T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA AZOT OKSİT EMİSYONLARININ MODELLENMESİ

NAİM DÖNMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ORKUN ÖZENER

İSTANBUL, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA AZOT OKSİT EMİSYONLARININ MODELLENMESİ

Naim DÖNMEZ tarafından hazırlanan tez çalışması **12.07.2019** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ARSLAN

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, içten yanmalı motorlarda azot oksit emisyonlarının yarı fiziksel modelleme yöntemiyle modellenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda desteklerini esirgemeyen ve çalışmalarıma yön veren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER'e teşekkür ederim.

Modelleme konusunda bana yön veren, yüreklendiren, desteğini ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen Ford OTOSAN'daki değerli ekip liderim Didem AYDIN'a teşekkür ederim.

İlk adımlarımı atmamı sağlayan, okumayı yazmayı öğreten, eğitim hayatım boyunca sürekli arkamda duran ve hep daha ilerisini hedeflememi söyleyen annem Zülbiye DÖNMEZ'e ve babam Nazım DÖNMEZ'e teşekkürü borç bilirim.

Hayata bambaşka bir pencereden bakmamı sağlayan ve bana her zaman en doğru bakış açısını kazandıran, doğrusuyla yanlışıyla tüm kararlarımın her zaman arkasında duran, yüksek lisansı benimle birlikte bitiren, orjinal fikirleriyle, yönlendirmeleriyle, desteği ve hoşgörüsüyle beni benden çok düşünen, her daim yüzümü güldüren, hayatta verdiğim en doğru karar olan, hayat arkadaşım, değerli eşim Hatice DÖNMEZ'e teşekkür ederim.

Mayıs, 2019

Naim DÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.1.1 İçten Yanmalı Motorlarda Yanma 2

1.1.2 Emisyonlar 7

1.1.2.1 Azot Oksit (NO_X) Emisyonları 8

1.1.2.2 Karbonmonoksit (CO) Emisyonları 8

1.1.2.3 Hidrokarbon (HC) Emisyonları 9

1.1.2.4 Partikül Madde (PM) Emisyonları 9

1.1.3 Emisyon Regülasyonları 10

1.1.4 İçten Yanmalı Motorlarda Azot Oksit Emisyonlarının Modellenmesi Amacıyla Yapılan Çalışmalar 11

1.2 Tezin Amacı 20

1.3 Hipotez 20

BÖLÜM 2

AZOT OKSİT EMİSYONLARI 22

2.1 Azot Oksit Oluşum Mekanizmaları 23

2.1.1 Termal Azot Oksit Oluşumu 23
2.1.2 Yakıt Kaynaklı Azot Oksit Oluşumu 23
2.1.3 Fenimore Azot Oksit Oluşum Mekanizması 24
2.1.4 N_2O kaynaklı Azot Oksit Oluşum Mekanizması 24

2.2 Azot Oksit Emisyonu Oluşumuna Etki Eden Parametreler 25

2.2.1 Yakıt Püskürtme Sistemi 25
2.2.2 Ateşleme Zamanı/Tutuşma Gecikmesi 25
2.2.3 Hava/Yakıt oranı 26
2.2.4 Art Gaz Etkisi 26

2.3 Azot Oksit Emisyonu Azaltma Yöntemleri 27

2.3.1 Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR) 28
2.3.2 Seçici Katalitik İndirme (SCR) 29
2.3.3 Lean-NO_X Katalisti 30

2.4 Azot Oksit Emisyonu Oluşumu Tahminleme Yöntemleri 30

2.4.1 Fiziksel Tabanlı Modeller 33
2.4.2 Veriye Dayalı Black Box Modeller 34
2.4.3 Grey Box (Yarı fiziksel) Modeller 35

2.5 Model Seçimi 37

2.6 Test Motoru ve Deney Düzeneği 37

BÖLÜM 3

AZOT OKSİT EMİSYON OLUŞUMU TAHMİNLEME MODELİ ve DETAYLARI 40

3.1 Girdi Tanımlama 40

3.1.1 Silindir İçi Maksimum Sıcaklık 42
3.1.2 Temiz Hava Miktarı 46
3.1.3 Yakıt Miktarı 46
3.1.4 Yakıt Ray Basıncı 46
3.1.5 EGR/Toplam Hava Oranı 47

3.1.6 Motor Gücü 47
3.1.7 Azot Oksit 47
3.2 Model Tasarımı 48
3.3 Model Eğitme 49
3.4 Doğrulama 56
BÖLÜM 4
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 59
KAYNAKLAR 61
EK-A
SİLİNDİR İÇİ MAKSİMUM SICAKLIK MATLAB KODLARI 65
ÖZGEÇMİŞ 71

SİMGE LİSTESİ

BG	Beygir gücü
^0C	Celsius
CH	Karbon-Hidrojen bağı
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
e	Euler sayısı
H	Hidrojen
H_u	Yakıt alt ısıl değeri (kj/kg)
HCN	Hidrosiyanik asit
HC	Hidrokarbon
H_2O	Su
^0K	Kelvin
k	Yarı fiziksel model sabiti
k_1	Silindir içi yanmış gazların maksimum sıcaklık katsayısı
k_2	Temiz hava miktarı katsayısı
k_3	Yakıt miktarı katsayısı
k_4	Yakıt ray basıncı katsayısı
k_5	EGR miktarının silindir içine alınan toplam havaya oran katsayısı
k_6	Motor gücü katsayısı
k_x	Değişken katsayılar
kW	Kilowatt
L	Litre
L_x	x noktasındaki iş (kj/kg)
m_{hava}	Temiz hava miktarı (kg/saat)
m_{NOx}	Azot oksitlerin kütlesi (ppm)
n_e	Taze dolgunun kmol sayısı (kmol/kg)
n_r	Bir önceki çevrimden kalan yanmış gazların mol sayısı (kmol/kg)
n_{yu}	Yanma ürünlerinin mol sayısı (kmol/kg)
N, N_2	Azot
NH_3	Amonyak
NO	Azot oksit
NO_2	Nitrit
NO_X	Azot oksitler
N_2O	Diazot monoksit

N_2O_3	Dinitrojen trioksit
N_2O_5	Dinitrojen pentaoksit
O, O_2	Oksijen
OH	Hidroksit
P	Motor gücü (BG)
p_{ray}	Yakıt ray basıncı (bar)
P_x	x noktasındaki basınç (bar)
ppm	Parts per million (Milyonda parça)
q_{tot}	Yakıt tüketim miktarı (mg/strok)
$\bar{R}$	Gaz sabiti
R	Çoklu korelasyon katsayısı
R^2	Çoklu açıklayıcılık katsayısı (uyum düzeyi)
T_{max}	Silindir içi yanmış gazların maksimum sıcaklığı (^{0}K)
T_x	X noktasındaki sıcaklık (^{0}K)
U_x	x noktasındaki gazın iç enerji değişimi (kj/kg)
V_x	x noktasındaki hacim (m^3)
$w.c_v'$	Havanın sabit hacimde molar ısınma ısısı (kj/kmol.^{0}K)
$w.c_v''$	Yanmış gazların sabit hacimde molar ısınma ısısı (kj/kmol.^{0}K)
x_n	Fiziksel değişken
α	Krank açısı (^{0})
Υ_r	Artık egzoz ürünleri katsayısı
η_y	Yanma verimi
μ	Kmol sayısının gerçek değişim katsayısı
ρ	Dolgunun özkütlesi (kg/m^3)

KISALTMA LİSTESİ

ARX	Autoregressive model with exogenous input
CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı akışkanlar dinamiği)
ECU	Engine Control Unit (Motor kontrol ünitesi)
EGR	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
KMA	Krank Mili Açısı
MAP	Manifold Absolute Pressure (Manifold mutlak basıncı)
MAF	Mass Air Flow (Kütlesel Hava Akışı)
NEDC	New European Driving Cycle
PM	Partikül maddeler
SCR	Selective Catalytic Reduction (Seçici katalitik indirgeme)
SOI	Start of Injection (Enjeksiyon başlangıcı)
VGT	Variable Geometry Turbocharger (Değişken geometrili turboşarj)
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Dizel Yanması [4] 7
Şekil 1.2 Hava fazlalık katsayısının emisyonlara etkisi [6] 10
Şekil 1.3 Yıllara Göre Emisyon Regülasyonlarının Değişimi [10] 10
Şekil 2.1 SCR [40] 29
Şekil 2.2 Yıllara göre azot oksit emisyonu modeli yapan araştırmacılar[27] 31
Şekil 2.3 INCA programı ekran görüntüsü 38
Şekil 2.4 Deney düzeneği [48] 39
Şekil 3.1 Dizel motorlarda yakıt/hava oranına bağlı NO, NO_X oluşumu [37] 41
Şekil 3.2 Girdi yapısı 42
Şekil 3.3 Silindir içi basınç ölçüm sensörü 43
Şekil 3.4 Krank mili açısına bağlı silindir içi basınç ölçümü 43
Şekil 3.5 Motor üzerinde bulunan dahili NO_X sensörü 48
Şekil 3.6 Model yapısı 48
Şekil 3.7 Motor haritalama testi 50
Şekil 3.8 Silindir içi maksimum sıcaklık veri noktaları 51
Şekil 3.9 Temiz hava miktarı veri noktaları 51
Şekil 3.10 Yakıt miktarı veri noktaları 52
Şekil 3.11 Yakıt ray basıncı veri noktaları 52
Şekil 3.12 EGR/toplam hava oranı veri noktaları 53
Şekil 3.13 Motor gücü veri noktaları 53
Şekil 3.14 NO_X ölçüm sonuçları 54
Şekil 3.15 Empirik model formülü tahmin gücü 56
Şekil 3.16 NO_X ölçüm ve tahmin sonuçlarının kıyaslanması 56
Şekil 3.17 Model doğrulama statik noktaları 57
Şekil 3.18 NO_X ölçüm ve doğrulama tahmin sonuçlarının kıyaslanması 57
Şekil 3.19 Model doğrulama hata oranı 58

