinsinden Yanma Süresi
V_c	Sıkıştırma Sürecinin Sonunda Silindir Hacmi

p_o	Atmosfer Basıncı
T_o	Atmosfer Basıncı
P_a	Emme Sonu Basıncı
T_a	Emme Sonu Sıcaklığı
μ_0	Kimyasal Moleküler Değişim Katsayısı
n_1	Sıkıştırma Politrop Üssü
n_2	Genişleme Politrop Üssü
P_i	İndike Güç
N_i	İndike Motor Gücü
η_i	İndike Verim
b_i	İndike Özgül Yakıt Tüketimi
G_y	Saatteki Yakıt Tüketimi
η_t	Termik Verim
η_m	Mekanik Verim
n_k	Sıkıştırma Politropik Üssü
P_r	Artık Gaz Basıncı
T_r	Artık Gaz Sıcaklığı
P_j	Cari Basınç
τ	Çevrim Zaman Sayısı
R	Evrensel Gaz Sabiti
α_t	Isı Transfer Katsayısı
F_p	Pistonun Yüzey Alanı
F_S	Silindirin Yüzey Alanı
M	İş Gazlarının Miktarı
M_Σ	Yanma Ürünlerinin Toplam Miktarıdır
ξ_d	Disosyasyon Isı Kayıp Katsayısı
L_o	Tam Yanma İçin Gerekli Teorik Hava Miktarı
γ_r	Artık Gaz Katsayısı
α_p	Yanma Basınç Artış Oranı

P_c	Sıkıştırma Sonu Basıncı
T_c	Sıkıştırma Sonu Sıcaklığı
T_{yerel}	Yerel Sıcaklık
λ	Hava Fazlalık Katsayısı
i	Silindir Sayısı
D	Silindir Çapı
S	Strok
n	Devir Sayısı
ε	Sıkıştırma Oranı
η_v	Volumetrik Verim
α_z	Yanma Süresi
T_{in}	İntercooler Soğutma Sıcaklığı
m	Vibe Katsayısı
θ	Yakıt Tutuşma Avansı
w_p	Ortalama Piston Hızı
M_e	Tork
b_e	Özgül Yakıt Tüketimi
p_z	Maksimum Yanma Basıncı
Δ_V	Strok Başına Yakıt
p_k	Kompressör Basıncı
T_k	Kompressör Sıcaklığı
p_r	Egzoz Sonu Artık Gaz Basıncı
ΔT	Motor Cidarindan Alınan Isı İle Oluşan Sıcaklık Farkı

KISALTMA LİSTESİ

ATS	Aftertreatment System
BDC	Bottom Dead Center
BTDC	Before Top Dead Center
BMEP	Brake Mean Effective Pressure
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
DPF	Diesel Particle Filter
ECU	Engine Control Unit
FMEP	Friction Mean Effective Pressure
IMEP	Indicated Mean Effective Pressure
KMA	Krank Mili Açısı
PFP	Peak Firing Pressure
TDC	Top Dead Center
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
AÖN	Alt Ölü Nokta

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 GT Suite yazılımı ile oluşturulmuş bir motor modeli 5
Şekil 1.2 Doğrulanmış hızlı model ile, detaylı model arasındaki farkın gösterimi 6
Şekil 1.3 Motor Kontrol Ünitesi, HIL Sistemi, Matlab destekli AVL BOOST-RT yazılımı ile oluşturulan otomatik kalibrasyon şeması . 6
Şekil 1.4 Motor testleri ile simülasyon sonuçları arasındaki farkı gösteren grafik 7
Şekil 1.5 Sanal motor test sistemi şematik gösterimi 7
Şekil 2.1 Sisteme ısı girişi yapıldığında hacimde oluşan değişim 10
Şekil 2.2 Açığa çıkan ısının krank açısına bağlı gösterimi 14
Şekil 2.3 Vibe parametresinin değişiminin yanma basıncı üzerindeki etkisi . 16
Şekil 2.4 Silindir içerisindeki enerji dengesi 19
Şekil 2.5 Krank miline gelen kuvvetler 21
Şekil 2.6 Silindir yüzeyi ve piston segmanları arasındaki sürtünme mekanizması 22
Şekil 2.7 Emisyon Standartlarının Motor Güçlerine ve Yıllara Göre Değişimi 25
Şekil 2.8 Silindir içinde NOx emisyon oluşum bölgeleri 27
Şekil 2.9 Bir dizel motorun performans eğrileri 33
Şekil 2.10 Bir dizel motorun indikatör diyagramı 34
Şekil 2.11 Motordaki tork ve güç değerinin, motor hızına göre ifadesi 36
Şekil 3.1 Eski yazılımın tek bloklu yapısı 40
Şekil 3.2 Yeni modüler yazılım mimarisinin yapısı 41
Şekil 3.3 "Virtual Diesel" yazılımının eski arayüz tarasımı 42
Şekil 3.4 "Virtual Diesel" yazılımının logosu 42
Şekil 3.5 Qt üzeinde GUI geliştirme arayüzü 43
Şekil 3.6 Geliştirme sonrasında ortaya çıkan "Virtual Diesel" yazılımının yeni arayüzü 43
Şekil 3.7 Performans eğrisi hesaplama modülü 44
Şekil 3.8 Performans hesaplama modülüne gerekli bilgilerin girilmesi . . . 45
Şekil 3.9 Hesaplanan eğrinin grafiksel olarak çizdirilmesi 45
Şekil 3.10 Eğrinin Excel formatında çıktısının alınması 46
Şekil 4.1 Yazılımın Kod Görünümü 47

Şekil 4.2 Kullanıcı Arayüzü Görünümü 48
Şekil 4.3 Motor Bilgileri Giriş Ekranları 48
Şekil 4.4 Hesaplanan Silndir İçi Basınç Eğrisinin Gösterimi 49
Şekil 4.5 Motor Giriş Verilerinin Kaydedilmesi 53
Şekil 4.6 Kayıt Verileri İçin .tms Uzantılı Dosya Oluşturulması 53
Şekil 4.7 Tam Yük Eğrisi Hesapma Aracına Erişim 54
Şekil 4.8 Tam Yük Hesabının Yapılması ve Eğri Oluşumu 54
Şekil 4.9 Yazılım içindeki DoE Matrisinin Oluşumu 55
Şekil 4.10 Yazılımın Algoritma Yapısının Bütünü 56
Şekil 5.1 Montajlanması planlanan 4DCI39E motoru 57
Şekil 5.2 Deney motorunun montaj çalışmalarına başlanması 58
Şekil 5.3 Emiş havası şartlandırma sistemi 59
Şekil 5.4 Torkmetre 60
Şekil 5.5 Dinamometre 61
Şekil 5.6 Yağ Şartlandırma Sistemi 62
Şekil 5.7 Emisyon Ölçüm Sistemi 64
Şekil 5.8 Yakıt Şartlandırma Sistemi 65
Şekil 5.9 Enjektör Akım Probu 66
Şekil 5.10 Hava Debimetresi 67
Şekil 5.11 Su Debimetresi 68
Şekil 5.12 Silindir İçi Basınç Sensörü 68
Şekil 5.13 Motor-Test Odası Bağlantı Şeması 71
Şekil 6.1 Motor Performans Eğrileri 72
Şekil 6.2 Test Sonuçlarının Dosya Yapısı 74
Şekil 6.3 Azot Oksit Ölçüm Matrisi 76
Şekil 6.4 Test Adımlarına Göre N_2O Test Sonuçları 78
Şekil 6.5 ATS'li N_2O Test Sonuçları 79
Şekil 6.6 ATS'siz N_2O Test Sonuçları 80
Şekil 6.7 1500 rpm, 800bar, 25mg Yakıt NO_x Test Sonuçları 82
Şekil 6.8 1500 rpm, 800bar, 35mg Yakıt NO_x Test Sonuçları 83
Şekil 6.9 1500 rpm, 800bar, 45mg Yakıt NO_x Test Sonuçları 84
Şekil 7.1 N_2O Test ve Model Sonuçlarının Kıyaslanması 85
Şekil 7.2 1500 rpm, 800bar, 25mg Yakıt NO_x Test Sonuçlarının Model Sonuçları ile Kıyaslanması 86
Şekil 7.3 1500 rpm, 800bar, 35mg Yakıt NO_x Test Sonuçlarının Model Sonuçları ile Kıyaslanması 87
Şekil 7.4 1500 rpm, 800bar, 45mg Yakıt NO_x Test Sonuçlarının Model Sonuçları ile Kıyaslanması 88

Şekil 7.5 Örnek Krank Açısına Bağlı Silindir İçi Basınç Kıyaslaması, NOx Testi 3. Adım 89
Şekil 7.6 Örnek Krank Açısına Bağlı Silindir İçi Basınç Kıyaslaması, NOx Testi 31. Adım 90
Şekil 7.7 Güç Test - Yazılım R^2 Hata Analizi 91

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 N_2O için kurulan Python regresyon kodu 32
Tablo 5.1 Emiş havası şartlandırma sistemi özellikleri 60
Tablo 5.2 Torkmetre özellikleri 61
Tablo 5.3 Dinamometre özellikleri 62
Tablo 5.4 Yağ şartlandırma sistemi özellikleri 63
Tablo 5.5 Emisyon ölçüm sistemi özellikleri 64
Tablo 5.6 Yakıt şartlandırma sistemi özellikleri 65
Tablo 5.7 Enjektör Akım Probu 67
Tablo 5.8 Su Debimetresi 68
Tablo 5.9 Silindir İçi Basınç Sensörü 69
Tablo 5.10 Motor Üzerinde Bulunan Diğer Sensörler 70
Tablo 6.1 Motor Test Adımları 73
Tablo 6.2 Test Sonuçlarının Gruplandırılması ve Nokta Tayini 75
Tablo 6.3 Motor Ray Basınç Haritası 75
Tablo 6.4 Motor Enjeksiyon Avans Açısı Haritası 76
Tablo 6.5 Emisyon Ölçüm Matrisi 77
Tablo 7.1 Motor Püskürtülen Yakıt Miktarı Haritası 92
Tablo 7.2 Motor Tork Haritası 93
Tablo 7.3 Motor Güç Haritası 94
Tablo 7.4 Motor Yakıt Enjeksiyon Avansı Haritası 95
Tablo 7.5 Motor Silindir İçi Basınç Haritası 96
Tablo 7.6 Motor Enjesiyon Avansı Haritası 96

ÖZET

Model Bazlı Motor Kalibrasyon Algoritması Geliştirilmesi

Cihan BÜYÜK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Bu çalışma, Python yazalım dilini kullanarak, silindir içi yanma, ısı transferi, sürtünme, mekanik ve emisyon hesaplamaları yapan bir motor modeli sayesinde, bir içten yanmalı dizel motorun, kalibrasyon haritalarının oluşturulması amacı ile bir algoritma ve bilgisayar yazılımı geliştirilmesini kapsamaktadır.

Oluşturulan algoritma ve yazılım, verilen maksimum güç ve tork hedefleri ile birlikte, kullanıcı tarafından belirtilen motorun ana boyutlarını kullanarak, bir hedef motor performans karakteristiği oluşturur. Daha sonra içinde barındırdığı motor modeli sayesinde, verilen yakıt tüketimi başta olmak üzere, silindir içi basınç, egzoz sıcaklığı v.b. limitleri kullanarak, motorun farklı çalışma devrine ve yüküne bağlı en optimum kalibrasyon haritalarının çıktısını üretir. Ayrıca çalışma kapsamında dizel motorlarda oluşan N_2O emisyonunun hesaplanması için yeni bir yöntem de önerilmektedir ve model sonuçları ile test sonuçları kıyaslanmaktadır.

Bu çalışma, motor geliştirme safhasındaki en maliyetli ve uzun süreçlerden biri olan kalibrasyon testleri için pratik bir yöntem ortaya koyar. Test süreçlerinin kısalması, geliştirme fazındaki yakıt sarfiyatının ve buna bağlı maliyetlerin ve emisyon salınımının azalmasına olanak sağlar. Motorun kalibrasyon haritalarının ve performans sonuçlarının, henüz motor tasarımı tamamlanmamışken dahi belirlenebilmesi, motor bileşenlerinin tasarımına veya tedarikine yön verir. Ayrıca, algoritma, belirtilen sınır koşullara göre oluşturduğu haritalar sayesinde, testler esnasında oluşabilecek riskli ve tehlikeli çalışma noktalarının elenmesini sağlar, bu sayede maliyeti yüksek prototip motorları ve test sistemlerini korur.

Geliştirilen yazılım, yalnızca tasarım ve test süreçlerinde değil, bu konuda öğrenim gören öğrencilerin alacakları eğitimlerde, motorun çalışma dinamiklerinin daha iyi anlaşılabilmesi adına bir araç olarak da kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: İçten Yanmalı Motor, Kalibrasyon, Simülasyon, Yazılım

ABSTRACT

Development of Model Based Engine Calibration Algorithm

Cihan BÜYÜK

Department of Mechanical Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

This study encompasses the development of an algorithm and computer software for creating calibration maps of an internal combustion diesel engine, using the Python programming language. This is achieved through an engine model that performs calculations for in-cylinder combustion, heat transfer, friction, mechanics, and emissions.

The developed algorithm and software generate a target engine performance characteristic by using the main dimensions of an engine specified by the user, along with given maximum power and torque targets. The engine model within then produces the most optimal calibration maps for different operating speeds and loads of the engine, based on given criteria such as fuel consumption, in-cylinder pressure, exhaust temperature, and other limits. Furthermore, this study proposes a new method for calculating N_2O emissions in diesel engines and compares the model results with test results.

This work presents a practical method for calibration tests, which are one of the most costly and time-consuming processes in the engine development phase. The shortening of test processes allows for reduced fuel consumption, associated costs, and emissions during the development phase. The ability to determine the engine's calibration maps and performance results, even before the engine design is completed, guides the design or procurement of engine components. Additionally, the algorithm, by creating maps based on specified limit conditions, helps to eliminate risky and dangerous operating points that may arise during testing, thus

protecting expensive prototype engines and test systems. The developed software is not only useful in design and testing phases but can also serve as an educational tool for students in this field, enhancing their understanding of engine operational dynamics.

Keywords: Internal Combustion Engines, Calibration, Simulation, Software

1
GİRİŞ

1.1 Amaç

Gelişen teknolojiyle birlikte, içten yanmalı motorların verimliliği ve çevresel etkileri üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Bu bağlamda, motor kalibrasyon haritalarının optimizasyonu, hem mühendislik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu haritalar, motorun kontrol ünitesi (ECU) içerisine yüklenerek, motorun her bir çalışma şartında en verimli şekilde çalışmasını sağlar. Bu çalışmanın amacı, motor kalibrasyon haritalarını optimize eden yenilikçi bir algoritma sayesinde bir bilgisayar yazılımının geliştirilmesidir.

Bu yazılım, temel motor özellikleri ve hedeflerine dayanarak kalibrasyon haritaları üretebilir. Böylece, motorların geliştirme test süreçleri önemli ölçüde kısalır. Test odalarının yüksek maliyetleri göz önüne alındığında, bu yazılımın ekonomik katkısı da çalışmanın ana amaçlarından biridir. Ayrıca, test sırasında harcanan yakıttan tasarruf sağlanarak, motorun henüz prototip fazdından itibaren çevreye duyarlı bir yaklaşımla geliştirilmesi sağlanır. Daha az yakıt tüketimi, hem operasyonel maliyetleri düşürür hem de çevre dostu bir yaklaşım sunar.

Bununla birlikte, bu yazılım sayesinde, motor henüz tasarım aşamasındayken bile kalibrasyon haritaları elde edilebilir. Bu, motorun hangi noktada nasıl çalışacağının önceden belirlenmesine olanak tanır. Böylelikle, motor için tedarik edilecek veya tasarlanacak parçalar daha bilinçli bir şekilde seçilebilir. Bu da, hem tasarım sürecini hızlandırır hem de son ürünün kalitesini artırır.

Bu tez çalışmasının temel odak noktalarından biri de, geliştirilen yazılımın, motorlarda oluşabilecek düzensiz ve riskli çalışma koşullarını test sürecine geçilmeden önce tespit ederek, haritaları bu noktaların dahil edilmediği şekilde oluşturmasıdır. Bu özellik, motorun test edilmesi sırasında karşılaşılabilecek potansiyel tehlikeleri ve arızaları önceden belirleyerek, test odasındaki kazaların ve hem motor hem de test odası ekipmanlarında oluşabilecek hasarların önüne geçer.

Yazılım, verilen sınır koşullara göre, motorun tehlikeli çalışma şartlarını belirler, bu sayede test sırasında meydana gelebilecek aşırı yüklenme, aşırı ısınma, kırılma veya diğer olumsuz durumların önlenebilmesi için gerekli önlemler alınabilir. Bu yaklaşım, test süreçlerinin güvenliğini artırırken, aynı zamanda maliyetli onarımlar ve ekipman değişiklikleri gerektiren durumların da önüne geçer. Böylece, yazılımın kullanımı, hem mühendislik hem de işletme açısından motor test süreçlerinin daha verimli ve güvenli hale gelmesine katkıda bulunur.

Ayrıca bu yazılımın eğitim ve akademik araştırmalarda da kullanılma potansiyeli bulunmaktadır. Üniversiteler ve teknik enstitüler, öğrencilere ve araştırmacılara, motor teknolojileri ve performans analizi konularında pratik ve teorik bilgiler sunmak için bu yazılımı bir araç olarak kullanabilirler. Bu, gelecek nesil mühendislerin ve araştırmacıların daha yenilikçi ve etkili çözümler geliştirmelerine yardımcı olabilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, içten yanmalı motorların tasarım, geliştirme ve test süreçlerini hızlandıran ve bu süreçlerdeki riskleri azaltan yenilikçi bir bilgisayar yazılımının geliştirilmesine odaklanmıştır. Yazılım, test süreçlerinin süresini kısaltarak test odası operasyonlarının maliyetlerini azaltır ve çevresel etkileri minimize eder. Ayrıca, motor mühendislerine, optimum parça tasarımı ve tedarikinde rehberlik ederek, motor performansını ve verimliliğini artırmak için kritik veriler sunar. En önemlisi, yazılım, motor tasarımının erken aşamalarında riskli çalışma koşullarını tespit edebilir, böylece test sırasında oluşabilecek kazaların ve hasarların önlenmesine katkıda bulunur. Ayrıca yazılımın motor konusunda öğremin gören öğrencilerin eğitimi amacı ile de kullanılma potansiyeli bulunmaktadır.

1.2 Kapsam

Bu tez çalışması, özellikle içten yanmalı dizel motorlar için kalibrasyon haritaları üreten bir yazılımın geliştirilmesine odaklanmaktadır. Çalışma, dizel prensibine uygun çalışan motorlar üzerinde gerçekleştirilmiş olup, farklı veya alternatif yakıtların kullanımını da kapsar. Ancak, bu yakıtların genel olarak dizel motorlara uygun olması gerekmektedir.

Yazılımın tasarımı, özellikle taze dolgu olarak hava kullanan dizel motor uygulamaları için öngörülmüştür. Özellikle, yazılım; yarış araçları veya özel uygulamalarda bulunan, atmosferik havadan farklı olarak daha yüksek konsantrasyonlu oksijen molekülleri içeren bileşikleri kullanarak çalışan motorları kapsamamaktadır. Bu tür motorlar, genellikle artırılmış performans ve

özelleştirilmiş yanma dinamikleri gerektiren uygulamalar için tasarlanmış olup, yazılımın hedeflediği standart dizel motor operasyonlarından önemli ölçüde farklılık gösterir. Bu nedenle, yazılımın kullanım alanı, bu tip özelleştirilmiş ve yüksek performanslı motor uygulamalarını içermemekte, daha geleneksel ve genel kullanım amaçlı dizel motorlar üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Ayrıca, bu çalışmanın kapsamı, yazılım tarafından üretilen kalibrasyon haritalarının hiçbir test yapılmadan doğrudan son kullanıcı tarafından kullanılan bir motora entegre edilmesini kapsamamaktadır. Yazılım, motor tasarımı ve geliştirme sürecinde kritik bir yardımcı araç olarak konumlandırılmış olup, bu süreçlerde önemli bir destek sağlamayı amaçlamaktadır. Yazılımın sonuçları, gerçek dünya testleri ve uygulamalarıyla desteklenmeli ve doğrulanmalıdır. Bu yaklaşım, hem yazılımın güvenilirliğini artırır hem de motorun nihai kullanımı sırasında karşılaşılabilecek olası riskleri minimize eder.

1.3 Yöntem

Bu tez çalışması, TÜMOSAN Motor ve Traktör A.Ş. bünyesinde geliştirilme sürecinde olan dizel motorlar kullanılarak ortaya konulmuştur. Araştırmada kullanılan motorlar, TÜBİTAK RUTE'nin sağladığı ve TÜMOSAN firmasının erişiminde olan ileri teknoloji motor test odalarında incelenmiştir. Bu test odalarındaki ekipmanlar, motor dinamometreleri, çeşitli ölçüm cihazları ve hassas sensörler, TÜBİTAK uzman personeli tarafından düzenli olarak kalibre edilmiştir. Bu, test süreçlerinin yüksek doğruluk ve güvenilirlik standartlarında gerçekleştirilmesini sağlamış, böylece elde edilen verilerin güvenilirliğini artırmıştır.

Tez çalışması, modern programlama dillerinden biri olan Python kullanılarak geliştirilen bir yazılım üzerine kuruludur. Python, mühendislik alanında karmaşık hesaplamalar ve veri analizi için geniş çapta kabul gören bir dil olup, bu çalışmanın ihtiyaçlarına uygun esneklik ve geniş kütüphane desteği sağlamaktadır. Yazılımın kullanıcı arayüzü, QT platformu kullanılarak tasarlanmıştır. QT'nin geniş kullanımı ve kullanıcı dostu arayüz özellikleri, araştırmacıların ve mühendislerin yazılımı etkili bir şekilde kullanmalarını sağlamakta ve bu da sonuçların analizi ve yorumlanmasında kolaylık sağlamaktadır.

Yazılımın kodlama yapısında modüler strateji benimsenmiştir. Bu modüler yapı, genişletilebilirlik ve esneklik açısından büyük avantajlar sunmakta, bu da yazılımın gelecekteki ihtiyaçlara ve teknolojik gelişmelere uyum sağlamasını kolaylaştırmaktadır. Bu yaklaşım, yazılımın çeşitli bileşenlerini her biri belirli bir

işlevi yerine getiren bağımsız modüller şeklinde düzenlemektedir. Böyle bir yapı, yazılımın farklı bölümlerini gerektiğinde bağımsız olarak güncelleme, geliştirme veya değiştirme esnekliği sağlar. Örneğin, motor performansı veya emisyon hesaplamaları hakkında eklenecek yeni özellikler, mevcut sistemlere sorunsuz bir şekilde entegre edilebilir. Ayrıca, bu modüler yapı, yazılımın bakımını ve yönetimini daha verimli hale getirir; her modülün ayrı ayrı güncellenmesi veya hata ayıklanması, genel yazılım yapısının istikrarını ve güvenilirliğini korurken, mühendislerin için iş yükünü azaltır. Uzun vadede, bu modüler yaklaşım, yazılımın sürdürülebilirliğini ve teknik yeniliklere adaptasyonunu destekleyen kritik bir faktör olarak ön plana çıkar.

Tez çalışmasının deney matris yapısı, TÜMOSAN'ın mevcut üretim hatlarında bulunan motor modellerinden yararlanarak belirlenen test ve deney noktalarını kapsamaktadır. Bu stratejik seçim, araştırmanın bulgularının geniş bir motor yelpazesi üzerinde uygulanabilirliğini ve dolayısıyla pratik değerini artırmaktadır.

TÜMOSAN firmasının geliştirdiği motorlardan elde edilen veriler kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, firmaya ait herhangi bir hassas veya kritik "know-how" bilgisine yer verilmemiştir. Bu yaklaşım, araştırmanın akademik bütünlüğünü korurken, aynı zamanda ticari sırların ve teknik bilgilerin korunmasını da garanti altına almaktadır.

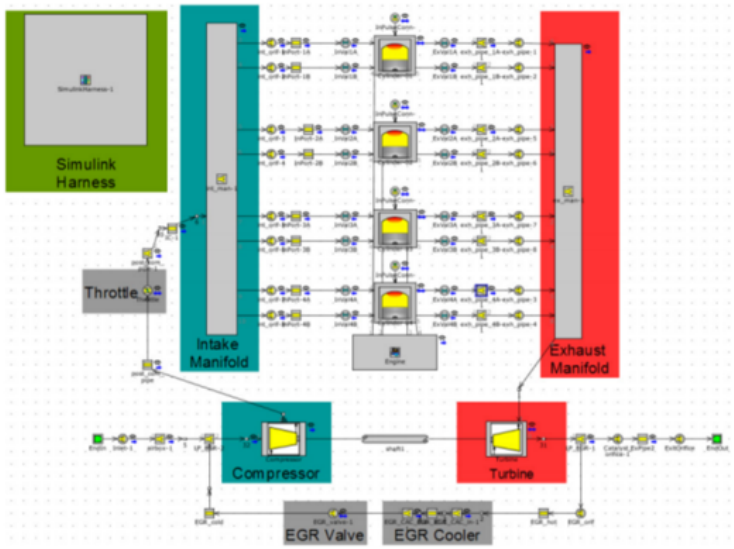
Araştırmanın ana hedeflerinden biri olan test maliyetlerinin azaltılması, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen testler için önemli bir kısıtlayıcı etmen olmuştur. Bu kısıtlama, TÜMOSAN firmasının sağladığı destek sayesinde aşılmış, böylece, tezin amacı ile TÜMOSAN beklentileri ortaklaştırarak araştırmanın maliyet etkin bir şekilde yürütülmesi sağlanmıştır.

1.4 Literatür Özeti

M. Özkan ve arkadaşları çalışmasında üç farklı enjeksiyon basıncı için dört zamanlı dört silindirli bir direkt enjeksiyonlu dizel motor üzerine araştırma yapmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki enjeksiyon basıncındaki artış, yanma verimliliğini artırırken termal verimliliği azaltmaktadır. Bu durum kalibrasyon esnasında her daim yüksek enjeksiyon basıncının, daha iyi bir kalibrasyon çıktısı üreteceği algısını ortadan kaldırmaktadır [1].

P. Barasa ve arkadaşları çalışmasında, bir otomatik kalibrasyon algoritması geliştirmesi olmasa da, GT SUITE yazılımı üzerinde bir motor modeli kurdular. Bu detaylı motor modelini, GT Suite içindeki "Fast Running Model (FRM) ve

"Mean Value Model (MVM)" özelliklerini kullanarak, normal simülasyona göre çok hızlı çalışan ve doğrulandıktan sonra doğruya çok yakın sonuçlar veren bir "Hızlı Simülasyon" modeline dönüştürdüler. Bu yeni modeli ise, hızlı çalışabilmesi sayesinde bir "Kalibrasyon geliştirme" arayüzü olarak kullandılar [2].



Şekil 1.1 GT Suite yazılımı ile oluşturulmuş bir motor modeli

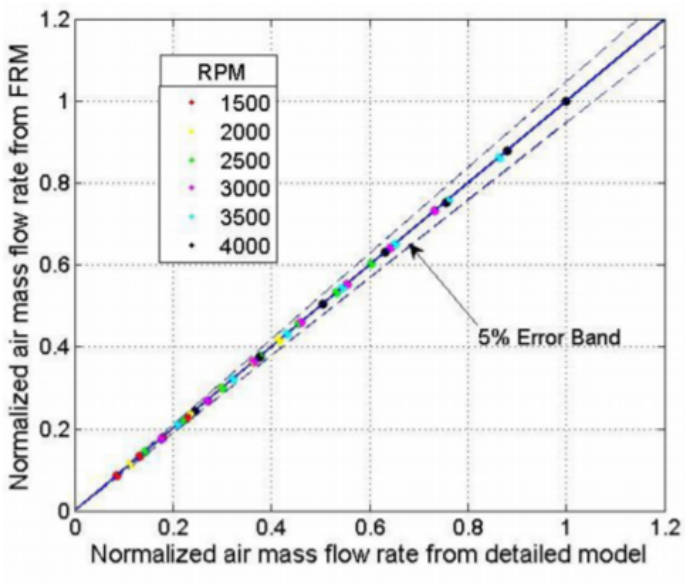
P. Barasa ve arkadaşları çalışmalarında, her ne kadar hazır bir paket program üzerinden gerçekleştirilmiş olsa da, test sonuçları ile doğrulanmış bir motor modelinin, motor kalibrasyon geliştirilmesi süreçlerinde kullanılabileceğini göstermektedir [2].

N. Damji ve arkadaşları çalışmalarında ise, bir başka ticari amrka olan AVL firmasının BOOST-RT yazılımını kullanarak "Sıfır Boyutlu" bir motor modeli geliştirmelerine dayanmaktadır. 1 Boyutlu motor performans yazılımı olan BOOST'un yanında BOOST-RT, "RT" özelliği ile gerçek zamanlı çalışacak kadar hızlı motor hesaplamaları yapabilen bir model oluşturabilmektedir. Bu sayede bir "HIL" sistemi üzerine entegre edilen model, sanal bir motor dinamometre test sistemine dönüştürülmüştür [3]. Şekil 1.1 üzerinde, GT Suite yazılımının bir örnek modeli gösterilmektedir.

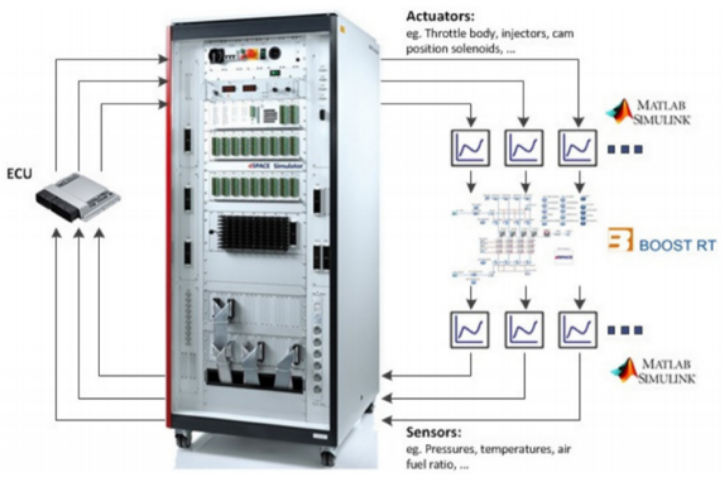
Şekil 1.2 üzerinde detaylı model ile hızlı model arasındaki fark gösterilmektedir.

1 Boyutlu motor performans yazılımı olan BOOST'un yanında BOOST-RT, "RT" özelliği ile gerçek zamanlı çalışacak kadar hızlı motor hesaplamaları yapabilen bir model oluşturabilmektedir. Bu sayede bir "HIL" sistemi üzerine entegre edilen model, sanal bir motor dinamometre test sistemine dönüştürülmüştür.

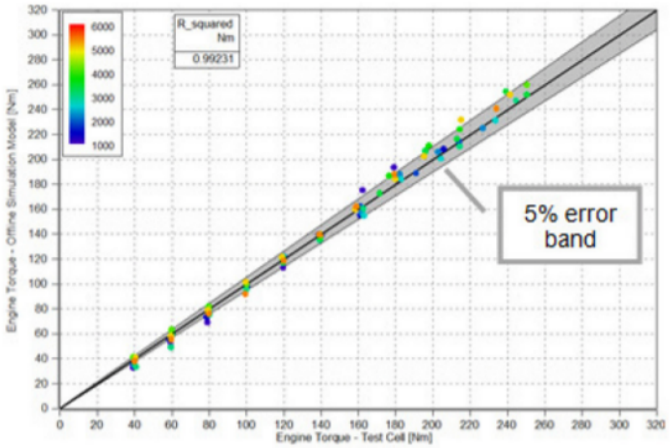
Şekil 1.3 üzerinde motor kontrol ünitesi ile kurulmuş bir sistem gösterilmektedir..



Şekil 1.2 Doğrulanmış hızlı model ile, detaylı model arasındaki farkın gösterimi



Şekil 1.3 Motor Kontrol Ünitesi, HIL Sistemi, Matlab destekli AVL BOOST-RT yazılımı ile oluşturulan otomatik kalibrasyon şeması



Şekil 1.4 Motor testleri ile simülasyon sonuçları arasındaki farkı gösteren grafik

Şekil 1.4 üzerinde simülasyon sonuçları ile motor testleri arasındaki fark gösterilmektedir.

N. Damji ve arkadaşlarının çalışması bizlere; Sanal motor modeli üzerinden oluşturulan "Sanal Test Sistemi" ve bu sistem üzerinden çalıştırılan AVL firmasının PUMA test otomasyon sisteminin ECU ile bağlantısı sağlanarak, Otomatik model bazlı bir kalibrasyon sistemi ortaya çıkartılabileceğini göstermektedir [3].

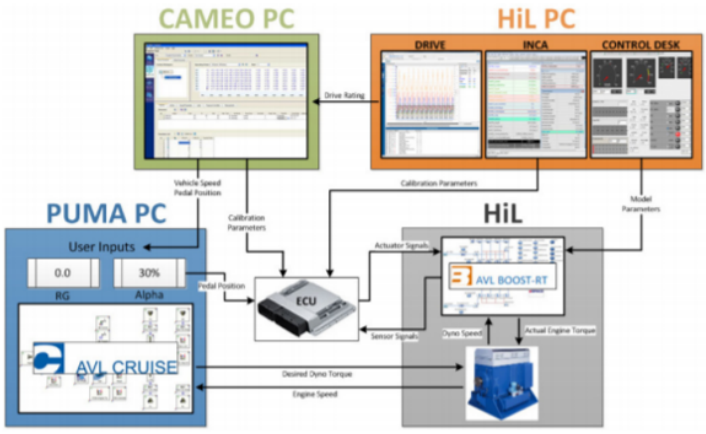


Figure 2. The Virtual Engine Test Cell

Şekil 1.5 Sanal motor test sistemi şematik gösterimi

Şekil 1.5 üzerinde oluşturulmuş bir sanal motor test sistemi gösterilmektedir.

Tüm ticari yazılım uygulamalarında ve bu tezin kapsamında hedeflenen yazılımın temelleri için literatürdeki aşağıdaki çalışmalar incelenmiş ve temel alınmıştır.

I. Vibe çalışmasında, motorlardaki karmaşık yanma reaksiyonlarını ayrıntılı olarak çözme çabasından ziyade, yakıtın yanma dinamiklerini anlamak üzere yarı deneysel

bir yaklaşım benimsemiştir. Araştırmacılar, bu modelle yanma sürecinin hızını ve özelliklerini, yani ne kadar hızlı ve hangi şartlar altında yanma gerçekleştiğini tanımlayabilmişlerdir. Bu sayede, yanma sonunda meydana gelen enerji miktarı, krank açısı cinsinden belirlenebilir hale gelmiş ve bu enerji değerleri kullanılarak silindir içi sıcaklık ve basınç gibi kritik motor parametreleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, motor tasarımı ve performansının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır [4].

K. Sihling ve G. Woschni çalışmalarında, dizel yakıt enjeksiyon sistemine sahip motorların, yüksek devirlerde çalışan uygulamaları üzerine yapılan kapsamlı testler sonucunda, motorlar üzerinde uygulanabilecek bir boyutlu model geliştirerek, ısı transferini hesaplayabilmiştir. Geliştirilen bu modelin en büyük özelliği, silindir cidarları, motorun silindir kafası ve piston gibi motorun temel bileşenlerinde meydana gelen ısı transfer miktarlarını, krank açısı cinsinden anlık olarak hesaplayabilme kapasitesine sahip olmasıdır. Bu model, motorun ısı yönetimi ve soğutma sistemlerinin tasarımında önemli bir araç olarak kullanılmaktadır, zira motorun ısıl verimliliğini ve performansını doğrudan etkileyen faktörler arasındadır [5].

S.K. Chen ve P.F. Flynn çalışmalarında, özellikle tek silindirli bir deney motoru üzerinde yapılan testlerle, motor sürtünmesini daha gerçekçi bir şekilde modelleyen yeni bir sürtünme modeli geliştirilmiştir. Bu model, sadece motorun devir sayısına değil, aynı zamanda motorun yük durumuna da bağlı olarak sürtünme kuvvetlerinin nasıl değiştiğini göstermektedir. Böyle bir modelin geliştirilmesi, motorun enerji verimliliğini ve performansını optimize etmek için kritik önem taşımaktadır. Çünkü sürtünme, motorun mekanik verimliliğini doğrudan etkileyen bir faktördür ve bu modelle daha doğru sürtünme tahminleri yapılabilir [6].

Y.B. Zeldvich çalışmasında, moleküler nitrojenin aktif nitrojen formuna dönüşüm sürecini ve bu sürecin içten yanmalı motorlardaki NOx emisyonları üzerindeki etkilerini anlamak için bir matematiksel model geliştirmiştir. Araştırmacılar, bu süreçte gerçekleşen kimyasal zincir reaksiyonlarını detaylı bir şekilde incelemiş ve modellemişlerdir. Bu model, motor emisyonlarını anlamak ve kontrol etmek açısından büyük önem taşır. Özellikle NOx emisyonlarının azaltılması ve çevresel etkilerinin minimizasyonu için motor tasarımı ve egzoz arıtma sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu model sayesinde, kalibrasyon sürecindeki gerekli optimizasyonlar daha doğru bir şekilde yapılabilir [7].

2
MATEMATİKSEL MOTOR MODELİ

Kalibrasyon algoritmasının hazırlanabilmesi için, içten yanmalı motorların olası tüm büyüklüklerini hesaplayan bir matematiksel motor modelinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu matematiksel motor modelinin geliştirme çalışmaları kapsamında yüksek lisans tezi olarak türetilmiştir. Bu doktora tezinde ise, kullanılan bu matematiksel model geliştirilerek, bu model ile birlikte çalışan bir kalibrasyon algoritması oluşturulmuştur [8].

2.1 Krank Açısı Bazlı Silindir İçi Parametrelerin Hesabı

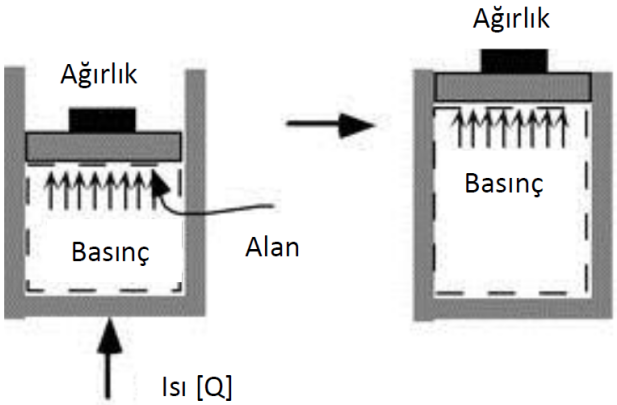
Bir içten yanmalı motorun performans parametreleri olan güç, tork ve yakıt tüketimi hatta emisyon gibi değerler, motorun silindirleri içerisinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal olayların bir sonucunu temsil eder. Bu çıktı parametrelerin doğru hesaplanabilmesi adına, silindir içerisinde meydana gelen bu fiziksel ve kimyasal olayların doğruya en yakın bir şekilde modellenmesini gerektirir.