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Girdi parametreleri minimum maksimum değerleri 50
Çizelge 3.2 Girdi parametreleri katsayıları..... 54

ÖZET

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA AZOT OKSİT EMİSYONLARININ MODELLENMESİ

Naim DÖNMEZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER

Günümüzde çevre kirliliğinin en büyük nedenlerinden olan fosil yakıt emisyonlarını azaltmak için devletler ve kuruluşlar tarafından uygulanan kurallar sıkılaşmaktadır. İçten yanmalı motorların, hava ve yakıt karışımını mekanik işe dönüştürdüğü mekanizma olan yanma öncesinde, esnasında ve sonrasında ortaya çıkardığı emisyonları azaltmak için bir çok teknoloji geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Emisyonların ölçülmesi için kullanılan fiziksel sensörler yerine fiziksel, grey box ve black box modelleme yöntemleriyle aynı işlevi gören sanal sensörler geliştirilmektedir.

Bu çalışma, yanma sonrası ortaya çıkan ve egzoz manifoldundan atılan azot oksit emisyonlarını yarı fiziksel modelleme yöntemiyle statik test verileri üzerinden modelleyecektir. Model için alınan veriler, Ford OTOSAN Ecotorq 13L, 6 silindir, 353 kW motorundan alınmıştır. Fiziksel girdi olarak; silindir içi basınç ölçümü bazlı silindir içi maksimum yanmış gaz sıcaklığı alt modeli, ölçülen girdi olarak; motor devrine ve torkuna bağlı olarak hesaplanan güç, silindir içine alınan temiz hava miktarı (ECU verisi), EGR'dan gelen tahmini yanmış gaz miktarı (ECU verisi), yakıt ray basıncı (ECU verisi), silindir içine gönderilen yakıt miktarı (ECU verisi) alınmıştır. Test motoru üzerinde yer alan sensör setleriyle ölçülebilen parametreler ile oluşturulan model, istatistiksel yöntemlerle önerilen empirik formüle dönüştürülecektir. Sonuç (hedef) verisi olarak motor çıkışından ölçülen dahili azot oksit sensörü kullanılmıştır.

Bulunan empirik formül, test motorundan alınan deneysel motor haritalama testi verileri ile eğitilmiş ve motor üzerinde rastgele seçilen çalışma noktalarında doğrulaması yapılmıştır. Model tahmin sonuçları incelendiğinde %1 ile %10 arasında değişen hata oranı olduğu görülmüş ve bu oranın içten yanmalı motorlarda NO_x emisyonu tahminlemek için kabul edilebilir olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dizel motor, egzoz emisyonları, NOx, NOx modelleme, yarı fiziksel modelleme

ABSTRACT

MODELING of NOx EMMISSIONS in INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Naim DÖNMEZ

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Orkun ÖZENER

In order to reduce fossil fuel emissions, which are among the biggest threats of human health in the global world, regulations are getting harder every day. Many technologies continue to be developed to reduce/eliminate emissions during combustion (at the source) or after combustion. Instead of physical sensors used for the measurement of emissions, virtual sensors (VS) are developed and used by physical, gray box and black box modeling methods.

In the current study, the NOx emissions generated at the engine output are modeled with steady state data by semi-physical modeling technique. The studies were carried out with data from 13 l Ecotorq engine (made by Ford OTOSAN) , 6 cylinder and 353 kW diesel engine. The physical value used for the model is the maximum temperature calculated via a temperature sub-model based on the in-cylinder pressure measurement. The input data of the model are; calculated engine power at the electronic control unit (ECU), the estimated exhaust gas recirculation (EGR) ratio from ECU, the fuel rail pressure , the amount of injected fuel per stroke and the amount of trapped in cylinder air mass. The NOX model created by these parameters are converted into empiric formula by statistical methods.

The engine NOX sensor data used as the target output data for validating and training the model parameters. Then validation results showed that the prediction accuracy of the developed NOX model is between 1% and 10% range that can be acceptable for internal combustion applications.

Keywords: Diesel engine, exhaust emissions, NO_X, NO_X modelling, semi-physical modelling

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

İnsanoğlu var olduğundan beri seyahat etmiştir. Atalarımızın göçebe yaşam sürdüğü zamanlarda yürüyerek gittikleri mesafeler, evcilleştirilmiş hayvanları ile daha da kısalmıştır. Sanayi devrimi ile birlikte gelen ulaşım araçlarıyla ise binlerce yıl önceye göre çok daha hızlı seyahat etme lüksüne erişmiş bulunmaktayız. İçten yanmalı motorların keşfiyle birlikte gelişen dünya, durdurulamayan bir hızla teknolojik atılımlar ile büyümekte ve globalleşmektedir. Büyüyen dünyanın en büyük sektörlerinden biri olan içten yanmalı motor teknolojisi, tüketmekte olduğu fosil kaynaklar ve çevreye yaydığı zehirli gazlar ile sürekli göz önündedir. Her gün milyonlarca insan, milyonlarca ton yakıt tüketmekte ve bunun sonucunda çevreye zehirli gaz yaymaktadır. Global dünyada insan sağlığının en büyük tehditlerinden olan fosil yakıt emisyonlarını, kaynağında (yanma esnasında) veya oluşumdan sonra (yanma sonrasında) azaltmak/yok etmek için bir çok teknoloji geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Günümüzdeki teknolojiler, yanma gerçekleşmeden oluşabilecek emisyonları kontrol etmektedir. Oluşan emisyonlar ölçülmekte veya tahminlenmekte ve kimyasal reaksiyonlar ile zararlı olan gazlar indirgenerek zararsız hale dönüştürülmektedir. Tüm bu gelişmelere/ilerlemelere rağmen yine de çevreye emisyon gazları atılmaktadır. Yasa koyucular tarafından belirlenen emisyon limitleri ile emisyon gazlarının çevreye verdiği zararı en aza indirmek için araç üretici firmaları bağlayıcı standartlar oluşturulmaktadır. Günden güne daralan bu limitlerden dolayı motor teknolojisi gelişmeye zorlanmakta ve standartları sağlamak için bir çok yeni teknoloji ortaya çıkmaktadır. Egzoz gazının yeniden yanma odasına

gönderilerek yanma havasına katılması, egzoz gazında oluşan azot oksitlerin motor sonrasında üre dozlanarak indirgenmesi ve çevreye dönüştürülerek atılması bunlardan bazılarıdır. Standartlar ile gelen limitler sonrası, ticari kaygı gütmek zorunda olan araç üretici firmaları çeşitli maliyet azaltma yöntemleri uygulamaktadır. Motor teknolojisi için günümüzde en büyük maliyet azaltma yöntemlerinden biri fiziksel olarak kullanılan sensörler yerine, sensör görevi görecek sanal sensörler oluşturmaktadır. Çeşitli modelleme yöntemleri ile oluşturulan sanal sensörler fiziksel sensörlerin yerini almakta ve araç başı maliyetlerin düşmesinde etkili olmaktadır. Emisyon standartlarında bulunan azot oksit limitlerini sağlamak ve ölçmek için araçlarda kullanılan fiziksel sensörlerin yerine birçok modelleme yöntemi kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları sadece test ortamında çalışırken bazıları ise fiziksel sensörlerin yerini almaya adaydır. Yine de mükemmel güvenirlikte bir sanal emisyon sensörü geliştirilememiş ve fiziksel sensörlerin yerini alamamıştır. Örnek verilecek olursa, araçlarda fiziksel azot oksit sensörü çalışmadığında/bozulduğunda bunun görevini görecek bir model ve emisyon limitlerini sağlaması için oluşturulan kontrol mekanizması mevcuttur fakat halen fiziksel olarak azot oksit sensörü motor üzerinde vardır.

İlerleyen bölümlerde içten yanmalı motor teknolojisi incelenecek, azot oksit oluşum ve azaltma yöntemleri ele alınacaktır. Buna bağlı olarak fiziksel sensörlerin yerine geçebilecek modellerin neler olabileceği ve seçilen modelleme yöntemi ile oluşturulan azot oksit tahmin modeli ve doğruluğu incelenecektir.

1.1.1 İçten Yanmalı Motorlarda Yanma

İçten yanmalı motorlar, yakıtın iç kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi sonucu sıcaklık ve basınçları yükselen yanma gazlarının genişlemesiyle yapılan işi piston, biyel ve krank mili mekanizmasıyla mekanik işe dönüştürmektedir [1]. İçten yanmalı motorların günümüzde en yaygın kullanımları benzinli (kıvılcım veya buji ateşlemeli Otto çevrimine göre çalışan) ve dizel (Sıkıştırma ateşlemeli Dizel çevrimine göre çalışan) motorlardır.

İçten yanmalı motorlarda yanma olayı, 1-5 milisaniye gibi çok kısa bi sürede gerçekleşen fizikokimyasal bir işlemdir. Bu kısa sürede, tam yanma gerçekleşmesi ve optimum verim alınabilmesi için yakıt-hava karışımının homojen olarak çok iyi karışması gerekmektedir.

Yakıt-hava karışımının tam yanması için her yakıt molekülünde yeterli sayıda oksijen molekülü bulunması durumunda bu karışım için tam karışmış denilebilir. Benzinli motorlarda tam karışımın sağlanması pratikte düşünüldüğünden daha karmaşık ve zordur. Bunun nedeni moleküler difüzyon olayıdır. Yani, aynı fazda bulunan iki gaz molekülünün (yakıt ve hava) difüzyonunun tam olması için gerekli olan sürenin oldukça fazla olmasıdır. Bu sürenin kısaltılması için moleküllerin mikro hacimlerde difüzyona uğramasını sağlamak gerekir. Mikro hacim boyutları türbülanslı akışın şiddetine bağlı olduğundan karışım homojenliği benzinli motorlar için türbülansın bir fonksiyonudur. Dizel motorlarda homojen karışımın oluşması ve yanma olayı, yanma odası içerisinde hemen hemen aynı anda gerçekleşmektedir. Enjektörden yakıtın püskürtülmesi sonucu yüksek basınçlı yakıtın sıvı halden gaz hale geçmesi için bir süre olacağından ilk anda karışım homojen değildir. Bu nedenle dizel motorlarda karışım homojenliği yakıtın buharlaşma hızı ve hava ile karışma hızının fonksiyonudur. Karışım homojenliği bu iki motorda farklı fonksiyonlara sahiptir. Homojen karışımların yanma hızları homojen olmayan karışımlara göre daha kısa sürede tamamlandığı için benzinli motorların devir sayıları dizel motorlara daha yüksektir [1]. Karışımın hazırlanmasındaki zorlukların yanı sıra yanma reaksiyonunun karmaşıklığı da ayrı bir dikkat edilmesi gereken konudur. Oksitlenmenin zincir reaksiyonlar teorisi yardımıyla açıklanması motordaki yanmayı anlamaya yönelik atılmış bir adımdır. Bu teoriye göre yakıtın yanması birbirini takip eden kesintisiz reaksiyonlardan oluşmakta ve bu sırada farklı radikaller, valans bağları ve atomik gazlar gibi tamamlanmamış ara ürünler oluşmaktadır. Bu ara ürünlerin oluşum mekanizması ise; görünür yanmadan önce birtakım ön reaksiyonlar ile ön oksitlenmiş molekül konsantrasyonu belirli bir kritik değere çıkar ve bu moleküller parçalanarak yeni aktif atom ve radikalleri oluşturur. Bu şekilde artan aktif sayısına göre ön reaksiyon hızı artar ve yanma oluşarak tamamlanmış olur [2]. Reaksiyon hızları aynı zamanda yanan kütlelerin konsantrasyonuna da bağlıdır. Eğer yanan kütlelerden birisinin konsantrasyonu stokiyometrik oranın çok fazla üstünde veya çok fazla altında ise reaksiyon durur [1].

Benzinli motorda yanma, yakıt hava karışımının, yanma odası içerisinde bulunan ateşleme sistemi(buji) tarafından tutuşturulmasıyla başlar. Ateşleme sisteminde her

silindir için kısa süreli yüksek gerilim üretilmekte ve bu yüksek gerilim elektronik kontrol ile ateşleme sırası gelen silindirin bujisine gönderilerek yanma sağlanmaktadır. Benzinli motorlarda yakıt ve hava karışımı silindir öncesinde karışarak silindir içerisine alınmakta ve sıkıştırma işlemi gerçekleşmektedir. Normal şartlarda sıkıştırma prosesi gerçekleştikten sonra buji ateşlenerek patlama ve yanma gerçekleşmektedir. Buji ateşlendiğinde türbülanslı bir alev oluşur. Önceden karışmış olan yakıt-hava ve yanmış gaz karışımından oluşan bu alev, yanma odası duvarlarına ulaşıncaya kadar yayılır ve sonra söner. Yanma nedeniyle ortaya çıkan ani basınç yükselmesi ile enerji salınımı başlar. Alev yanma odası boyunca büyümeye ve yayılmaya devam ettikçe, basınç sürekli olarak yükselir. Basınç, üst ölü noktadan sonra maksimum seviyeye ulaşır, ancak silindir hacminin genişleme stroğunda artmaya devam etmesiyle azalır. Alevin gelişimi ve yanmanın yayılması, çevrimden çevrime değişmektedir. Bu noktada önemli olan kıvılcım oluşması için bujinin yakınında bulunan karışım teşkili ve bileşimidir. Benzinli motorlarda yanma işlemini 4 farklı faza bölmek mümkündür. Bu fazlar; kıvılcım ateşlemesi, erken alev gelişimi, alev yayılımı ve alev sonlanmasıdır. Yanma, sıkıştırma stroğunun sonundan önce başlar, genişleme stroğunun erken bölümü boyunca devam eder ve maksimum silindir basıncının meydana geldiği döngüdeki noktadan sonra sona erer. Optimum kıvılcım ayarı, alev oluşumu ve yayılma hızına, yanma odasındaki alev hareket yolunun uzunluğuna ve duvardan çıktıktan sonra alev sonlandırma prosesine bağlıdır. Bu çıktılar ise motor tasarımına, çalışma koşullarına ve yakıt-hava ve yanmış gaz karışımının özelliklerine bağlıdır. Gaz basıncı, sıcaklık ve yoğunluk, piston hareketinden kaynaklanan hacim değişikliklerinin sonucu olarak değişir. Yanma sırasında, yakıtın kimyasal enerjisinin salınımı nedeniyle silindir basıncı artar. Yakıt-hava karışımının her bir elemanı yanarken, yoğunluğu yaklaşık dört kat azalır. Yanma ile artan gaz genleşmesi yanma odası içerisinde yer değişimine neden olur. Yanmamış karışımı alev oluşan bölgeden sıkıştırır ve yanma odası duvarlarına doğru iterken, zaten yanmış olan karışımıda sıkıştırır ve bujiye doğru iter. Yani, yanma işlemi sırasında yanmamış gaz elemanları bujiden uzaklaşırken, yanma sonrasında münferit gaz elemanları bujiye geri döner. Ayrıca, yanmamış karışımın farklı zamanlarda yanan elementleri, yanmadan önce farklı

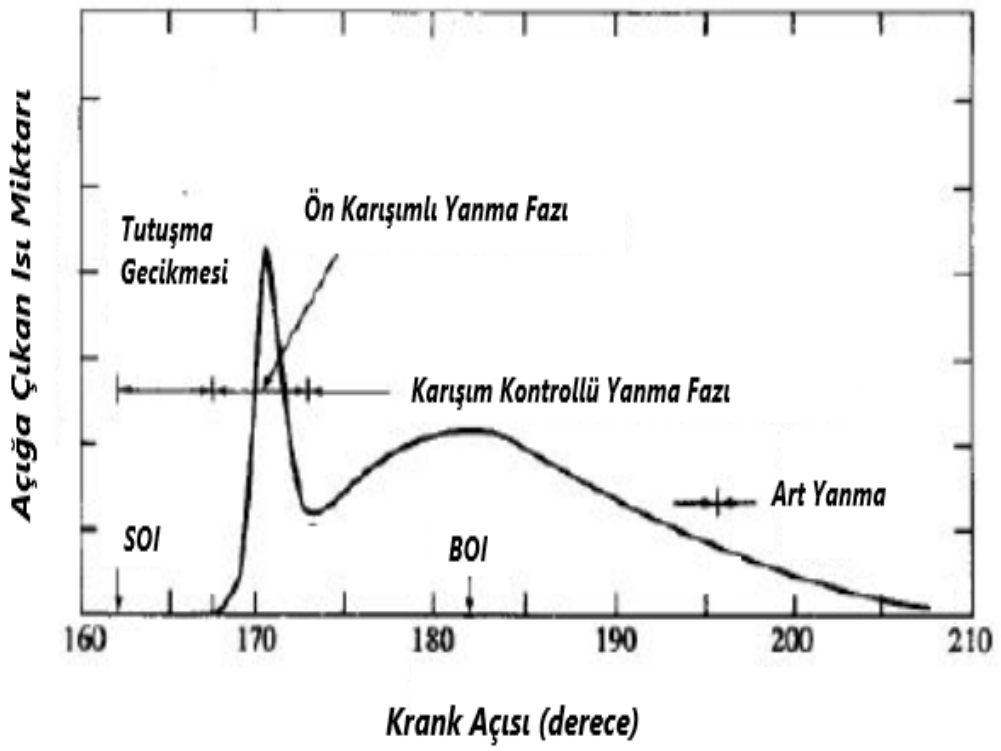
basınçlara ve sıcaklıklara sahiptir. Doğal olarak yanma sonrasında da farklılıklarını korurlar. Bu nedenle yanmış gazın termodinamik hali ve bileşimi, üniform değildir [3].