2.2 Ön Hesaplamalar

İterasyonel bir hesaplama metodu kullanılacak olan içten yanmalı dizel motor modeli için tüm iterasyonların başlangıcında veya her bir iterasyonun kendi başlangıcında ilerleyen bölümlerde tanıtılacak olan hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Temel anlamda motorun ilgili simülasyon adımındaki koşullarının, bilinen değişkenlerden yararlanarak, bilinmeyen ancak hesaplanabilen diğer değişkenlerinin tayinini belirtmektedir.

2.2.1 Enerjinin Korunumu - Termodinamiğin 1. Yasası

Bir sistemin üreteceği iş miktarının belirlenmesi, sisteme dışarıdan sağlanan enerji miktarı ile sistemin iç dinamikleri sonucunda meydana gelen enerji değişikliklerinin detaylı bir analizini gerektirir. Bu süreç, sistemin aldığı toplam enerji ile, sistemin iç



Şekil 2.1 Sisteme ısı girişi yapıldığında hacimde oluşan değişim

yapısında gerçekleşen enerji dönüşüm ve kayıplarının net bir hesaplamasını içerir. Bu enerji dönüşümü, termodinamik ilkeler doğrultusunda, sistemin kendi içinde oluşturduğu veya tükettiği enerji miktarlarını kapsar. Dolayısıyla, bir sistemin yapabileceği iş, bu iki enerji parametresi - sisteme verilen toplam enerji ve sistemin kendi içinde gerçekleştirdiği enerji değişimi - arasındaki fark kadar olacaktır. Bu, sistemin verimliliğini ve enerji kullanımının etkinliğini anlamak için kritik bir hesaplama olup, enerji mühendisliği ve fizik alanlarında temel bir kavramdır. Bu hesaplama, sistemin ne kadar enerjiyi işe dönüştürebileceğini ve enerji kayıplarını en aza indirebilmek için gerekli optimizasyonları belirlemede yardımcı olur [9].

Şekil 2.1 üzerinde değişken hacimli bir sisteme ısı girişi yapıldığındaki değişim gösterilmiştir.

$$dU = dQ_H - dQ_W - pdV \tag{2.1}$$

Mevcut durumda bulunan bir enerji çeşidinin yok edilemeyeceğini, bulunmayan bir enerjinin ise yoktan var edilemeyeceğini açılayan yasaya "Enerjinin Korunumu" yasası denir [10].

Enerjinin korunumu yasasını, bir içten yanmalı motor için özelleştirmek istersek, ortaya çıkacak mekanik işi, basınç ve hacimin bir foksiyonu olarak göstermemiz ve içten yanmalı motorun silindirleri içerisinde meydana gelen yanma sonucu ısı oluşumu ve soğutma sayesinde dışarı atılan ısı ile özleştirilmiş halini 2.1 denklemi ile ifade edebiliriz.

2.2.2 Yakıtın Hesaplanması

Dizel motorlarda kullanılan yakıtlar, doğada bulunan hidrokarbon karşımlarından meydana gelmektedir. Dizel yakıtın kompozisyonu yaklaşık %12.6 H, %87 C ve %0.004 O şeklinde belirtilebilir [9].

Yakıt içerisinde bulunan su ve kükürt değerlerini ihmal ederek söz konusu yakıtın ısıl değeri hesaplanmak istenirse;

$$H_u = [33.91C + 125.6H - 10.89(O - S) - 2.51(9H + W)] \cdot 10^3 \tag{2.2}$$

2.2.3 İş Gazının Hesaplanması

Dizel motorlarında, yanma sürecinin karakteristik özellikleri nedeniyle, otto motorlarında olduğu gibi yakıt ve hava karışımının silindire emilmesi söz konusu değildir. Bu tür motorlarda, silindir içine sadece temiz hava çekilir ve yakıt, sıkıştırma aşamasının sonuna doğru bu temiz havaya doğrudan enjekte edilir. Dolayısıyla, dizel motorlardaki iş gazı esasında yalnızca havadan oluşur.

Ancak, yanma, genişleme ve egzoz safhalarındaki gazın hesaplanabilmesi için, temiz havanın dizel yakıt ile yanması sonucunda meydana gelen " yanma ürünleri bileşenleri" kullanılmaktadır.

2.2.4 Hava Miktarının Hesaplanması

Yakıtın tam ve verimli bir şekilde yanabilmesi için gerekli olan hava miktarı, stokiyometrik oran olarak adlandırılır. Bu, yakıtın tamamen yanması için teorik olarak ihtiyaç duyulan ideal hava miktarını ifade eder ve stokiyometrik hava-yakıt karışım oranı olarak da bilinir [11];

$$L_0 = \frac{1}{0.208}\left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32}\right) \tag{2.3}$$

$$l_0 = \frac{1}{0.23}\left(8 \cdot \frac{C}{3} + 8H - O\right) \tag{2.4}$$

Yakıtın molar kütlesi [9];

$$\mu_a = \frac{l_0}{L_0} \tag{2.5}$$

Alınan taze hava miktarı [9];

$$L = L_0 \cdot \lambda \tag{2.6}$$

$$l = l_0 \cdot \lambda \tag{2.7}$$

Yukarıda bahsedildiği üzere, dizel motorlarda silindir içerisine sadece temiz hava emilimi yapılmaktadır. Silindir içerisine emilen hava ile yakılabilecek yakıt miktarı belirlenerek, silindir içerisine enjekte edilir. Bu sayede taze dolgu meydana getirilir [11].

$$m_1 = 1 + l \tag{2.8}$$

$$M_1 = \frac{1}{m_y} + L \tag{2.9}$$

2.2.5 Emme Süreci Silindir İçi Parametrelerinin Hesabı

Emme sonu gaz basıncı (yanmasız);

$$P_\alpha = P_k - \Delta\rho_\alpha \tag{2.10}$$

$$\Delta\rho_\alpha = \frac{(\beta^2 + \xi) \cdot \omega^2 \cdot \rho_k}{2 \cdot 10^6} \tag{2.11}$$

$$\rho_k = \frac{P_k \cdot 10^6}{287 \cdot T'_k} \tag{2.12}$$

$$T_k = T_o \cdot \left(\frac{P_k}{P_o}\right)^{\left(\frac{n_k - 1}{n_k}\right)} \tag{2.13}$$

Emme sonu ortalama gaz sıcaklığı [9];

$$T_\alpha = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} \tag{2.14}$$

Bu aşamada oluşan sıcaklık farkı ΔT, silindir içerisine dahil ettiğimiz taze havanın, sıcak silindir cidarlarından transfer edilen ısı sebebi ile oluşmaktadır. Dizel motorlarında, sıcaklık artışı genellikle 5 ila 10 Kelvin aralığında değişiklik gösterir. Bir önceki döngü sonrasında motor silindirinde kalmış olan artık gazların miktarını ifade eden katsayı [9];

$$\gamma_r = \frac{P_r \left(T_0 + \Delta T\right)}{T_r \left(\varepsilon P_\alpha - P_r\right)} \tag{2.15}$$

2.3 Krank Açısına Bağlı Parametrelerin Hesabı

Krank mili açısına dayalı hesaplamaları yapmadan önce, motorun emme sürecinin sonunu ve sıkıştırma sürecinin başlangıcını tanımlayan aşamaları (bazı simülasyon yazılımları, bu noktada emme valfinin tamamen kapalı olduğu durumu temel alır) incelememiz gerekmektedir. Bu aşamalarda belirlenen koşullar, örneğin taze hava basıncı ve sıcaklığı, döngünün başlangıcı olarak kabul edilir. Bu kabulün ardından, bir kapalı sistemin içerisindeki hacim, basınç ve sıcaklık değişimlerini detaylı bir şekilde incelemeye başlayacağız.

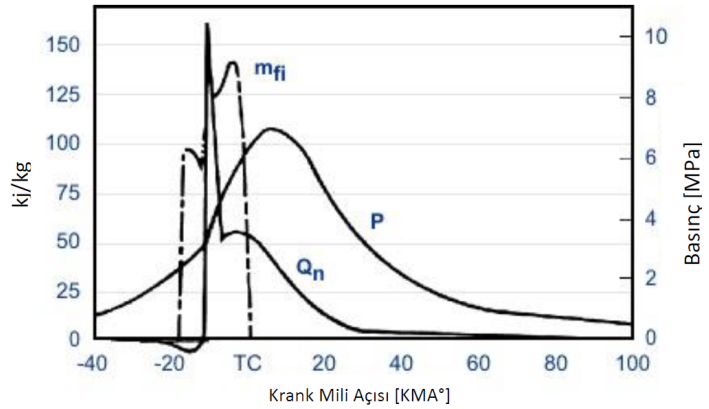
2.3.1 Krank Açısı Cinsinden Silindir Hacminin Hesabı

İçten yanmalı motorlarda bulunan pistonların hareketi, biyel kolu üzerinden bağlı olduğu krank mili ile ilişkilidir. Motorda bulunan pistonun konumunu anlık olarak daha net tanımlayabilmek adına, pistonun bağlı olduğu bu krank milinin kendi ekseni etrafında yaptığı dönme hareketinin açısı kullanılır. Krank açısı sayesinde belirlenen pistonun anlık konumu, ilgili konumdaki silindir içerisindeki hacmi ve bu hacmin değişimini tanımlamış olur. İşte bu hacim değişimi anındaki, basınç ve sıcaklık durumları analiz edilmeye çalışılacaktır [12].

$$V = F_p \omega \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda_s} \right) - \left(\cos(\alpha) + \frac{1}{\lambda_s} \sqrt{1 - \lambda_s^2 \sin^2(\alpha)} \right) \right] \tag{2.16}$$

2.3.2 Tutuşma Gecikmesi

Dizel motorlardaki yanma olayını başlatmak için otto motorlarında kullanılan buji gibi bir tetikleme mekanizması kullanılmamaktadır. Taze dolgunun silindirlere emilmesi sonrasında başlayan ve sıkıştırma stroğu olarak ifade edilen aşamada, krank açısına bağlı silindir hacminde ani bir düşüş meydana gelir. içeriye alınan gazın kütlesinin kayıplar ihmal edilip sabit kaldığı düşünüldüğünde, bu hacim



Şekil 2.2 Açığa çıkan ısının krank açısına bağlı gösterimi

düşüşü sebebi ile, hacim içerisindeki gazın basıncında ani bir artık meydana gelir. Bu basınç artışı ise, bu küçük hacimdeki iş gazının yani havanın sıcaklığını, dizel yakıtının yanabileceği seviyelere kadar çıkartır. Tam bu anda silindir içerisindeki bu küçük hacime bir enjektör vasıtası ile püskürtülür ve bu yakıt-hava karışımında fiziksel ve kimyasal değişimler oluşmaya başlar [12].

Şekil 2.2 üzerinde bir motordaki krank açısına bağlı silindir içerisinde oluşan ısının dağılımı gösterilmiştir.

Yakıtın, silindir içerisine enjeksiyonu, yakıtın sıvı fazında gerçekleşir. Bu sıvı yakıt motora entegre edilmiş bir yüksek yakıt pompası ile çok yüksek basınçlarda silindir içerisine gönderilir. Kullanılan küçük delikli enjektörler sayesinde, bu yüsek basınçtaki yakıt, silindir içerisine enjekte edilirken, çok küçük zerreciklere dönüşür. Bu sayede sıvı fazda olan yakıtın, silindir içerisinde yanmaya hazır sıcaklıklara gelmiş hava ile çok daha iyi karışabilmesi hedeflenmektedir.

Ancak yakıtın tutuşabilmesi için, her ne kadar çok küçük zerrecikler halinde de bulunsa, henüz yakıt sıvı fazdadır. Yanmanın gerçekleşebilmesi için öncelikle yakıtın fiziksel olarak hal değiştirmesi ve gaz fazına geçebilmesi gerekmektedir. İşte bu hal değişimi için, sıvı fazda bulunan yakıtın içinde bulunduğu ortamdan, yani havadan bir miktar ısı enerjisi çekmesi gerekecektir. Bu sayede yakıt gaz fazına geçer ve gaz fazına geçmiş olan yakıt, artık ortamda bulunan hava ile daha fazla karışabilme imkanı bulur. Ancak bu durum tutuşmanın başlayabilmesi için yine yeterli değildir. Gaz fazına geçmiş yakıt, bu kez ortamdan ısı çekmeye devam ederek, tutuşma sıcaklığına ulaşması gerekir. Tüm bu süreç esnasında, yakıtın püstürtülmeden hemen önceki silidir içerisindeki duruma bakacak olursak, hem basınçta hem de sıcaklıkta bir miktar düşüş veya sıkıştırma işlemi devam ediyorsa, sıcaklık ve basınç artış ivmesinde bir miktar azalma meydana gelebilir. Motorun

kalibrasyonuna ve dolayısı ile püskürtme zamanında krank mili açısına bağlı motor hacmine bakacak olursa, silindir içi basınç ve sıcaklıkta anlık sabitlenme dahi görülebilir. İşte tam bu anda, yakıt ve hava karışımı tutuşma sıcaklığına ulaştığında yanma süreci başlamış olur.

Yakıtın, püskütme sonrasında, yanmanın başlangıcına kadar geçirdiği fiziksel süreç, maddenin sıcaklık değişiminin yanında hal değişim süreçlerini de kapsamaktadır. işte bu süreçte yaşanan duruma tutuşma gecikmesi adı verilir.

Bu gecikme, aslında istenen bir durum değildir. Bu gecikme süresi, motor hızına, motor yüküne, ortak ve yakıt koşullarına ve daha bir çok parametreye bağlı değişiklik göstermektedir. Arıcak bu etki, yanmanın başlayacak olduğu krank açısını değiştirmesi sebebi ile, motorun ürettiği gücü ve yakıt tüketimine de doğrudan etki etmektedir. İşte bu sebeple motor kalibrasyonunda, motorun ilgili tüm parametrelerini doğrudan ilgilendirdiği için, motorun farklı işletme şartlarında nasıl bir tutuşma gecikmesi yaşanacağının tam olarak hesaplanabilmesi gerekmektedir.

Eğer tutuşma gecikmesi haddinden fazla gerçekleşir ve kalibrasyon esnasında bu durum tespit edilerek tedbir alınmazsa, yüksek gecikme süresince silindire enjekte edilen yakıt birikerek, ani ve yüksek şiddette bir patlama meydana getirir. Bu ise ani basınç ve sıcaklık yükselmesine sebep olur. Bu duruma dizel motor vuruntusu denir ve motor parçaları için olumsuz etkiye sahiptir [12].

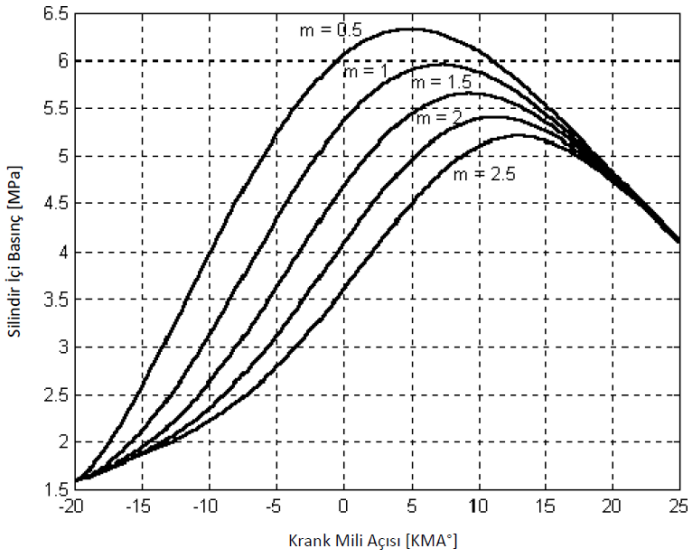
$$\alpha_i = 6n\sqrt{\left(V_0 - \frac{V_c}{V_s} + \frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot \left(\frac{T_o}{P_0}\right)} \cdot 10 \cdot \beta \cdot \exp\left[\frac{\left(V_0 - \frac{V_c}{V_s} + \frac{1}{\varepsilon}\right)^{n_1 - 1} E}{RMT_o}\right] \quad (2.17)$$

Yapılacak olan motor modelinde, tutuşma gecikmesi için Tolstor Formülasyonu kullanılmıştır.

2.3.3 Dizel Yanma Modeli

Silindir içerisine püskürtülen yakıtın yanması sonucunda açığa çıkan ısı [12];

$$dQ_H = \xi_d \cdot H_u \cdot g_c \cdot dx \quad (2.18)$$



Şekil 2.3 Vibe parametresinin değişiminin yanma basıncı üzerindeki etkisi

$$g_c = \frac{n_v \cdot \rho_k \cdot V_h}{\lambda \cdot l_0} \tag{2.19}$$

Bu denkleme göre, x değeri, silindire enjekte edilen yakıtın toplam yanma oranını temsil ederken, dx terimi bu yanma hızının krank mili açısıyla ilişkili olarak ne kadar değiştiğini gösterir.

Şekil 2.3 üzerinde vibe fonksiyonuna bağlı olarak yanma basıncındaki değişim gösterilmektedir.

İçten yanmalı dizel motorların yanma mekanizmasının karmaşıklığı, x değişkeninin hesaplamasının da oldukça karmaşık olacağını öngörmemize neden olur. Bununla birlikte, çeşitli deneysel çalışmalarla elde edilen bazı sıfır boyutlu ısı açığa çıkış modelleri, bu hesaplama sürecini basitleştirmekte önemli bir rol oynamaktadır.

Dizel motorlarda, yanma sürecinin başlaması için harici bir ateşleme mekanizmasının olmaması ve yakıtın kendiliğinden ani ve patlamalı bir şekilde tutuşması, bu sürecin ve x değerinin hesaplanmasını fiziksel ve kimyasal açıdan karmaşık hale getirir. Ancak, yanma dinamiklerini ve ısı açığa çıkışını modellemek amacıyla geliştirilen bazı sıfır boyutlu modeller, bu karmaşık süreci basitleştirerek daha anlaşılır ve yönetilebilir hale getirmektedir. Bu modeller, dizel motorların yanma sürecinin temel özelliklerini basit matematiksel ifadelerle yakalamayı amaçlar [12].

$$x = 1 - \exp\left[-6,908\left(\frac{\alpha}{\alpha_z}\right)^{m+1}\right] \tag{2.20}$$

Dizel motorlar için yanma sürecinin modellenmesi alanında, özellikle yaygın ve tanınmış modellerden biri olan Vibe (Wiebe) modeli, bu konudaki en etkili çalışmalardan biridir. Bu model, dizel motorlarda gerçekleşen yanma süreçlerinin analizinde ve anlaşılmasında kritik bir role sahiptir, çünkü karmaşık yanma mekanizmalarını matematiksel olarak basit ve kullanışlı bir formülasyonla ifade edebilmektedir. Vibe (Wiebe) modeli, yanma verimliliği, emisyonlar ve motor performansı üzerine çalışmalar yürüten mühendisler ve araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir ve dizel motor teknolojisinin gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. Bu model, yanma sürecinin farklı aşamalarını ve bu süreçlerin motor performansına etkilerini daha iyi anlamak için temel bir araç olarak kabul edilir [13].

Hangi yanma modeli seçilirse seçilsin, termodinamik hesaplamaların yapılması sırasında, termodinamiğin birinci yasasına uygun olarak ideal gaz kanunlarından faydalanmak zorunludur. Bu esas prensibe göre, bir sistemin iç enerjisinde gerçekleşen artış, sisteme haricen dahil olan ısı enerjisi ile bu sistemden çıktı olarak elde edilen iş arasındaki farka eşittir. Bu, enerjinin korunumu ilkesini temsil eden temel bir kaidedir ve tüm termodinamik hesaplamaların temelini oluşturur [12] [10].

$$dU = dQ_H - dQ_W - pdV \tag{2.21}$$

$$p \cdot V = R \cdot M \cdot T \tag{2.22}$$

Krank mili hareketine ve bunun sonucu olarak pistonun hareketine bağlı olarak tanımlanan silindir içi hacmin ifadesi [12];

Biyel kolu eğiklik miktarı;

$$\lambda_s = r/l_s \tag{2.23}$$

$$V = F_p{}^{\omega}\left[\left(1 + \frac{1}{\lambda_s}\right) - \left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda_s}\sqrt{1 - {\lambda_s}^2\sin^2\alpha}\right)\right] \tag{2.24}$$

Krank milinin dönüş hızı, Hz

$$\omega = \pi n/30 \tag{2.25}$$

Termodinamiğin birinci kanununa dayanarak ifade edilen ve motordaki yanma sürecinde t_y yerel sıcaklığın hesaplanmasını sağlayan denklem [9];

$$\begin{aligned}\frac{\xi_d \cdot H_u}{\lambda_1 \cdot L_0 \cdot (1+\gamma_r)} + \left[(mc_v)_{t_0}^{t_y} + 8.315\alpha\right] \cdot t_c + 2270\,(\alpha - \mu_1) \\ = \mu_1\,(mc_p)_{t_0}{}^{t_y} \cdot t_y\end{aligned} \tag{2.26}$$

Sabit hacimde gerçekleşen dizel yanma sürecinin ürünleri için belirlenen ortalama molar özgül ısı değeri [9];

$$\begin{aligned}(mc_v)_{t_0}^{t_y} = &\frac{1}{M_{2(\lambda=1)}} \left[M_{CO_2}\,(mc_{vCO_2})_{t_0}^{t_y} + M_{\mathrm{H_2O}}\,(mc_{v\mathrm{H_2O}})_{t_0}^{t_y}\right. \\ &\left. + M_{N_2}\,(mc_{vN_2})_{t_0}^{t_y}\right]\end{aligned} \tag{2.27}$$

$$(mc_{vCO_2})_{t_0}^{t_y} = 39.123 + 0.003349 \cdot t_y \tag{2.28}$$

$$(mc_{v\mathrm{H_2O}})_{t_0}^{t_y} = 26.67 + 0.004438 \cdot t_y \tag{2.29}$$

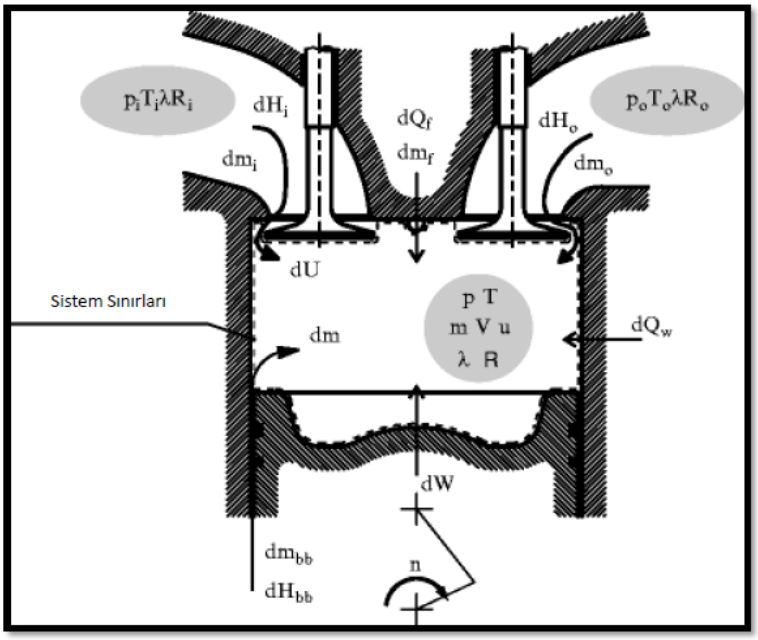
$$(mc_{vN_2})_{t_0}{}^{t_y} = 21.951 + 0.001457 \cdot t_y \tag{2.30}$$

Dizel yanma ürünlerinin, sabit basınç altında oluşan ortalama molar özgül ısı değeri [9];

$$(mc_p)_{t_0}^{t_y} = (mc_v)_{t_0}^{t_y} + 8.314 \tag{2.31}$$

$$k_y = \frac{(mc_p)_{t_0}^{t_y}}{(mc_v)_{t_0}^{t_y}} \tag{2.32}$$

Dizel motorun sıkıştırma sonunda oluşan basınç ile emme sürecinin sonundaki basınç arasındaki orana dayanan, basınç artış oranının miktarı [9];



Şekil 2.4 Silindir içerisindeki enerji dengesi

$$\alpha = \frac{P_j}{P_c} \tag{2.33}$$

2.3.4 Isı Transferi Modeli

Silindir içerisindeki termodinamik süreçleri etkin bir biçimde modellemek için, silindir içindeki ısı transferinin krank milinin konumuna göre anlık olarak doğru bir şekilde tespit edilmesi elzemdir. Woschni bu ihtiyaca cevap vermek amacıyla derinlemesine deneysel incelemeler yapmış ve bu incelemeler sonucunda ısı transferini açıklayan bir ampirik model ortaya koymuştur. Bu geliştirme, motorun çeşitli işletme durumlarında silindir içi ısı akışını daha kesin ve detaylı bir şekilde kavramamıza olanak tanır [12] [14] [5].

Şekil 2.4 üzerinde silindir içerisinde diferansiyel hacim değişimlerine bağlı oluşan kapalı hacmin dengesi gösterilmiştir.

$$Q_w = \int_{\varphi=0}^{720} \sum_i h_{(\varphi)} \cdot F_i \cdot \left(T_{F(\varphi)} - T_{W_i}\right) \cdot d\varphi \tag{2.34}$$

$$h = 110 \cdot d^{-0.2} \cdot P_z^{0.8} \cdot T_z^{-0.53} \cdot \left[C_1 \cdot C_m + C_2 \cdot \frac{V_H \cdot T_1}{P_1 \cdot V_1} \cdot (P_z - P_{Z_0})\right]^{0.8} \tag{2.35}$$

$$C_1 = 6.18 + 0.417 \cdot \frac{C_u}{C_m} \tag{2.36}$$

$$C_1 = 2.28 + 0.308 \cdot \frac{C_u}{C_m} \tag{2.37}$$

$$C_2 = 3.24 \cdot 10^{-3} \tag{2.38}$$

Woschni'nin ısı transferi modelinde ele alınan C_1parametresi, motorun çalışma koşullarındaki değişken sıcaklık ve basınç durumlarına uyum sağlayacak şekilde değişken bir yapıda olmalıdır. Bu bağlamda, modelin, egzoz ve sıkıştırma-genişleme evrelerinde farklı hesaplamalar yapılmasını gerektirir. Bu, motorun çeşitli çalışma durumlarına göre ısı transfer süreçlerinin daha doğru analiz edilmesini sağlar ve modelin uygulama esnekliğini artırır.

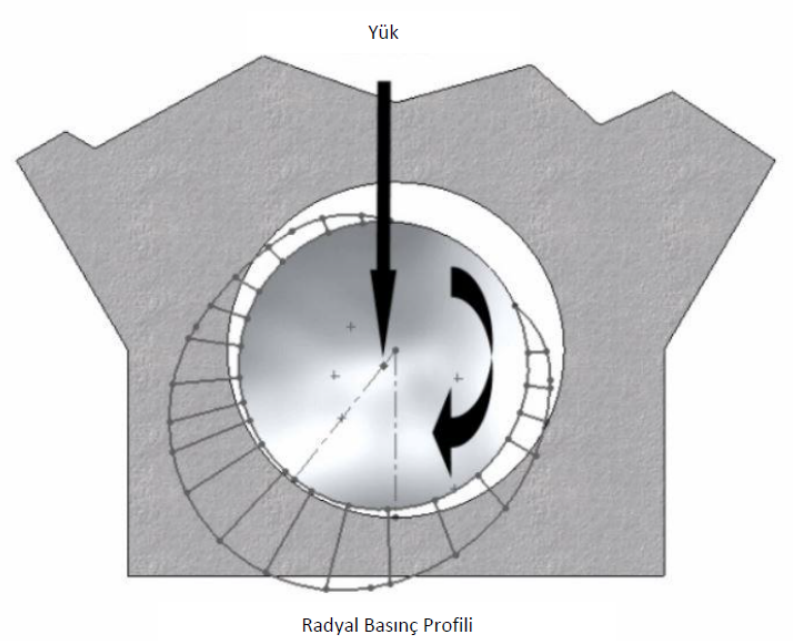
2.3.5 Motor Sürtünme Modeli

İçten yanmalı motorlarda, çoğu sürtünme piston segmanları ve silindir duvarları arasında gerçekleşir. Motor hızlandıkça, artan ortalama piston hızı sebebiyle segmanların daha sık sürtünmesi, sürtünme kayıplarını artırır. Bunun yanı sıra, motor yatakları ile piston ve silindirin yüzeyi arasındaki sürtünmeler sadece motor hızıyla ilgili değildir. Çalışma şartlarına bağlı olarak, silindir içindeki basınç kuvvetlerinin etkisiyle de sürtünme oranları değişebilir [6].

Şekil 2.5 üzerinde krank miline gelen kuvvetler gösterilmektedir.

Motor içindeki yanma basıncının, motorun performansı ve verimliliği üzerindeki etkisi büyüktür. Yanma sırasında oluşan basınç, piston segmanlarının arka yüzeyine baskı yaparak, pistonun silindire dik olarak kuvvet uygulamasını sağlamaktadır. Bu kuvvet sayesinde, piston ile motor bloğunun silindir yüzeyi arasındaki yağ tabakası sıyırılır ve motor içinde, silindir yüzeyinde koruyucu bir yağ filmi oluşacak kadar bir mikrar yağ kalır. Bu yağ filmi, pistonun hareketini kolaylaştırır ve aşınmayı azaltır, aynı zamanda piston ve silindir arasında kaygan bir yüzey sağlar. Ancak, bu süreç sürtünme kayıplarını da artırabilir; bu, motorun yağ film kalınlığını koruması ve fazla yağın yanma odasından uzak tutulması açısından istenilen bir durumdur, çünkü bu sayede yağ tüketimi azaltılır.

Eğer basınç aşırı derecede yükselirse, normal çalışma koşullarının ötesine geçerse, yağ film tabakası gereken kalınlığın altına düşebilir. Bu durum, segmanların silindir



Şekil 2.5 Krank miline gelen kuvvetler

duvarlarını aşındırmasına ve ciddi yıpranmaya neden olabilir. Ayrıca, artan silindir içi basınç, piston, biyel ve krank yataklarında artan kuvvetlere sebep olabilir ve bu bölgelerde sürtünme miktarını artırabilir.

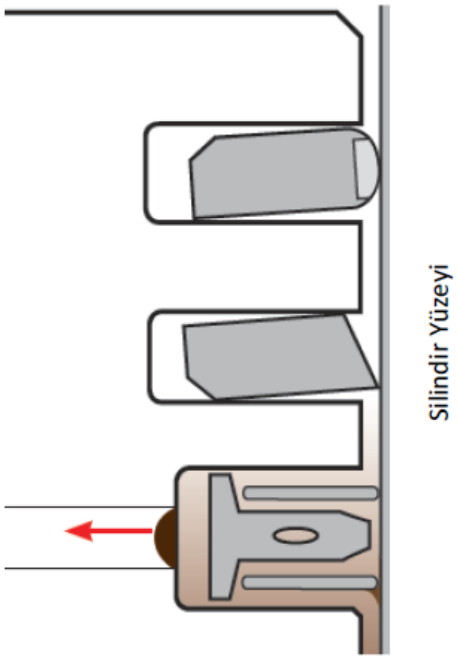
Motorun farklı çalışma hızları ve yük koşulları altında, silindir içi basınç seviyeleri değişkenlik gösterecektir. Bu durum, motorun sürtünme miktarlarının da değişmesine yol açar. Motorun tasarımı ve bakımında bu etkileşimlerin göz önünde bulundurulması, motorun hem verimli hem de uzun ömürlü çalışmasını sağlamak açısından büyük önem taşır [6].

Şekil 2.6 üzerinde silindir yüzeyi ve piston segmanları arasındaki sürtünme mekanizması gösterilmektedir.

$$FMEP = FMEP_{\text{Const}} + A \cdot P_{Cyl,\max} + B \cdot c_{p,m} + C \cdot c_{p,m}^2 \tag{2.39}$$

2.3.6 Krank Açısına Bağlı Silindir Basıncı ve Sıcaklığının Modellenmesi

Şimdiye kadar ele alınan bütün modeller ve hesaplamaları göz önünde bulundurduğumuzda, silindir içindeki sıcaklığın anlık olarak değişkenlik gösterdiğini gözlemliyoruz. Ayrıntısına girdiğimizde, öncelikle, silindirde bulunan taze hava sıkıştırılmaya başlar. Bu sıkıştırma sürecinde, hem sıkıştırma işleminden hem de taze havadan daha sıcak olan silindir duvarlarından gelen ısı transferi sebebiyle hava sıcaklığı yükselmeye başlar. Sıkıştırma devam ederken, taze hava,



Şekil 2.6 Silindir yüzeyi ve piston segmanları arasındaki sürtünme mekanizması

silindir duvar sıcaklığını geçmeye başlar ve bu noktada ısı transferi tersine dönerek, taze hava iç enerjisini silindir duvarlarına ve soğutma suyuna aktarmaya başlar. Ancak, sıkıştırma işlemi hızlı ve yoğun bir şekilde gerçekleştiğinden, havanın sıcaklığı hızla yükselmeye devam eder.

Sıkıştırma işleminin son evresinde, içerideki yüksek basınç ve sıcaklığa sahip hava içerisine ince damlacıklar halinde yakıt yüksek basınç altında enjekte edilir. Yakıtın silindire girişi, üst ölü noktaya yakın bir zaman diliminde gerçekleşir ve bu, kapalı sistemin iç enerjisini artırırken, yakıt ve hava arasındaki ısı alışverişi ve fiziksel değişimler nedeniyle ortalama sıcaklık ve basıncın yanma başlangıcından önceki artış hızını yavaşlatır.

Yakıt ve hava karışımı, belirli bir basınç ve sıcaklık seviyesine ulaştığında, yanma koşulları sağlanır ve birikmiş yakıt "kontrolsüz yanma" fazında yanar. Bu olay, silindir içerisindeki sıcaklık ve basıncın hızla yükselmesine neden olur. Bu evrede aynı zamanda NO_x emisyonlarının büyük bir kısmı meydana gelir.

Tutuşma gecikmesinden kaynaklanan bu hızlı ve kontrolsüz yanma, biriken yakıtın hızla tükenmesine yol açar. Yakıt enjeksiyonunun sürdüğü bu dönemde, yanma süreci daha stabil bir hale bürünür. Bu aşamada, piston üst ölü noktayı aşarak genişlemeye başlar. Yanma sürecinin devam etmesiyle birlikte, basınç ve sıcaklık bir müddet daha artış gösterir. Genişleme evresinde, yakıt enjeksiyonu sonlanmış

olsa da yanma devam eder ve bu durum 'ard yanma' olarak tanımlanır. Piston, üst ölü noktadan ilerledikçe, basınç artışı azalır. Nihayetinde, genişleme sürecindeki silindir içi basınç, pistonun yüzey alanı vasıtasıyla krank mili üzerinde moment oluşturarak motor gücünü üretir.

$$dT = \frac{dU}{(mC_v)_{t_0}^{t_i}} \tag{2.40}$$

$$dP = \frac{R_m M dT}{dV} \tag{2.41}$$

Tüm bu adımlarda, sıcaklık artışı ve buna bağlı olarak basınç değişiklikleri ölçülür. Çevrim tamamlandığında, silindirdeki gözlemlenen basınç değerlendirilir ve sürtünme etkileri dikkate alınarak efektif basınca dönüştürülür. Son olarak, bu efektif basınç kullanılarak motorun tork ve güç değerleri belirlenir.

2.3.7 N_2O Diazot Monoksit ve NO_x Azot Oksit Emisyon Modeli

Azot oksitlerin NO_x oluşumu, sadece içten yanmalı motorlara özgü bir durum olmayıp, hava kullanılan herhangi bir yanma işlemiyle ilişkilendirilebilir. Atmosferdeki nitrogen ve oksijen, yüksek sıcaklık ve basınç altında doğal olarak ve çeşitli yanma süreçleri sırasında birleşerek azot oksitleri üretirler. Bu süreçte, (NO ve NO_x) ana reaktanlar olarak ortaya çıkar ve bu bileşikler atmosferde foto-kimyasal reaksiyonlara girerek hava kirliliğine katkıda bulunurlar. Genellikle kirleticiler olarak benzer özellikleri paylaştıklarından, bu iki gaz genelde topluca NO_x olarak adlandırılır [15] [16].

Bunun yanında içten yanmalı motorlardaki yanma reaksiyonlarında ppm biriminde diğer NO_x bileşikleri ile kıyaslandığında daha az açığa çıkan ancak doğaya özellikle sera etkisi anlamında CO_2 den yaklaşık 300 kat daha çok etkisi olan N_2O gazı da oluşmaktadır.

İçten yanmalı motorlardaki N_2O salımları, motorun yanma odasında yüksek ısı ve basınç altında yakıt ile havanın tepkimesi sonucu oluşur. Bu durum, motorun işletme şartları, kullanılan yakıtın cinsi, yanma sıcaklığı ve motorun çalışma koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Özellikle yüksek sıcaklıkta, atmosferde bulunan azot ve oksijen molekülleri birleşerek nitroz oksit olarak da alınan diazot monotsit formunda N_2O'yu oluştururlar. Bu süreç, otomobiller, kamyonlar, uçaklar ve endüstriyel motorlar gibi birçok kaynaktan meydana gelen emisyonlarla, atmosfere önemli miktarda N_2O salımına neden olur. Bu gazın atmosfere salınımını

azaltmada, emisyon kontrol teknolojileri ve yanma yöntemlerindeki gelişmeler merkezi bir role sahiptir.

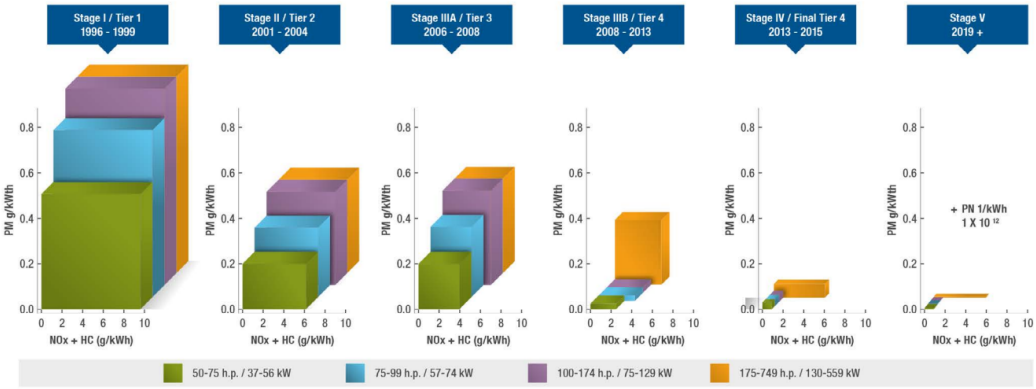
N_2O'nun çevre ve iklim üzerindeki zararlı etkileri, özellikle uzun atmosferik ömrü ve yüksek küresel ısınma potansiyeli ile dikkate değerdir. Atmosferde, karbondioksitten çok daha güçlü bir sera gazı olarak işlev görerek, küresel ısınmaya büyük oranda katkıda bulunur. Bu etkisi, sera gazları içerisinde özellikle endişe verici bir yere sahiptir çünkü birim kütleye göre CO_2'den çok daha etkili bir ısınma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, stratosfere ulaştığında ozon tabakasının incelmesine yol açar ve bu da artan ultraviyole ışınları ile ekolojik dengelerin bozulmasına, tarım ürünlerinin zarar görmesine ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaya neden olur. Bu bağlamda, N_2O salımlarının azaltılması, yerel hava kalitesini korumanın yanı sıra, küresel ısınmayı sınırlamak ve ozon tabakasını korumak için kritik öneme sahiptir. İklim değişikliğiyle mücadelede, bu gazın salımlarını azaltmaya yönelik uluslararası işbirliği, politika geliştirme ve teknolojik yenilikler, geniş çaplı çevresel stratejilerin önemli bir parçasını oluşturmalıdır. Bu yönde atılacak adımlar, gelecek nesiller için daha sağlıklı ve yaşanabilir bir dünya bırakma hedefine katkıda bulunacaktır.

Özellikle dizel motorlar gibi heterojen karışım süreçlerinde, yanma her yerde homojen olarak dağılmaz. Silindir içindeki basınç eşit dağılsa da, sıcaklık dağılımı ve yanma hızları farklılık gösterir. Bölgesel olarak 2000 K civarında sıcaklıklar gözlemlenirken, azot oksitlerin oluşumu için, silindir içi ortalama sıcaklıkların bu seviyelere ulaşması şart değildir. Lokal olarak yüksek sıcaklıklar, azot oksit oluşumu için yeterli olabilir. Ancak, ortalama sıcaklıkların da artışı, azot ve oksijenin karşılaşma oranını artırarak, yanmayan bölgelerde bile NOx oluşumunu tetikleyebilir. Dizel motorlar gibi karmaşık yanma sistemlerinde, NOx oluşum mekanizması, sistemin zaten yüksek olan karmaşıklığını daha da artırır [17] [7].

Ancak günümüzde, bu emisyon mekanizmasını anlamak ve modellemek için birçok yöntem geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Bu teknikler, gerçeğe yakın sonuçlar sağlamakla birlikte, detaylı analizler sunan yazılımların hesaplama hızları henüz yeterli düzeyde değildir [7] [18].

Bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda, içten yanmalı motorlara uygulanan giderek artan emisyon kısıtlamaları dikkate alındığında, yazılım teknolojisinin kullanımı, azot oksit oluşumu gibi karmaşık bir problemin çözümünde bize maliyet ve zaman açısından büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Şekil 2.7 üzerinde emisyon değerlerinin yıllara göre değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Emisyon Standartlarının Motor Güçlerine ve Yıllara Göre Değişimi

$$\frac{dM_{NO}}{d\alpha} = \frac{2\left(1-\beta^2\right)}{6n}\left[\frac{R_1}{\frac{\beta \cdot R_1}{(R_2+R_3)}+1}\right]\frac{10^3 \cdot p}{M_\Sigma R T_z}\text{kmol/KMA} \tag{2.42}$$

Bu denklem üzerinde reaksiyonların, R_1, R_2, ve R_3 iki yönlü oluşum hızları gösterilmiştir.

$$R_1 = k_1' \cdot [NO] \cdot [N] \tag{2.43}$$

$$R_2 = k_2 \cdot [O_2] \cdot [N] \tag{2.44}$$

$$R_3 = k_3 \cdot [N] \cdot [\text{OH}] \tag{2.45}$$

$$k_1' = 3,1 \cdot 10^3 \cdot \exp(-160/T) \tag{2.46}$$

$$k_2 = 6,4 \cdot 10^9 \cdot T \cdot \exp(-3125/T) \tag{2.47}$$

$$k_3 = 4,2 \cdot 10^{13} \tag{2.48}$$

Belirlenen katsayılar, dizel yakıtının hava ile gerçekleşen yanma hızının, azot oksitlerin oluşum sürecinden daha hızlı olması gerçeğiyle ilişkilidir. Yanma süreci sonlandıktan ve yanma sonucu ortaya çıkan ürünler bir denge durumuna eriştikten

sonra dahi, azot oksitlerin oluşumu sürme potansiyeline sahiptir [12] [19].

Daha önceden geliştirilen modellerde, azot oksit oluşumunun hesaplanmasında, yanma sürecinin tamamlanmasını bekleyen ve silindir içi maksimum yanma basıncını esas alan bir yöntem kullanılırdı. Fakat Genişletilmiş Zeldovich Mekanizması'nın devreye girmesiyle, yanma süreci bireysel bölgelere ayrılarak her bir için detaylı hesaplamalar yapılabilir hale geldi. Bu bölgeler ne kadar küçük ayrılırsa, sonuçların doğruluğu o oranda artar [20].

Zeldovich mekanizması, püskürtülen yakıtın tutuşması ve sonrasındaki Mach faktörünün neden olduğu sıcaklık dağılımını incelenmesi gerektiğini belirtir. Örnek olarak, yanma esnasında silindir içinde basınç hızla tüm alanlara yayılır ve her bölgede eşit basınç değerlerine ulaşılır. Fakat, yerel sıcaklık dağılımlarının yayılma hızı bu kadar hızlı değildir. Bu, kısa zaman periyotlarında farklı bölgelerde çeşitli sıcaklık seviyeleriyle karşılaşılacağı anlamına gelmektedir. Azot oksit emisyonlarının oluşumu, bu bölgesel sıcaklık değişimleri ve ilgili gaz basıncı dalgalanmaları ile yakından bağlantılıdır ve bu etkenler göz önünde bulundurulmalıdır [12].

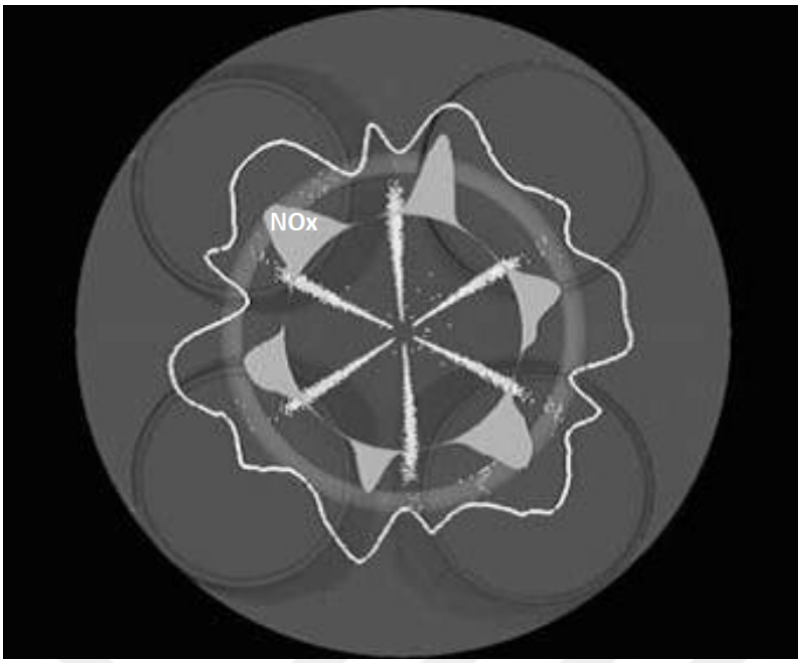
$$T_{y.\text{u.}} = T_y \cdot \left(\frac{p_j + 1}{p_j} \right)^{\frac{k_j - 1}{k_j}} \tag{2.49}$$

Azot oksit emisyonlarının hesaplanmasında, dizel yanmanın sonucunda oluşan sıcaklık dağılımını anlamak adına, yanma odası, eş hacimli bölgelere ayrılır. Bu bölgelerdeki yanma tamamlandıktan sonra, her bölgenin izole edildiği ve diğer bölgelerle ısı veya kütle transferi olmadığı varsayılarak, o bölgenin yerel sıcaklığı temel alınarak azot oksit oluşumu hesaplanır [12].

Şekil 2.8 üzerinde NO_x emisyonlarının oluşum bölgeleri gösterilmektedir. Dizel yanma sonucunda egzoz gazlarında bulunan azot oksitlerin miktarı, yanma işlemi tamamlanmış yakıtın farklı bölgelerde oluşturduğu azot oksit seviyelerinin birikimi olarak tanımlanabilir [12].

$$NO(\alpha) = \sum_{I}^{B} NO_j(\alpha) \cdot \Delta x_j \tag{2.50}$$

Silindir içerisindeki yerel sıcaklıkların hesabı [12];



Şekil 2.8 Silindir içinde NOx emisyon oluşum bölgeleri

$$T_{\text{yerel}} = T'_y \left(\frac{p}{p_{\max}} \right)^{\left(\frac{k_y - 1}{k_y} \right)} \tag{2.51}$$

T'_y maksimum basınç anındaki sıcaklığı tanımlar.

Yanma esnasında, püskürtülen yakıtın çevresindeki tutuşma bölgeleri, basınç değişimleriyle birlikte sıkışma ve genişleme etkilerine maruz kalır. Bu, bölgenin karakteristik özelliklerine bağlı olarak, yerel sıcaklıkların yükselmesine ya da düşmesine yol açabilir. Bu dinamikler göz önünde bulundurularak, henüz yanma gerçekleşmemiş bölgelerdeki sıcaklık değişimleri belirlenebilir ve bu, azot oksit oluşum tahminlerinde önemli bir faktör olarak değerlendirilir [12] [21].

$$T_{kar} = T_c \left(p/p_c \right)^{k_y - 1/k_y}, (K) \tag{2.52}$$

Yapılan araştırmalarda, yanma sıcaklığı ile N_2O değeri arasında bir ilişki olduğu görüldü [22] [23]. Ancak bu ilişti N_2O oluşum mekanizması sebebi ile lineer bir davranış göstermemektedir. Düşük sıcaklık durumlarında N_2O emisyonu beklenildiği üzere, görece az bir miktarda oluşum göstermektedir. Sıcaklık yükseldikçe N_2O oluşumu da buna paralel olarak artmaktadır. Çünkü N_2O oluşumu için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç bulunmaktadır. Ancak sıcaklığın belirli bir değeri geçmesi sonrasında, N_2O oluşumu artma eğilimi göstermemiş, sonuç çıktılarda azalma trendine girmeye başlamıştır. Bunun başlıca sebebi N_2O gazının, yüksek

sıcaklıklarda çok iyi bir yakıcı gaz olarak davranması ve silindir içerisinde bulunan başta karbon atomları olmak üzere, yanma reaksiyonuna girmesi gösterilebilir [23]. Bu sebepe, içten yanmalı motorun çalışma şartlarında, egzoz sıcaklığını artırıcı bir etki meydana geldiğinde, bu nispette N_2O oluşumu, yanma reaksiyonlarına katılması sebebi ile azalış göstermektedir.

Literatürde, içten yanmalı dizel motorlar için türetilmiş bir N_2O hesaplama yöntemi bulunmamaktadır. Ancak N_2O reaksiyonları aşağıda belirtilen şekilde gelişmektedir.

$$\mathrm{NH} + \mathrm{NO} \Rightarrow \mathrm{N_2O} + \mathrm{H} \tag{2.53}$$

$$\mathrm{NCO} + \mathrm{NO} \Rightarrow \mathrm{N_2O} + \mathrm{CO} \tag{2.54}$$

İçten yanmalı bir motorun silindir içerisinde N_2O oluşumu 2.53 ve 2.54 reaksiyonlarında görüldüğü üzer, NH ve NCO ara moleküllerinin, NO ile karşılaşmaları ile meydana gelmektedir [24].

Bu oluşum mekanizması yalnızca oksidasyon bölgesi ile sınırlıdır. Hidrojen atom konsantrasyonunun silindir içerisinde yüksek olması sebebi ile N_2O 2.54 ve 2.55 reaksiyonları ile bozunma gösterir [24].

$$\mathrm{N_2O} + \mathrm{H} \Rightarrow \mathrm{NH} + \mathrm{NO} \tag{2.55}$$

$$\mathrm{N_2O} + \mathrm{H} \Rightarrow \mathrm{N_2} + \mathrm{OH} \tag{2.56}$$

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen 6.5 ve 6.6 test sonuçları incelendiğinde N_2O oluşum trendi ile motorun egzoz gaz sıcaklığı (T_egzoz) değerleri arasında bir bağlantı bulunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, farklı enjeksiyon avansları ve farklı yakıt miktarları ile ortaya çıkan maksimum silindir içi basınç (P_max) ile, N_2O arasında bir ilişki olması gerekmektedir [25].

Bu sebeple, yapılan testlerden elde edilen sonuçlardan N_2O ile T_egzoz ve P_max arasında polinomsal regresyon yöntemi kullanılarak denklem üretilmiştir. Ancak bu denklem için motorda ATS kullanılıp kullanılmaması durumu ayrı ayrı ele alınmıştır.

Yapılacak olan regresyon analizine, testler neticesinde gözlemlenen duruma göre T_egzoz değerinin, N_2O oluşumu üzerinde daha büyük etkisinin olması dolayısı ile T_egzoz değişkeni 2. dereceden ele alınarak dahil edilmiştir. Bu anlamda denklemimiz 2.57 eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$N_2O = \beta_1 \cdot T^2_{\text{egzoz}} + \beta_2 \cdot T_{\text{egzoz}} + \beta_3 \cdot P_{\text{max}} \tag{2.57}$$

Burada, 6.5 ve 6.6 deney sonuçlarının ilk 100 noktası baz alınarak β_1 , β_2, β_3, katsayılarını belirlemek için regresyon yönetmi uygulayacağız. Çözüm için oluşturulan python kodu tablo 2.1 da gösterildiği gibidir.

ATS sistemi kullanılmayan içten yanmalı dizel motorlar için, bu polinomsal regresyon metodonun uygulanarak elde edilen katsayılar neticesinde oluşan denklem aşağıdaki 2.58 denkleminde belirtildiği gibidir.

$$N_2O = -5.41 \times 10^{-6} \cdot T^2_{\text{egzoz}} + 0.00475 \cdot T_{\text{egzoz}} - 0.00302 \cdot P_{\text{max}} \tag{2.58}$$

Bu denklemde belirtilen β_1 , β_2, β_3 katsayıları benzer motorlarda kullanılmak üzere referans alınabilir. Ancak farklı motorlar için eğer bazı test noktalarının tespiti mümkün ise, kurulacak modelin validasyonu sırasında motora özel bu katsayılar farklılaştırarak daha net neticeler elde edilebilir.

ATS sistemlerinin kullanılması durumunda, N_2O değerleri yapılan testlerde artış göstermiştir. 6.5 sonuçlarında görüleceği üzere bu durum ayrı bir denklemin kurulmasını gerektirmektedir. Benzer nitelikteki bir içten yanmalı motorun ATS sistemi kullanılarak test edilmesi durumunda N_2O hesaplamalarında kullanılmak üzere 6.5 testleri referans alınarak ve 2.1 kodları kullanılarak belirlenen denklem 2.59 de belirtildiği şekilde olur.

$$N_2O = -1.04 \times 10^{-5} \cdot T^2_{\text{egzoz}} + 0.00711 \cdot T_{\text{egzoz}} - 1.19 \times 10^{-5} \cdot P_{\text{max}} \tag{2.59}$$

2.4 Model Çıktıları

2.4.1 Yanma Sonu Ürünlerin Bileşim Miktarı

Eksiksiz yanma için bir yakıtın gereksinim duyduğu hava miktarı stokiyometrik hava miktarı olarak tanımlanır, ve bu oran sağlandığında elde edilen karışım

stokiyometrik karışım olarak adlandırılır $\lambda = 1$. Bu, havanın ne fazla ne de eksik olmadığı, tam olarak yanma için gerekli olan ideal oranı ifade eder ve bu durumda hava fazlalık katsayısının değeri ideal durum olan 1 sayısı ile gösterilir. Yakıtın miktarı, var olan havadan daha fazlaysa, bu durum zengin karışım olarak adlandırılır $\lambda < 1$, yani hava yetersizdir. Tersine, püskürtülen yakıt miktarı, mevcut havanın yakabileceğinden daha azsa, bu durum fakir karışım olarak adlandırılır $\lambda > 1$, yani hava fazlası vardır. Fakir karışım durumunda hava fazlalık katsayısı 1'den büyüktür $\lambda > 1$ [26] [27].

Fakir karışım $\lambda > 1$;

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_{N_2} \tag{2.60}$$

$$M_2 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0.208(\lambda - 1)L_0 + 0.792\alpha L_0 \tag{2.61}$$

Stokiyometrik karışım $\lambda = 1$;

$$M_{2(\lambda=1)} = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{N_2} \tag{2.62}$$

$$M_{2_{(\lambda=1)}} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0.792\lambda_1 L_0 \tag{2.63}$$

Yanma esnasında yakıt ve hava tarafından oluşturulan taze dolgu karışımı için, moleküler değişim katsayısı;

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1} \tag{2.64}$$

$$\mu_0 = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O}{32} - \frac{1}{m_y}}{\lambda L_0 + \frac{1}{m_y}} \tag{2.65}$$

2.4.2 Artık Gaz Değerleri

Dizel motorlardaki çevrim sonrası, turboşarj sistemi kullanımı halinde silindir içinde kalan gazın basıncı $P_r = (0.750.98) \cdot P_k$ aralığında değişir. Ayrıca, turbo sonrası hava basıncı $P_k$ise, turbo basınç oranı P_k/P_0 ile dış hava basıncının çarpımı

olarak ifade edilir..

$$P_r = 0.95 \cdot P_k \tag{2.66}$$

Silindir içirisinde yanma sonucunda kalan artık gazların sıcaklığı;

$$T_r = 1600 - 403 \cdot \lambda + 0.037 \cdot n - 7.38 \cdot \varepsilon \tag{2.67}$$

Tablo 2.1 N_2O için kurulan Python regresyon kodu

```
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import numpy as np

# Excel dosyasından test datalarının yüklenmesi
new_file_path = '/2.xlsx'
new_data = pd.read_excel(new_file_path)
new_data.head()

# Gerekli sütunları çıkararak ve sayısal olmayan değerleri içeren satırları atıyoruz
new_df = new_data[2:][['T_EXH', 'PMAX1', 'EM_N2O']].dropna()

# Verileri float'a çevirme
new_df = new_df.astype(float)

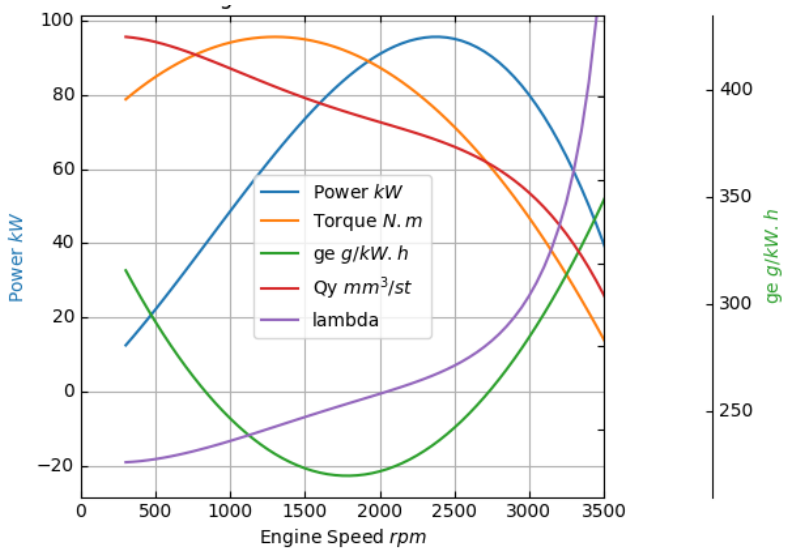
# Veriler için bağımsız değişkenleri (T_EXH, PMAX1) ve
bağımlı değişkeni (EM_N2O) tanımlama
new_X = new_df[['T_EXH', 'PMAX1']]
new_y = new_df['EM_N2O']

# Polinom yapısını tanımlama
new_X_poly_specific =
np.column_stack((new_X['T_EXH']**2, new_X['T_EXH'], new_X['PMAX1']))

# Polinom yapısını Lineer Regresyon modeline uydurma
model_new_data = LinearRegression(fit_intercept=False)
# Sabit terim kapatıldı
model_new_data.fit(new_X_poly_specific, new_y)

#denkleminin katsayıları
beta_1, beta_2, beta_3 = model_new_data.coef_

print(beta_1, beta_2, beta_3)
```



Şekil 2.9 Bir dizel motorun performans eğrileri

2.4.2.1 Ortam Değişkenleri

Turboşarj sistemi olmadığı varsayılan bir durumda, ortam havasının basınç ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak hesaplanan taze dolgu yoğunluğu;

$$\rho_0 = \frac{\rho_0 \cdot 10^6}{287 \cdot T_0} \tag{2.68}$$

2.4.3 Moleküler Değişim Katsayısı

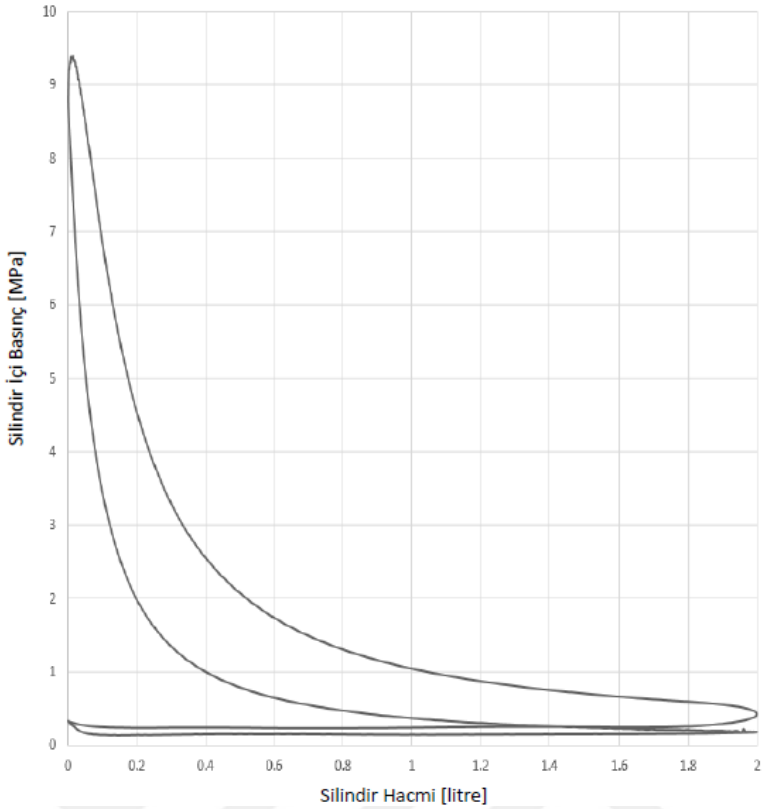
$$\mu = \frac{M_2 + M_r}{M_1 + M_r} \tag{2.69}$$

$$M_r = \gamma_r M_1 \tag{2.70}$$

2.4.4 Motor Performans Değerleri

Motor çevrimlerinin detaylı analizine geçilmeden önce, bu çevrimlerin temelini oluşturan bazı kritik kavramların üzerinde durmak önemlidir. Bu kavramlar arasında motorun gerçekleştirdiği iş, silindirlerdeki indike basınç, motorun ürettiği moment ve güç ile motorun volümetrik verimi bulunmaktadır. Şekil 2.9 üzerinde bir dizel motorun performans eğrilerinin karakteristiği gösterilmektedir.

İçten yanmalı motorlarda, silindir içinde gerçekleşen yanmanın sonucu olarak oluşan yüksek basınç, pistonun yüzey alanına etki eder ve bu da pistona bir kuvvet uygular. Bu kuvvet, piston ve biyel kol aracılığıyla krank miline iletilir. Krank



Şekil 2.10 Bir dizel motorun indikatör diyagramı

milinin yarıçap uzunluğu boyunca bu kuvvetin etkisiyle dönme hareketi oluşur ve bu dönme, motorun ürettiği mekanik işi oluşturur.

$$L = \int F \cdot dx = \int P \cdot A_p \cdot dx \tag{2.71}$$

$$A_p \cdot dx = dV \tag{2.72}$$

Bu formüldeki dV değişkeni, pistonun hareket etmesiyle birlikte silindir içerisinde süpürülen hacmi ifade eder. Bu sayede iş, silindir içi basınç değeri ve silindir hacmine göre ifade edilmek istenirse;

$$L = \int P \cdot dV \tag{2.73}$$

Motorun indikatör diyagramı, krank milinin 720°'lik dönüş süresince yanma odasındaki basıncın, hacim değişiklikleriyle nasıl değiştiğini göstermek için kullanılır. İçten yanmalı motorlar çoğunlukla birden fazla silindire sahip olduğundan, analiz sürecini basitleştirmek adına silindir içindeki kütlenin birim

kütle olarak ele alınması faydalı olacaktır. Bu metodoloji, hacim yerine özgül hacimi ve iş yerine özgül işi kullanmayı gerektirir, bu da hesaplamaları daha basit ve anlaşılır kılar. Ayrıca, bu yaklaşım motorun performans analizlerini ve termodinamik değerlendirmelerini standartlaştırarak, farklı motor tipleri ve yapılandırmaları arasında karşılaştırmalar yapmayı kolaylaştırır. Şekil 2.10 üzerinde bir dizel motorun örnek indikatör diyagramı gösterilmektedir.

$$\omega = W/m \tag{2.74}$$

$$v = V/m \tag{2.75}$$

$$\omega = \int P \cdot dv \tag{2.76}$$

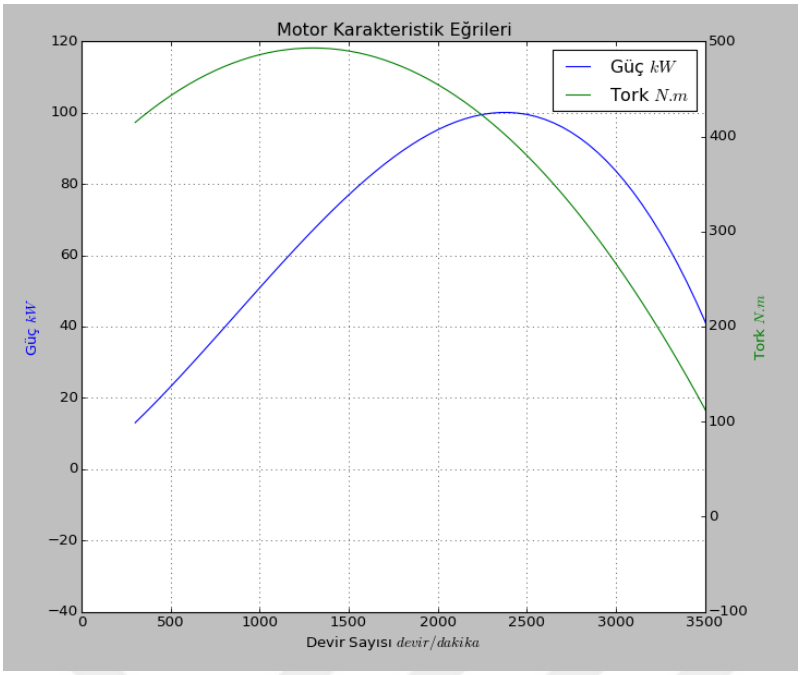
İndikatör diyagramında, AÖN'dan ÜÖN'ya doğru sıkıştırma fazının eğrisini izleyerek başlayalım. Bu hareket sırasında oluşan eğri altı alanı, negatif işi yansıtır. ÜÖN'dan AÖN'ya geri dönerken oluşan eğri altı ise pozitif işi gösterir. Eğrilerin altındaki toplam alanı integral alarak hesapladığımızda, üst kısım pozitif, alt kısım negatif iş olarak değerlendirilir. Pozitif ve negatif işlerin arasındaki fark net işi verir ve bu, indike iş olarak adlandırılır.

Ancak, bu indike iş motorun asıl çıkışı olan volandan elde edilen güç ile aynı değildir. Motorun çalışmasına yardımcı olan ek ekipmanlar (örneğin, yakıt pompası, su pompası vb.) ve motor içindeki sürtünme gibi kayıplar dikkate alındığında, volandan elde edilen net iş, efektif iş olarak adlandırılır ve bu değer, indike işten genellikle daha düşük olur. Bu fark, motorun performans analizinde ve verimliliğinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar, zira motorun gerçekte ne kadar etkili çalıştığını gösterir.

$$\omega_e = \omega_i - \omega_f \tag{2.77}$$

$$\omega_{\text{net}} = \omega_{\text{top}} - \omega_{\text{emme}} \tag{2.78}$$

Motorun volanından alınan efektif iş ile silindir içinde oluşan basınçtan türetilen indike işin oranı, motorun mekanik verimini belirler.



Şekil 2.11 Motordaki tork ve güç değerinin, motor hızına göre ifadesi

$$\eta_m = \omega_e/\omega_i = W_e/W_i \tag{2.79}$$

Moment, ya da motor terminolojisinde daha yaygın olan adıyla tork, genel anlamda bir motorun iş üretme kapasitesi olarak yorumlanabilir. Bu, krank mili boyunca hareket eden kuvvetin kuvvet kolu etrafında yarattığı döndürme momenti olarak ifade edilir.

$$2 \cdot \pi \cdot M = W_e = P_{em} \cdot V_H/i \tag{2.80}$$

Güç, bir motor tarafından üretilen momentin, birim zaman içindeki etkisi olarak tanımlanabilir. Şekil 2.11 üzerinde bir dizel motorun motor hızına göre güç ve tork değerlerinin temsili gösterilmektedir.

$$W = W \cdot n/i \tag{2.81}$$

$$W = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n/i \tag{2.82}$$

$$W = (1/2 \cdot i) P_{im} \cdot A_p \cdot U_p \tag{2.83}$$

$$W = P_{im} \cdot A_p \cdot U_p/4 \tag{2.84}$$

$$\dot{\mathrm{W}}_e = \eta_m \cdot \dot{\mathrm{W}}_i \tag{2.85}$$

Motor gücü, motorun hızı ve o hızda üretilen torkla doğru orantılıdır. Eğer bir motorun torku sabitse, bu torkun daha yüksek devirlerde elde edilmesi, motorun gücünü artırır. Ancak, hızın artması motor içindeki sürtünme kayıplarını da artırır ve bu durum özgül yakıt tüketimini olumsuz yönde etkiler.

Eğer motorun yüksek hızlara çıkması istenmiyorsa veya yakıt ekonomisi önemliyse, sabit bir devirde motorun gücünü artırmak için torkun arttırılması gerekebilir. Bu genellikle, hava fazlalık katsayısı elverişli olduğunda, dizel motorlarda yakıt enjeksiyon miktarının artırılması ile sağlanır. Ancak bu işlem sırasında, silindir içindeki maksimum basınç ve motorun termik yükleri gibi faktörler, motorun yapısal dayanımı ve ısı transfer kabiliyeti açısından dikkate alınmalıdır.

2.4.5 İndike Büyüklükler

Motorun indike parametrelerine odaklandığımızda, bunlar esas olarak silindir içi basınç ölçümlerinden türetilen ortalama indike basınç değerleriyle ilgilidir. Bahsedilen ortalama indike basınç ile, yanma sonunda meydana gelen indike gücün hesaplanması yapılır. İndike güç bilgisi ve yanma için harcanan yakıt miktarı ile birlikte, özgül yakıt tüketimi hesaplanabilir. Bu ifade indike-özgül yakıt tüketimi şeklinde tanımlanır. Motorun sürtünme kayıpları hesaplamalarda göz ardı edildiğinde, elde edilen verimlilik, indike verim olarak adlandırılır.

Silindir içi basınç, yanma sürecinde ve krank mili açısı boyunca değişir. Aynı dönem boyunca motorun ürettiği sabit bir torka karşılık gelen ortalama bir basınç hesaplanabilir. Bu basınç, indike ortalama efektif basınç olarak bilinir ve motorun performansının bir göstergesi olarak kullanılır.

$$\omega = P_{im} \cdot \Delta v \tag{2.86}$$

$$\Delta v = v_{\text{AÖN}} - v_{\text{ÜÖN}} \tag{2.87}$$

Ortalama efektif basınç, motorun hacmi veya gücünden bağımsız bir ölçüttür

ve bu nedenle, farklı güç ve boyutlardaki motorların karşılaştırılmasını sağlar. Bu, motorların yalnızca güç veya hacim gibi değerlere göre karşılaştırılmasının genellikle eksik veya yanıltıcı olabileceği durumlarda önemlidir. Efektif basınç, motor tarafından üretilen efektif işin motorun strok hacmine oranı olarak tanımlanır ve motor performansının daha kapsamlı ve doğru bir değerlendirmesini sunar.

$$P_{em} = \omega_e / V_H \tag{2.88}$$

Teorik olarak, ortalama indike basınç;

$$P_i = \left(\frac{Q_w}{V_h \cdot 1000} \right) - (P_r - P_\alpha) \tag{2.89}$$

Ortalama İndike Güç;

$$N_i = \frac{P_i \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot 1000}{30\tau} \tag{2.90}$$

İndike Verim;

$$\eta_i = \frac{P_i \cdot \ell_0 \cdot \lambda}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_V} \tag{2.91}$$

İndike Özgül Yakıt Tüketimi;

$$b_i = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_i} \tag{2.92}$$

2.4.6 Efektif Büyüklükler

Motorun efektif büyüklükleri, motorun dinamometre testlerinden, doğrudan volan üzerinden alınan ölçümlerle belirlenir. Bu ölçülen tork ile belirli bir motor hızındaki güç değeri, efektif güç olarak adlandırılır. Efektif gücün bilinmesiyle, bu güç seviyesindeki yakıt tüketimi temel alınarak efektif özgül yakıt tüketimi hesaplanabilir. Aynı zamanda, bu veriler kullanılarak motorun efektif verimliliği, yani motorun yakıtı ne kadar etkili bir şekilde güce dönüştürdüğü de belirlenebilir.

Efektif Basınç;

$$P_e = \eta_m \cdot P_i \tag{2.93}$$

Efektif Güç;

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_h \cdot i \cdot n}{30 \cdot \tau} \tag{2.94}$$

Döndürme Momenti;

$$M_e = 9550 \cdot \frac{N_e}{n} \tag{2.95}$$

Efektif Verim;

$$\eta_e = \eta_m \cdot \eta_i \tag{2.96}$$

Efektif Özgül Yakıt Tüketimi;

$$b_e = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_e} \cdot 10^3 \tag{2.97}$$

Yakıt Tüketimi;

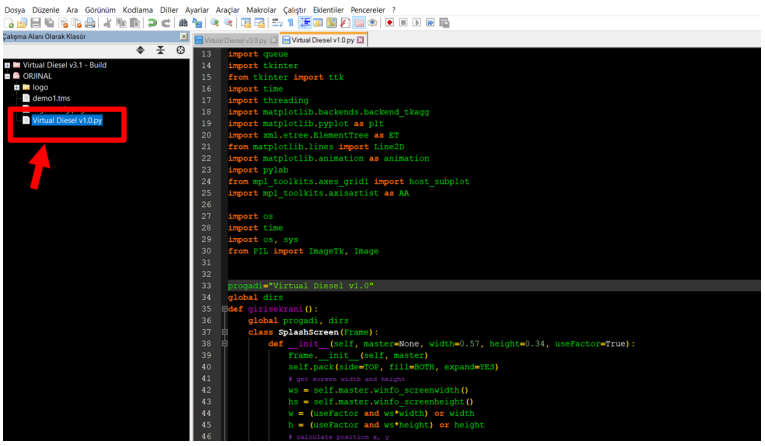
$$G_y = N_e \cdot b_e \cdot 10^{-3} \tag{2.98}$$

3
YAZILIM GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

Tez kapsamında geliştirilmesi hedeflenen algoritma ile çalışacak olan "Virtual Diesel" yazılımının geliştirme aşamaları alt bölümlerde açıklanmıştır.

3.1 Yazılım Mimarisinin Oluşturulması

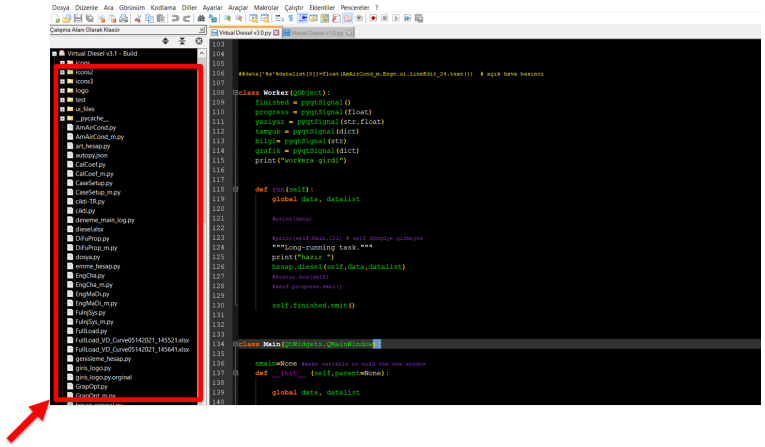
"Virtual Diesel" yazılımının ilk versiyonunu oluşturan ve 3569 satır kod, geliştirmeye ve esnekliğe uygun olmayan tek bir kod bloğu üzerinden çalışmaktaydı. Bu kodlama yöntemi modern olmamakla birlikte, geliştirilmek istenen kalibrasyon algoritmasının önündeki en büyük engellerden biriydi. Bu sebeple, kullanılan matematiksel modellere sadık kalarak, tüm yazılım yeni bir mimari ile tamamen yeniden oluşturulmuştur.



Şekil 3.1 Eski yazılımın tek bloklu yapısı

"Virtual Diesel" yazılımı;18 modüle ayrılarak, her bir modülün kendi içinde bağımsız çalışması ve gerektiğinde diğer modüller ile veri alış verişi yapması sağlanmıştır.Bu sayede, yazılımın iskeleti oluşturulmuş ve yazılıma eklenecek yeni özellikler, diğer bölümlerde değişikliğe gerek kalmadan programlanacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 3.1 üzerinde yüksek lisans tez çalışmasındaki eski yazılım mimarisi gösterilmektedir. Şekil 3.2 üzerinde ise yeni geçiş yapılan mimari

gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Yeni modüler yazılım mimarisinin yapısı

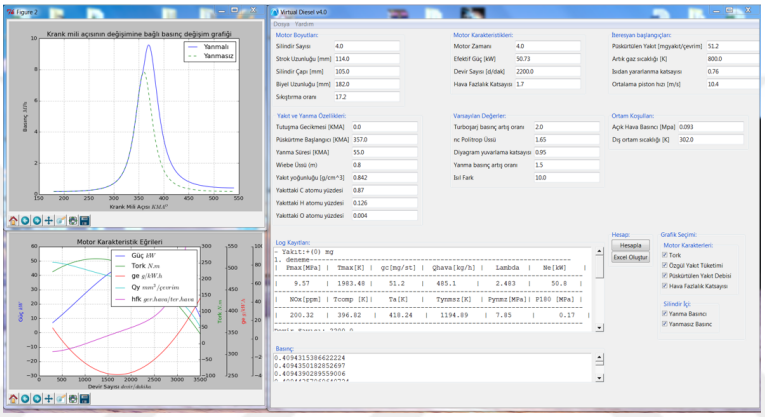
Yeni modüler yapıda kullanılan bölümler aşağıda belirtilmiştir.