Dizel motorlarda yanma, yanma odasına alınan hava için gerekli miktarda yüksek basınçlı yakıtı, yanma odası içerisine püskürtülmesi sonrası sıkıştırılması ve patlaması ile gerçekleşir. Motor yükü kontrolü silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı ile yapılmaktadır. Yakıt, enjeksiyon sistemi tarafından, istenen yanma başlangıcından hemen önce, yanma odası içerisine enjekte edilir. Enjektör ucundaki küçük nozüllerden çok yüksek hızda enjekte edilen sıvı yakıt, küçük zerreler halinde atomize edilir ve yanma odasına nüfuz eder. Buharlaşan yakıt, yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlı halde bulunan silindir havası ile karışır. Sıkışan havanın sıcaklığı ve basıncı yakıtın ateşleme noktasının üzerinde olduğundan, difüze olmuş yakıt ve hava belirlenen tutuşma gecikmesinden sonra kendiliğinden tutuşarak yanmayı gerçekleştirir. Yakıt ilk püskürtüldüğü anda yüksek basınç ve hızdan dolayı sürtünme nedeniyle dış çevresinden başlayarak zerrelerine ayrılır. Yüksek hızda enjektör ucundan uzaklaşmaya başlayan yakıt kütlesi içinde hava kütlesi artmakta ve ilerleyen yakıt hüzmesi genişlemektedir. Genişleyen bu alev hüzmesi yayılırken, aynı oranda hızı azalmaktadır. Havanın yakıt kütlesi içerisine girişiyle birlikte yakıt damlacıkları buharlaşmakta, yanan hüzmenin ilerlemesi giderek azalarak yanma odasında ilerlemektedir. Enejktör içerisinden püskürtülen yakıt kütlesinin açısı yanma odası içerisine girmeye başladıktan sonra hava ile daha iyi karışım teşkili oluşturması için türbülans oluşacak şekilde ayarlanmaktadır. Yakıt ve hava silindir içerisinde yeterince karışım sağlayamazsa zerreciklerine ayrılmayan sıvı yakıt soğuk silindir duvarlarına çarparak emisyon miktarının artmasına neden olur [4]. Yakıtın daha küçük zerreciklerine ayrılması için yüksek basınçta püskürtülmesi bu noktada önem taşır. Yüksek basınçta püskürtülen yakıt daha hızlı buharlaşabilir ve karışım teşkili istenen seviyelere gelir [3]. Tutuşma oluşmasıyla birlikte yanmanın gerçekleşmesi, ilerleyen alev demeti ile veya ilk oluşan zerreciklerin tutuşmasıyla artan sıcaklık ve basıncın diğer zerreciklerde sebep olduğu tutuşma etkisi ile olabilir. Püskürtülen yakıt demetlere ayrılıp yanmaya başladıktan sonra, ortamda bulunan yüksek sıcaklıktaki yanma ürünleri yakıtın oksitlenmesi için gerekli olan hava ile karışım oranını düşürmektetir. Ortaya çıkan bu

durum yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle karışım kontrollü yanmalarda büyük miktarlarda NO_X emisyonunun ortaya çıkmasına neden olur [5].

Dizel motorlarda oluşan yanma temel olarak dört evreden oluşmaktadır.

- **Tutuşma gecikmesi:** Yakıtın enjektör nozülünden çıktığı an ile ilk tutuşmanın başladığı ana kadar geçen zamana tutuşma gecikmesi adı verilir. Gecikmeyi etkileyen bazı parametreler vardır. Bunlar, yanma öncesi silindir içinin sıcaklığı ve basıncı, püskürtme zamanı, püskürtülen yakıt miktarı, motor devri, türbülans oranı ve püskürtülen yakıt cinsidir. Gecikmenin etkilediği parametreler ise, yakıt buharlaşma oranı ve yanma odası içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlardır [3].
- **Ön karışımlı yanma:** Yanma odası içine enjekte edilen yakıt ile havanın hemen hemen homojen bir karışım oluşturmasından sonra fiziksel ve kimyasal olarak bu karışım çok hızlı şekilde tutuşur. Yanmanın gerçekleştiği bu an silindir içerisinde ısı miktarının maksimuma ulaşır [3],[6].
- **Difüzyon yanma:** Ön karışımlı yanmadan sonra oda içerisinde oluşan alevin ve ön karışımlı yanmadan dolayı ortaya çıkan yanma ürünlerinin içine enjektör yakıt püskürtmeye devam eder. Çok hızlı gerçekleşen bu yanma aynı zamanda karışım kontrollü yanma olarakta ifade edilir. Bu süreçte, sıvı yakıtın pülverize olması, buharlaşması ve yanma odasına alınan hava ile karışması gerçekleşir, aynı zamanda yanma maksimum sıcaklığına ulaşır [3],[6].
- **Art yanma:** Yanma tamamlandıktan sonra alev cephesindeki basınç ve sıcaklık düşmeye başladığından kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar yavaşlar. Çok düşük oranda da olsa ısı oluşmaya devam eder [3],[6].



Şekil 1.1 Dizel Yanması [4]

1.1.2 Emisyonlar

İçten yanmalı motorlarda; yakıt ve havanın, yanma odası içerisinde karışması ve kimyasal reaksiyonu sonrasında yanma ürünleri oluşur. Eğer yakıt ve hava tam olarak yanmamış ise yanma ürünleri içerisinde egzoz emisyonu olarak adlandırılan kirletici ürünler bulunur. Egzoz emisyonları kentsel hava kirliliğinin en büyük kaynağıdır [3].

İçten yanmalı motor üreticilerinin araştırma ve geliştirme maliyetlerinin büyük bir çoğunluğu egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi içindir. Yanma sonrası sistemler ile emisyonların istenilen seviyelere çekilmesinde başarılı olunmasına rağmen; artan maliyetler, rekabet koşullarının gün geçtikçe zorlaşması, yakıt tüketimi hedefleri ve limitleri zorlayan emisyon standartlarından dolayı araştırma ve geliştirme faaliyetleri sürekli devam ettirilmektedir.

İçten yanmalı motorların çevreye attığı emisyonlardan regülasyon limitleri ile kontrol edilenleri şöyledir, Karbonmonoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC), azot oksitler (NO_X) ve partikül maddeler (PM).

1.1.2.1 Azot Oksit (NO_X) Emisyonları

Motorun yanma havasında en çok bulunan element olan azot (N) (yanma havasında %79), yanma sonrası oksitlenerek zararlı bileşenler açığa çıkartır. Azot oksitler; NO, NO_2 N_2O, N_2O_3, N_2O_5 gibi bileşiklerdir. Motorda gerçekleşen yanma sonucunda ciddiye alınacak miktarda NO ve NO_2 ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu emisyonlar egzozdan atılan NO_X olarak adlandırılır. İçten yanmalı motorlarda ortaya çıkan azot oksitlerin çeşitli oluşum mekanizmaları vardır. Oluşan azot oksit emiyonları genellikle hava ile alınan oksijen ve yakıt içinde bulunan azot ya da yanma esnasına ortaya çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle yanma havasında bulunan oksijen ve azotun bağlanmasıyla ortaya çıkmaktadır. Azot oksit emisyonlarında ağırlıklı olarak NO oluşumu görülmektedir. Bunun nedeni, yanma gerçekleşirken NO'nun NO_2'ye dönüşmesi için geçecek olan sürenin daha uzun olması gerektiğidir [3]. İçten yanmalı motorlarda NO oluşumunu azaltmak için günümüzde birçok yöntem uygulanmaktadır. Püskürtmeyi geciktirmek, yanmış gazları yanma odasına tekrardan göndermek veya egzoz hattında NO'yu daha zararsız bileşenlere ayırmak bunlardan bazılarıdır [5].

NO_X oluşum mekanizmaları ve oluşumuna etki eden parametrelere tezin ilerleyen bölümlerinde değinilecektir.

1.1.2.2 Karbonmonoksit (CO) Emisyonları

İçten yanmalı motorlarda regülasyonlarla sınırlandırılan bir diğer egzoz ürünü de karbonmonksittir. İdeal yanma oluştuğu zaman oluşan CO oksitlenerek CO_2'ye dönüşür. CO, eksik yanma olduğunda ortaya çıkmaktadır. Oluşan gaz sıcaklıklarının düşük olması, yanmayı meydana getirecek olan karışımın homojen karışmaması, yeterli oksijenin olmaması ve dolayısıyla ortaya çıkan CO'nun oksitlenmemesi CO miktarını arttıran etkenlerdir [7].