- Yazılım Açılış Modülü
- Ana Hesap Modülü
- Ön Hesap Modülü
- Emme Hesap Modülü
- Yanma Hesap Modülü
- Genişleme Hesap Modülü
- Art Hesap Modülü
- CaseSetup Modülü
- Sonuç Rapor Modülü
- Dizel Yakıt Özellikleri Modülü
- Kayıt Dosyası Modülü
- Motor Karakteristikleri Modülü
- Motor Boyutları Modülü
- Yakıt Enjeksiyon Modülü
- Grafik Çizim Modülü
- MainLog Modülü

- Performans Eğrisi Hesap Modülü
- Turboşarj Modülü

3.2 Yazılım Arayüz Güncellemesinin Yapılması

Yazılımın önceki versiyonlarında python yüklemesi yanında hazır gelen bir arayüz kütüphanesi olan «Tkinter» kullanılmıştı. Ancak bu kütüphanenin, sınırlı yeteneği ve modern arayüzlerin görselliğinden ve fonksiyonelliğinden uzak olması sebebi ile, yazılımın arayüzünün yeni bir GUI kütüphanesi ile tamamen yeniden oluşturulması gerekti.



Şekil 3.3 "Virtual Diesel" yazılımının eski arayüz tarasımı

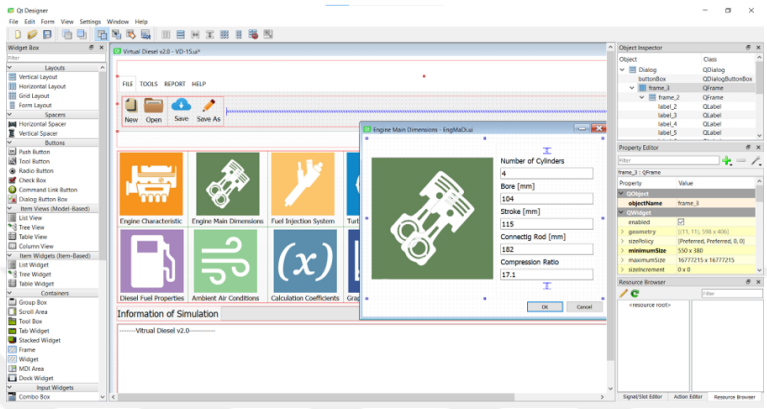
Ancak "Tkinter" kütüphanesinin, sınırlı yeteneği ve modern arayüzlerin görselliğinden ve fonksiyonelliğinden uzak olması sebebi ile, yazılımın arayüzü yeni bir GUI kütüphanesi ile tamamen yeniden oluşturuldu. Şekil **??** üzerinde yazılımın eski arayüzü gösterilmektedir. Şekil 3.6 üzerinde ise yeni yazılımın arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.4 "Virtual Diesel" yazılımının logosu

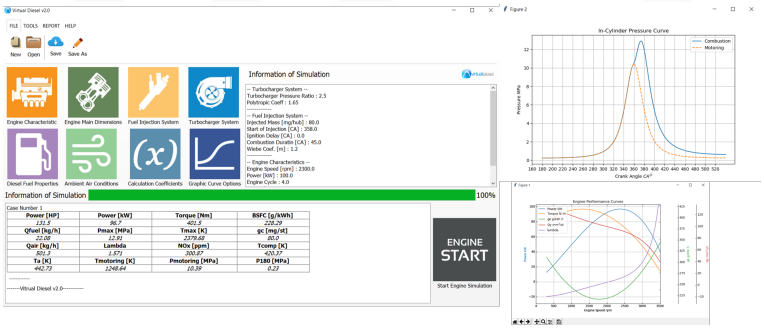
Virtual Diesel yazılımının yeni GUI tasarımında bir çok dünya devi firma tarafından kullanılan çok güçlü bir GUI programlama dili olan "Gt" kullanıldı. Şekil 3.4 üzerinde yazılımın logosu gösterilmektedir.

Temelinde C++ için kod üretilen «Qt», daha sonra python üzerinde "PyQt5" kütüphanesi ile birlikte kullanılabiliyor. Üretilen arayüzlerin "Python" dönüşümü yapılarak, yazılımın hesap modülleri ile haberleşmesi sağlandı.



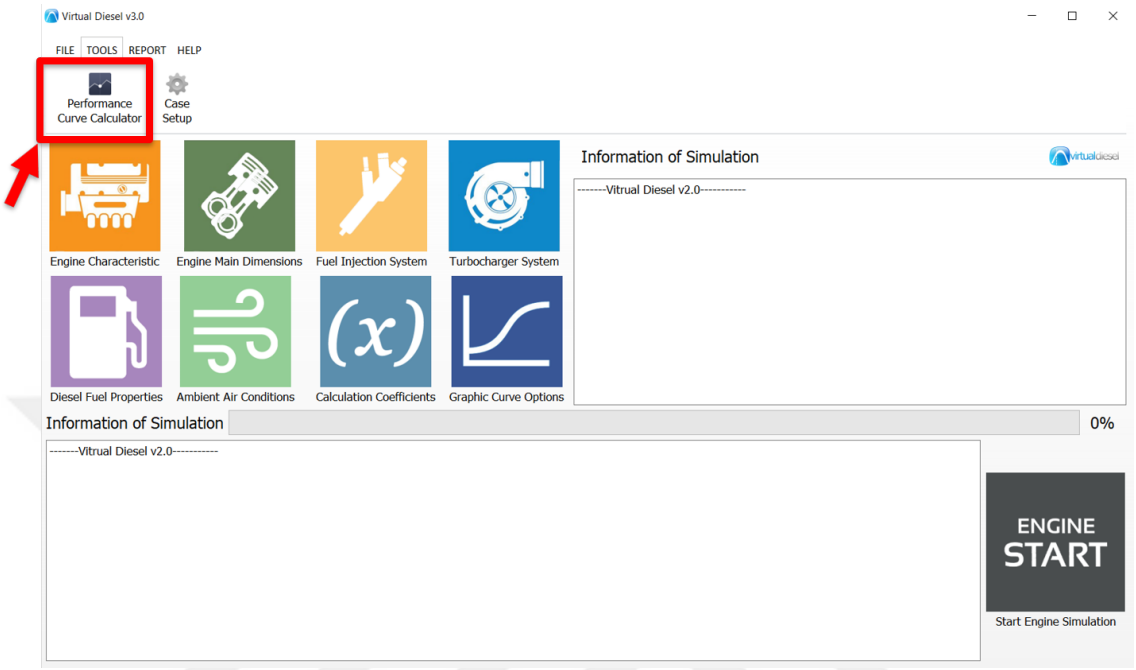
Şekil 3.5 Qt üzeinde GUI geliştirme arayüzü

Geliştirme çalışmaları neticesinde daha modern ve kolay kullanımlı bir arayüz oluşturuldu. Şekil 3.5 üzerinde arayüz tasarım ekranı gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Geliştirme sonrasında ortaya çıkan "Virtual Diesel" yazılımının yeni arayüzü

Yazılım için kalibrasyon modüllerinin geliştirilmesine başlandı.Bu anlamda bir kalibrasyonda temel hedef olan «Tam Yük Eğrisi» nin belirlenmesi için modül oluşturuldu. Şekil 3.7, Şekil 3.8 , Şekil 3.9, üzerinde performans hesaplama modülünün kullanımı gösterilmektedir.

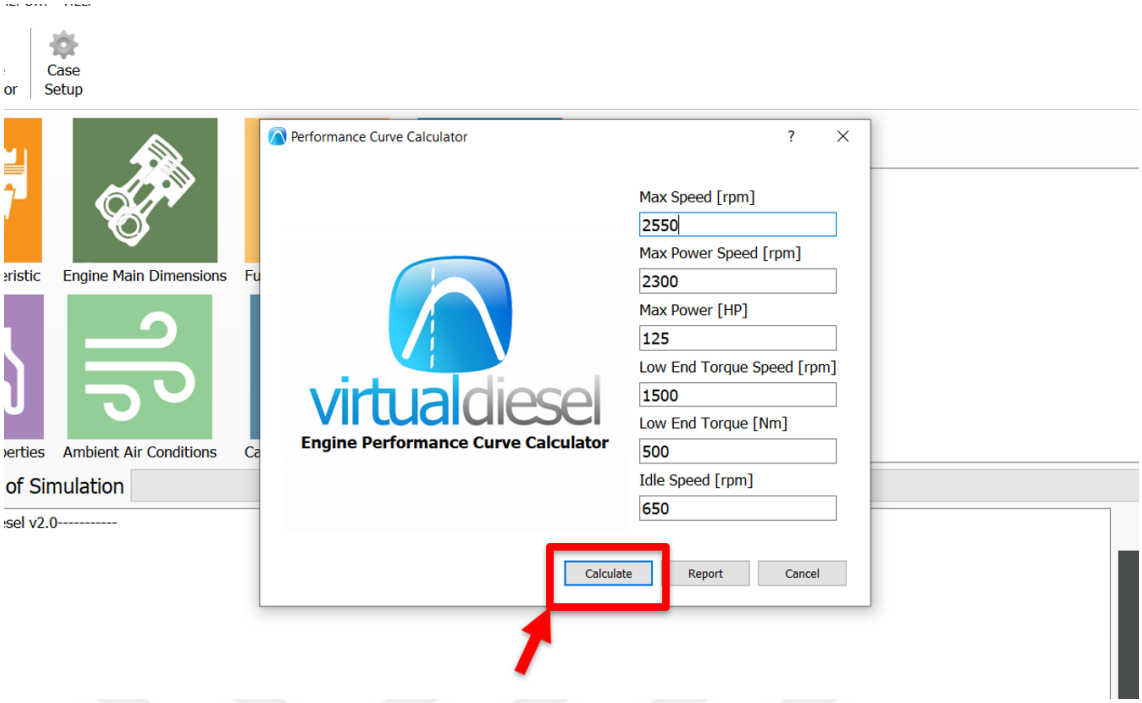


Şekil 3.7 Performans eğrisi hesaplama modülü

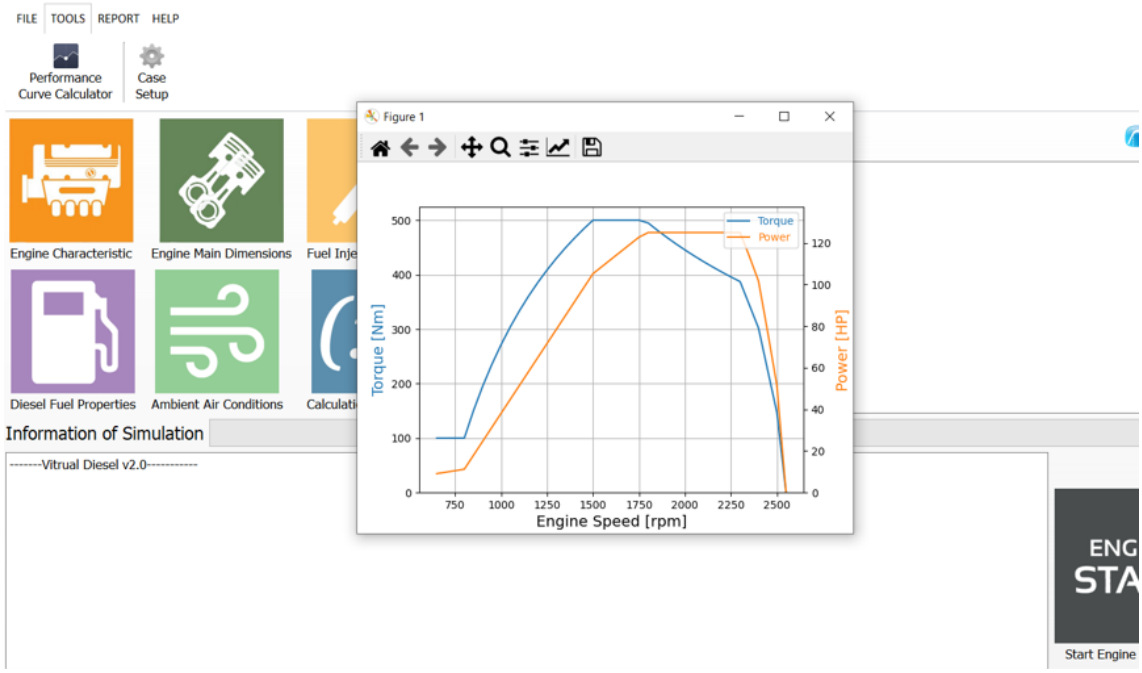
Modül, kalibrasyonu yapılmak istenen motorun temel bilgileri girildiğinde, bu hedeflere uygun eğriyi hesaplamaktadır.

Oluşturulan eğri incelenerek, girilen hedeflerin tutarlı olup olmadığı değerlendirilebilmektedir.

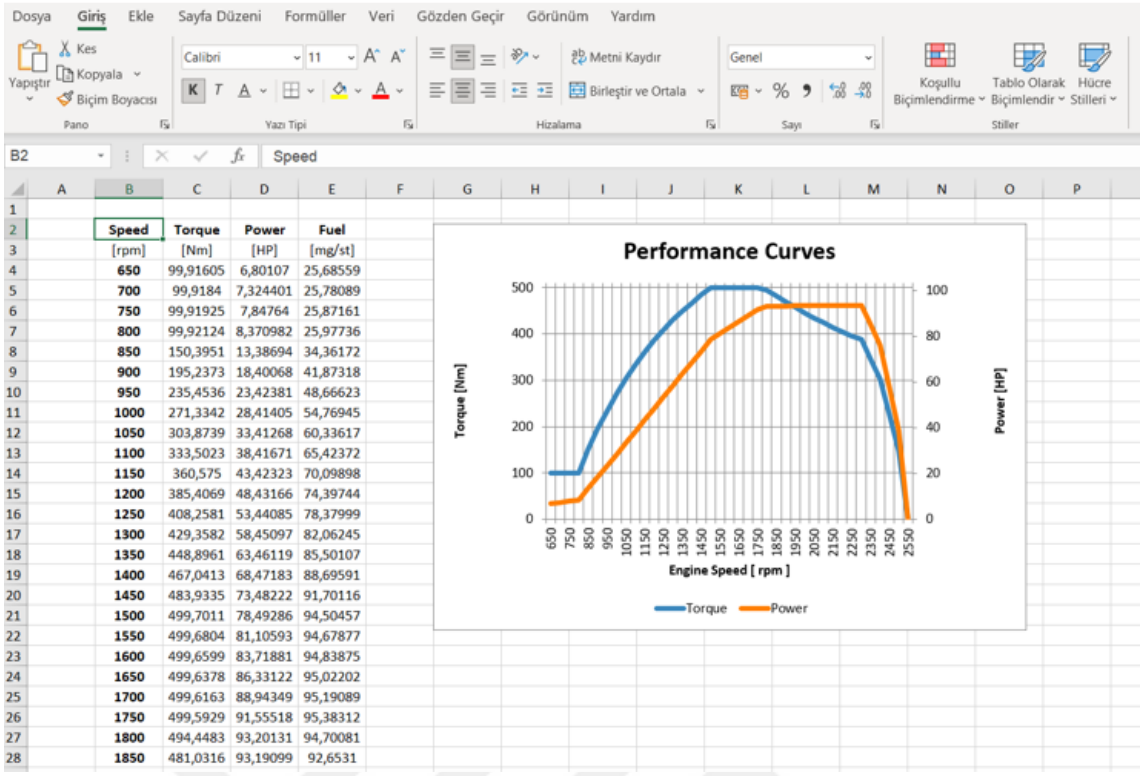
Hedeflenen eğriye ulaşıldığında, eğri değerleri incelenmek üzere excel formatında alınabilmektedir. Şekil 3.10, üzerinde oluşturulan grafiğin excel formatında çıktısı gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Performans hesaplama modülüne gerekli bilgilerin girilmesi



Şekil 3.9 Hesaplanan eğrinin grafiksel olarak çizdirilmesi



Speed	Torque	Power	Fuel
[rpm]	[Nm]	[HP]	[mg/st]
650	99,91605	6,80107	25,68559
700	99,9184	7,324401	25,78089
750	99,91925	7,84764	25,87161
800	99,92124	8,370982	25,97736
850	150,3951	13,38694	34,36172
900	195,2373	18,40068	41,87318
950	235,4536	23,42381	48,66623
1000	271,3342	28,41405	54,76945
1050	303,8739	33,41268	60,33617
1100	333,5023	38,41671	65,42372
1150	360,575	43,42323	70,09898
1200	385,4069	48,43166	74,39744
1250	408,2581	53,44085	78,37999
1300	429,3582	58,45097	82,06245
1350	448,8961	63,46119	85,50107
1400	467,0413	68,47183	88,69591
1450	483,9335	73,48222	91,70116
1500	499,7011	78,49286	94,50457
1550	499,6804	81,10593	94,67877
1600	499,6599	83,71881	94,83875
1650	499,6378	86,33122	95,02202
1700	499,6163	88,94349	95,19089
1750	499,5929	91,55518	95,38312
1800	494,4483	93,20131	94,70081
1850	481,0316	93,19099	92,6531

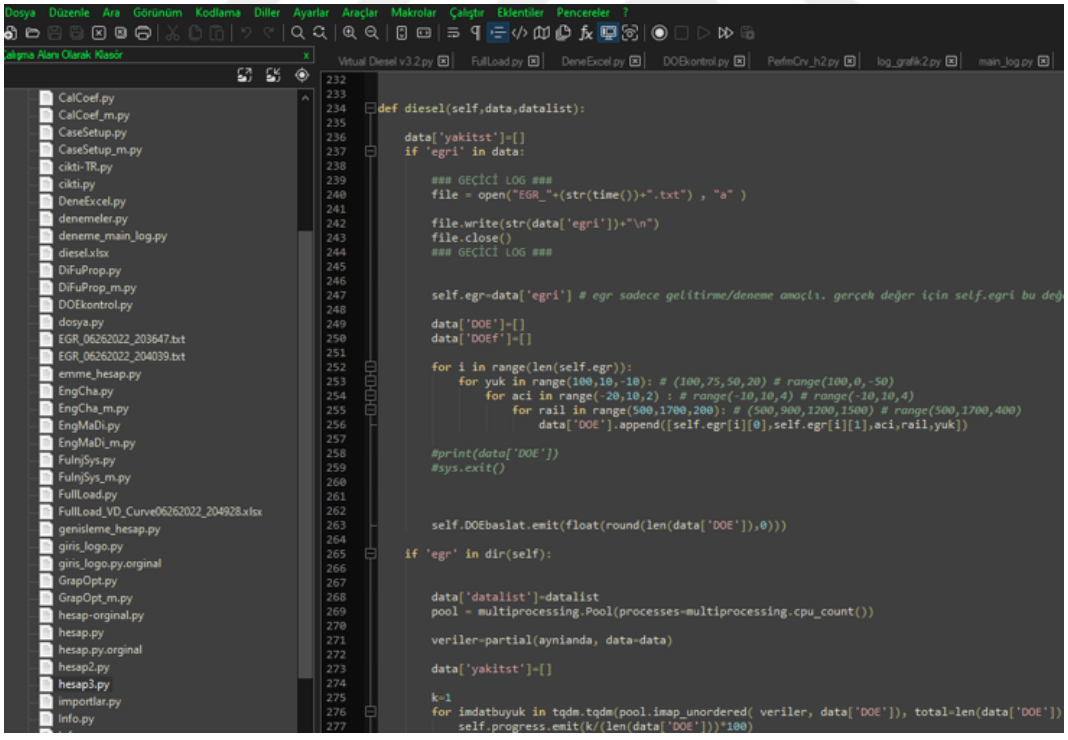
Şekil 3.10 Eğrinin Excel formatında çıktısının alınması

4
YAZILIM MİMARİSİ

4.1 Arayüz Yapısı ve Kullanımı

Yazılım Python Programlama Dili kullanılarak geliştirilmiştir.

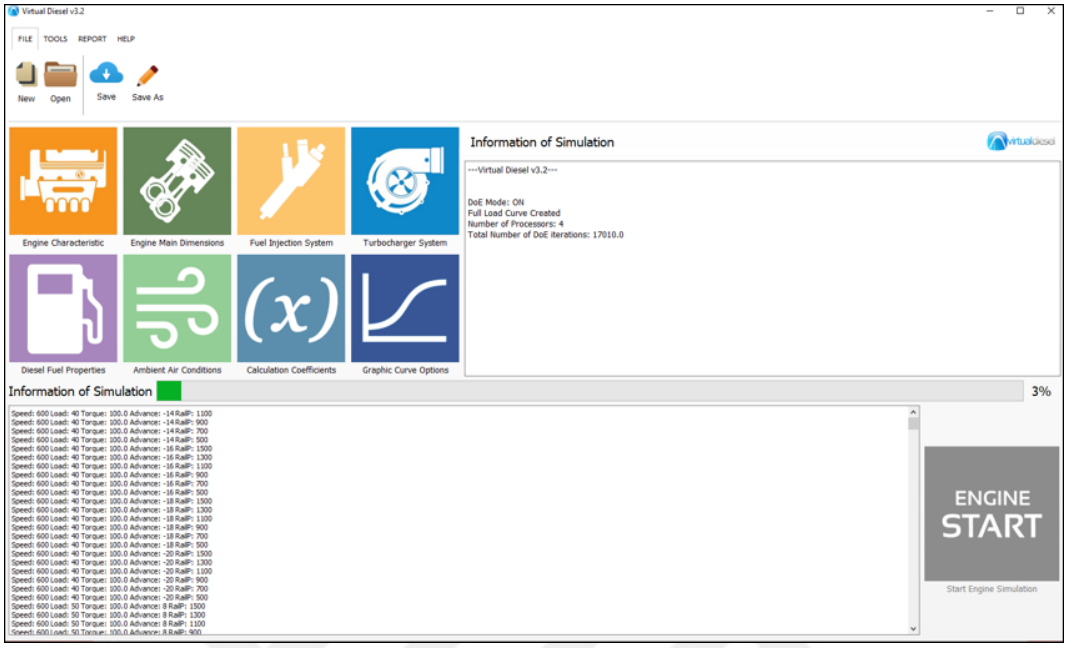
Geliştirilen yazılımda gerçekleştirilecek işlemlerin çok uzun sürüyor olması sebebi ile tek işlemci kullanan yazılım mimarisi yerine, çok işlemci kullanan bir yazılım mimarisine geçilerek «Paralel Programlama» prensiplerine uygun olması için yazılım yeniden kurgulanmıştır.



Şekil 4.1 Yazılımın Kod Görünümü

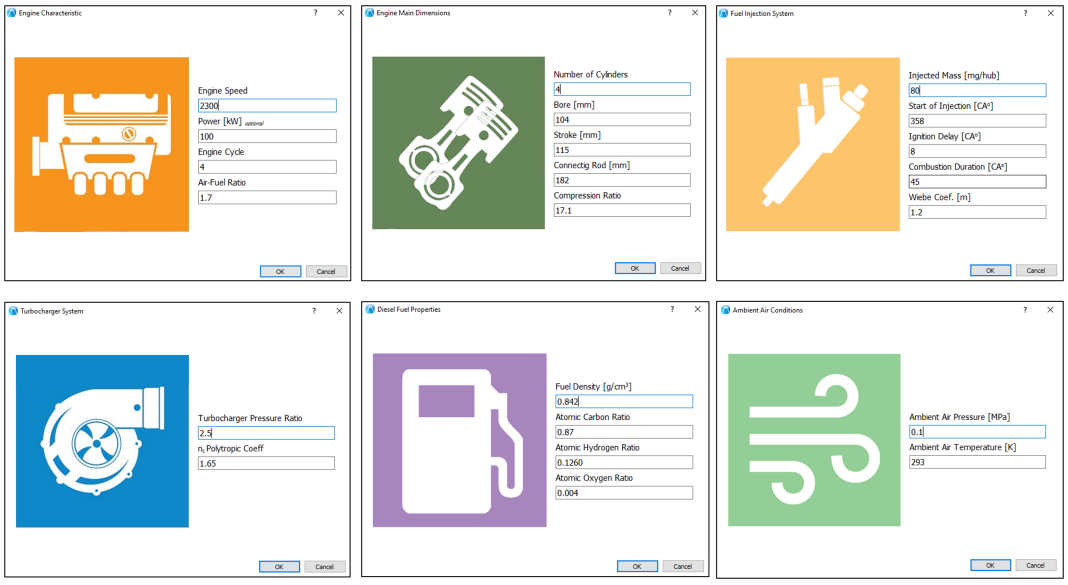
Geliştirilen yazılımın gerçekleştireceği hesapların karmaşıklığı, son kullanıcı nezdinde kalibrasyonu yapılacak olan motorun bir çok parametresinin yazılıma girdi olarak sağlanmasını gerektirmektedir. Bu kapsamı kolaylaştırmak için «Kullanıcı Dostu» bir GUI (Graphical User Interface) tasarımı yapılmıştır. Bu

arayüzün oluşturulması ve tasarlanması için için ise PyQt5 kütüphanesi ve Qtdesigner aracı kullanılmıştır. Şekil 4.1, üzerinde yazılımın kod görünümü gösterilmektedir.



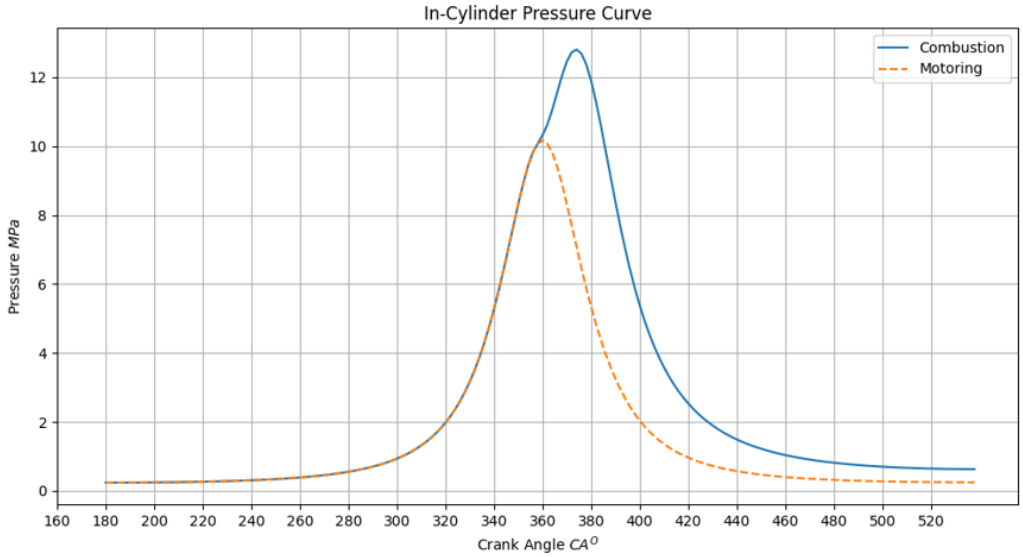
Şekil 4.2 Kullanıcı Arayüzü Görünümü

Otomatik kalibrasyonu yapılmak istenen motorun temel bilgileri, ara-yüz üzerinden programa girilmektedir. Şekil **??**, üzerinde yazılımın yeni arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Motor Bilgileri Giriş Ekranları

Yazılımda, sadece motor parametreleri girildiğinde hesaplama yapılırsa, sadece tek bir nokta için hesaplama gerçekleştirilmekte ve başta Silindir İçi Basınç eğrisi olmak üzere motor parametreleri hesaplanmaktadır. Şekil 4.3, üzerinde yazılımın veri giriş bölümleri gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Hesaplanan Silndir İçi Basınç Eğrisinin Gösterimi

Yazılımda, silindir içi basınç değerinin yanında, aşağıda listelenmiş olan büyüklükler de her bir nokta için hesaplanmaktadır. Şekil 4.4, üzerinde yazılımın oluşturduğu örnek bir silindir içi basınç gösterilmektedir.

- Açık Hava Basıncı - Dış ortamın atmosfer basıncı değeri.
- Adyabatik Üssü - İdeal bir gazın adyabatik (ısı alışverişi olmayan) genişlemesi sırasında basınç ve hacim arasındaki ilişkiyi tanımlayan ifade.
- Artık Gaz Basıncı - Motor silindirinde yanmadan sonra kalan gazların basıncı.
- Artık Gaz Sıcaklığı - Yanma sonucu oluşan ve silindirde kalan gazların sıcaklığı.
- Artık Gazlar Katsayısı - Artık gazların özgül ısılarının oranı.
- Basınç Artış Oranı - Motorun yanma sırasında basıncın ne kadar arttığını gösteren oran.
- Birim Hacimden Elde Edilen Güç - Motorun birim hacim başına ürettiği güç miktarı.
- Dış Ortam Sıcaklığı - Motorun bulunduğu çevrenin sıcaklık değeri.
- Diyagram Yuvarlama Katsayısı - Motor performans diyagramlarının düzenleme katsayı.
- Efektif Basınç - Motorun gerçek çalışma koşullarında ürettiği basınç.

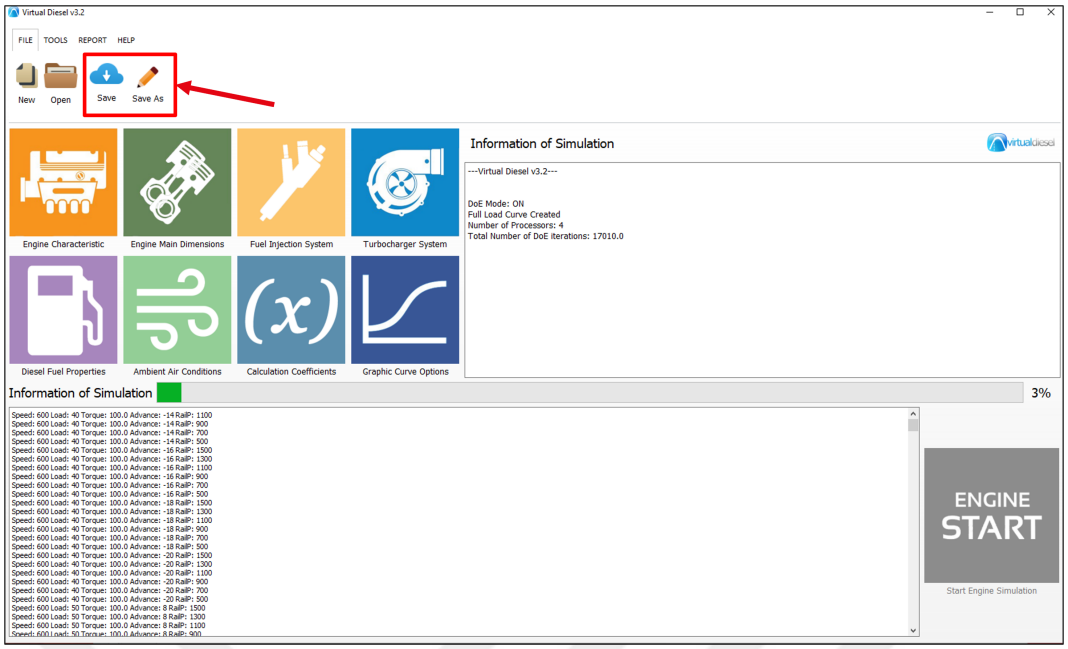
- Efektif Güç - Motorun gerçek çalışma koşullarında ürettiği güç.
- Efektif Özgül Yakıt Tüketimi - Birim güç başına tüketilen yakıt miktarı.
- Emme Basınç Kaybı - Emme işlemi sırasında meydana gelen basınç düşüşü.
- Emme Sonu Basıncı - Emme işlemi tamamlandığında silindirdeki basınç.
- Emme Sonu Sıcaklığı - Emme işlemi tamamlandığında silindirdeki sıcaklık.
- Genişleme Adyabatik Üssü - Genişleme sürecindeki adyabatik değişimin üssü.
- Genişleme Politropik Üssü - Genişleme sürecindeki politropik (ısı ve iş değişimi içeren) değişimin üssü.
- Genişleme Sonrası Oranı - Genişleme işlemi sonrası oluşan oranlar.
- Genişleme Sonu Basıncı - Genişleme işlemi sonrası silindirdeki basınç.
- Genişleme Sonu Sıcaklığı - Genişleme işlemi sonrası silindirdeki sıcaklık.
- Gerekli Minimum Hava - Yanmanın gerçekleşmesi için gerekli olan minimum hava miktarı.
- Hava Fazlalık Katsayısı - Gerçek hava miktarının teorik hava ihtiyacına oranı.
- Isıdan Yararlanma Katsayısı - Motorun Isıdan Yararlanma Katsayısı.
- İndike Verim - Motorun teorik (indike) verimliliği.
- Karışımın Moleküler Değişim Katsayısı - Yakıt-hava karışımının moleküler yapıdaki değişimin ölçüsü.
- Karışımın Yanma Isısı - Yakıt-hava karışımının yanma sırasında açığa çıkardığı ısı miktarı.
- Kayıplar Nedeniyle Azalan Basınç - Çeşitli mekanik ve termik kayıplar nedeniyle azalan basınç değeri.
- Maksimum Yanma Basıncı - Yanma sırasında ulaşılan en yüksek basınç değeri.
- Mekanik Verim - Motorun mekanik bileşenlerinin verimliliği.
- Moment - Motorun ürettiği dönme momenti.
- Motor Zamanı - Motorun çalışma çevriminin tanımı (2-4).

- Ort. Skştrma Molar Özg. Isı (Atık Gazlar) - Ortalama sıkıştırma sürecinde atık gazların molar özgül ısısı.
- Ort. Skştrma Molar Özg. Isı (Hava) - Ortalama sıkıştırma sürecinde havanın molar özgül ısısı.
- Ort. Skştrma Molar Özg. Isı (Çlşma Ortamı) - Ortalama sıkıştırma sürecinde çalışma ortamının molar özgül ısısı.
- Ortalama İndike Basınç - Motorun ortalama indike (teorik) basıncı.
- Ortalama Piston Hızı - Pistonun ortalama hızı.
- Ön Genişleme Oranı - Genişleme işleminden önceki oran.
- Özgül Yakıt Tüketimi - Birim güç başına tüketilen yakıt miktarı.
- Politrop Üssü - İş çevriminin politropik üssü
- Silindire İçine Giren Hava Yoğunluğu - Silindire giren havanın yoğunluğu.
- Silindir Çapı - Motorun her bir silindirinin çapı.
- Silindir Kesit Alanı - Silindirin kesit alanı.
- Silindir Sayısı - Motorun toplam silindir sayısı.
- Silindire Etki Eden Po - Silindir üzerinde etkili olan basınç.
- Silindire Etki Eden To - Silindir üzerinde etkili olan sıcaklık.
- Sıkıştırma Oranı - Motorun sıkıştırma işlemi sırasındaki hacim oranı.
- Sıkıştırma Sonu Basıncı - Sıkıştırma işlemi sonunda ulaşılan basınç.
- Sıkıştırma Sonu Sıcaklığı - Sıkıştırma işlemi sonunda ulaşılan sıcaklık.
- Strok Uzunluğu - Pistonun hareket ettiği mesafe.
- Strok-Çap Oranı - Piston strokunun silindir çapına oranı.
- Taze Dolgu Miktarı - Motor silindirine yeni giren hava-yakıt karışımı miktarı.
- Taze Dolgunun Moleküler Değişim Katsayısı - Yeni giren hava-yakıt karışımının moleküler değişimi.
- Tek Silindirin Hacmi - Bir silindirin hacmi.
- Tek Silindir Püskürtülen Yakıt [mg] - Bir silindire püskürtülen yakıt miktarı.

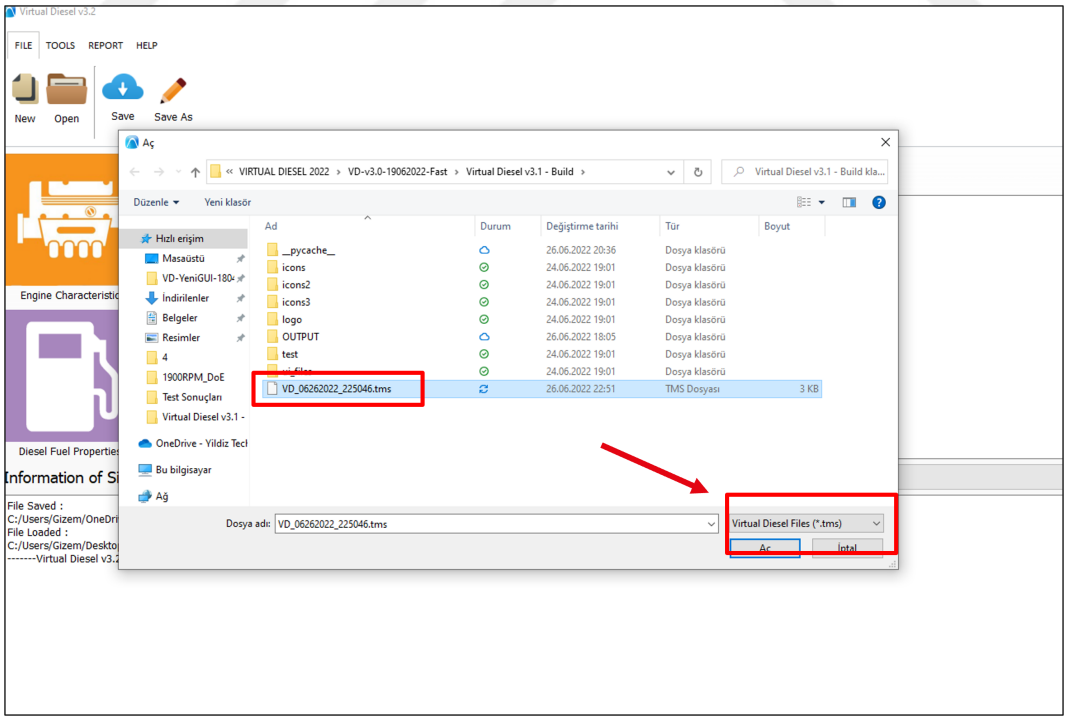
- Termik Verim - Motorun termik verimliliği.
- Toplam Motor Hacmi - Tüm silindirlerin toplam hacmi.
- Volümetrik Verim - Motorun iş gazının ne kadar verimli emdiğinin ölçüsü.
- Yakıt Enerjisi - Yakıtın birim kütlesi başına içerdiği enerji miktarı.
- Yakıt Tüketimi - Zamana bağlı sarf edilen yakıt
- Yakıttaki C Atomu Yüzdesi - Yakıtın içindeki karbon atomunun yüzdesi.
- Yakıttaki H Atomu Yüzdesi - Yakıtın içindeki hidrojen atomunun yüzdesi.
- Yakıttaki O Atomu Yüzdesi - Yakıtın içindeki oksijen atomunun yüzdesi.
- Yanma Sonu Sıcaklığı [C] - Yanma işlemi sonrasında ulaşılan sıcaklık (Celsius cinsinden).
- Yanma Sonu Sıcaklığı [K] - Yanma işlemi sonrasında ulaşılan sıcaklık (Kelvin cinsinden).
- Yanma Sonu CO2 - Yanma sonucu oluşan karbondioksit miktarı.
- Yanma Sonu H2O - Yanma sonucu oluşan su buharı miktarı.
- Yanma Sonu N2 - Yanma sonucu oluşan azot miktarı.
- Yanma Sonu O2 - Yanma sonucu oluşan oksijen miktarı.
- Yanma Ürünleri - Yanma işlemi sonucu oluşan gazlar.
- Devir Sayısı - Motorun dakikadaki devir sayısı.

Programa girilmiş olan datalar, daha sonra kullanılmak üzere tek bir formatta kaydedilebilmektedir.