CO emisyonunu kontrol eden temel değişken yakıt/hava oranıdır. Zengin karışımlarda ortamda az oksijen olduğu için eksik yanma meydana gelir ve CO miktarı artar, dolayısıyla CO miktarı hava fazlalık katsayısı ile ters orantılıdır. Dizel motorlarda, benzinli motorlara kıyasla hava fazlalık katsayısı yüksek olduğundan dolayı CO emisyonu düşüktür. Benzinli

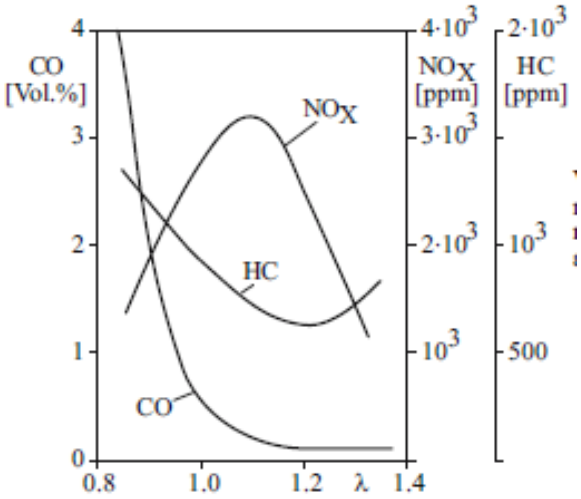
motorlarda, karışımın homojen olması ve karışımın zengin karışımdan fakir karışıma veya stokiyometrik orana yakın şekilde oluşturulması için yapılan çalışmalar CO emisyonlarının azaltılması için önemlidir [3].

1.1.2.3 Hidrokarbon (HC) Emisyonları

Yakıtın içinde bulunan hidrokarbon yanma odasında eksik yanmanın doğal bir sonucu olarak egzozdan atılan organik maddedir. HC emsiyonları motordan çıkan azot oksitlerle reaksiyon oluşturarak atmosferde sis tabakası meydana getirmektedir. Bu sis tabakasının canlılar üzerinde bilinen olumsuz etkileri vardır [8]. HC emisyonu egzozdan atılmasının birçok nedeni olabilir. Bunlardan bazıları; yanma odası içinde oluşan düşük sıcaklık ve kompresyon, silindir içerisinde homojen karışmayan yakıt-hava, aşırı fakir karışım ile yanma oluşması, piston ve silindir duvarları arasındaki yağlama yağının absorbsiyonu ve desorbsiyonu, yanma odası duvarlarında alev sönmesidir [3].

1.1.2.4 Partikül Madde (PM) Emisyonları

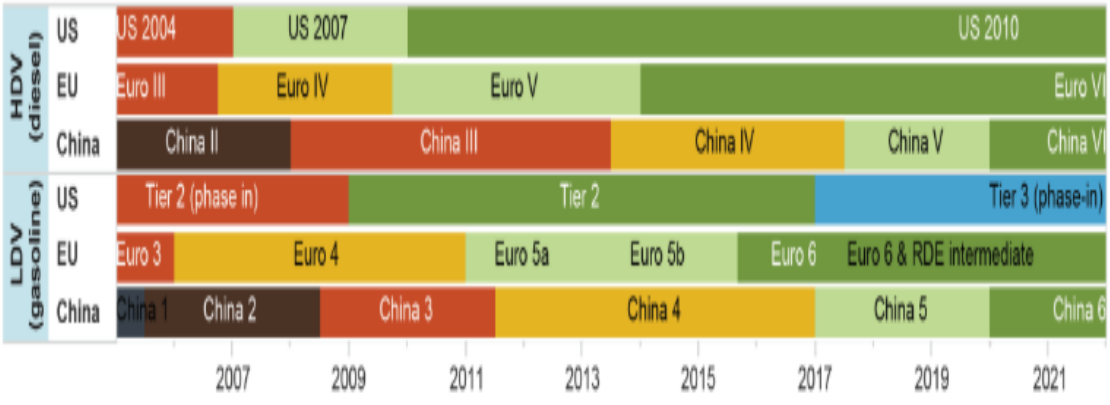
Partikül madde emisyonları, yetersiz yanma havası olan yanma ortamındaki termal bozunma nedeni ile meydana gelmektedir. Partikül madde emisyonları; karbon-hidrojen bağları, kükürtdioksit, sülfürik asit ve büyük bir kısmı is adı da verilen karbon parçacıkları oluşumudur. Dizel motorlarda is oluşumu temel olarak yanma evresinde yetersiz karışım ve sonucu olan eksik yanma nedeniyle alevin yakıtça zengin olduğu bölgelerde meydana gelir. Direkt püskürtmeli olan motorlarda en fazla partikül madde oluşumu yakıt demetinin alev oluşturan çekirdek bölgesindedir. Bunun nedeni o bölgede yakıt fazlalık katsayısının fazla olmasıdır. Alev oluşumundan sonra yakıt çift aşamalı olarak okside olur. İlk aşama, yakıtın fazla olduğu ön karışımlı bölgedir. İkinci aşama ise alevi oluşturan yakıt demetinin çevresindeki difüzyonlu bölgedir. Alevi oluşturan çekirdekten uzak kısımlarda is oluşumu azalırken çekirdeğin merkezine doğru is oluşumu artmaktadır [3],[4].



Şekil 1.2 Hava fazlalık katsayısının emisyonlara etkisi [6]

1.1.3 Emisyon Regülasyonları

İnsan sağlığını ve çevreyi direkt ve indirekt yollar ile tehdit eden emisyonların, azaltılması amacıyla kontrol edilmesi kaçınılmaz bir gerçektir. Araçlardan çevreye salınan emisyonların sınırlandırılması amacıyla yapılan ilk çalışmalar Amerika Birleşik Devletleri'nde büyük bir sorun haline gelen hava kirliliği nedeniyle yapılmıştır. 1960'lı yıllardan günümüze daraltılarak gelen bu sınırlandırmalar günümüzde yakıt tüketiminden, egzoz emisyonları azaltıcı parça kullanımı zorunluluğuna kadar genişlemiştir [9].



Şekil 1.3 Yıllara Göre Emisyon Regülasyonlarının Değişimi [10]

1.1.4 İçten Yanmalı Motorlarda Azot Oksit Emisyonlarının Modellenmesi Amacıyla Yapılan Çalışmalar

İçten yanmalı motorlarda azot oksit emisyonlarının modellenmesi amacıyla yapılmış çalışmalar, araştırmacılar tarafından farklı modelleme yöntemlerinde farklı girdi parametreleriyle incelenmiş ve geçmişten günümüze artan hassasiyetlerle tahminlemeler yapılmıştır.

Kihas vd. [11] araç üretici firmalar ve motor geliştiriciler tarafından yapılan azot oksit emisyon modeli araştırmalarının hangi temeller üzerine kurulu olduğunu ve motor üzerinde fiziksel olarak kullanılan azot oksit sensörünü tamamen kaldırarak sanal sensöre nasıl dönüştürebileceğini incelemişlerdir. Araştırmacılar azot oksit tahminleyicilerini üç ana model grubuna ayırmıştır; fiziksel, yarı fiziksel/gri (semi-phsyical-grey box) ve black box. Modellemesi yapılacak olan sanal sensör ile fiziksel olarak var olan azot oksit ölçen sensörün aynı ihtiyaçlara cevap verebilmesi için bazı temel benzerliklerinin olması gerektiği belirtilmiştir. Bunlar; tepki süresinin hızlı olması, her ortam koşulunda çalışabilir ve açık nokta kalmayacak şekilde tahmin yapabilmesi, modelleme yöntemi setinin motor üzerindeki parametreleri kullanması veya donanım kullanacaksa ucuz ve sağlam olması, ECU (Elektronik Kontrol Ünitesi) kaynak tüketiminin benzer işlevlerde çalışan modeller için yakın olması. Fiziksel modelleme yöntemleri iyi ekstrapolasyon yeteneğine sahip olmasına ve çok az ECU kaynağı kullanmasına karşın sıcaklık hesaplamasına ihtiyaç duyduğu için günümüz motorlarında kullanılması çok maliyetlidir. Girdi konsantrasyonu ve silindir içi basınç ölçümüne bağlı sıcaklık modelin temel parametreleridir. Genellikle Zeldovich mekanizmasına göre yapılan modellerin hassasiyeti çok yüksek değildir. Grey box modeller, fiziksel modelleme ve black box bazlı modellerdir. Sensör setlerinden ve bazı matematiksel formüllerden oluşan bu model yöntemi, anlamlı matematiksel formüller ve sensör değerlerini kullanarak anlamsız bir matematiksel formül ile black box model çözümü yöntemi ile oluşturulur. Silindir içi basınç ölçümü tahmini daha stabil ve güçlü yapar. Azot oksit emisyonlarını grey box modelleme ile tahmin için; enjeksiyon başlangıcı, enjeksiyon süresi, ray basıncı, giren hava kütlesi, boost basıncı gibi parameteler kullanılır. Black box modeller, istatistiksel bazlı modelleme yöntemidir. Kurulacak olan tahminleme algoritması için model girdi ve

çıktı bilgileriyle eğitilir. Eğitilen model karmaşık yapay sinir ağları ile algoritma kurar ve bunun sonucunda tahmin edilecek sonuç için girdi parametrelerini yüksek doğrulukta sonuçlara dönüştürür. Azot oksit emisyonlarını black box modelleme ile tahmin için; motor devri, yakıt kütlesi, hava kütlesi, giriş manifoldu basıncı, ana enjeksiyon açısı, ray basıncı, oksijen konsantrasyonu gibi parametreler kullanılır.