Programın kendi uzantısı olan .tms formatı ile kaydedilen motor dataları tekrar yüklenebilmektedir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 üzerinde giriş verilerinin kaydedilmesi gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Motor Giriş Verilerinin Kaydedilmesi



Şekil 4.6 Kayıt Verileri İçin .tms Uzantılı Dosya Oluşturulması

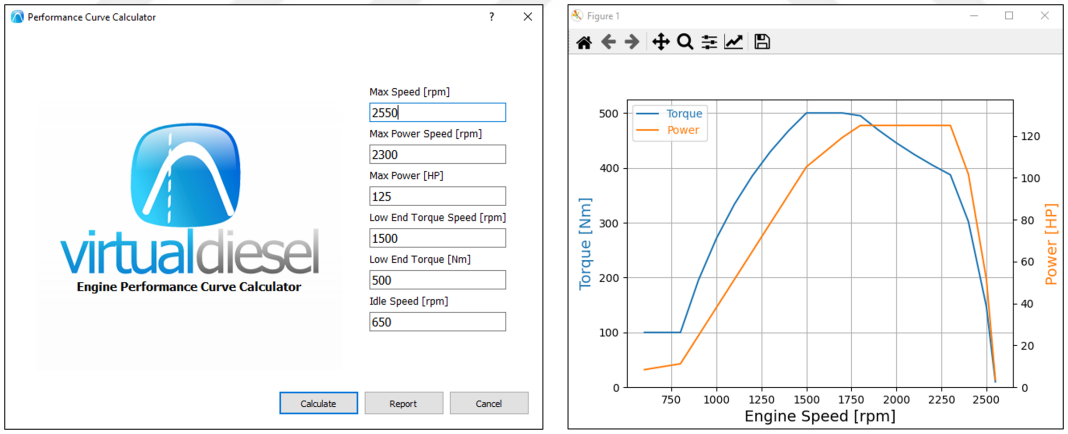


Şekil 4.7 Tam Yük Eğrisi Hesapma Aracına Erişim

4.2 Algoritmanın Yapısı

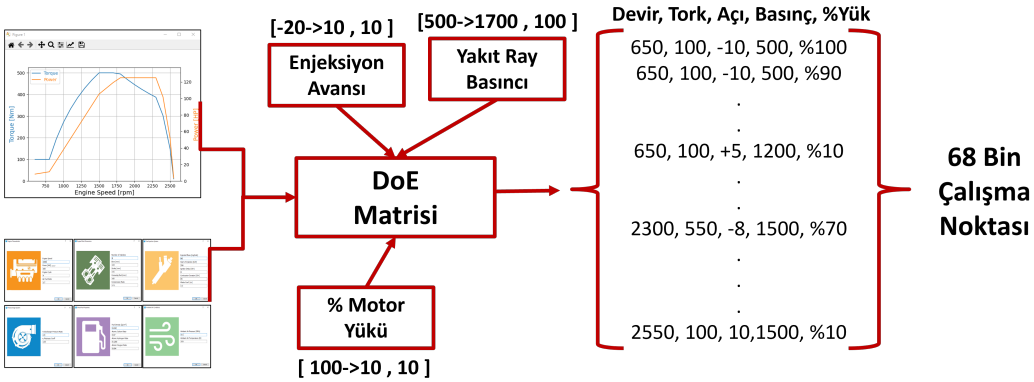
Araçlar bölümünde bulunan «Performans Eğrisi Hesaplayıcısı» ile, kalibrasyonu yapılacak olan motorun temel güç-tork ve devir beklentileri girilerek, performans eğrisi hesaplanmaktadır.

Araçlar bölümünde bulunan «Performans Eğrisi Hesaplayıcısı» ile, kalibrasyonu yapılacak olan motorun temel güç-tork ve devir beklentileri girilerek, performans eğrisi hesaplanmaktadır.

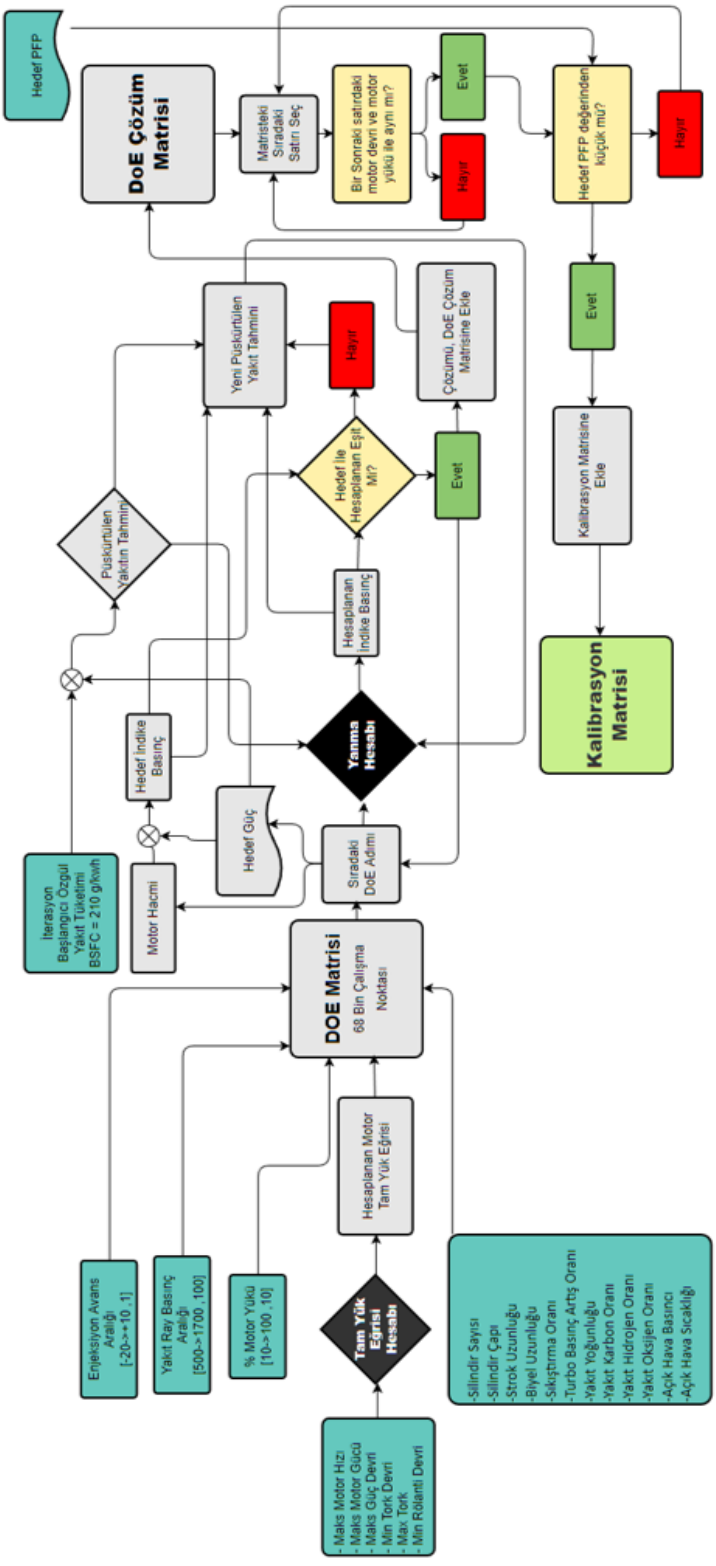


Şekil 4.8 Tam Yük Hesabının Yapılması ve Eğri Oluşumu

İlgili motor parametrelerinin girilmesi sonrasında eğer arayüz üzerinden Performans Eğrisi hesaplanırsa, Yazılımın kalibrasyon modu aktif olmaktadır. Bu modda yazılım çalıştırıldığında bir DoE matrisi oluşturarak otomatik kalibrasyon algoritmasını devreye almaktadır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 üzerinde tam yük hesaplama aracının kullanımı gösterilmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.9 kapsamında oluşturulan veriler Şekil 4.10 içerisinde gösterilmektedir.



Şekil 4.9 Yazılım içindeki DoE Matrisinin Oluşumu



Şekil 4.10 Yazılımın Algoritma Yapısının Bütünü

5
TEST HAZIRLIKLARI

Tez kapsamında oluşturulacak olan algoritmanın geliştirilmesinde ve test edilmesinde kullanılacak olan motor testleri için, öncelikle testlerde kullanılacak olan ölçüm ekipmanları belirlenmiştir. Bu ekipmanların belirlenmesinin akabinde, alınacak olan ölçümlerin motor üzerindeki veya test sistemi donanımı üzerindeki lokasyonlarının belirlenmesi çalışmalarına başlanmıştır.

Tez kapsamında geliştirilmesi hedeflenen algoritma için test edilecek olan motorun montaj çalışmaları, test sisteminin hazırlanması çalışmaları, test motorunun test sistemine entegrasyon çalışmaları, kullanılan ölçüm ekipmanlarının özellikleri ile ilgili detaylar alt bölümlerde açıklanmıştır.

5.1 Test Motorunun Hazırlanması

Kullanılacak olan motor TÜMOSAN firmasının geliştirmiş olduğu 4DCI39E isimli motor Şekil 5.1 içerisinde gösterilmektedir.

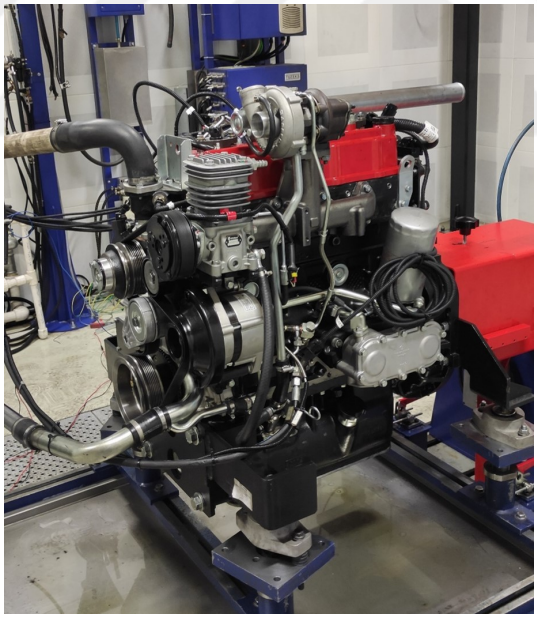


Şekil 5.1 Montajlanması planlanan 4DCI39E motoru

Bu motorun montaj çalışmaları için tüm motorun parçaları, tedarikçilerden tedarik edilerek, TÜMOSAN'ın iç kalite kontrol süreçlerine tabii tutulmuştur. Bu süreçler sonunda, teknik resimlerde belirtilmiş olan imalat töleranslarına uygun olan ve kalite kontrol süreçlerinden başarı ile geçmiş olan motor parçaları, TÜMOSAN Ar-Ge prototip atölyesine teslim edilmiştir.

TÜMOSAN motor teknolojileri müdürlüğü mühendisleri gözetiminde, daha önceden hazırlanmış olan montaj klavuzu yardımı ile, motorun montaj çalışmalarına başlanmıştır.

Test edilecek motorun montaj çalışmalarının tamamlanması sonrasında, Konya TÜMOSAN fabrikası içerisinde ilk çalıştırma denemesi yapılmış ve motorda herhangi bir sorun gözlemlenmemiştir. Motorun ilk çalıştırılması yaklaşık olarak 15 dakika rölanti devrinde kalarak yapılmaktadır. Bu esnada herhangi bir ek test donanımı bağlanmamaktadır ancak motorun elektronik kontrollü olması sayesinde, motor kontrol ünitesine bağlantı yapılarak, motorun kendi üzeirindeki sensörlerinden alınan sinyallerle herhangi bir olumsuz durum olup olmadığı kontrol edilmektedir.



Şekil 5.2 Deney motorunun montaj çalışmalarına başlanması

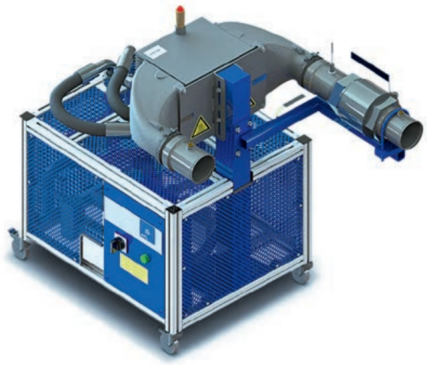
Bu kontrollerden başarı ile geçen motor için aynı zamanda silindir kafasında veya silindir blok kısmında olabilecek herhangi bir döküm veya işleme hatası sebebi ile, motorun yağ hattı ile su hattı arasında herhangi bir kaçak olup olmadığı da kontrol edilmektedir. Bu kontrol kolayca motor karterine su dolumu olup olmadığı kontrol edilerek yapılmaktadır. Şekil 5.2, üzerinde motorun test odasındaki bağlantısı gösterilmektedir.

Montajı tamamlanan ve ilk çalıştırılması yapılan motor, sevkiyata hazırlanarak, TÜBİTAK RUTE Motor Mükemmeliyet Merkezi'ne ait olan TC2 test odasında testlere başlanmak amacı ile Kocaeli iline sevk edilmiştir. TÜBİTAK RUTE TC2 test odasında motorun test sistemine entegrasyonunun yapılabilmesi için, test sisteminde kullanılacak olan ekipmanlar belirlenmiştir.

5.2 Test odası ölçüm sistemleri ve ekipmanları

Tez kapsamında belirlenen donanımların ve sistemlerin teknik özellikleri ilerleyen bölümlerde aktarılmıştır.

5.2.1 Emis havası şartlandırma sistemi



Şekil 5.3 Emiş havası şartlandırma sistemi

İçten yanmalı motorun dinamometre testlerinde, motorun kullanılacağı araç özelinde tasarımı yapılan arasoğutucu (intercooler) bulunmamaktadır. Bu durumun bir kaç sebebi olabilir. Henüz geliştirilmekte olan motor için bir intercooler tasarımı yapılmamış olabilir. Bunun yanında, geliştirilmesi tamamlanmış olan motor için belirlenmiş ve hali hazırda kullanılan arasoğutucusunun, fiziksel olarak test odasına fan sistemleri ile bağlanmasının imkanı olmayabilir. Şekil 5.3, üzerinde motorun emiş havası şartlandırma sistemi gösterilmektedir.

Bu gibi durumlarda, verilen hedef ısı atım değerlerini kW/kW mertebesinde, içerisinde bulunan PID kontrolcüler vasıtası ile sağlayan, bir nevi taşıtlarda kullanılan arasoğutucuyu simüle eden sistemler kullanılır. Aşağıda, bu motor testlerinde kullanacağımız, belirtilen motorun güç, tork ve hava debisi hedeflerinde uygun şekilde seçilmiş bir arasoğutucu sistmein teknik özellikleri belirtilmektedir. Tablo **??** içerisinde hava emiş sisteminin özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 5.1 Emiş havası şartlandırma sistemi özellikleri

EMİŞ HAVASI ŞARTLANDIRICI ÖZELLİKLERİ	
GENEL	
Tür	Consysboost 3000
Laboratuvar bilgisi	TC-3
SN	120
Yaklaşık Motorlar	520kW
Teknik Veriler	
Maksimum Soğutma Kapasitesi	135kW
Hava Şartlandırıcı Sıcak Kontrol Aralığı	15-70°C
Maksimum Hava Şartlandırı Akışı	3000kg/h
Soğut Suyu Rezervi Verileri	
Su Giriş Sıcaklığı	5-30°C
deltaT 6K'da Debi	21m³/h
Soğutma Suyu Basıncı	250-600 kPa



Şekil 5.4 Torkmetre

5.2.2 Torkmetre

İçten yanmalı motor testlerinde motor gücü, motor devrinden ve motor torkundan hesaplanan bir büyüklüktür. Gerçekte testlerde ölçülen motor torkudur. Bu tork değeri ise, aşağıda teknik özellikleri verilen tork ölçüm flanşı ile sağlanmaktadır. Şekil 5.4, üzerinde test sisteminin tork metre sistemi gösterilmektedir. Ayrıca Tablo 5.2 içinde tork metrenin özellikleri belirtilmiştir.

5.2.3 Dinamometre

İçten yanmalı motor testlerinde, bir motorun, araç üzerinde karşılaştığı yükleri ve zorlanmaları, kontrollü bir ortamda motora uygulamak için dinamometreler kullanılır. Bu dinamometreler, motorun araç üzerindeki çalışmalarını birebir

Tablo 5.2 Torkmetre özellikleri

MOTOR DINAMOMETRESI TORK FLANŞ ÖZELLİKLERİ	
GENEL	
Tork Flanş Türü	HBM_T12HP_L_5KNM
Doğruluk Sınıfı	0,02
Laboratuvar Bilgisi	TC-3
Teknik Veriler	
Nominal Tork	5000 Nm
Nominal Devir	14000 rpm
Kütle Atalet Momenti	0,037 kgm²



Şekil 5.5 Dinamometre

simüle edebildiği gibi, bir motorun araç üzerinde ender karşılaştığı zor şartların, sabit bir şekilde uygulanmasını da sağlayabilir. Bu testlede, çalışmayan motora hareket verebilen ve motoru istenilen motor hızında sabit bir şekilde çalıştırabilen "aktif" dinamometre kullanılmıştır. Aşağıda bu dinamometrenin teknik özellikleri belirtilmektedir. Şekil 5.5, üzerinde test sisteminin dinamometresi gösterilmektedir. Tablo 5.3 içerisinde, dinamometre özellikleri gösterilmiştir.

5.2.4 Motor Yağı Şartlandırma Sistemi

Motor için hayati kabul edilebilecek bir element olan motor yağının tipi, basıncı ve sıcaklığı çok önemli parametrelerdir. Motor yağının tipine göre farklı sıcaklıklarda farklı karakteristikler göstermektedir. Özellikle elektronik kontrollü motorlarda, motor yağının ısısına göre motorun çalışma şartlarında optimizasyon ve kalibrasyon çalışmaları yapılması gerekmektedir. Ancak motorun daimi çalışma şartlarında motor yağ sıcaklığı, rejim sıcaklığına kadar daimi şekilde yükselecek ve ara sıcaklık değerlerinde optimizasyon ve kalibrasyon yapacak gerekli zaman kalmayacaktır. Bu yağ şartlandırma sistemleri ise, motor yağını istenilen ara sıcaklıklarda, motorun tam yük altındaki çalışma şartlarında bile sabir bir değerde turarak, bu optimizasyon

Tablo 5.3 Dinamometre özellikleri

MOTOR DİNAMOMETRE ÖZELLİKLERİ	
GENEL	
Motor Dyno Türü	DynoRoad 504/5
Motor Türü	INDY S50-4/3000-1
Laboratuvar Numarası	TC-3
S/N	133075
Teknik Veriler	
Nominal Tork	n=0'dan 1591 rpm'e kadar 3000 Nm
Nominal Güç	400 kW
Nominal Devir	1591 rpm
Maksimum Devir	5800 rpm
Rotorun Kütle Atalet Momenti	4.46 kgm²
Döner Sensör ND End	Heindenhain ROD 426 1024
Ağırlık	2660 kg

ve kalibrasyon için gereken zamanı vermektedir. Ayrıca bu sistemlerin bir diğer avantajı da, normalde araç üzerinde yapılmayan bu testlerde, motor yağının aşırı ısınmasını engellemektir. Tüm bunlara ek olarak, yapılacak olan testlerde, yağ sıcaklığının optimum değere getirilmesi için de zamandan tasarruf sağlar. Şekil 5.6 içerisinde yağ şartlandırma sistemi gösterilmektedir. Ayrıca 5.4 içerisinde yağ şartlama sisteminin özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.6 Yağ Şartlandırma Sistemi

5.2.5 Yakıt Şartlandırma Sistemi

Dizel motorlarda, motor içerisinde püskürtülen yakıt sıvı formdadır. Elektronik motorlarda, motor içerisine enjekte edilen yakıtın miktarını ayarlamak için, enjektörlere gönderilen sinyal süresi gönderilmek istenen yakıta göre optimize edilmelidir. Bu enjektörün açık kalma süresine göre ve yakıt enjeksiyon

Tablo 5.4 Yağ şartlandırma sistemi özellikleri

YAĞ ŞARTLANDIRMA SİSTEMİ ÖZELLİKLERİ	
GENEL	
Türü	ConsysLube 25/50
Laboratuvar Bilgisi	TC-3
SN	1092
Yaklaşık Motorlar	200 kW
Maksimum Soğutma Aralığı	25 kW/50 kW
Teknik Veriler	
Ortam	SAE Oil
Yağ Hacmi (ısıtma yok)	6 I
Çalışma Sıcaklığı	20-150°C
Yağ Sıcaklığı	70-140°C
Kontrol Doğruluğu	±1°C
PID Basınç Kontrol	100-800 kPa
Isıtma Sığası	90kW

sistemindeki ortak hat üzerinde bulunan yakıtın basıncına göre, volümetrik bir debi açığa çıkmaktadır.

Bu volümetrik debiden ziyade, motor gücünü belirleyen ise, motor içerisine enjekte edilmiş olan kütlesel debidir. İçeriye alınan kütlenin ve enerjinin miktarını bu kütlesel debi belirler. Tüm bu sebeplerle enjekte edilen yakıtın yoğunluğu, dolayısı ile yakıtın sıcaklığı büyük önem arz eder. Motora beslenen yakıtın sıcaklığı, yakıtın bir miktarının motordan geçerek, yakıt deposuna geri dönmesi ile değişeceği ve ısınacağı için, yakıtın yoğunluğu da değişmektedir. Bu yakıt sıcaklığının sabit tutulamaması ise, motor kalibrasyon ve test safhasında, motordan alınacak olan gücün de bir oranda farklılaşmasına sebep olacaktır. Bu etkileri ortadan kaldırabilmek adına, yakıt sıcaklığı şartlandırma sistemleri kullanılarak, yakıtın sıcaklığı istenilen değerde sabit tutulabilmektedir. Bu tez kapsamında kullanılan yakış şartlandırma sisteminin teknik özellikleri aşağıda belirtilmektedir. Şekil 5.8 içinde emisyon ölçüm sistemi gösterilmektedir. Ayrıca 5.6 içinde emisyon ölçüm sisteminin tablosu gösterilmektedir.



Şekil 5.7 Emisyon Ölçüm Sistemi

5.2.6 Emisyon Ölçüm Sistemi

İçten yanmalı motorların kalibrasyon çalışmalarının, özellikle emsiyon regülasyonlarına uyumlu bir şekilde yapılması isteniyorsa, mutlaka motorların egzoz gazları içerisindeki kirleticilerin, hassas metotlarla ölçülmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında "AVL AMAi60 COMBI" cihazı kullanılmaktadır. Bu emisyon ölçüm cihazı bünyesinde barındırdığı analizörler sayesinde THC, CH_4, NO/NO_X, CO, CO_2 ve N_2O gazlarının ölçümlerini yüksek hassasiyette alabilmektedir. Şekil 5.7 içinde emisyon ölçüm sistemi gösterilmektedir. Ayrıca 5.5 içinde emisyon ölçüm sisteminin tablosu gösterilmektedir.

Tablo 5.5 Emisyon ölçüm sistemi özellikleri

Özellik	**Birim**
Gerilim kaynağı	230 / 200 / 120 / 100 VAC
Ağırlık	180 kg (standart kabin)
Çevre sıcaklığı	10 – 30 °C / 10 -40 °C (AC)
Nispi nem	%5 – 80, yoğuşmasız
Basınç	900 – 4000 hPa (13 – 58 psi)
Ölçülen gaz bileşenleri	CO, CO2, H2O, NO, NO2, N2O, NH3, CH4, C2H2, C2H4, C2H6, C3H6, C3H8, C4H6, C2H5OH, CH3OH, CH3CHO, CHO, HCOOH, SO2, IC5, NC5, NC8, HNCO, HCN, COS, AHC, NOx, NMHC, HCD, HCG, HCE
Büyük Kabin	670 x 1970 x 1240 mm (g x y x d)



Şekil 5.8 Yakıt Şartlandırma Sistemi

Tablo 5.6 Yakıt şartlandırma sistemi özellikleri

YAĞ ŞARTLANDIRMA SİSTEMİ ÖZELLİKLERİ	
GENEL	
Türü	ConsysLube 25/50
Laboratuvar Bilgisi	TC-3
SN	1092
Yaklaşık Motorlar	200 kW
Maksimum Soğutma Aralığı	25 kW/50 kW
Teknik Veriler	
Ortam	SAE Oil
Yağ Hacmi (ısıtma yok)	6 I
Çalışma Sıcaklığı	20-150°C
Yağ Sıcaklığı	70-140°C
Kontrol Doğruluğu	±1°C
PID Basınç Kontrol	100-800 kPa
Isıtma Sığası	90kW



Şekil 5.9 Enjektör Akım Probu

5.2.7 Enjektör Akım Probu

Mekanik enjeksiyon sistemine sahip geleneksel dizel motorlar, özellikle emisyon regülasyonlarının gelişmesi ve motorlardan daha yüksek yakıt verimliliği beklentisi sebebi ile yerini elektronik enjeksiyon sistemine sahip içten yanmalı dizel motorlara bırakmaktadır.

Bu yeni nesil elektronik enjeksiyon sistemine sahip motorlarda, enjektörün, krank mili açısına bağlı olarak, çevrimin tam anlamıyla hangi aşamasından enjeksiyon yapılması gerektiği, motorun çalışma koşullarına bağlı olarak değişken bir şekilde optimize edilebilmektedir. Bu yetenek sayesinde, bir dizel motorun kalibrasyon testleri aşamasında, mekanik motorlardan çok daha özgür bir şekilde, ilgili motorun istenilen çalışma şartlarına getirilmesi sağlanmaktadır. Şekil 5.9 içerisinde akım probu gösterilmektedir ve teknik özellikleri Tablo 5.7 içerisinde verilmiştir.

Bu gerekli kalibrasyon çalışması yapılırken de, motorun elektronik kontrol ünitesinden, enjektöre iletilen komutun tam olarak doğru aktarılıp-aktarılmadığı, bu tip yüksek frekanslı akım probları ile mümkün olmaktadır. Bu sayede krank mili açısına bağlı olarak, her bir enjeksiyon için, enjeksiyon başlangıcı ve enjeksiyon süresi tayin edilebilmektedir.

5.2.8 Hava Debimetresi

İçten yanmalı motorlardaki en önemli parametrelerden biri olan hava fazlalık katsayısı (lambda) değerinin tayini için, yakıt tüketimi ile birlikte hava debisinin de ölçülmesi gerekmektedir. Motorun daimi şartlarında lambda değerinin anlık olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için kalibrasyon süreçlerinde, motor üzerinde bulunan sensörlerden çok daha hassas ekipmanlar ile, motorun tüm çalışma noktaları için bu değer belirlenerek, daha sonra motor üzerindeki

Tablo 5.7 Enjektör Akım Probu

AKIM PROBU	
Teknik Özellikleri	
Nominal Akım Kademesi	10-100A (AC/DC)
Sürekli Akım Kademesi	0.1 - 10 A , 1-100A (AC/DC)
Zararlı Olmayan Maks. Akım	140 A - 2 kHz
Ölçülebilen En Düşük Akım	0.1 A
Temel Doğruluk	3% + 50 mA (@ 10 A)
Kullanılabilen Frekans	DC - 100 kHz
Çıkış Seviyeleri	10 mV/A- 100 mV/A



Şekil 5.10 Hava Debimetresi

sensörler ile ölçülen ya da hesaplanan hava debisi değerinin karşılaştırması ve doğrulamasının yapılması gerekmektedir. Bu hava debisi ölçümleri için tez kapsamında kullanılacak olan hava debimetresinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

5.2.9 Su Debimetresi

İçten yanmalı motorlarda motordaki ısıl rejimin ve ısı dağılımının tespit edilmesi kritik öneme sahipdir. Isı dağılımının tespitinde, kullanılacak olan motor soğutma sisteminin kapasitesinin belirlenmesi, motor elemanları üzerindeki ısıl yükün tayini; su pompası, yağ eşanjörü varsa EGR soğutucu gibi alt sistemlerin ve parçaların özelliklerinin belirlenmesi amacı ile motor suyuna atılan ısının, motorun her bir çalışma noktası için belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, motorun giriş ve çıkışından alınan motor suyu sıcaklık ölçümlerinin yanında, motor suyunun debisinin de tam olarak belirlenmesi gerekmektedir. Aşağıda bu tez kapsamında kullanılacak olan su debimetresinin teknik özellikleri belirtilmiştir. Şekil **??** içerisinde su debimetresi gösterilmektedir. Tablo 5.8 içerisinde de debimetrenin teknik özellikleri gösterilmektedir.

5.2.10 Silindir İçi Basınç Sensörü

Bir içten yanmalı motordaki alınan en önemli ölçüm, krank açısına bağlı silindir içi basınç ölçümüdür. Bu ölçümden elde edilen indikatör diyagramı üzerinden,



Şekil 5.11 Su Debimetresi

Tablo 5.8 Su Debimetresi

Su Debimetresi	
Model	RSTLD-500-4-1-1-1-1-G-A-B
Seri No	20080043
Nominal Basınç	4.0 Mpa
Doğruluk	±0.5%
Nominal Çapı	50 mm
Elektrot Malzemesi	316L
Koruma	IP65
Sıcaklık Aralığı	-10. . . . .+120 °C



Şekil 5.12 Silindir İçi Basınç Sensörü

Tablo 5.9 Silindir İçi Basınç Sensörü

Silindir İçi Basınç Sensörü		
Tür	6045BU48-3-1	
Kalibre Aralığı (bar)	Hassasiyet (bar)	
0-250 (250°C)	-35,51	
0-200 (250°C)	-35,51	
0-150 (250°C)	-35,54	
0-100 (250 °C)	-35,53	
Bütün aralıklarda Doğrusallık(23°C'de)	%FSO	$\leq .03$
Hızlanma Hassasiyeti	eksenel=bar/g	≤ 0.0015
	radyal=bar/g	≤ 0.0002
Çalışma Sıcaklık Aralığı	°C	-20 . . . 350
Sıcaklık , min./maks.	°C	-40 . . . 400
Hassasiyet Kayması	RT . . . 350 °C = %	≤ 1
	250 °C ± 100 °C = %	≤ 0.5
20 °C'de Yalıtım Direnci		≥ 10
Sıkma Torku	N	6
Kapasitans (kablosuz)	pF	11
Kablolu Ağırlık	g	26,00
Konnektör, Seramik Yalıtkan		M4x0.35

motorun termodinamik hesaplamaları yapılarak, motoru oluşturan yük altındaki tüm parçaların tasarımına çıktı üretilmektedir. Ayrıca motor performansının ana göstergesi olan bu indikatör diyagramı üzerinden, motorun ana optimizasyonu yapılarak, hedef güç ve yakıt tüketimi gibi parametreler de dahil olmak üzere, motorun kalibrasyon çalışmaları yürütülmektedir.

Ayrıca elde edilen bu indikatör diyagramından, motor özelinde gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları için kurulan motor modellerinin doğrulama çalışmaları da gerçekleştirilmektedir. Bu sanal motor modelleri sayesinde, motorun gerçekte ölçülemeyen, ortalama silindir içi sıcaklığı gibi bazı parametreleri de belirlenebilmektedir. Şekil 5.12 içerisinde silindir içi basınç sensörü gösterilmektedir. Ayrıca Tablo 5.9 içerisinde de silindir içi basınç sensörünün teknik özellikleri verilmiştir.

5.2.11 Motor Üzerinde Bulunan Diğer Sensörler

Tez kapsamında test edilecek motorun üzerinde, önceki bölümlerde bahsedilen sensörlerin dışında, tüm gaz ve sıvı akışkanlarının durumunu tayin etmek adına sıcaklık ve basınç sensörleri bulunmaktadır. Bu sensörler tablo ve şema olarak belirtilmiştir.

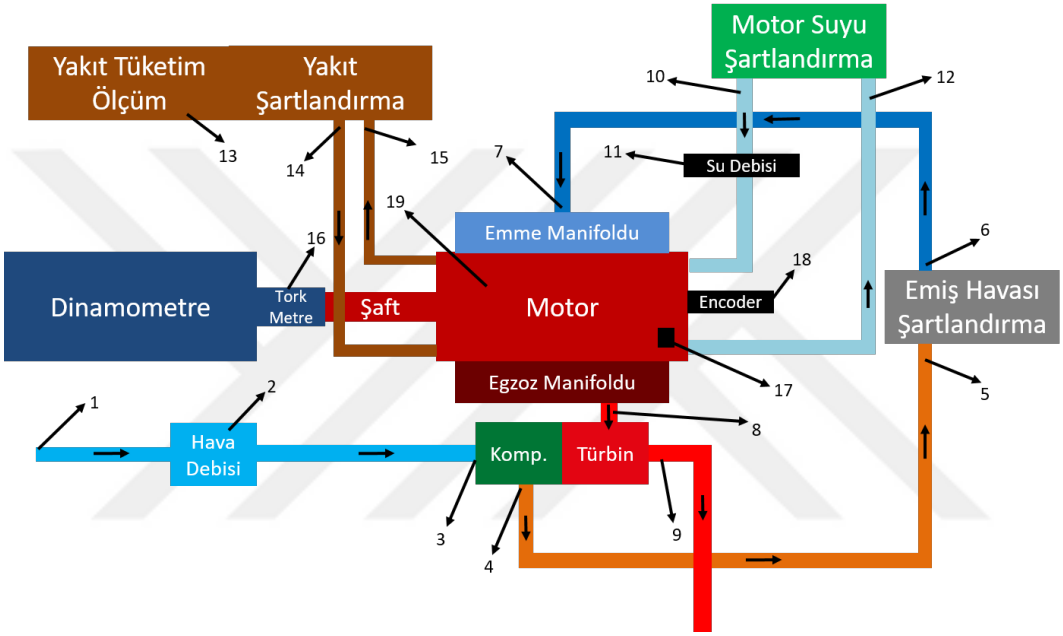
Tablo 5.10 Motor Üzerinde Bulunan Diğer Sensörler

MOTOR ÜZERİNDE BULUNAN SENSÖRLER		
SENSÖR	**TİP**	**ARALIK**
YAĞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
YAĞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 10 bar
SU GİRİŞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
SU GİRİŞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 2.5 bar
SU ÇIKIŞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
SU ÇIKIŞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 2.5 bar
SU POMPASI BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 10 bar
TÜRİN ÇIKIŞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
TÜRBİN ÇIKIŞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 2.5 bar
EGZOZ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
EGZOZ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 2.5 bar
KOMPRASÖR GİRİŞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
KOMPRASÖR GİRİŞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 10 bar
KOMPRASÖR ÇIKIŞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
KOMPRASÖR ÇIKIŞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	-1 - 2.5 bar
ARA SOĞUTUCU GİRİŞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
ARA SOĞUTUCU GİRİŞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 10 bar
ARA SOĞUTUCU ÇIKIŞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
ARA SOĞUTUCU ÇIKIŞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 10 bar
EMME MANİFOLD BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 10 bar
EMME MANİFOLD SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
SİLİNDİR KAFA SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
YAKIT GİRİŞ SICAKLIĞI °C	K-TİPİ	- 50 +1372
YAKIT GİRİŞ BASINCI (BAR)	RELATIVE	0 - 2.5 bar

5.3 Test Motorunun Entegrasyonu

Tez kapsamında test edilecek olan 4DCI39E motorunun hazırlıkları ve test odasında kullanılacak ölçüm ekipmanlarının belirlenmesi sonrasında, motorun test odasına entegrasyon çalışmaları tamamlanmıştır.

Bu testler esnasında kullanılan ve önceki bölümlerde açıklamaları yapılmış olan test ekipmanları ve sensörlerin kullanım noktaları, Şekil 5.13 üzerinde şematik görselde belirtilmektedir. Ayrıca test odasında haricen bulunan sensörler 5.10 içerisinde belirtilmiştir.

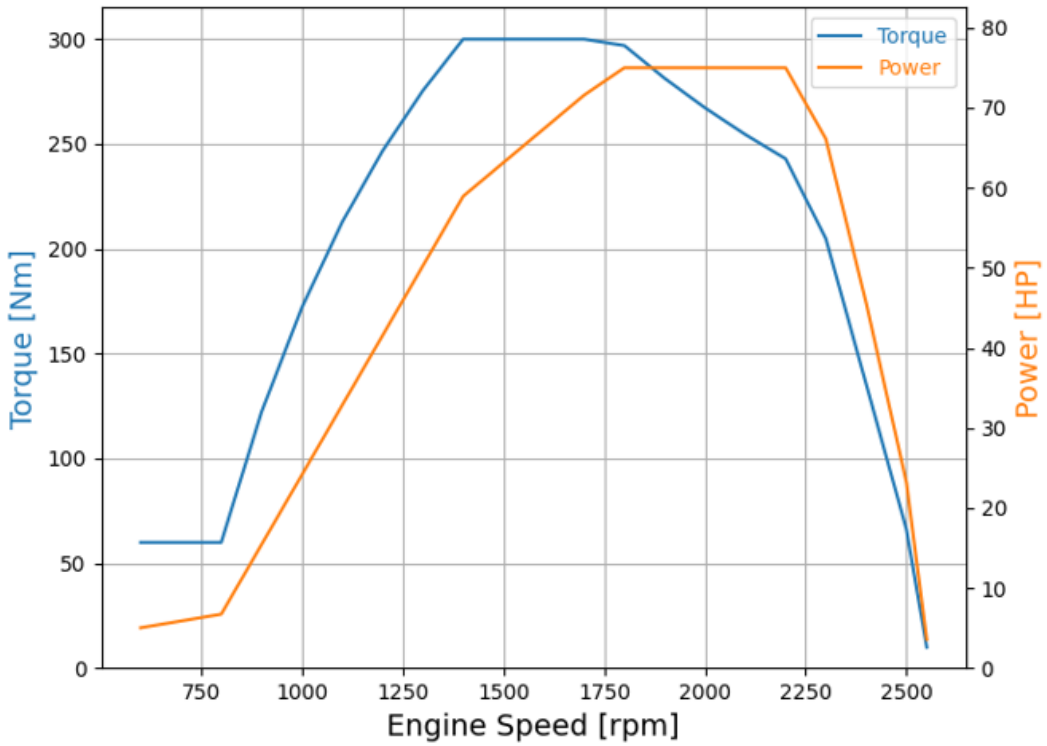


Şekil 5.13 Motor-Test Odası Bağlantı Şeması

6
TEST AŞAMASI

6.1 Test Adımlarının Belirlenmesi

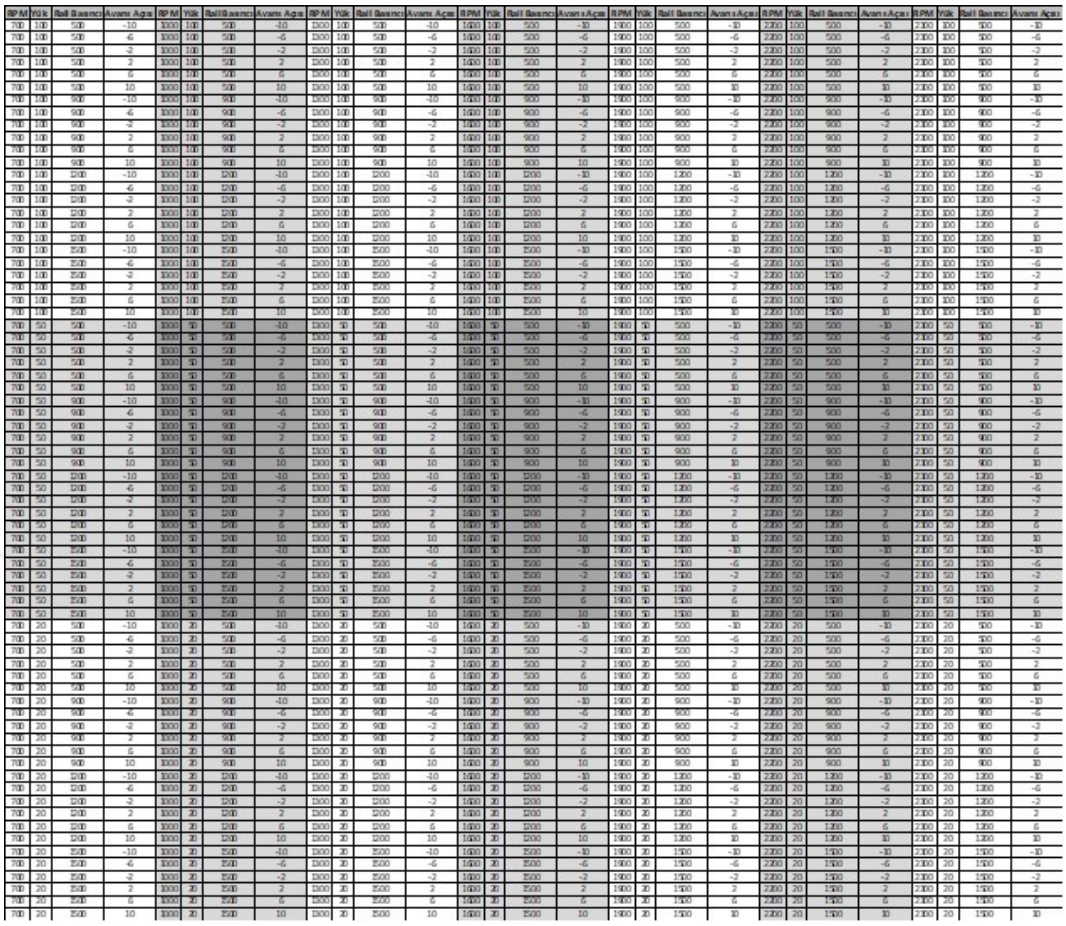
Tez kapsamında kullanılacak olan 4DCI39E motorunun tam yük eğrisi aşağıda gösterilmektedir. Motor, 2200 d/dak maksimum güç noktasında 55.9kW bir güce sahiptir. Bu güç, 2200 d/dak noktasında 242.6Nm seviyesine denk gelmektedir. Aynı zamanda Şekil 6.1 incelendiğinde, motor maksimum tork seviyesi olan 300 Nm torku, 1400 d/dak seviyesinden 1800 d/dak mertebesine kadar sabit bir şekilde verebildiği görülmektedir. Motorun çıkabileceği maksimum rölanti hızı ise 2550 d/dak seviyesidir.



Şekil 6.1 Motor Performans Eğrileri

Yapılacak olan çalışma için, motorun her bir çalışma noktasında detaylı ölçümlerin alınması gerekmektedir. Bu anlamda, motor üzerinde tam bir

Tablo 6.1 Motor Test Adımları



tarama senaryosunun gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır.Yapılacak testler Table 6.1 içerisinde gösterilmiştir.

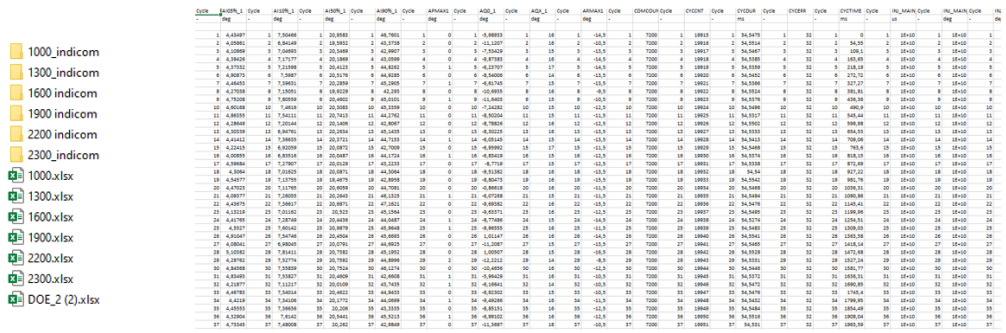
4DCI39E motoru üzerinde; Motor Devri (700-1000-1300-1600-1900-2200-2300) Enjeksiyon Avansı (-10, -6, -2, 0, 2, 6, 10) Ray Basıncı (500, 900, 1200, 1500) Motor Yükü (100, 50, 20) Noktalarında 504 noktalık bir DoE deney matrisi belirlenmiştir.

4DCI39E motoru üzerinde yapılacak olan testlerde Motor Devri, Enjeksiyon Avansı, Ray Basıncı ve Motor Yükü parametreleri değişken olarak kabul edilerek bir test matrisi hazırlanmıştır. Bu matriste, motorun test edileceği devir noktaları " 700, 1000, 1300, 1600, 1900, 2200, 2300 " olarak belirlenmiştir. Bunun yanında enjeksiyon avansı ECU üzerinden ayarlanarak her bir nokta için " -10, -6, -2, 0, 2, 6, 10 " olacak şekilde değiştirilmiştir. Ray basıncı ise " 500, 900, 1200, 1500 " olacak şekilde belirlenmiş ve motorun tam yük eğrisi altında "%100, %50, %20" yüklerinde tüm kombinasyonları kapsayacak, 504 noktadan oluşan bir test matrisi belirlenmiştir.

6.2 Testlerin Gerçekleştirilmesi

Belirtilen test matrisinde bulunan 504 noktanın 4DCI39E motoru üzerinde ölçümleri gerçekleştirilmiş ve test otomasyon sisteminden Microsoft Excel formatında çıktıları alınarak, her bir motor devri için ayrı ayrı dosyalanmıştır. Şekil **??** içerisinde dosya yapısı gösterilmektedir.

Şekil 6.2 Test Sonuçlarının Dosya Yapısı



??

6.3 Motor Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

«4DCI39E» motoru üzerinden alınan ölçümlerde, aynı motor devri ve aynı motor yükü şartları birlikte kendi aralarında gruplandırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan testlerin hiç biri, motor için kritik silindir içi basınç sınırı olan 170 bar mertebesini geçmemiştir.

Örnek olarak 2300 devirde %100 yük durumunda, farklı yakıt basıncı ve avans açısı konumlarında testleri yapılan 24 nokta kendi arasında değerlendirilerek, özgül yakıt yakıt tüketimi en az olan varyasyon, bu grup için en optimum nokta olarak belirlenmiştir. Tablo 6.2 içerisinde seçimin nasıl yapıldığı gösterilmektedir. Ayrıca Tablo **??** ve Tablo **??** içerisinde optimum noktalardan oluşan tablo görülmektedir.

Tüm noktalar değerlendirilerek, her bir grup içindeki en optimum nokta seçildiğinde, «Motor Ray Basıncı Haritası» ve «Motor Enjeksiyon Avans Haritası» yukarıdaki tablolarda gösterildiği şekilde olmaktadır. Bu haritalarda görüldüğü üzere, ray basıncı haritasında «1500 bar» seviyesi, avans haritasında ise «-10 °KA» değeri ön plana çıkmaktadır. Farklılıkların olduğu az sayıdaki noktalarda ise bu kombinasyon en iyi 2. sonuç olduğu görülmektedir.

Tablo 6.2 Test Sonuçlarının Gruplandırılması ve Nokta Tayini

		RPM	Yük	Rail Basıncı	Avans Açısı	BSFC
Grup 1	1	2300	100	500	-10	312,257
	2	2300	100	500	-6	327,807
	3	2300	100	500	-2	349,033
	4	2300	100	500	2	391,839
	5	2300	100	500	6	456,495
	6	2300	100	500	10	629,07
	7	2300	100	900	-10	265,133
	8	2300	100	900	-6	292,263
	9	2300	100	900	-2	305,336
	10	2300	100	900	2	339,501
	11	2300	100	900	6	443,967
	12	2300	100	900	10	454,342
	13	2300	100	1200	-10	266,545
	14	2300	100	1200	-6	279,031
	15	2300	100	1200	-2	307,504
	16	2300	100	1200	2	310,37
	17	2300	100	1200	6	563,72
	18	2300	100	1200	10	319
	19	2300	100	1500	-10	262,736
	20	2300	100	1500	-6	278,381
	21	2300	100	1500	-2	299,649
	22	2300	100	1500	2	306,656
	23	2300	100	1500	6	497,548
	24	2300	100	1500	10	582,613

Tablo 6.3 Motor Ray Basınç Haritası

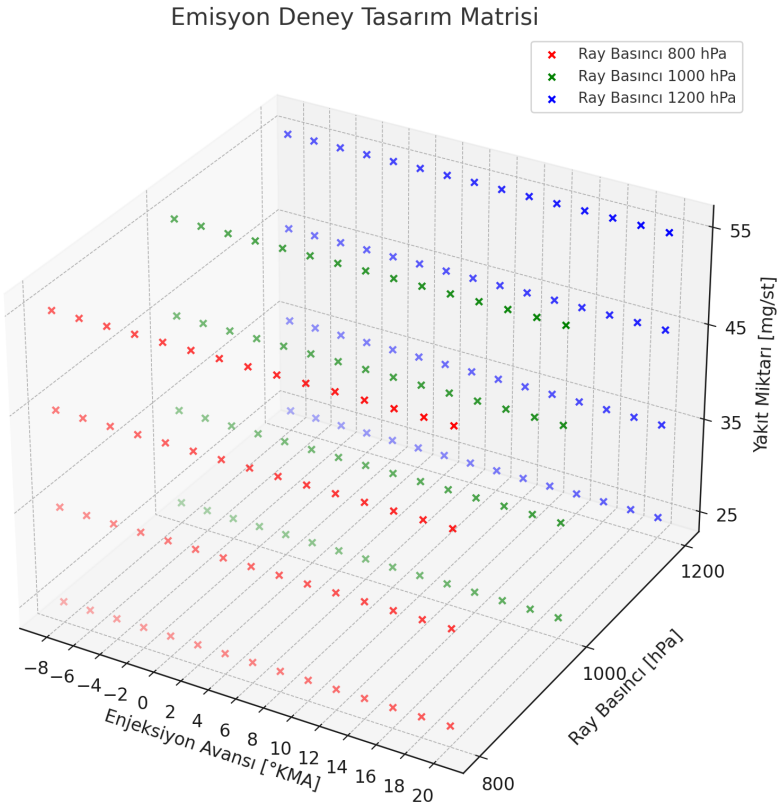
Motor Ray Basıncı Haritası [Bar]				
		Motor Yükü		
		100	**50**	**20**
Motor Devri	**1000**	1500	500	500
	1300	1500	1500	500
	1600	1200	900	900
	1900	1500	1200	900
	2200	1500	1500	1500
	2300	1500	1500	1500

Tablo 6.4 Motor Enjeksiyon Avans Açısı Haritası

Motor Enjeksiyon Avans Haritası [°KA]				
		Motor Yükü		
		100	**50**	**20**
Motor Devri	**1000**	-6	-10	-6
	1300	-10	-10	-2
	1600	-10	-10	-10
	1900	-10	-10	-10
	2200	-10	-6	-6
	2300	-10	-10	-2

6.4 Azot Oksit Ölçümleri

Kurulan motor modelinin Azotoksit NO_x ve Diazot Monoksit N_2O çıktılarını değerlendirebilmek için, 6.3 grafiğinde belirtilen şekilde bir test matrisi hazırlandı. 180 noktadan oluşan bu test matrisinde, motorun çalışma moktası olarak 1500 d/dak noktası belirlendi. Yakıt enjeksiyon basıncının 800, 1000, 1200 bar olarak belirlendirği bu test matrisinde, yakıt miktarı 25mg, 35mg, 45mg ve 55mg olacak şekilde değiştirildi. Bu sayede her bir işletme şartı için -8°KMA dan 20°KMA arasında 2°KMA çözünürlükte farklı enjeksiyon avansları belirlendi.



Şekil 6.3 Azot Oksit Ölçüm Matrisi

Bu test matrisinde, en düşük yakıt miktarı, en düşük ray basıncı, en yüksek avanstan

başlayarak, ilk test adımı 1. adım olacak şekilde, önce farklı avans değişimleri, sonrasında ray basıncı değişimi ve en son yakıt miktarları değişimleri ele alınarak 180 test adımı sıralanmıştır. Tablo **??** içerisinde sınırlandırılmış matris yapısı gösterilmektedir.

Tablo 6.5 Emisyon Ölçüm Matrisi

Test No.	Motor Hızı (d/dk)	Ray Basıncı (bar)	Yakıt (mg)	Avans (°CA)
1	1500	800	25	-8
2	1500	800	25	-6
3	1500	800	25	-4
...	...	...	...	...
45	1500	800	55	20
46	1500	1000	25	-8
47	1500	1000	25	-6
...	...	...	...	...
90	1500	1000	55	20
91	1500	1200	25	-8
92	1500	1200	25	-6
...	...	...	...	...
135	1500	1200	45	20
136	1500	1200	55	-8
137	1500	1200	55	-6
...	...	...	...	...
180	1500	1200	55	20

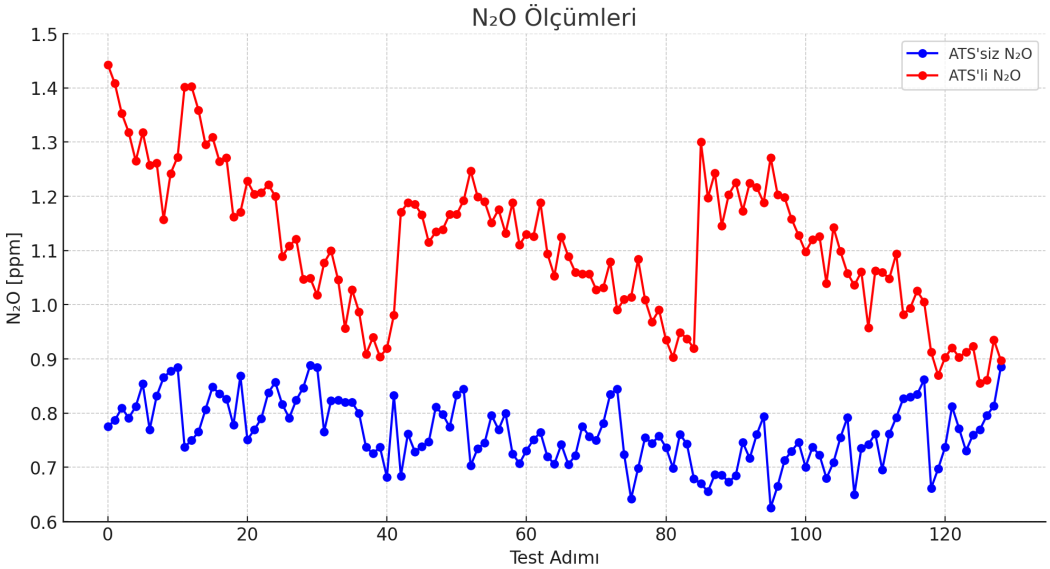
Tablo 6.5 üzerinde verilen test tablosundan aşağıda belirtilen test adım aralıkları için, motorun dengesiz çalışma bölgesine gelerek tehlikeli titreşim oluşturması sebebi ile ölçüm alınmamıştır. Ölçüm alınamayan aralıklar:(belirtilen noktalar dahil) 12 - 14, 25 - 30, 42 - 45, 57 - 60, 71 - 75 , 87 - 90 , 102 - 105 , 118 - 121, 132 - 135, 146 - 150, 162 - 165, 178 - 180 .

Bu noktalar test matrisinden çıkartılarak, geriye kalan noktalar, yeniden sıralandırılmıştır. Yapılan testler sonucunda 129 noktada ölçüm sağlanmıştır.

6.4.1 Diazot Monoksit N_2O Ölçümleri

Bu çalışmada, Grafik 6.3 içerisinde belirtilen, içten yanmalı motorun farklı yakıt tüketim oranlarındaki ve çeşitli enjeksiyon avansı ayarlarındaki N_2O emisyon seviyeleri incelenmiştir. Ölçüm faaliyetleri, hem dizel oksidasyon katalizörü

(DOC) ve dizel partikül filtresi (DPF) gibi emisyon kontrol sistemleri kullanılarak hem de bu sistemler devre dışı bırakılarak, yani yalın motor egzozu üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerle, emisyon kontrol sistemlerinin N_2O salımları üzerindeki etkisinin yanı sıra, motorun farklı çalışma koşullarındaki davranışlarının detaylı bir analizi yapılmıştır. Yapılan testlerin amacı, motor tasarımı ve işletme parametrelerinin yanı sıra, çeşitli emisyon azaltma teknolojilerinin N_2O salımlarına olan etkilerini belirleyerek, geliştirilen kalibrasyon algoritmasının karar mekanizmasında bir sınır şartı olarak kullanılması opsiyonunu ortaya koymaktır. Daha sonraki bölümlerde Şekil 6.4 üzerine gösterilen ölçümler, test sonuçları ile kıyaslanacaktır.

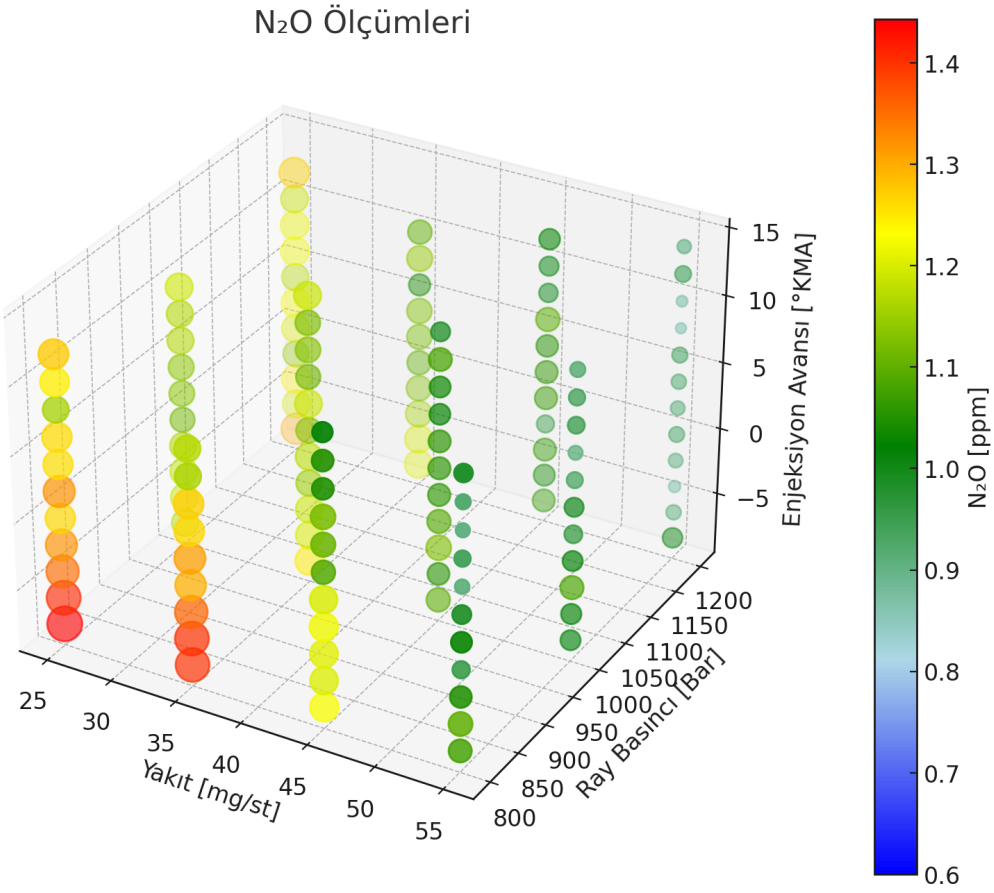


Şekil 6.4 Test Adımlarına Göre N_2O Test Sonuçları

Yapılan testlerdeki ölçüm noktaları kıyaslandığında, ilk göze batan fark, ATS sistemi kullanılarak yapılan ölçümlerdeki N_2O miktarının, ATS sistemi olmadan yalın motorlar ile yapılan ölçümlerdeki N_2O miktarına göre oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Normal şartlar altında, çevreye zararlı egzoz gazlarının düşürülmesi için kullanılan bu ATS sistemlerinin, N_2O üzerinde artırıcı etkisinin olduğunu ortaya koymaktadır. Motorda yanma sonucunda oluşan ve ATS sistemine giren gazlar 6.1 6.2 denklemlerinde belirtilen reaksiyonlar sonucunda N_2O miktarını artırmaktadır [24].

$$\mathrm{NH} + \mathrm{NO} \Rightarrow \mathrm{N_2O} + \mathrm{H} \tag{6.1}$$

$$\mathrm{NCO} + \mathrm{NO} \Rightarrow \mathrm{N_2O} + \mathrm{CO} \tag{6.2}$$

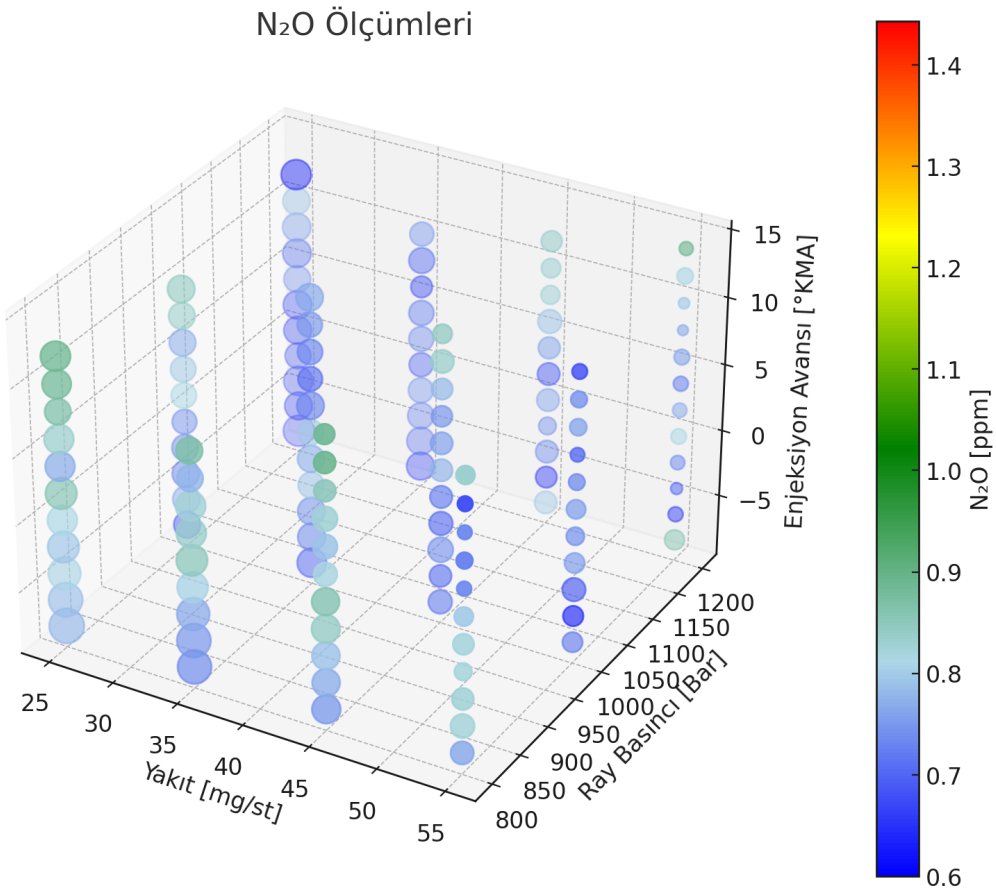


Şekil 6.5 ATS'li N_2O Test Sonuçları

İçten yanmalı bir dizel motorun modellendiği bu çalışmada, Azot Oksit NO_x hesaplamaları için Zeldovic mekanizmasının kullanıldığı bahsedilmişti. Ancak içten yanmalı motorlarda N_2O oluşumu için herhangi bir matematiksel model bulunmamaktadır. N_2O değerinin model içerisine entegre edilebilmesi adına, tez kapsamında yapılan ölçümerden çıkarım yapılarak N_2O için bir tespit yöntemi önerilecektir.

Yapılan araştırmalarda, yanma sıcaklığı ile N_2O değeri arasında bir ilişki olduğu görüldü [22] [23]. N_2O silindir içerisinde oluşaiblmesi için belirli bir eşik sıcaklığın ve basıncın geçilmesi gerekir. Ancak bu ilişki N_2O oluşum mekanizması sebebi ile lineer bir davranış göstermemektedir. ATS sistemi kullanılarak ve ATS sistemi kullanılmadan yapılan testlerin sonuçları Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 üzerinde gösterilmektedir.

Öçüm verileri kendi içinde değerlendirildiğinde silindir içerisine enjekte edilen yakıt miktarının artması ile birlikte, oluşan N_2O miktarının azalış trendi gösterdiği gözlemlenmektedir. Aynı etki enjeksiyon avansının geciktirilmesinde, yani ATDC sonrasına doğru kaymasında da görülmektedir. Bununla birlikte, enjeksiyon ray



Şekil 6.6 ATS'siz N_2O Test Sonuçları

basıncındaki artış ise, yine N_2O oluşumunu azaltıcı yönde eğilim göstermiştir. Enjeksiyon avansının aynı yakıt miktarı ve aynı ray basıncı korunurken artırılması, yani BTDC yönüne kaydırılması, silindir içerisindeki yanmanın daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır. Bu durumda silindir içerisindemi maksimum basınç ve sıcaklık seviyeleri artmakta ve bu durum N_2O seviyesinde artış meydana gelmesine sebep olaması beklenir. Ancak yanma süreci devam ettikçe, enjeksiyon avansının da yüksek olması sebebi ile, genişleme sonu ve egzoz gaz sıcaklıkları daha düşük bir seviyeye gelecektir. Bu durumun tersi şeklinde, yanmanın ATDC bölgesine kayması veya ray basınçlarının düşmesi, egzoz sıcaklıklarında artış trendi görülmesini sağlar. Egzoz sıcaklıklarındaki artış durumu ise, N_2O miktarında azalış görmemize sebep olur. Bunun başlıca sebebi N_2O gazının, yüksek sıcaklıklarda çok iyi bir yakıcı gaz olarak davranması ve silindir içerisinde bulunan başta karbon atomları olmak üzere, yanma reaksiyonuna girmesi gösterilebilir [23]. Bu sebepe, içten yanmalı motorun çalışma şartlarında, egzoz sıcaklığını artırıcı bir etki meydana geldiğinde, bu nispette N_2O oluşumu, yanma reaksiyonlarına katılması sebebi ile azalış göstermektedir.

6.4.2 Diğer Azot Oksit NO_x Ölçümleri

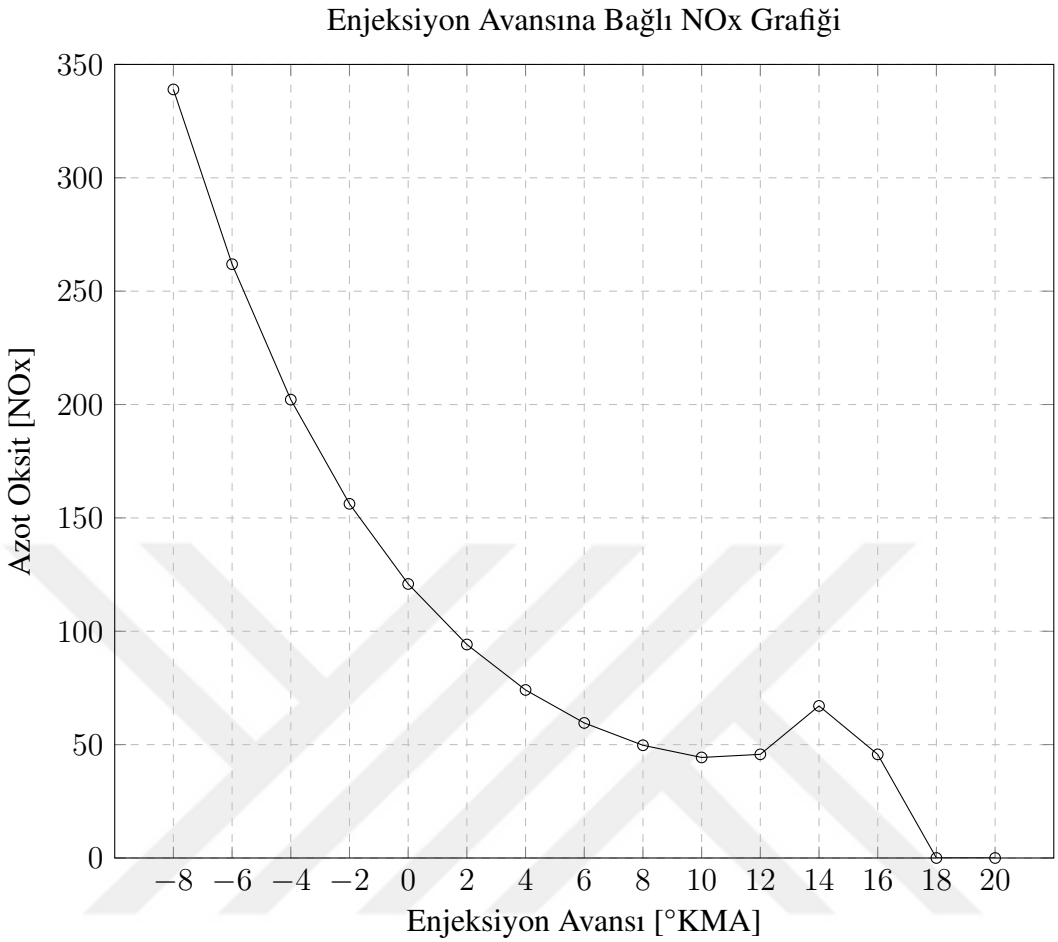
Nitrojen oksitler (NO_x), içten yanmalı motorların yanma odalarında yüksek sıcaklık altında nitrojenin oksijen ile reaksiyona girerek meydana getirdiği gazlardır. Bu gazlar arasında nitrik oksit (NO) ve nitrojen dioksit (NO_2) gibi muhtelif bileşikler bulunur ve bu bileşiklerin atmosfere salımı, motorun yanma koşulları, kullanılan yakıtın miktarı, hava-yakıt oranı ve yanma sıcaklığı gibi parametrelerden etkilenir. NO_x emisyonları, atmosferdeki kimyasal reaksiyonlara katılarak fotoğrafik smog ve yer seviyesi ozonu gibi zararlı hava kirleticilerinin meydana gelmesine sebebiyet verir ve böylece hem insan sağlığını hem de çevresel dengeleri tehdit eder. Bu gazlar, aynı zamanda asit yağmurlarının oluşumuna katkıda bulunarak su kaynaklarını, toprağı ve bitki örtüsünü olumsuz yönde etkiler.

Emisyon kontrolü ve motor performansı üzerine yapılan araştırmalar, NO_x emisyonlarını azaltma gayretinin, içten yanmalı motor teknolojilerinde süregelen bir meydan okuma olduğunu göstermektedir. Motor tasarımında yapılan iyileştirmeler, yanma mekanizmasının optimizasyonu, emisyon azaltma teknolojileri ve egzoz gazı arıtma sistemlerinin geliştirilmesi gibi muhtelif yollarla bu salımların azaltılması hedeflenmektedir.

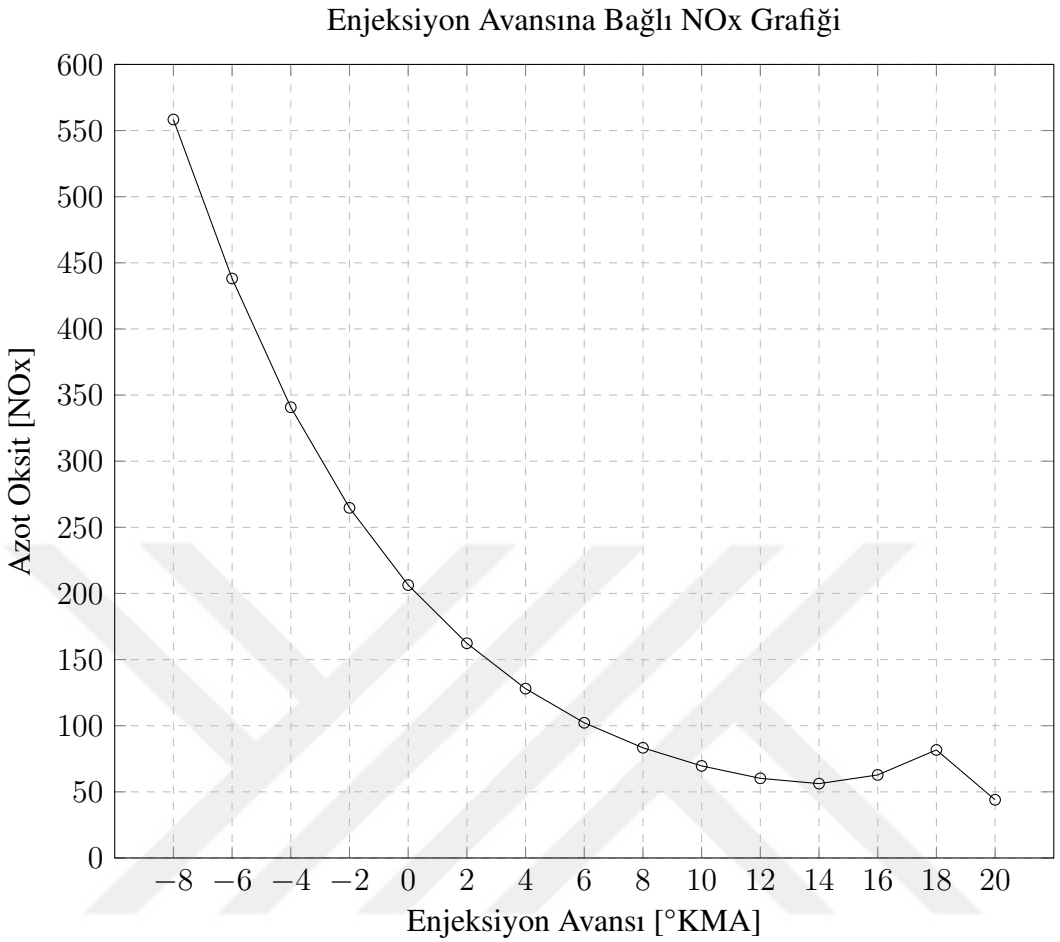
Yapılan ölçümlerde, beklenildiği üzere azot oksit emisyonunun, enjeksiyon açısının azaltılması (ÜÖN sonrasına doğru hareket ettirilmesi) ile azot oksit NO_x emisyonlarında azalma meydana geldiği görülmektedir. Ancak burada beklenmedik şekilde 12°KMA ve sonrasında, ya azot oksit NO_x değerlerinin sabit kalmaya başladığını ya da artma eğilimi gösterdiğini görmekteyiz.

Yapılan testlerde, 1500rpm, 800bar yakıt basıncı 25mg testleri esnasında, 18°KMA ve 20°KMA noktalarında ölçüm sisteminden ölçüm alınamamıştır. Alınan ölçümlerden bazıları Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9 üzerinde gösterilmektedir.