Karaky vd. [12] 0D yanma modeliyle birleştirilmiş yarı fiziksel azot oksit emisyon modeli geliştirmiştir. Önerdikleri model, stokiyometrik karışımdan elde edilen yanmış gaz ürünlerinin adyabatik alev sıcaklığını termodinamik hesaplamalarına dayanmaktadır. Fiziksel formüle dayalı bu alt modele ek olarak ampirik formül, en yüksek yerel silindir içi sıcaklık ve motora alınan oksijen konsantrasyonunu fiziksel girdi fonksiyonu olarak kullanmaktadır. Bu girdiler ile birlikte yeni bir ampirik formül geliştiren araştırmacılar 1.6 litre Euro 5 dizel motorda bir çok çalışma noktası için eğitmiş ve korele etmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre model tek enjeksiyon durumu veya çoklu enjeksiyon durumlarında etkili sonuçlar vermektedir. Oluşturulan modelin en büyük avantajı yanma modeli tanımlandıktan sonra herhangi ek kalibrasyon çalışması yapılmasına gerek kalmamasıdır.

Lee vd. [13] gerçek zamanlı light-duty araçlar için yarı fiziksel azot oksit emisyonu modellemesi üzerine çalışma yapmışlardır. Oluşturulan model, ölçülen silindir içi basınç ve ECU'dan gelen ölçüm bilgilerini kullanarak geliştirilmiştir. Model girdileri, silindir içindeki karışım oluşumunu etkileyen pilot enjeksiyonun yanmasını ve karıştırılmasını baz alarak geliştirilmiştir. Azot oksit oluşumu için fiziksel bazlı silindir içi sıcaklık hesaplaması yapıldıktan sonra basitleştirilmiş bir empirik formül oluşturulmuştur. Oluşturulan bu formül girdi olarak silindir içi maksimum sıcaklığı, silindir içine giren hava ve azot kütlesini, yakıt kütlesini, motor devrini, enjeksiyon açısını ve maksimum sıcaklığın yanmamış gazların sıcaklığına oranını kullanır. Modelin kullanılabilirliği; farklı EGR(Egzoz Gazı Resirkülasyonu) hızları, ray basınçları, enjeksiyon zamanları ve light-duty homologasyon test prosedürlerinden olan WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle-Dünya çapında uyumlaştırılmış hafif ticari araç testi) testi için denenmiş, %3'ten daha az hata tespit edilmiştir. Ayrıca, önerilen model, donanımın yaşlanması, bilinen veya yapay sapmalar açısından güvenirliğini koruduğu görülmüştür.

Benz vd. [14] dizel motorlarda model bazlı emisyonların optimizasyonu çalışmasında azot oksit emisyonlarının yarı fiziksel modellenmesi konusuna değinmiştir. Yapılan çalışmada azot oksit ve is emisyonları modellemesi yarı fiziksel yöntemle oluşturulmuş ve kullanılmıştır. Azot oksit emisyonu tahmini için girdiler; motor çalışma koşulu (devir ve yük), emme manifoldu kapanma anında silindir içi hava kütlesi, yakıt ray basıncı ve silindir içine alınan kütlenin %90'ının yandığı açıdır. Empirik yöntemlerle modele eklenen parametreler için sabitler belirlenmiş ve yarı sabit (quasi-stationary) değişken bulma yöntemiyle katsayılar belirlenmiştir. Oluşturulan model deney motorunun %20-%80 yük koşullarında denenmiş ve başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Finesso vd. [15] gerçek zamanlı sıfır boyutlu üç bölgeli yanma modelinden elde ettikleri silindir içi sıcaklık ve ısı salınım miktarıyla dizel motorlar için, durağan ve değişken test koşullarında azot oksit emisyonları için yarı fiziksel model oluşturmuşlardır. Oluşturulan model daha sonra sıcaklığa ve yakıt miktarına bağlı değişen kalibrasyon sabiti ile iyileştirilmiştir. Yanmış gaz sıcaklıklarının tahminlemesi için Zeldovich mekanizması kullanılmış ve buna bağlı alt modeller oluşturulmuştur. Deneysel veriler NEDC (Avrupa yeni sürüş çevrimi) çevrimine uygulanmış ve model doğruluğu hesaplanmıştır.

Arrègle vd. [16] anlık hesap yeteneği sağlayan motor ECU'sunda kullanıma uygun bir azot oksit oluşum modelini geliştirmiş ve bu modelde kullanılan her bir giriş parametresinin azot oksit tahmini üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir duyarlılık analizi yapmıştır. İlk olarak oluşturulan termodinamik alt modelin girdi parametreleri; yakıt ve hava kütlesine bağlı hava/yakıt oranı, emme subabı kapanma anında silindir içine giren kütlenin sıcaklığı ve basıncı, volümetrik verimdir. Bu girdilerden oluşan matematiksel formüllerle adyabatik alev sıcaklığını tahminlemişlerdir. İntegratif yöntemle oluşturdukları empirik formülde ise girdi olarak ısı salınım miktarı devir ve matematiksel hesaplamalardan gelen adyabatik alev sıcaklığı tahminidir. Buna bağlı katsayı değişkenleri çözümü istatistiksel yöntemlerle yapılmış ve tahmin sonuçları elde edilmiştir. Model girdi parametrelerinin sırasıyla her birinin %5 değiştirilmesiyle gerçekleştirdikleri duyarlılık analizine göre tahmin sonuçlarında şu hata oranlarını görmüşlerdir; silindir içi basınç ölçümü +%8, enjekte edilen yakıt kütlesi -%7, silindir içi giriş manifold basıncı -%52, volümetrik verim -%50, temiz hava kütlesi +%59, silindir içi

giriş manifold sıcaklığı +%98. Bu sonuçlara göre silindir içi giriş manifold sıcaklığı (EGR+temiz hava) ölçüm değişkenliğinin oluşturdukları modelde çok kritik bir parametre olduğunu göstermişlerdir.

Guardiola vd. [17] silindir içi basınç ölçümü bazlı, yarı fiziksel, azot oksit emisyonu kontrol odaklı uygulamalar için tahmin modeli geliştirmişlerdir. Yapılan çalışma literatürde bulunan empirik bir formül üzerinden ilerlemiştir. Isı salınım miktarı, devir ve adyabatik alev sıcaklığı krnak mili açısına göre integratif yöntemle modellenmiştir. Model, farklı EGR, silindir içi giriş manifoldu basıncı ve silindir içi giriş manifoldu sıcaklığına göre valide edilmiştir. Ortaya çıkan sonuca göre empirik formüle düzeltme faktörü uygulanmıştır. Düzeltme faktörü için hava/yakıt oranı ve hava yakıt kütlesi parametre olarak eklenmiş ve buna bağlı olarak yeniden yanma katsayısı empirik formüle eklenmiştir. Ortaya çıkan yeni empirik formüle göre valide edilmiş sonuçlar incelenmiş ve modelin eski haline göre iyileştiği gösterilmiştir.

d'Ambrosio vd. [18] püskürtme sistemi farklı iki dizel motor üzerinde yaptıkları çalışmada Zeldovich termal mekanizmasını kullanarak üç bölgeli yanma modellemesi ile maksimum yanmış gaz sıcaklığı tahminlemesi yapmış ve empirik olarak ileri sürülen matematiksel formülle yarı fiziksel modelleme oluşturmuşlardır. Üretilen azot oksit emisyonlarını; maksimum yanmış gaz sıcaklığı, silindir içine gönderilen yakıt miktarı, yakıt/hava oranı, motor devri ve yakıt ray basıncı fonksiyonu olarak tanımlamış ve girdi olarak modelde kullanmışlardır. Deney düzeneklerinde kullandıkları ilk motor 2 L çift turbolu Euro 5 emisyon standartlarında piezoelektrik enjektörlü, diğer motor 1.6 L Euro 6 emisyon standartlarında selenoid enjektörlüdür. Her iki motor için koşulan testlerden alınan veriler ile model eğitilmiş ve empirik formüle katsayılar üretilmiştir. Yanmış gaz sıcaklıklarının azotun okside olmasına çok büyük etkisi olduğu için yanmış maksimum gaz sıcaklığı için ayrıca düzeltme faktörü uygulanmış ve oluşturulan empirik formül yarı fiziksel model için kullanılan istatistiksel yöntemlerle çözülmüştür. Her iki deney motoru için formül revize edilmiş ve katsayı hesabı yapılmıştır. NEDC çevrimi koşularak valide edilen model için karekök ortalama hesabı yapıldığında ilk motor R=0.95, ikinci motor R=0.96 ile tahminleme yapmıştır.

Hirsch vd. [19] gerçek zamanlı azot oksit emisyon tahminlemesi yapabilmek için fiziksel sensörlerden gelen girdiler kullanarak yarı fiziksel emisyon modeli oluşturmuşlardır. Azot oksit emisyonları tahmini yapılırken ortaya çıkan aksaklıkları minimuma indirmek için bazı kriterler belirlemişlerdir. Bunlar; girdi olarak kullanılacak veriler geri beslemesiz olacak, emisyonlar üzerinde etkili değişkenleri bulabilmek için geniş bir veri seti hazırlanması, model çıktıları için doğrusal kombinasyonlar kullanılması. Bu kriterlere göre oluşturdukları yarı fiziksel modelde, 2L 4 silindirli dizel deney motorundan aldıkları girdi parametreleri şöyledir; püskürtülen ana yakıt miktarı, yakıt püskürtme açısı, pilot püskürtme miktarı, pillot püskürtme süresi, yakıt ray basıncı, motor devri, MAP(Manifold mutlak basıncı) ve MAF(Kütlesel Hava Akışı) ölçümleri, motor yağ sıcaklığı. Girdi verileri alındıktan sonra bölgesel alt modeller oluşturulmuştur. İlk alt model MAF ölçümünün düzeltilmiş hale getirilmesiyle meydana gelmiştir. İkinci alt model kullanılan yakıt parametreleriyle oluşturulmuştur. Bu iki alt model ile empirik formül elde edilmiş ve statik, lineer olmayan polinom istatistiki metoduyla çözümlenmiştir. Azot oksit çıktı verileri HORIBA emisyon cihazıyla alınmış ve NEDC çevrimiyle valide edilmiş ve %88 doğrulukta tahmin sonucu çıkarmıştır. Sonuç olarak ECU içerisinden alınan verilerle azot oksit tahminlemesinin mümkün olduğu çıkarılmaktadır.

Brahma vd. [20] deney motorundan aldıkları hava akışı kütlesi ve manifold basıncı ölçümleriyle torku ve azot oksit emisyonlarını tahminlemişlerdir. Oluşturdukları model yapısı fiziksel formüllerle türetilmiş ve yarı fiziksel hale getirilmiştir. 2.5 L 4 silindirli test motorundan MAF, MAP, manifold giriş basıncı değerlerini değişken girdi, püskürtülen yakıt kütlesi, püskürtme açısı değerlerini sabit girdi, tork ve azot oksit değerlerini çıktı olarak almışlardır. Her bir değişken girdi ve çıktı için sabit girdilerden elde ettikleri matematiksel formüller türetmişler ve katsayı hesaplamaları yapmışlardır. Deney motorunun referans aldıkları yük bölgelerinde model validasyonunu yapmışlardır. Tahmin edilen azot oksitin model hatası çıkartıldığında %89 olduğu görülmüştür.

Nelson-Gruel vd. [21] dizel motorlar için azot oksit tahminin ilk olarak fiziksel yaklaşımla tanımlamışlardır daha sonra oluşturdukları dinamik çıktı geribildirim mekanizmasına dayalı bir gözlemciyle birleştirerek yarı fiziksel emisyon modeli oluşturmuşlardır. Krank açısı bazlı geliştirdikleri termodinamiksel model ile Zeldovich termal oluşum

mekanizmasını beslemişlerdir. Tahminledikleri azot oksit fiziksel emisyon modeli farklı EGR ve VGT (Variable Geometry Turbocharger-Değişken geometrili turboşarj) noktalarında uygulamışlardır. Elde edilen sonuçları boost basıncı, EGR, VGT, motora giren hava kütlesi, enjekte edilen yakıt kütlesi ve enjeksiyon açısı fonksiyonuna dönüştürmüşler ve yarı fiziksel ikinci bir kontrol modeli kurmuşlardır. Geri beslemeli kontrol algoritması ile motordan gelen azot oksit model sinyali dinamik olarak algılanarak %98 doğru tahminle model çıktısı olarak gösterilmiştir.

Grahn vd. [22] azot oksit ve is emisyonları için b-spline eğrisi yöntemini kullanarak yarı fiziksel veri güdümlü tahmin modeli oluşturmuş ve 5 silindirli bir dizel motor üzerinden alınan verilerle %5,1 hata oranı ile tahminlemişlerdir. Oluşturulan model girdisi için sıcaklık ve silindir içine giren oksijen kütlesi bazlı azot oksit emisyonu tahmini yapılmış, bu tahmin sonrasında motor devrine bağlı içeri alınan hava kütesi ve enjekte edilen yakıt miktarı verileri kullanılarak empirik formül oluşturulmul ve boyutsuz azot oksit emisyon tahmini çıkartılmıştır. B-spline metoduyla logaritmik fonksiyona dönüştürülen model tahmin çıktısı motor hızı ve enjekte edilen yakıt kütlesi eksenli iki boyutlu bir haritaya dönüştürülmüştür.

Carlucci vd. [23] 2L 4 silindirli Euro 6 emisyon standartlarında bir dizel motor için anlık silindir içi basınç ölçümü verisi bazlı integratif yarı fiziksel azot oksit emisyon tahmini yapmışlardır. Tahmin edilecek azot oksit kütlesi için girdi olarak kullanılacak parametreler, anlık krank mili açısına bağlı değişen fiziksel formüllerle hesaplanmış ısı salınım miktarı, motor devri ve anlık krank mili açısına bağlı fiziksel formüllerle hesaplanmış adyabatik alev sıcaklığıdır. Parametrelerin hesaplanmasından sonra integratif empirik formülün içindeki katsayılar verilere göre belirlenmiş ve model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin tahmin doğruluğu %86 olarak bulunmuştur. Buna bağlı olarak yeni önerilen empirik formülde motor devri parametresi yerine anlık krank mili açısına göre hacim değişimi eklenmiş ve katsayılar tekrardan hesaplanmıştır. Yeni empirik önermeye göre tahmin doğruluğu %97 bulunmuştur.

Quérel vd. [24] azot oksit emisyonlarını tahminlemek için öncelikle termodinamik model oluşturmak için alt modeller meydana getirmiş ve bunun sonucunda kinetik azot oksit

tahmini yapmışlardır. Oluşturdukları alt modeller matematiksel ifadelerle girdi parametrelerini ortaya çıkarmıştır. İlk alt model silindir içine giren gazların bileşimini ele almaktadır. İkinci alt model yanma modelidir. Yanma modeli kurulması için ısı salınım miktarı, yanmış gaz bölgesindeki molar miktarlar, sıcaklık hesaplamaları, yanmış gaz hacmi ve denge konsantrasyonlarının oranları oluşturulmuştur. Son alt model ise ilk iki alt modelin çıktısı olacak olan kinetik fiziksel denklemlerle modellenmiş azot oksit tahmin modelidir. Elde edilen parametrik modele göre dört silindirli bir dizel motordan alınan veriler modele işlenmiş ve çıktı sonuçlarının tahminleme yeteneğinin düşük olduğu görülmüştür. Hipotez olarak ortaya atılan alt modellerin iyileştirilmesi için, girdilerde önemli bir parametre olan yanmış gaz sıcaklığı iyileştirilmiş model için kalibre edilmiştir. Buna göre, yanmış gaz oranı ve yanma başlangıç açısı, yanmış gaz sıcaklığını yarı fiziksel olarak tahminleyecek ve azot oksit modelini iyileştirecektir. Motor devri ve torkuna göre oluşturulan haritada yanmış gaz oranı ve yanma başlangıç açısı değerleri model parametresi olarak tanımlanmıştır. Sabit noktalardan alınan verilerle tekrar oluşturulan yeni model önermesi ile NEDC çevrimi testi valide edilmiştir. Test sonucuna göre ölçülen toplam azot oksit miktarı 100 mg/km'ken model tahmini 109 mg/km olmuş, durağan noktalar ölçülen toplam azot oksit kütlesi 83 mg/km'yken model tahmini 91 mg/km olmuş, dinamik noktalarda ölçülen toplam azot oksit kütlesi 17 mg/km'yken model tahmini 17 mg/km olmuştur.

Timoney vd. [25] azot oksit oluşum mekanizmasını adyabatik alev sıcaklığına göre Zeldovich fiziksel formülü ile alınan verilere göre modellemişlerdir. Modellenen tahminin yeteneğinin arttırılması için yarı fiziksel model oluşturulmuş ve bu modelin girdileri anlık silindir içi basınç, bir çevrimde silindire alınan hava kütlesi, bir çevrimde enjekte edilen yakıt kütlesi ve EGR oranı olmuştur. Silindir içinde üretilen azot oksit kütlesi toplamı her çevrim için yanma başlangıcı ve yanma sonu olarak hesaplanmıştır. Yeni önerilen yarı empirik formül istatistiksel yaklaşım ile doğrusal logaritmik bir formüle uyarlanmış ve parametre katsayıları tahminlenmiştir. İki adet hafif ticari ve bir adet ağır ticari üç farklı motor için geliştirilen model test edilmiştir. Hafif ticari motorlar için model tahmini karekök ortalama hesabı R=0,9879 hesaplanmışken, ağır ticari motor için R=0,9445 bulunmuştur.