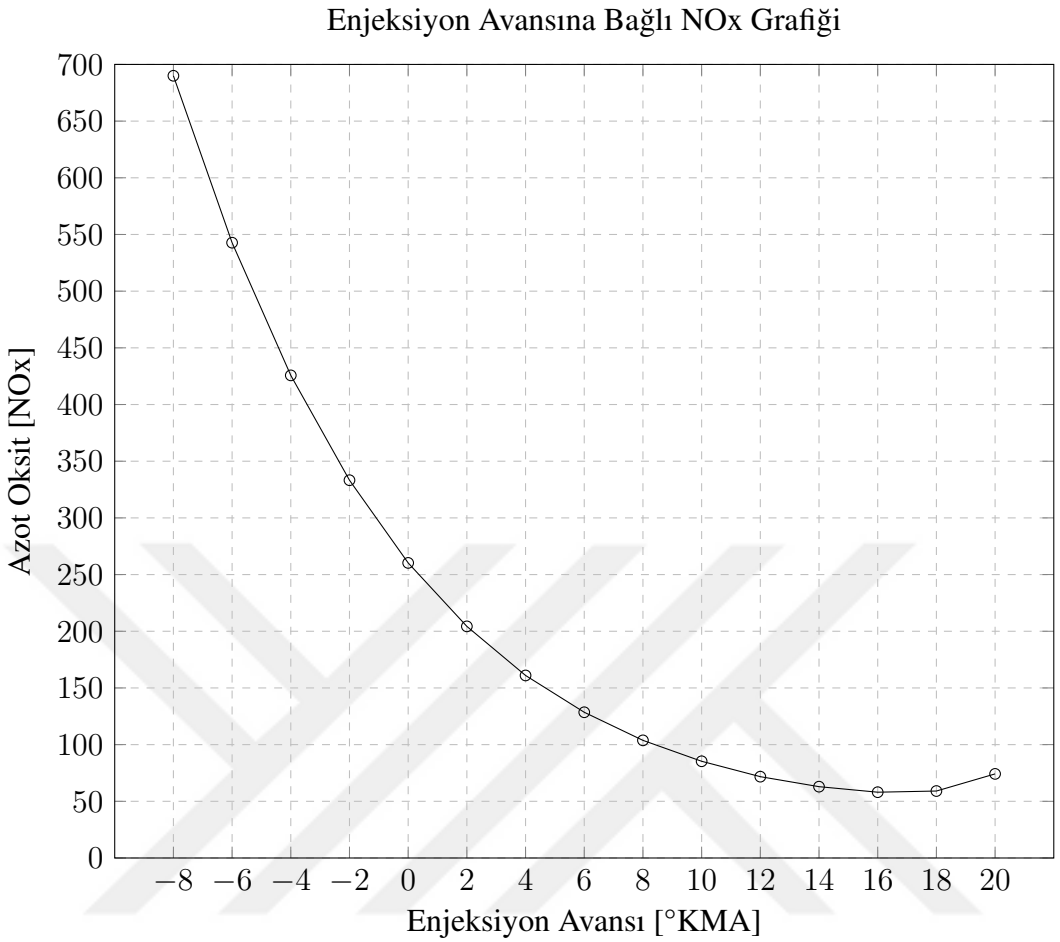
Şekil 6.7 1500 rpm, 800bar, 25mg Yakıt NO_x Test Sonuçları



Şekil 6.8 1500 rpm, 800bar, 35mg Yakıt NO_x Test Sonuçları



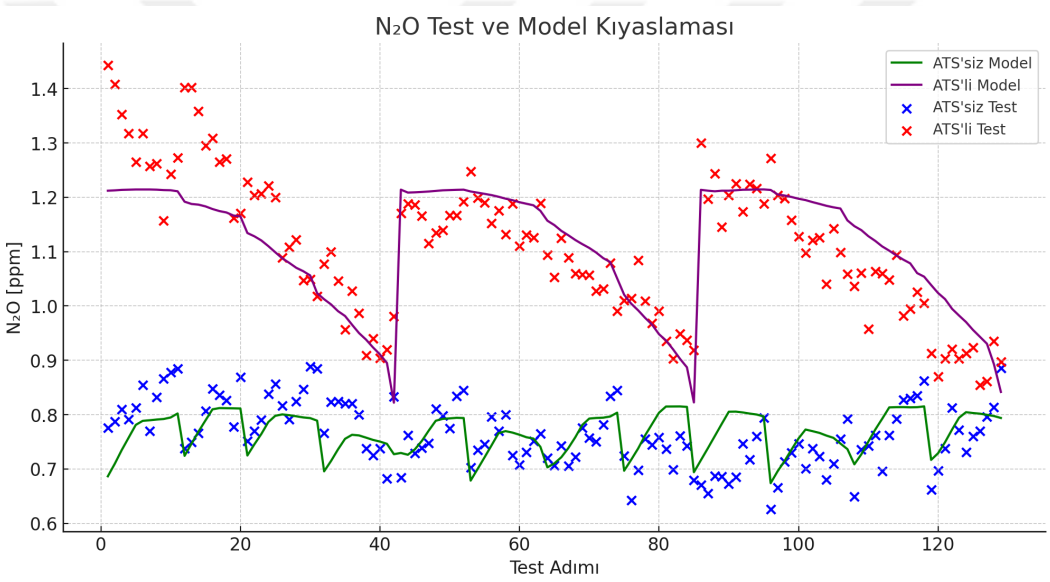
Şekil 6.9 1500 rpm, 800bar, 45mg Yakıt NO_x Test Sonuçları



7
DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

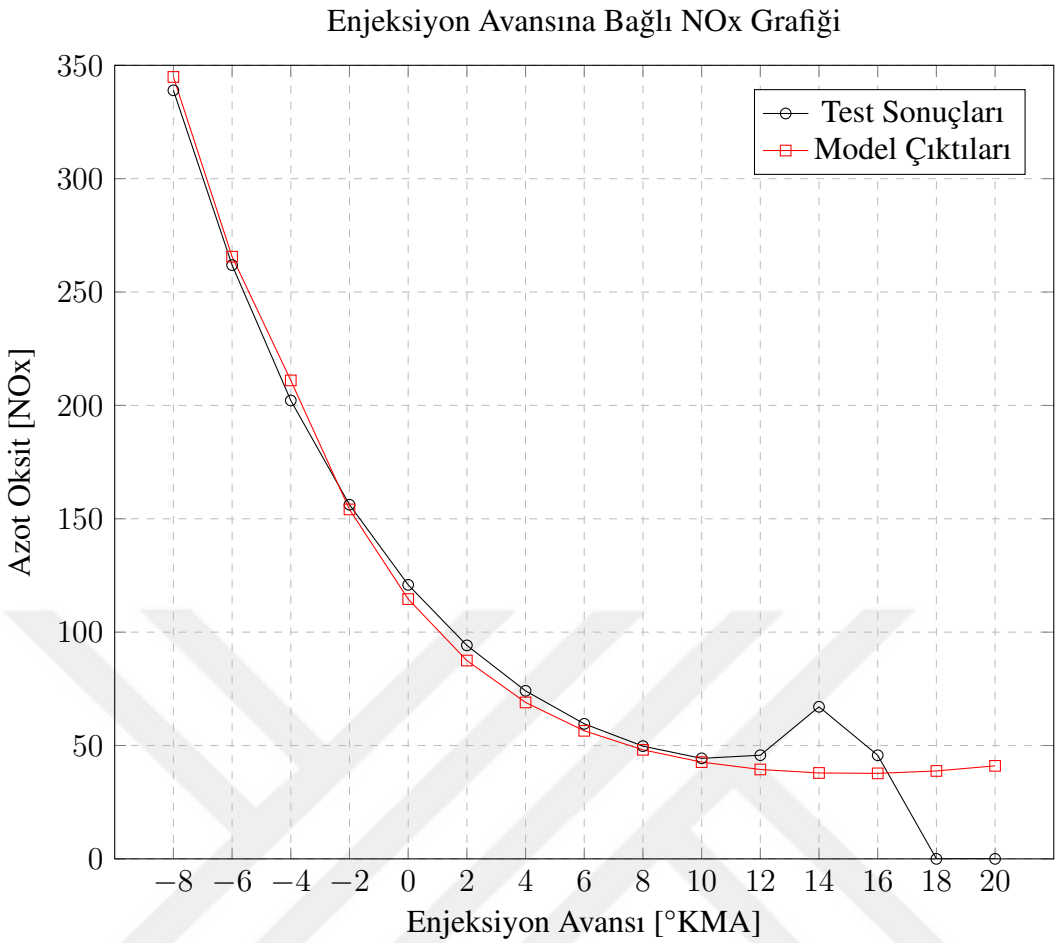
7.1 Emisyon Sonuçlarının Motor Modeli ile Kıyaslanması

7.1.1 Diazot Monoksit N_2O Sonuçlarının Motor Modeli ile Kıyaslanması



Şekil 7.1 N_2O Test ve Model Sonuçlarının Kıyaslanması

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen ATS'li Model Denklem 2.59 ve ATS'siz Model Denklem 2.58 ile, yapılan testler sonucunda elde edilen N_2O sonuçları, Tablo 6.3 belirtilen test adımlarına göre kıyaslanmıştır. Çıktılar ve model sonuçları incelendiğinde, motordan çok az miktarda salınan N_2O değerlerinde, ATS kullanımı olduğunda bir miktar artış görülmektedir. Ancak değer yaklaşık olarak 0.5-2ppm mertebelerinde kalmaktadır. Alınan hesaplama sonuçlarının da bu aralıkta sonuçlar verdiği ve modelde ele alınan hesaplama yaklaşımının, motorun farklı çalışma koşullarında oluşan farklı N_2O oluşum trendini takip edebildiği görülmektedir.

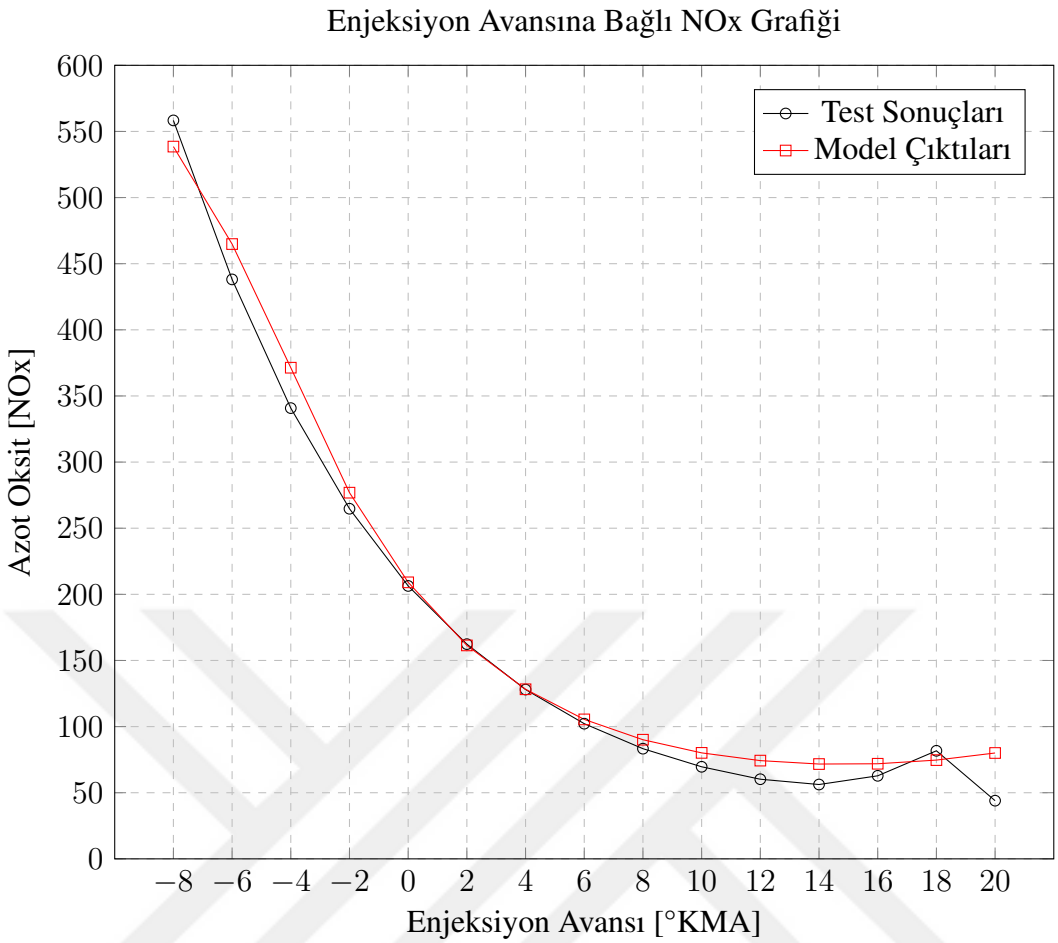


Şekil 7.2 1500 rpm, 800bar, 25mg Yakıt NO_x Test Sonuçlarının Model Sonuçları ile Kıyaslanması

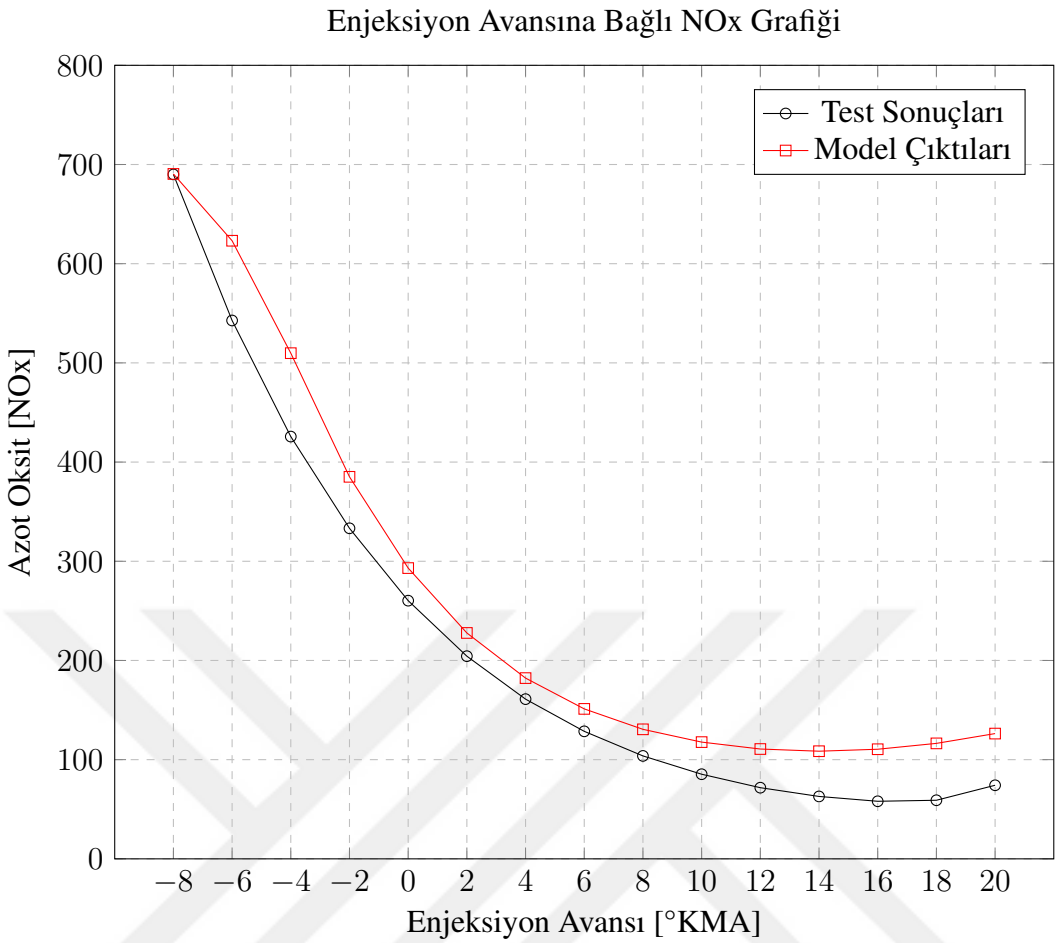
7.1.2 Azot Oksit Sonuçlarının, Motor Modeli ile Kıyaslanması

Görüldüğü üzere, test için belirlenmiş olan 45 nokta için ortaya konulan motor modelinden elde edilen azot oksit emisyon sonuçları değerlendirildiğinde, değerlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

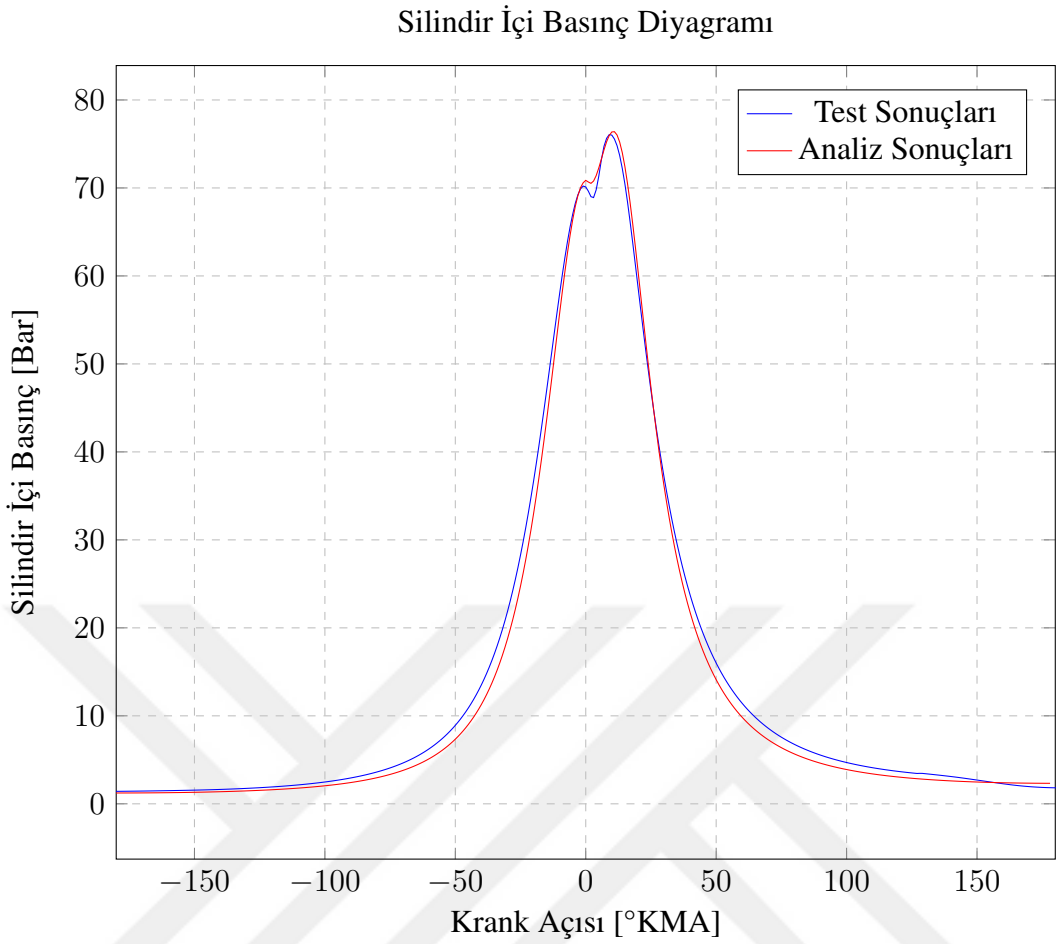
Her ne kadar değerler birbirlerine çok yakın gözükse de, özellikler bir motor kalibrasyonu algoritması için, tam değer elde etmek amaç değildir. Konu bir optimizasyon problemi olması sebebi ile, trendin doğru takip ediliyor olması ve trendin değiştiği bölgelerin doğru tayini çok daha önemlidir. Bu anlamda sonuçlar incelendiğinde, Azot oksit seviyesinin, motor enjeksiyon açısına bağlı trendinin model ile örtüştüğü gözükmektedir. Bu anlamda model, azot oksit kalibrasyonu için sınır şartı tanımlanarak kullanılabilir.



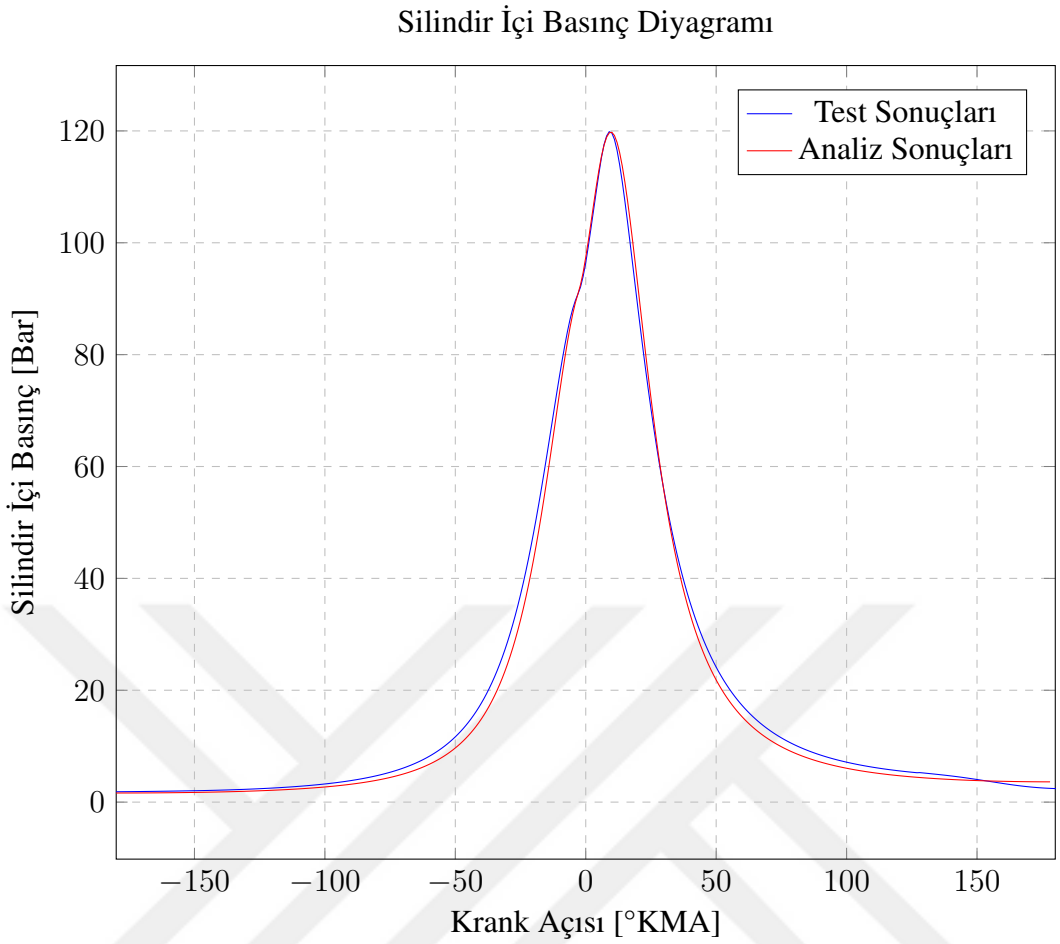
Şekil 7.3 1500 rpm, 800bar, 35mg Yakıt NO_x Test Sonuçlarının Model Sonuçları ile Kıyaslanması



Şekil 7.4 1500 rpm, 800bar, 45mg Yakıt NO_x Test Sonuçlarının Model Sonuçları ile Kıyaslanması

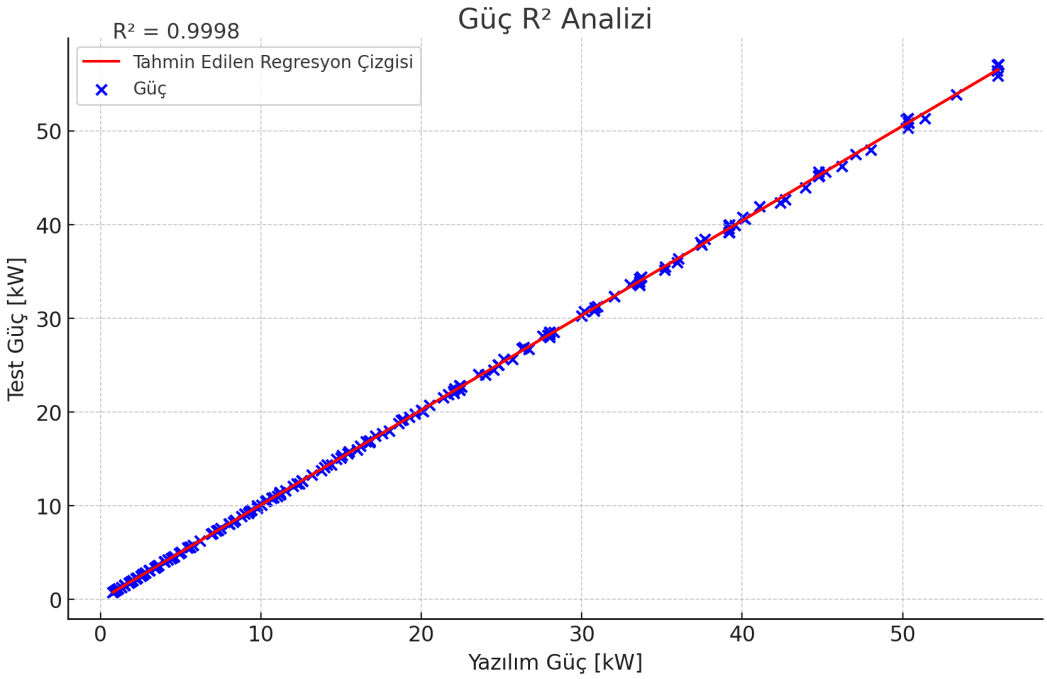


Şekil 7.5 Örnek Krank Açısına Bağlı Silindir İçi Basınç Kıyaslaması, NOx Testi 3. Adım



Şekil 7.6 Örnek Krank Açısına Bağlı Silindir İçi Basınç Kıyaslaması, NOx Testi 31. Adım

??



Şekil 7.7 Güç Test - Yazılım R^2 Hata Analizi

7.2 Kalibrasyon Algoritması Çıktılarının Değerlendirilmesi

Girişmiş olan motor verileri ile ve oluşturulan tam yük eğrileri üzerinden belirlenmiş olan 68Bin noktanın algoritma üzerinden koşulması ile, kendi içlerinde aynı motor devri ve aynı motor yükü noktalarında gruplandırılmış olan bölümler arasında, verilmiş olan 170 Bar silindir içi basınç sınırını geçmeyen en düşük özgül yakıt tüketimine sahip olan noktalar tayin edilmiştir.

Bu tayin edilen noktalar üzerinden, motorun elektronik kontrol ünitesi içerisine girilmesi gereken haritaların tayinleri yapılmıştır.

Bu haritalar içerisinde en önemlilerinden biri muhakkak ki yakıt tüketimi haritasıdır. Çünkü kalibrasyonu yapılmamış bir motor kontrol ünitesi içerisinde, eğer bu yakıt miktarları doğru girilmemiş ise, sadece istenen gücü alamamak bir problem değildir. Asıl problem, gönderilen yakıtın uygunsuzluğu sebebi ile oluşabilecek motor arızalarıdır. Düzenlenmiş iki nokta arasındaki geçişleri düzgün olan bir harita ile motor çalışmalarına başlanması gerekmektedir.

Tablo 7.2 üzerinde gösterilen bu harita, esasen her tip kontrol ünitesi için geçerli değildir. Bazı motor kontrol üniteleri gönderilecek yakıtın belirlenmesi için tork haritalarını kullanırlar. Bu tip motor kontrol ünitelerine "tork tabanlı kontrol ünitesi" denmektedir. Diğer bir kontorl ünitesi tipi ise yakıt miktarına bağlı olarak motor yükünü belirleyen kontrol üniteleridir. Ancak bu tip üniteler esasen motorun hangi güç noktasında çalıştığını ve nekadar tork ürettiğini bilmezler. Modern

Tablo 7.1 Motor Püskürtülen Yakıt Miktarı Haritası

		Injected Fuel Quantity [mg/st]								
		Engine Load [%]								
		100	90	80	70	60	50	40	30	20
Engine Speed [rpm]	600	18,36666	17,41199	16,45748	15,50375	14,53929	13,58729	12,63736	11,68598	10,7459
	700	18,56768	17,6132	16,65872	15,70499	14,73776	13,78699	12,83721	11,88607	10,93476
	800	18,78478	17,83044	16,87605	15,92232	14,954	14,00438	13,053	12,1021	11,15122
	900	28,98866	27,02665	25,06213	23,0946	21,14975	19,19537	17,25075	15,30894	13,35504
	1000	37,2317	34,46315	31,70499	28,94689	26,1848	23,41725	20,6758	17,93109	15,18206
	1100	44,00387	40,62652	37,20684	33,78312	30,3742	26,96002	23,53787	20,14788	16,75701
	1200	49,6791	45,75842	41,84185	37,88629	33,91993	29,9668	26,00592	22,05879	18,11688
	1300	54,53995	50,16224	45,78659	41,41674	36,99389	32,56724	28,15063	23,72149	19,32895
	1400	58,77484	53,99438	49,22707	44,46363	39,68521	34,85834	30,04559	25,22603	20,43113
	1500	59,09996	54,32073	49,55491	44,79331	40,0002	35,19067	30,37637	25,55728	20,75994
	1600	59,44086	54,66292	49,89865	45,13897	40,34598	35,53906	30,72315	25,90455	21,10554
	1700	59,79754	55,02095	50,25829	45,50062	40,70769	35,90352	31,08591	26,26784	21,46928
	1800	59,74216	54,95634	50,24435	45,53805	40,79119	36,03703	31,26781	26,49901	21,75051
	1900	57,64209	53,11453	48,65417	44,20152	39,68668	35,1757	30,65996	26,1398	21,64459
	2000	55,7518	51,51402	47,28111	43,036	38,74768	34,45601	30,16801	25,87175	21,60491
	2100	54,15557	50,12299	46,09681	42,01971	37,95283	33,86003	29,77776	25,68409	21,62426
	2200	52,76081	48,91557	45,06711	41,16775	37,28476	33,37503	29,4776	25,59456	21,69679
	2300	48,51911	45,13644	41,71137	38,30385	34,87809	31,4532	28,02761	24,62522	21,20374
	2400	40,37385	37,82821	35,26836	32,70727	30,15155	27,59076	25,05747	22,5025	19,95743
	2500	32,2021	30,5124	28,82049	27,12561	25,46232	23,77371	22,08482	20,40208	18,7278
	2600	24,06488	23,24217	22,41943	21,59673	20,7768	19,96183	19,14461	18,3284	17,49782
	2650	17,71581	1,649387	1,466122	1,282857	1,099592	0,916326	0,733061	0,549796	0,366531

sistemlerde genellikle tork tabanlı kontrol üniteleri kullanılmaktadır. Bu sebeple, oluşturulan motor tork haritası büyük öneme sahiptir.

Tablo 7.3 içerisinde gösterilen motor güç haritası normal şartlar altında motor kalibrasynu için gerekli bir harita değildir. Kalibrasyon çalışmalarında daha çok motor torku ve püskürtülen yakıt miktarı üzerinden bir kalibrasyon çalışması gerçekleştirilir. Bununla birlikte bu harita ile motorun araç üzerindeki performansına odaklı çalışmalar yapılabilir. Örneğin, düşük devirlerde normalde %30 %40 gaz kolu pozisyonunda, araç üzerinde kullanıcı nezdindeki beklentileri karşılamak amacı ile %80 %90 motor gücü verilebilir.

Yakıt enjeksiyo avans haritası bir içten yanmalı dizel motorun kalibrasyonu safhasında, kalibre edilmesi gereken en kritik parametrelerden biridir. Tablo 7.4 üzerinde gösterilen bu haritada meydana gelecek bir hata, yakıtın düzgün yanmaması ile birlikte performans kaybına yol açabilir ya da yakıtın hiç yanmayarak egzozdan atılmasına sebep olabilir. Ancak daha tehlikeli tarafı ise, yanlış girilmiş bir yüksek avans sebebi ile, motorun çok yüksek silindir içi basınçlara çıkmasına ve başta piston olmak üzere pek çok parçasına zarar verilmesine sebep olunabilir. Oluşturulmuş bu harita ile birlikte belirlenmiş olan ray basıncı, motorun çalışma noktaları arasında yanmanın en iyi olduğu ve verimliliğin en yüksek olduğu noktayı tayin için kalibre edilir. Yapılmış olan analiz sonucunda,

Tablo 7.2 Motor Tork Haritası

		Engine Torque [Nm]								
		Engine Load [%]								
		100	90	80	70	60	50	40	30	20
Engine Speed [rpm]	600	60.02174	54.03264	48.04596	42.0655	35.97744	29.97966	23.97031	17.9533	11.99879
	700	60.02067	54.03235	48.04544	42.06457	35.97969	29.98032	23.97146	17.95549	11.93988
	800	60.01956	54.03171	48.04489	42.06361	35.98275	29.98335	23.97261	17.95767	11.94435
	900	122.195	109.9576	97.71113	85.45249	73.33441	61.12486	48.93097	36.75304	24.41891
	1000	172.0044	154.7989	137.5849	120.3709	103.1451	85.89822	68.80438	51.6343	34.38321
	1100	212.7304	191.5803	170.185	148.8999	127.6136	106.3143	84.98524	63.826	42.60406
	1200	246.5558	221.9636	197.4256	172.6718	147.9907	123.3069	98.60124	74.00106	49.36974
	1300	275.1523	247.7255	220.2772	192.9006	165.2337	137.6771	110.1108	82.49956	55.09565
	1400	299.721	269.774	239.8932	210.0218	180.006	149.9983	119.9696	89.91022	60.00861
	1500	299.6966	269.7541	239.8873	210.0243	180.0066	149.9986	119.9695	89.91002	60.00749
	1600	299.6713	269.7335	239.8814	210.027	180.0069	149.999	119.9694	89.90992	60.00479
	1700	299.6449	269.7122	239.8754	210.0302	180.0072	149.9994	119.9693	89.90992	60.00454
	1800	296.9462	266.9443	237.4244	207.9011	178.1659	148.4648	118.7403	88.98642	59.39073
	1900	281.3165	252.9505	224.9808	197.0605	168.7882	140.648	112.4811	84.28208	56.26622
	2000	266.8996	240.3693	213.8035	187.0749	160.3483	133.6124	106.8459	80.04622	53.45427
	2100	254.2405	228.9721	203.7131	178.1668	152.7118	127.2372	101.7459	76.21182	50.91006
	2200	242.7468	218.6305	194.3643	170.068	145.7693	121.4431	97.10834	72.88364	48.59716
	2300	213.2794	191.935	170.6084	149.28	127.9424	106.5763	85.19735	63.97707	42.66247
	2400	159.2705	143.341	127.4035	111.4439	95.48641	79.5084	63.70717	47.78673	31.88652
	2500	105.2251	94.67504	84.11606	73.54339	63.16692	52.6424	42.12106	31.61348	21.15846
	2600	51.29302	46.1667	41.04139	35.91746	30.80206	25.68605	20.60609	15.48799	10.26772
	2650	10.01607	-93.4135	-93.3566	-94.4666	-95.6064	-96.746	-97.8857	-99.0252	-100.165

çoğunluk noktanın -10°KMA etrafında yoğunlaştığını göstermektedir.

Yakıt hattı basıncı olarak da isimlendilen bu değer, Ortak hat (Ray) kullanan dizel motorlarda motor kontrol ünitesi tarafından kontrol edilebilen bir parametredir. Dizel motorlarda yakıt basıncı, yanmanın kalitesi açısından yüksek öneme sahiptir. Bir kalibrasyon çalışması sırasında genellikle yüksek güç noktalarında, yüksek ray basıncı seçimi yapılarak yanma iyileştirilmesi amaçlanır. Ancak bu haritanın yakıt enjeksiyon avansı ile olan ilişkisi çok önmelidir. Çünkü enjeksiyon avansının artırılması da yine genellikle yanma kalitesini artırarak verimliliği artırır. Ancak, hem ray basıncının artırılması hem de enjeksiyon avansının yükseltilmesi, silindir içi basınç seviyesinde ani yükselmelere sebep olabilir. Bu sebeple, her iki haritaının birlikte dikkatlice kalibre edilmesi gerekir.

Geliştirilmiş algoritma ise, verilmiş olan silindir içi basınç seviyesini aşmayacak şekilde, tüm bu olasılıkları test ederek, en optimum noktayı bulmayı amaçlar. Ancak hedefimiz olan 4DCI39E motorunun güç seviyesi 75 BG olması sayesinde, motor tehlikeli bir çalışma noktasına çıkmamakta, bu sebeple algoritma, yakıt verimliliği sebebi ile olası en yüksek ray basıncını tercih etmektedir. Tablo 7.5 üzerinde motorun maksimum silindir içi basınç haritası gösterilmektedir.

Silindir içi basınç haritası kalibrasyonda en çok dikkat edilmesi gereken değerlerin başında gelir. Ancak bu değer ve oluşturulan harita elektronik kontrol ünitesi

Tablo 7.3 Motor Güç Haritası

		Engine Power [kW]								
		Engine Load [%]								
		100	90	80	70	60	50	40	30	20
Engine Speed [rpm]	600	3.771277	3.394971	3.018817	2.643053	2.260529	1.883678	1.506099	1.128039	0.753906
	700	4.399745	3.960778	3.521914	3.083494	2.637449	2.197672	1.7572	1.316206	0.875239
	800	5.028187	4.52655	4.025	3.523913	3.014484	2.511879	2.008325	1.504418	1.000648
	900	11.51661	10.36326	9.209057	8.053708	6.911605	5.760882	4.611635	3.463893	2.301428
	1000	18.01226	16.21051	14.40785	12.60521	10.80133	8.995241	7.205177	5.407131	3.600601
	1100	24.50478	22.06847	19.60391	17.15204	14.70004	12.24653	9.789596	7.352228	4.907636
	1200	30.98311	27.89277	24.80924	21.69858	18.59706	15.4952	12.3906	9.299248	6.203985
	1300	37.45804	33.72428	29.98758	26.26065	22.49421	18.74277	14.99001	11.23113	7.500484
	1400	43.9414	39.55093	35.17018	30.79081	26.39025	21.9909	17.58846	13.18153	8.797722
	1500	47.07624	42.37288	37.68141	32.99053	28.27537	23.56173	18.84476	14.12303	9.425954
	1600	50.2104	45.19428	40.19251	35.19037	30.16044	25.13258	20.10106	15.06455	10.0539
	1700	53.34387	48.01513	42.70347	37.39033	32.04552	26.70344	21.35737	16.00609	10.68222
	1800	55.97303	50.31782	44.75344	39.18843	33.58348	27.98496	22.38202	16.77355	11.19489
	1900	55.97284	50.32894	44.76387	39.20864	33.58338	27.98439	22.38008	16.7694	11.19515
	2000	55.89932	50.34283	44.77889	39.18087	33.58328	27.98372	22.37775	16.76484	11.19544
	2100	55.9104	50.35359	44.79885	39.18092	33.58307	27.98091	22.37509	16.75985	11.19571
	2200	55.92486	50.36885	44.77831	39.18085	33.58285	27.97847	22.37216	16.79119	11.19598
	2300	51.3695	46.22858	41.09197	35.9549	30.81562	25.66947	20.52025	15.40922	10.27549
	2400	40.02904	36.02552	32.01999	28.00891	23.99835	19.98264	16.01136	12.01011	8.013956
	2500	27.54787	24.78587	22.02153	19.25361	16.53706	13.78175	11.02727	8.276391	5.539271
	2600	13.96562	12.56987	11.1744	9.779295	8.38652	6.993577	5.610447	4.216937	2.795605
	2650	2.779534	-25.9229	-25.9071	-26.2152	-26.5315	-26.8477	-27.164	-27.4802	-27.7964

içerisine işlenmez. Kontrol amacı ile takip edilir ve kayıt altına alınır. Görüldüğü üzere yapılan çalışmada tercih edilen 4DCI39E motorunun güç seviyesi 75 BG olması sayesinde, motor tehlikeli bir çalışma noktasına çıkmamakta ve silindir içi basınç seviyesi, motorun mekanik sınırlarını aşmamaktadır.

7.3 Sonuç

Yapılan test sonuçları ile geliştirilen algoritmanın çalıştırıldığı yazılım sonuçları bizlere göstermiştir ki; değerlerin birbirlerine çok yakın olması neticesinde, ortaya konulan yöntemin, dizel motor tasarım, geliştirme ve test süreçlerinde kullanılmasın, özellikle zamandan ve maliyetten tasaruf anlamında ciddi faydalar sağlayacaktır.

Detayda incelendiğinde ise kalibrasyon algoritması, temelde ray basıncı olarak 1500 bar seviyesinde çalışılmasını uygun görmektedir. Test sonuçlarına baktığımızda da 1500 bar seviyesinin daha yoğun olduğu görülebilir. Farklılık olan noktalarda ise, test sonuçlarında yine 1500 bar seviyesi, en iyi ihtimale çok yakın bir durumdadır. Bunun akabinde ek dinamometre testleri ve araç üzeri motor kalibrasyon çalışmaları ile, kullanıcıların özel beklentisine cevap olabilecek "ince ayar" çalışmaları yapılabilir.

Özetle;

Tablo 7.4 Motor Yakıt Enjeksiyon Avansı Haritası

		Fuel Injection Advance [°CA]								
		Engine Load [%]								
		100	90	80	70	60	50	40	30	20
Engine Speed [rpm]	600	-6	-6	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-8
	700	-6	-6	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-8
	800	-6	-6	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-8
	900	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-6	-6	-8
	1000	-10	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-6
	1100	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6
	1200	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-6
	1300	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-6
	1400	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-8
	1500	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	1600	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	1700	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	1800	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	1900	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	2000	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	2100	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	2200	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	2300	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-8
	2400	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
	2500	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6
	2600	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-6	-6
	2650	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-6	-6

- Toplamda 633 nokta test, 68.000 nokta analiz edilmiştir.
- Yapılan test çalışmaları, ön görüldüğü üzere yaklaşık olarak 2 haftalık tam zamanlı test odası çalışmasını gerektirmiştir. Bu anlamda test odası ücretleri ve harcanan yakıt göz önünde bulundurulduğunda maddi anlamda ciddi bir maliyet ortaya çıkmaktadır.
- Yapılan analiz ortalama bir bilgisayar ile yaklaşık 2.5 saat sürmektedir. Yazılım çıktıları doğrudan ECU üzerinde kullanılabilir sonuçlar ortaya koymaktadır.
- Ölçüm noktaları ve yazılım çıktı sonuçları kıyaslandığında, değerlerin birbirlerine çok yakın olması ve manuel tespit edilen optimum noktalar ile algoritma sonuçlarının benzer olması sebebi ile, ortaya konulan algoritmanın ve yazılımın motor tasarım, geliştirme ve test çalışmalarında pratik olarak ugulanabileceğini göstermektedir.
- Ölçüm değerleri ile, test dataları arasında bulunan farklılık, elde edilen özgül yakıt tüketimi değerini baz alarak karşılaştırdığımızda ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmektedir.

Tablo 7.5 Motor Silindir İçi Basınç Haritası

		In-Cylinder Peak Firing Pressure [Bar]								
		Engine Load [%]								
		100	90	80	70	60	50	40	30	20
Engine Speed [rpm]	600	91.45194	91.02689	90.60183	90.17704	89.91747	93.13078	92.69338	92.25524	91.8589
	700	91.54252	91.11757	90.69255	90.26778	89.92023	93.22379	92.78647	92.34845	91.91027
	800	91.64008	91.21522	90.79025	90.3655	89.97089	93.36085	92.88673	92.44884	92.01088
	900	105.7268	103.9061	102.0813	100.2519	98.47802	91.85379	90.9579	90.09307	93.02658
	1000	121.5024	110.853	108.2454	105.6888	103.1251	100.5527	98.10046	91.26151	90.07397
	1100	129.1634	125.3277	113.8067	110.17	107.0129	103.8456	100.6656	97.72367	90.73933
	1200	135.5934	131.1538	126.7094	122.2491	110.2971	106.6358	102.9601	99.32622	91.34539
	1300	141.3758	136.1404	131.1863	126.227	113.5788	109.0456	104.9518	100.8374	91.94755
	1400	146.5729	140.7061	135.0832	129.6867	116.472	111.2809	106.7099	102.2365	97.92769
	1500	146.9719	141.1076	135.4545	130.0611	124.656	111.6393	107.0169	102.5448	98.16316
	1600	147.3901	141.5285	135.8438	130.4535	125.0496	112.0148	107.3387	102.8678	98.44062
	1700	147.8275	141.9687	136.2509	130.864	125.4612	112.4074	107.6753	103.2056	98.77967
	1800	147.797	141.8898	136.2355	130.9068	125.5565	112.5515	107.8442	103.4207	99.04183
	1900	145.2231	139.6269	134.4369	129.3914	124.301	111.6247	107.2812	103.0874	98.94355
	2000	142.8673	137.6715	132.8827	124.9559	123.233	110.8499	106.8256	102.8387	98.90692
	2100	140.9072	136.0993	131.5412	126.9534	122.3286	110.2452	106.4641	102.6647	98.92522
	2200	139.1931	134.7337	127.1149	125.9858	121.5682	109.7967	106.186	102.6179	98.99301
	2300	134.2853	127.1889	126.6037	122.7288	111.3054	108.0174	104.8412	101.7174	98.53423
	2400	125.0839	122.1876	111.7259	109.1791	106.8114	104.436	102.1194	99.7434	97.59217
	2500	108.7115	107.1461	105.5773	104.0044	102.4958	100.9262	99.35492	97.91029	91.62164
	2600	101.1971	100.432	99.66656	98.90082	98.17838	97.59575	91.82555	91.44405	91.11098
	2650	91.20815	89.75402	89.84129	91.13437	90.93724	90.74009	90.54291	90.34572	90.14851

Tablo 7.6 Motor Enjesiyon Avansı Haritası

		Fuel Injection Advance [°CA]								
		Engine Load [%]								
		100	90	80	70	60	50	40	30	20
Engine Speed [rpm]	600	-6	-6	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-8
	700	-6	-6	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-8
	800	-6	-6	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-8
	900	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-6	-6	-8
	1000	-10	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-6
	1100	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6
	1200	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-6
	1300	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-6
	1400	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-8
	1500	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	1600	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	1700	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	1800	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	1900	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	2000	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	2100	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	2200	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8
	2300	-10	-10	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-8
	2400	-10	-10	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
	2500	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6
	2600	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-6	-6
	2650	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-6	-6	-6

KAYNAKÇA

[1] M. Özkan, "A comparative study on energy and exergy analyses of a cı engine performed with different multiple ınjection strategies at part load: Effect of ınjection pressure," *Entropy*, vol. 17, no. 1, pp. 244–263, 2015.

[2] P. Barasa *et al.*, "Virtual engine, controls, and calibration development in automated co-simulation environment," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2016.

[3] N. Damji, D. Dresser, J. Bellavoine, M. Swaminathan, "Automated model-based calibration for drivability using a virtual engine test cell," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2015.

[4] I. Vibe, "Semi-empirical expression for combustion rate in engines," in *Proceedings of Conference on piston engines, USSR Academy of sciences, Moscow*, 1956, pp. 186–191.

[5] K. Sihling, G. Woschni, "Experimental investigation of the instantaneous heat transfer in the cylinder of a high speed diesel engine," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 1979.

[6] S. K. Chen, P. F. Flynn, "Development of a single cylinder compression ignition research engine," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 1965.

[7] Y. B. Zeldvich, "The oxidation of nitrogen in combustion and explosions," *J. Acta Physicochimica*, vol. 21, p. 577, 1946.

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

[9] A. I. Kolchin, V. P. Demidov, *Design of automotive engines*. MIR publishers, 1984.

[10] G. Sarton, J. Mayer, J. P. Joule, S. Carnot, "The discovery of the law of conservation of energy," *Isis*, vol. 13, no. 1, pp. 18–44, 1929.

[11] I. Lenin, "Automobile and tractor engines," *IM Lenin, Popyk KG, OM Malashkin-M.: Higher School*, 1969.

[12] G. P. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch, F. Otto, *Simulating Combustion: Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development*. Springer Science & Business Media, 2005.

[13] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2018.

[14] G. Borman, K. Nishiwaki, "Internal-combustion engine heat transfer," *Progress in energy and combustion science*, vol. 13, no. 1, pp. 1–46, 1987.

[15] J. Merkisz, J. Pielecha, S. Radzimirski, *New trends in emission control in the European Union*. Springer, 2014, vol. 4.

[16] R. Egnell, "On zero-dimensional modelling of combustion and nox formation in diesel engines," Ph.D. dissertation, Lund University, 2001.

[17] A. Albayrak, O. Gezer, O. Özener, C. Büyük, M. Özkan, "The effect of multiple injection on cı engine pollutant emissions and green house gases," *Fuel*, vol. 349, p. 128 667, 2023.

[18] T. Yoshikawa, R. D. Reitz, "Development of an ımproved no reaction mechanism for low temperature diesel combustion modeling," *SAE International Journal of Engines*, vol. 1, no. 1, pp. 1105–1117, 2009.

[19] R. Finesso, E. Spessa, "Real-time predictive modeling of combustion and no x formation in diesel engines under transient conditions," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2012.

[20] S. Röpke, G. Schweimer, T. Strauss, "Nox formation in diesel engines for various fuels and intake gases," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 1995.

[21] D. Qi, M. Leick, Y. Liu, F. L. Chia-fon, "Effect of egr and injection timing on combustion and emission characteristics of split injection strategy dı-diesel engine fueled with biodiesel," *Fuel*, vol. 90, no. 5, pp. 1884–1891, 2011.

[22] L. Muzio, T. Montgomery, G. Samuelsen, J. Kramlich, R. Lyon, A. Kokkinos, "Formation and measurement of n2o in combustion systems," in *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, vol. 23, 1991, pp. 245–250.

[23] C. P. Cho, Y. D. Pyo, J. Y. Jang, G. C. Kim, Y. J. Shin, "Nox reduction and n2o emissions in a diesel engine exhaust using fe-zeolite and vanadium based scr catalysts," *Applied Thermal Engineering*, vol. 110, pp. 18–24, 2017.

[24] G. De Soete, "Cinétique de la formation de polluants gazeux dus à la combustion. un exemple type: L'oxyde et le protoxyde d'azote," *Pollution atmosphérique*, vol. 31, no. 122, pp. 176–183, 1989.

[25] M. Aho, K. Paakkinen, P. Pirkonen, P. Kilpinen, M. Hupa, "The effects of pressure, oxygen partial pressure, and temperature on the formation of n2o, no, and no2 from pulverized coal," *Combustion and Flame*, vol. 102, no. 3, pp. 387–400, 1995.

[26] H. Park, C. Bae, C. Ha, "A comprehensive analysis of multiple injection strategies for improving diesel combustion process under cold-start conditions," *Fuel*, vol. 255, p. 115 762, 2019.

[27] Z. Wang, H. Xu, C. Jiang, M. L. Wyszynski, "Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection," *Fuel*, vol. 174, pp. 140–152, 2016.

A YAZILIM

Yazılımın bazı bölümlerine bu ekte yer verilecektir.

A.1 Ana Program

```
import AmAirCond_m
import CalCoef_m
import DiFuProp_m
import EngMaDi_m
import FuInjSys_m
import GrapOpt_m
import TuChrgSys_m
import EngCha_m
import Info_m
import PerfmCrv_m
import CaseSetup_m

import hesap3 as hesap
import cikti
import dosya
import PerfmCrv_h2
import main_log
import log_grafik2 as log_grafik

import FullLoad

import multiprocessing

global data, versiyon

######  VERSİYON NUMARASI ######

versiyon=round(3.2,1)

###### VERSİYON NUMARASI #######

data={}

#### HESAP ÇÖZÜNÜRLÜĞÜ ######

data['cozunurluk']= 1 # 0.1 - Krank mili açısı
```

```
#### HESAP ÇÖZÜNÜRLÜĞÜ SON ######

datalist=['C22','C23','C29','C50','E25','C61','C12','C13','C14','C2ab','C10','C11A','C73','C26','C90','C5b1','C5b2','C5b3','C5b4','C5b5','E24','C7','C8h','C9','C4','C27','C49']

class Worker(QObject):
    finished = pyqtSignal()
    progress = pyqtSignal(float)
    yaziyaz = pyqtSignal(str,float)
    tamyuk = pyqtSignal(dict)
    bilgi= pyqtSignal(str)
    grafik = pyqtSignal(dict)
    DOErapor = pyqtSignal(list)
    DOEbaslat = pyqtSignal(float)
    print("workera girdi")


    def run(self):
        global data, datalist

        #print(data)

        #print(self.Main.C22) # self döngüye girmiyor
        """Long-running task."""
        print("hazır ")
        hesap.diesel(self,data,datalist)
        #kostur.kos(self)
        #self.progress.emit()

        self.finished.emit()



class Main(QtWidgets.QMainWindow):

    emain=None #make variable to hold the new window
    def __init__ (self,parent=None):

        global data, datalist

        QtWidgets.QWidget.__init__(self, parent)
        self.ui = Ui_MainWindow()
        self.ui.setupUi(self)


        self.ui.toolButton_20.clicked.connect(self.calis2)
        self.ui.toolButton_11.clicked.connect(self.rapor)




        self.AmAirCond_m = AmAirCond_m.Engn(self) #refrence the
        ↪  window
        self.CalCoef_m = CalCoef_m.Engn(self) #refrence the window
        self.DiFuProp_m = DiFuProp_m.Engn(self) #refrence the
        ↪  window
        self.EngMaDi_m = EngMaDi_m.Engn(self) #refrence the window
```

```
self.FuInjSys_m = FuInjSys_m.Engn(self) #refrence the
↪  window
self.GrapOpt_m = GrapOpt_m.Engn(self) #refrence the window
self.TuChrgSys_m = TuChrgSys_m.Engn(self) #refrence the
↪  window
self.EngCha_m = EngCha_m.Engn(self) #refrence the window
self.Info_m = Info_m.Engn(self) #refrence the window
self.PerfmCrv_m = PerfmCrv_m.Engn(self) #refrence the
↪  window
self.CaseSetup_m = CaseSetup_m.Engn(self) #refrence the
↪  window
```

```
self.ui.toolButton_3.clicked.connect(self.AmAirCond_r)
self.ui.toolButton_5.clicked.connect(self.CalCoef_r)
self.ui.toolButton_2.clicked.connect(self.DiFuProp_r)
self.ui.toolButton_8.clicked.connect(self.EngMaDi_r)
self.ui.toolButton_4.clicked.connect(self.FuInjSys_r)
self.ui.toolButton_6.clicked.connect(self.GrapOpt_r)
self.ui.toolButton_7.clicked.connect(self.TuChrgSys_r)
self.ui.toolButton.clicked.connect(self.EngCha_r)
self.ui.toolButton_12.clicked.connect(self.Info_r)
self.ui.toolButton_13.clicked.connect(self.PerfmCrv_r)
self.ui.toolButton_15.clicked.connect(self.CaseSetup_r)
```

```
#self.C65=10.4

data[datalist[0]]=float(self.AmAirCond_m.ui.lineEdit_24.t⌋
↪  ext())  # açık hava
↪  basıncı
data[datalist[1]]=float(self.AmAirCond_m.ui.lineEdit_25.t⌋
↪  ext())  # açık hava
↪  sıcaklığı
data[datalist[2]]=float(self.CalCoef_m.ui.lineEdit_27.tex⌋
↪  t())    # ısıl
↪  fark
data[datalist[3]]=float(self.CalCoef_m.ui.lineEdit_91.tex⌋
↪  t())    # yanma basınç artış
↪  oranı
data[datalist[4]]=float(self.TuChrgSys_m.ui.lineEdit_92.t⌋
↪  ext())  # Turbo politropik
↪  üssü
data[datalist[5]]=float(self.CalCoef_m.ui.lineEdit_94.tex⌋
↪  t())    # diyagram yuvarlama
↪  kats.
data[datalist[6]]=float(self.DiFuProp_m.ui.lineEdit_17.te⌋
↪  xt())   # C
↪  yüzdesi
data[datalist[7]]=float(self.DiFuProp_m.ui.lineEdit_18.te⌋
↪  xt())   # H
↪  yüzdesi
```

```
data[datalist[8]]=float(self.DiFuProp_m.ui.lineEdit_19.te
↪  xt())    # O
↪  yüzdesi
data[datalist[9]]=float(self.DiFuProp_m.ui.lineEdit_29.te
↪  xt())   # yakıt
↪  yoğunluğu
data[datalist[10]]=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit.text(
↪  ))        # Silindir
↪  sayısı
data[datalist[11]]=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit_2.tex
↪  t())     # strok
↪  uzunluğu
data[datalist[12]]=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit_3.tex
↪  t())      # silindir
↪  çapı
data[datalist[13]]=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit_4.tex
↪  t())      # sıkıştırma
↪  oranı
data[datalist[14]]=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit_5.tex
↪  t())      # biyel
↪  uzunluğu
data[datalist[15]]=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_22.t
↪  ext())   # tutuşma
↪  gecikmesi
data[datalist[16]]=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_20.t
↪  ext())   # püskürtme
↪  başlangıcı
data[datalist[17]]=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_21.t
↪  ext())   # yanma
↪  süresi
data[datalist[18]]=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_34.t
↪  ext())   # wiebe
↪  üssü
data[datalist[19]]=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_23.t
↪  ext())   # yakıt miktası
↪  mg/st
data[datalist[20]]=float(self.TuChrgSys_m.ui.lineEdit_26.
↪  text())  # Turbo basınç artış
↪  oranı
data[datalist[21]]=float(self.EngCha_m.ui.lineEdit_7.text
↪  ())       # motor
↪  zamanı
data[datalist[22]]=float(self.EngCha_m.ui.lineEdit_8.text
↪  ())       # efektif
↪  güç
data[datalist[23]]=float(self.EngCha_m.ui.lineEdit_9.text
↪  ())       # devir
↪  sayısı
data[datalist[24]]=float(self.EngCha_m.ui.lineEdit_15.tex
↪  t())      # Hava fazlalık
↪  katsayısı
data[datalist[25]]=800
data[datalist[26]]=0.8


data['checkBox']=True
data['checkBox_2']=True
data['checkBox_3']=True
```

```
        data['checkBox_4']=True
        data['checkBox_5']=True
        data['checkBox_6']=True




        self.ui.toolButton_18.clicked.connect(self.dosyaacma_r)
        self.ui.toolButton_19.clicked.connect(self.dosyakaydet_r)
        self.ui.toolButton_21.clicked.connect(self.dosyaFkaydet_r)
        self.ui.toolButton_9.clicked.connect(self.dosyayeni_r)


    def dosyayeni_r(self):
        dosya.yeni(self,data,datalist)


    def dosyakaydet_r(self):
        dosya.kaydet(self,data,datalist)

    def dosyaFkaydet_r(self):

        dosya.Fkaydet(self,data,datalist)

    def dosyaacma_r(self):
        dosya.acma(self,data,datalist)


    def PerfmCrv_r(self):
        self.PerfmCrv_m.show
        if self.PerfmCrv_m.exec_():



            #PerfmCrv_h.calis(self)
            print("evet")

            #PerfmCrv_h.calis(self)

        else:

            data['egri']=self.PerfmCrv_m.egri



    def CaseSetup_r(self):
        self.CaseSetup_m.show
        if self.CaseSetup_m.exec_():
            print("evet")

            allRows = self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.rowCount()
```

```
        allColumn =
        ↪  self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.columnCount()
        self.Tablo=list()

        for i in range(allRows):
            self.Tablo.append({})
            for k in range(allColumn):
                basliklar=self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.hor
                ↪  izontalHeaderItem(k).text()
                item=self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.item(i,k
                ↪  ).text()
                self.Tablo[i]['%s'%basliklar]=item


        self.CtrlC=list()
        self.sutun=list()
        self.satir=list()
        self.selectionCopy=self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.se
        ↪  lectedIndexes()
        for i in range(len(self.selectionCopy)):
            self.satir.append(self.selectionCopy[i].row())
            self.sutun.append(self.selectionCopy[i].column())
            #print(row,column)
            item=self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.item(int(sel
            ↪  f.satir[i]),int(self.sutun[i])).text()
            print(item)
        print(self.sutun)
        print(self.satir)



        k=0
        self.CtrlC.append([])
        for i in range(len(self.selectionCopy)):
            self.CtrlC[k].append(self.CaseSetup_m.ui.tableWid
            ↪  get.item(int(self.selectionCopy[i].row()),int
            ↪  (self.selectionCopy[i].column())).text())
            if max(self.sutun)==self.sutun[i] and (i+1) !=
            ↪  len(self.selectionCopy):
                self.CtrlC.append([])
                k=k+1
        print(self.CtrlC)
        stream = io.StringIO()
        csv.writer(stream,delimiter='\t').writerows(self.Ctrl
        ↪  C)
        QtWidgets.qApp.clipboard().setText(stream.getvalue())

    else:
        print("hayir")


        allRows = self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.rowCount()
        allColumn =
        ↪  self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.columnCount()
        print(allRows,allColumn)
        #self.Cases=list()

        self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.setRowCount(allRows+1)
```

```
            for k in range(allColumn):
                item = QtWidgets.QTableWidgetItem()
                self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.setItem(allRows,
                ↪  k, item)

                item=self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.item(allRows
                ↪  -1,k).text()
                print(allRows,k,item,self.CaseSetup_m.ui.tableWid
                ↪  get.rowCount())
                self.CaseSetup_m.ui.tableWidget.item(int(allRows)
                ↪  ,k).setText(str(item))




    def Info_r(self):
        self.Info_m.show
        if self.Info_m.exec_():
            print("evet")
        else:
            print("hayir")

    def AmAirCond_r(self):
        self.AmAirCond_m.show

        if self.AmAirCond_m.exec_():
            data['C22']=float(self.AmAirCond_m.ui.lineEdit_24.tex
            ↪  t())
            data['C23']=float(self.AmAirCond_m.ui.lineEdit_25.tex
            ↪  t())

            self.ui.textBrowser_2.moveCursor(1)
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-- Ambient Air
            ↪  Conditions --"+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Ambient Air
            ↪  Pressure [MPa]"+" : "+str(data['C22'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Ambient Air
            ↪  Temperature [K]"+" : "+str(data['C23'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-------------"
            ↪  +"\n")


        else:
            print("hayır")

    def CalCoef_r(self):
        self.CalCoef_m.show

        if self.CalCoef_m.exec_():
            data['C29']=float(self.CalCoef_m.ui.lineEdit_27.text(
            ↪  ))
            data['C50']=float(self.CalCoef_m.ui.lineEdit_91.text(
            ↪  ))

            data['C61']=float(self.CalCoef_m.ui.lineEdit_94.text(
            ↪  ))
```

```
            self.ui.textBrowser_2.moveCursor(1)
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-- Calculation
            ↪  Coefficients --"+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Combustion
            ↪  Rise Coeff"+" : "+str(data['C50'])+"\n")

            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Intake Temp.
            ↪  Differences"+" : "+str(data['C29'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Diagram
            ↪  Smooting Coeff"+" : "+str(data['C61'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-------------"
            ↪  +"\n")


        else:
            print("hayır")

    def DiFuProp_r(self):
        self.DiFuProp_m.show

        if self.DiFuProp_m.exec_():
            data['C12']=float(self.DiFuProp_m.ui.lineEdit_17.text
            ↪  ())
            data['C13']=float(self.DiFuProp_m.ui.lineEdit_18.text
            ↪  ())
            data['C14']=float(self.DiFuProp_m.ui.lineEdit_19.text
            ↪  ())
            data['C2ab']=float(self.DiFuProp_m.ui.lineEdit_29.tex
            ↪  t())

            self.ui.textBrowser_2.moveCursor(1)
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-- Diesel Fuel
            ↪  Properties --"+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Fuel Density
            ↪  [g/cm3]"+" : "+str(data['C2ab'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Atomic Carbon
            ↪  Ratio"+" : "+str(data['C12'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Atomic
            ↪  Hydrogen Ratio"+" : "+str(data['C13'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Atomic Oxygen
            ↪  Ratio"+" : "+str(data['C14'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-------------"
            ↪  +"\n")


        else:
            print("hayır")

    def EngMaDi_r(self):

        self.EngMaDi_m.show



        if self.EngMaDi_m.exec_():
```

```
            data['C10']=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit.text())
            data['C11A']=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit_2.text(
            ↪  ))
            data['C73']=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit_3.text())
            data['C26']=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit_4.text())
            data['C90']=float(self.EngMaDi_m.ui.lineEdit_5.text())

            self.ui.textBrowser_2.moveCursor(1)
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-- Engine Main
            ↪  Dimensions --"+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Number of
            ↪  Cylinders"+" : "+str(data['C10'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Bore [mm]"+" :
            ↪  "+str(data['C73'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Stroke [mm]"+"
            ↪  : "+str(data['C11A'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Connectig Rod
            ↪  [mm]"+" : "+str(data['C90'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Compression
            ↪  Ratio"+" : "+str(data['C26'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-------------"
            ↪  +"\n")


        else:
            print("hayır")


    def FuInjSys_r(self):

        self.FuInjSys_m.show

        if self.FuInjSys_m.exec_():

            data['C5b1']=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_22.tex
            ↪  t())
            data['C5b2']=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_20.tex
            ↪  t())
            data['C5b3']=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_21.tex
            ↪  t())
            data['C5b4']=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_34.tex
            ↪  t())
            data['C5b5']=float(self.FuInjSys_m.ui.lineEdit_23.tex
            ↪  t())

            self.ui.textBrowser_2.moveCursor(1)
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-- Fuel
            ↪  Injection System --"+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Injected Mass
            ↪  [mg/hub]"+" : "+str(data['C5b5'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Start of
            ↪  Injection [CA]"+" : "+str(data['C5b2'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Ignition Delay
            ↪  [CA]"+" : "+str(data['C5b1'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Combustion
            ↪  Duratin [CA]"+" : "+str(data['C5b3'])+"\n")
```

```
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Wiebe Coef.
            ↪  [m]"+" : "+str(data['C5b4'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-------------"
            ↪  +"\n")


        else:
            print("hayır")


    def GrapOpt_r(self):

        self.GrapOpt_m.show

        if self.GrapOpt_m.exec_():

            data['checkBox']=self.GrapOpt_m.ui.checkBox
            data['checkBox_2']=self.GrapOpt_m.ui.checkBox_2
            data['checkBox_3']=self.GrapOpt_m.ui.checkBox_3
            data['checkBox_4']=self.GrapOpt_m.ui.checkBox_4
            data['checkBox_5']=self.GrapOpt_m.ui.checkBox_5
            data['checkBox_6']=self.GrapOpt_m.ui.checkBox_6


            print("evet")


        else:
            print("hayır")

    def TuChrgSys_r(self):

        self.TuChrgSys_m.show

        if self.TuChrgSys_m.exec_():
            data['E24']=float(self.TuChrgSys_m.ui.lineEdit_26.tex
            ↪  t())
            data['E25']=float(self.TuChrgSys_m.ui.lineEdit_92.tex
            ↪  t())

            self.ui.textBrowser_2.moveCursor(1)
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("--
            ↪  Turbocharger System --"+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Turbocharger
            ↪  Pressure Ratio"+" : "+str(data['E24'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Polytropic
            ↪  Coeff"+" : "+str(data['E25'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-------------"
            ↪  +"\n")


        else:
            print("hayır")


    def EngCha_r(self):
        self.EngCha_m.show
```

```
        if self.EngCha_m.exec_():

            data['C7']=float(self.EngCha_m.ui.lineEdit_7.text())
            data['C8h']=float(self.EngCha_m.ui.lineEdit_8.text())
            data['C9']=float(self.EngCha_m.ui.lineEdit_9.text())
            data['C4']=float(self.EngCha_m.ui.lineEdit_15.text())

            self.ui.textBrowser_2.moveCursor(1)
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-- Engine
            ↪  Characteristics --"+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Engine Speed
            ↪  [rpm]"+" : "+str(data['C9'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Power [kW]"+"
            ↪  : "+str(data['C8h'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Engine
            ↪  Cycle"+" : "+str(data['C7'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Air-Fuel
            ↪  Ratio"+" : "+str(data['C4'])+"\n")
            self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-------------"
            ↪  +"\n")


        else:
            print("hayır")

    def reportProgress(self, n):
        #self.stepLabel.setText(f"Long-Running Step: {n}")
        self.ui.progressBar.setProperty("value", n)
        #print("reportprogress",n)


    def reportyaziyaz(self,yazi,engspd):
        self.ui.textBrowser.moveCursor(1)
        self.ui.textBrowser.insertPlainText("Engine Speed %s
        ↪  [rpm]"%engspd+"\n")
        self.ui.textBrowser.insertHtml(yazi)
        self.ui.textBrowser.insertPlainText("-------------"+"\n")

    def reporttamyuk(self,veri):
        FullLoad.excel(self,veri)

    def reportbilgi(self,aralog):
        self.ui.textBrowser_2.moveCursor(1)
        self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("--Iteration--"+"\n
        ↪  ")
        self.ui.textBrowser_2.insertPlainText(aralog)
        self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("-------------"+"\n
        ↪  ")

    def reportgrafik(self,veri):

        log_grafik.grafik(self,veri)


    def reportDOEbaslat(self,veri):

        islemci=multiprocessing.cpu_count()
```

```
        self.ui.textBrowser_2.clear()
        self.ui.textBrowser.clear()
        self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("---Virtual Diesel
        ↪  v%s---"%versiyon+"\n")
        self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("\n"+"\n"+"DoE
        ↪  Mode: ON "+"\n")
        self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Full Load Curve
        ↪  Created "+"\n")
        self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Number of
        ↪  Processors: %s "%islemci+"\n")
        self.ui.textBrowser_2.insertPlainText("Total Number of
        ↪  DoE iterations: %s "%veri+"\n")



def reportDOE(self,veri):
    duzenle=(veri[0],veri[4],round(veri[1],0),veri[2],veri[3])

    self.ui.textBrowser.moveCursor(1)
    self.ui.textBrowser.insertPlainText("Speed: %s Load: %s
    ↪  Torque: %s Advance: %s RailP: %s "%duzenle+"\n")



def calis2(self):

    #hesap.diesel(self)


    self.thread = QThread()
    self.worker = Worker()
    self.worker.moveToThread(self.thread)
    self.thread.started.connect(self.worker.run)

    self.worker.progress.connect(self.reportProgress)
    self.worker.yaziyaz.connect(self.reportyaziyaz)
    self.worker.tamyuk.connect(self.reporttamyuk)
    self.worker.bilgi.connect(self.reportbilgi)
    self.worker.grafik.connect(self.reportgrafik)
    self.worker.DOErapor.connect(self.reportDOE)
    self.worker.DOEbaslat.connect(self.reportDOEbaslat)

    self.worker.finished.connect(self.thread.quit)
    self.worker.finished.connect(self.worker.deleteLater)
    self.thread.finished.connect(self.thread.deleteLater)

    print("tret başlangıç")
    self.thread.start()

    self.ui.toolButton_20.setEnabled(False)
    self.thread.finished.connect(
        lambda: self.ui.toolButton_20.setEnabled(True)
    )
```

```
        print("tamam")




        #self.ui.textBrowser.moveCursor(1)

    def rapor(self):
        global data, datalist
        cikti.excel(self,data,datalist)
```

A.2 Performans Eğrisi Belirleme Hesabı

```
def calis(self):

##    self.Nmax=2550
##    self.Ntork=1500
##    self.Nguc=2300
##    self.Mtork=500
##    self.Mguc=120
##    self.Nidle=650
    plt.close('all')
    self.Nmax=int(self.Nmax)
    self.Ntork=int(self.Ntork)
    self.Nguc=int(self.Nguc)
    self.Mtork=int(self.Mtork)
    self.Mguc=int(self.Mguc)
    self.Nidle=int(self.Nidle)
    self.NHidle=self.Nidle+150
    self.Midle=self.Mtork/5


    #fprint(self.Nmax,self.Ntork,self.Nguc,self.Mtork,self.Mguc,s
    ↪  elf.Nidle)

    Tguc=(self.Mguc/1.34)*(60*1000/(2*math.pi))/self.Nguc


    if self.Nmax<=self.Nguc:
        self.Nmax=int(round(self.Nguc+100))

    donum1=(round((self.Nidle+self.Ntork)/200))*100
    donum2=(round((self.Nmax+self.Nguc)/2-100))

    n=[]
    self.Tork=[]
    self.Guc=[]
    self.egri=[]

    Trk=Tguc
```

```
    for i in range(self.Nguc,self.Nmax,100): # Max hızdan, max
    ↪  güç noktasına gidiş
        self.egri.append([i,round(Trk,3)])
        if i>=self.Nguc+100:
            Trk=Trk-((Tguc)/((self.Nmax-self.Nguc)/100))
            continue
        Trk=Trk-((Tguc)/((self.Nmax-self.Nguc)/100))*0.55

    self.egri.append([self.Nmax,10])


    Trk=(self.Mguc/1.34)*(60*1000/(2*math.pi))/(self.Nguc-100)

    for i in range(self.Nguc-100,self.Nidle-100,-100): # Güç
    ↪  Platosu
        Trk=(self.Mguc/1.34)*(60*1000/(2*math.pi))/(i)
        if Trk>self.Mtork: # Girilen tork değerinden yüksek bir
        ↪  torka gelirsek, çık
            break
        self.egri.append([i,round(Trk,3)])

    for i in range(i,self.Ntork-100,-100): # Tork Platosu, "i"
    ↪  değeri, bir önceki çevrimde bulunan high end torque
    ↪  noktasını gösteriyor.
        Trk=self.Mtork
        self.egri.append([i,round(Trk,3)])

    self.egri.sort() # sort(reverse=True)

    for i in range(i-100,self.NHidle,-100): # Yüksek Tork Bitiş
    ↪  noktasından rölantiye iniş

        self.AltGuc=self.NHidle*self.Midle/9549
        self.UstGuc=self.Mtork*self.Ntork/9549
        self.Adm=((self.Ntork-self.NHidle))
        self.Egim=(self.UstGuc-self.AltGuc)/self.Adm
##        print(self.AltGuc,self.UstGuc,self.Adm,self.Egim)

        Trk=((((i)-self.NHidle)*self.Egim)+(self.Midle*self.NHidl⌋
        ↪  e/9549))*9549/i


        self.egri.append([i,round(Trk,3)])
        self.egri.sort() # sort(reverse=True)

    for i in range(i-100,self.Nidle-100,-100):

        self.egri.append([i,self.Midle])
        self.egri.sort() # sort(reverse=True)


    for i in range(len(self.egri)):
        n.append(self.egri[i][0])
        self.Guc.append(round(self.egri[i][0]*self.egri[i][1]*1.3⌋
        ↪  4/(60*1000/(2*math.pi)),2))
        self.Tork.append(self.egri[i][1])
```

```
def time():
    now=datetime.now()
    date_time = now.strftime("%m%d%Y_%H%M%S")
    #print("date and time:",date_time)
    return(date_time)
```

A.3 Karar Algoritması

```
def aynianda(adim,data):

    data['C9']=adim[0]
    data['TrkHdf']=adim[1]*adim[4]/100
    data['C5b2']= adim[2]+360

    C12 = 80 # maxyan
    C13 = 25 # minyan
    C14 = 500 # minbas
    C15 = 1800 # maxbas
    C16 = 5 # minykt
    C17 = 190 # maxykt

    data['C5b3'] = (C12-C13)*(((data['C5b5']/adim[3])-(C16/C15))/
    ↪  ((C17/C14)-(C16/C15)))+C13 # yanma süresi , C5b5:yakit
    ↪  miktarı
    data['C5b4'] = ((((adim[3]-300)*(1-0.7))/(1600-300))-1)*(-1)
    ↪  # wiebe üssü
    data['C5b5']=(data['TrkHdf']*data['C9']/9549)*210*1000/60/dat
    ↪  a['C9']/2 # bsfc 210 g/kwh kabulü ile itereasyon
    ↪  başlangıcı yakıt tüketimi

    if data['TrkHdf']==0:
       data['C5b5']=10

    while 1==1:

        onhes.kos(data) # Ön hesap süreci
        emhes.kos(data) # Emme süreci
        yanhes.kos(data) # Yanma süreci
        genhes.kos(data) # Genişleme süreci
        arthes.kos(data) # Art hesap süreci

        aralog=str("Speed :"+ str(round(data['C9'],1))+" [rpm]
        ↪  \n"+
                   "Target Torque: "+
                   ↪  str(round(data['TrkHdf'],1))+" [Nm] \n"+
                   "Actual Toque: "+str(round(data['C86'],1))+"
                   ↪  [Nm] \n"+
                   "Fuel: "+ str(round(data['C5b5'],1))+"
                   ↪  [mg/st]\n\n")
```

```
            ibuyuk=data['C11A']
            imdatb=data['C73']
            baba=data['C10']

            MotHac=math.pi*(imdatb**2)*ibuyuk*baba/(4*10**6)
            data['GucHdf']=data['TrkHdf']*data['C9']/9549
            data['PeffHdf']=data['GucHdf']*4*30/(MotHac*data['C9'])
            data['PinHdf']=data['C66']+data['PeffHdf']

            data['PinFark']=abs(data['C60']-data['PinHdf'])*100/data[
            ↪  'PinHdf']

            yuzde=0.1
            if data['PinFark']<yuzde:

                data['yakitst'].append([data['C9'], data['C86'],
                ↪  data['C85'], data['C5b5']])



                return ([data['C9'], data['C86'], data['C85'],
                ↪  data['C5b5'], adim[2] , adim[3] , adim [4],
                ↪  data['C53'] , data['C59'] ]) #C53: PFP, C59:ExhT


                break


            #Yakıt Kontrol v3#

            if data['C60'] <= 0:
                return ([data['C9'], data['C86'], data['C85'],
                ↪  data['C5b5'], adim[2] , adim[3] , adim [4],
                ↪  data['C53'] ,data['C59'] ]) #C53: PFP, C59:ExhT
                break


            data['C5b5']= data['C5b5']*(data['PinHdf']/data['C60']) #
            ↪  C60: Ortalama indike basınç


    def diesel(self,data,datalist):

        data['yakitst']=[]
        if 'egri' in data:

            ### GEÇİCİ LOG ###
            file = open("EGR_"+(str(time())+".txt") , "a" )

            file.write(str(data['egri'])+"\n")
            file.close()
            ### GEÇİCİ LOG ###


            self.egr=data['egri']

            data['DOE']=[]
```

```
        data['DOEf']=[]

        for i in range(len(self.egr)):
            for yuk in range(100,10,-10): # (100,75,50,20) #
            ↪  range(100,0,-50)
                for aci in range(-20,10,1) : # range(-10,10,4) #
                ↪  range(-10,10,4)
                    for rail in range(500,1700,100): #
                    ↪  (500,900,1200,1500) # range(500,1700,400)
                        data['DOE'].append([self.egr[i][0],self.e
                        ↪  gr[i][1],aci,rail,yuk])

        #print(data['DOE'])
        #sys.exit()


        self.DOEbaslat.emit(float(round(len(data['DOE']),0)))

    if 'egr' in dir(self):


        data['datalist']=datalist
        pool = multiprocessing.Pool(processes=multiprocessing.cpu
        ↪  _count())

        veriler=partial(aynianda, data=data)

        data['yakitst']=[]

        k=1
        for imdatbuyuk in tqdm.tqdm(pool.imap_unordered( veriler,
        ↪  data['DOE']), total=len(data['DOE'])):
            self.progress.emit(k/(len(data['DOE']))*100)
            self.DOErapor.emit(data['DOE'][k-1])
            k=k+1
            data['yakitst'].append(imdatbuyuk)


        data['yakitst']= sorted ( data['yakitst'], key= lambda e:
        ↪  ( e[0], -e[6]))

        ### GEÇİCİ LOG ###
        file = open("LOG_"+(str(time())+".txt") , "a" )

        file.write(str(data['yakitst'])+"\n")
        file.close()
        ### GEÇİCİ LOG ###

        PFPSinir=250
        ExhTSinir = 15000 #DegC

        data['DOEs']=[0,0,0,1222222,0,0,0,0,0]
        for i in range(len(data['yakitst'])):

            if i == (len(data['yakitst'])-1):
                data['DOEf'].append(data['DOEs'])
                print("burada 103")
                break
```

```
            if data['yakitst'][i][0] == data['yakitst'][i+1][0]
            ↪  and data['yakitst'][i][6] ==
            ↪  data['yakitst'][i+1][6]:

                print("burada 102")
                if data['yakitst'][i][3] <
                ↪  data['yakitst'][i+1][3] and
                ↪  data['yakitst'][i][3] < data['DOEs'][3] and
                ↪  data['yakitst'][i][7] < PFPSinir and
                ↪  data['yakitst'][i][8] < ExhTSinir :
                    print("burada 104")
                    data['DOEs'] = data['yakitst'][i]

                elif data['yakitst'][i+1][3] < data['DOEs'][3]
                ↪  and data['yakitst'][i+1][7] < PFPSinir and
                ↪  data['yakitst'][i+1][8] < ExhTSinir:
                    print("burada 105")
                    data['DOEs'] = data['yakitst'][i+1]

            if data['yakitst'][i][6] != data['yakitst'][i+1][6]:

                print("eklendi 101")
                data['DOEf'].append(data['DOEs'])
                data['DOEs']=[0,0,0,1222222,0,0,0,0,0]


        data['tamyuk']=data['DOEf']

        ### GEÇİCİ LOG ###
        file = open("LOG_2_"+(str(time())+".txt") , "a" )
        file.write(str(data['tamyuk'])+"\n")
        file.close()
        ### GEÇİCİ LOG ###

        print(data['tamyuk'])
        self.tamyuk.emit(data)
    else:
        onhes.kos(data) # Ön hesap süreci
        emhes.kos(data) # Emme süreci
        yanhes.kos(data) # Yanma süreci
        genhes.kos(data) # Genişleme süreci
        arthes.kos(data) # Art hesap süreci
        print("datalar yenilendi")
        log_grafik.kos(self,data)
        self.grafik.emit(data)
```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. A. Albayrak, O. Gezer, O. Özener, C. Büyük, M. Özkan, “The effect of multiple injection on CI engine pollutant emissions and green house gases,” Fuel, vol. 349, p. 128 667, 2023

Konferans Bildirisi

1. C. Büyük, M. Özkan, "Determination of an Algoritm of Calibration Strategies for Internal Combustion Diesel Engines," 12. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 2023, İstanbul