Savva vd. [26] fiziksel bazlı sıfır boyutlu çok bölgeli yanma modelini kullanarak yarı fiziksel, integratif, empirik bir yaklaşımla iki farklı deney motoru için tek çevrimde oluşan azot oksit tahminlemesi yapmışlardır. Modelin çok bölgeli olması, yanma başlangıcı, yanma sonu ve egzoz subabı açılma anına kadar geçen sürede tahminlemenin yapılmasından dolayıdır. Model fiziksel hesaplama girdileri olarak, silindir içi yanma sonrası artık gaz, EGR oranı ve silindir içine alınan hava kütlesini kullanmıştır. Ayrıca silindir içi basınç sensörüyle alınan veriler empirik formüle eklenmiştir. Oluşturulan empirik formül parametreleri şöyle belirlenmiştir; emme subabı açılma anındaki basınç ve giriş manifoldu basınç oranı, yanma başlangıcı anındaki basınç ve giriş manifoldu basınç oranı, maksimum yanma basıncı ve yanma başlangıcı anındaki basınç oranı, yanmanın merkezindeki hacim ve üst ölü nokta hacmi oranı, ortalama içeri alınan hava kütlesi, hava/yakıt karışımı ve son olarak motor yüküne bağlı basınç değişim oranı. Yapılan testlerin sonucunda her iki farklı deney motoru için sonuçlar incelenmiş ve çok bölgeli yanma modeli hesaplamalarının yarı fiziksel yolla tahmin edilen azot oksit emisyonlarına güçlü bir katkısı olduğu kanısına varılmıştır.

Gärtner vd. [27] azot oksit emisyonlarını tahminlemek için yarı fiziksel model oluşturmuşlardır. Oluşturulan yarı fiziksel model empirik formülünü beslemek için yanma alt modelini CFD yoluyla elde etmişlerdir. Silindir içi enerji değişimiyle yanmanın merkezinde oluşan azot oksit emisyonu oluşumunu korele eden araştırmacılar her bir yanma başlangıç açısı için kontrollü deneyler yapmış ve yanmanın merkez krank mili açısını hesaplamışlardır. Deney motorunda koşulan testlerden sonra simülasyona veri oluşturmak için 920 nokta belirlenmiş ve oluşturulan empirik formül için katsayılar lineer logaritmik istatistiksel yöntemiyle hesaplanmıştır. Model için kullanılan girdiler % 50 enerji dönüşümünün olduğu krank mili açısı derecesi (yanmanın merkezi), her strokta silindir içine alınan hava kütlesi ve her strokta silindir içine alınan oksijen kütlesi. Girdileri oluşturan veriler ile empirik formül katsayıları lineer logaritmik yöntemlerle bulunmuştur. Katsayıları belirlenen empirik formül; yakıt enjektör sistemi, yanma sistemi, enjeksiyon akış tipi, nozül enjeksiyonun sprey açısı, sıkıştırma oranı ve motor hacmi gibi farklılıkları bulunan test motorlarında valide edilmiştir. Valide edien test

motorlarında hata oranı %2 ve %9 arasında olduğu görülmüş, tekrardan katsayı hesabı yapmadan bu formülün kullanılabileceği önerilmiştir.

Guardiola vd. [28] azot oksit emisyonlarını yol şartında anlık izlemek için yarı fiziksel modelleme yöntemiyle oluşturulmuş sanal sensör önerisinde bulunmuştur. Önerilen model çıktısının kullanılabilir hale getirilmesi için düzeltme ve filtreleme faktörleri kullanılmıştır. Sensörden gelen bilgi ve modelden gelen bilginin düzeltme faktörü ile ele alındığıi yol şartlarına göre de filtrelendiği bir sonuç ortaya çıkarılmıştır. Oluşturulan model azot oksit sonucunun haritalanmasına ve girdi verileriyle ortam verileri arasındaki değişkenlere bağlı düzeltmelere göre araç yol şartında ECU içerisinde kullanılabilir hale getirilmiştir. Oluşturulan model ölçülebilir ve hesaplanabilir girdileri, düzeltme faktörü, motor devri, silindir içinde harcanan yakıt kütlesi, EGR oranı, boost basıncı ve soğutma suyu sıcaklığıdır. Hesaplanan model çıktısı ölçüm ile kıyaslandığında filtrelenmeye ve düzeltme faktörüne ihtiyaç duymaktadır. Termal geçişlerin silindir içi sıcaklık etkileri de göz önüne alındığında ortaya çıkartılan düzeltme katsayısının dinamik olması bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. 363 durağan test noktasından alınan verilere ve dinamik test verilerine uygulanan modelin verdiği hata oranı %7 oranında çıkmıştır.

Schmitt vd. [29] Euro 6 standartların 2.2 L 4 silindirli bir motor üzerinden alınan verilerle sıfır boyutlu motor modellemesi yapmışlar ve buna bağlı olarak yarı fiziksel empirik formülle oluşturukları modeli yapay sinir ağları yöntemiyle ve ölçüm sonuçlarıyla besleyerek azot oksit emisyonlarını tahminlemiştir. Motordan alınan veriler ile silindir içi yanmayı yapay sinir ağları yöntemiyle hesaplamışlardır. Silindir içi yanma hesabı için girdi parametreleri; motor devri, enjekte edilen kütle, enjeksiyon zamanı ve yanmış gaz oranıdır. Bulunan yanma sıcaklıkları ile azot oksit hesabı için empirik formül önermişler ve beslemişlerdir. Empirik formül parametreleri; maksimum motor devrinin anlık motor devrine oranı ve silindir içi maksimum yanma sıcaklığının yanmış gaz oranının üssel fonksiyonudur. 350 test noktası için alınan verilerle formül katsayıları belirlenmiş ve valide edilmiştir. Oluşturulan model başarı kriteri olarak belirlenen %80'in üzerinde çıkmıştır.

Quérel vd. [30] kontrol amaçlı modellenen azot oksit emisyonlarındaki gelişen teknolojileri ve modelleme yöntemlerini incelemişlerdir. Literatüde yer alan black box, yarı fiziksel, sıfır boyutlu termodinamiksel, üç boyutlu CFD modellerin kısa bir özetini sunmuşlar ve literatürden üç adet modelleme yöntemi seçmişler ve iki farklı motor için ortaya çıkan sonuçları kıyaslamışlardır. İlk olarak motor devri ve tork noktalarına göre haritalanmış bir black box önerisi modellemişlerdir. Buna bağlı olarak motor devri, yanmış gaz oranı ve silindir içi maksimum sıcaklık parametrelerinden oluşan yarı fiziksel bir modeli deneysel sonuçlara göre katsayı çözümünü yapmışlar ve son olarak black box modelde tahminlenmiş olan azot oksite yarı fiziksel model ile düzeltme katsayısı uygulamışlardır. İlk motor için karekök ortalama hata hesabı birinci model de 0.939, ikinci model de 0.987 çıkmıştır. İkinci motor için karekök ortalama hata hesabı birinci model de 0.963, ikinci model de 0.918 çıkmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı, içten yanmalı motorlarda fiziksel olarak var olan azot oksit emisyonu ölçen sensörü, matematiksel modelleme yöntemleriyle deney ortamında kullanılabilecek sanal sensöre dönüştürmektir. Yarı fiziksel modelleme yöntemi ile yapılacak olan tahminlemede, model oluşturmak iiçin literatür taraması sonucu optimum sonucu verecek olan parametrelerin kullanılması hedeflenmektedir.

Yarı fiziksel modelleme yöntemi kullanılarak, silindir içi basınç ölçümü bazlı, ileri sürülecek olan empirik formülün deney motoru üzerinden alınacak eğitim datası ile çözümlenmesi ve aynı motora ait rastgele seçilecek olan motor devri-tork test noktalarında tahminleme yeteneğininin yüksek olması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Dizel motorların en büyük problemlerinden olan azot oksit emisyonlarının yanma sonrası motor üzerinden ölçülmesi için fiziksel olarak sensörler kullanılmaktadır. Sensörden okunan değerler, motorun regülasyonlarda belirtilen emisyon limitleri içerisinde kalması için birçok geri besleme mekanizması kurar. Fiziksel olarak var olan bu sensörün ortadan

kaldırılarak sanal sensöre tam anlamıyla dönüştürülmesi günümüzde mümkün olmasada, bu amaçla ortaya konulan bir çalışmanın var olması tezin temel hedefidir.

Bu çalışma ile literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak önerilecek yarı fiziksel empirik model formülü çözümlemesi, model parametre girdi verisi alınacak deney motorunda oluşan azot oksit emisyonlarının tahmin doğruluğunu gösterecektir.

BÖLÜM 2

AZOT OKSİT EMİSYONLARI

Emme havası ile birlikte atmosferden alınan azot gazı yanma odası içerisinde yüksek sıcaklıklarda oksijen ile tepkimeye girerek azot oksit bileşiklerini oluşturur. Oluşan bu bileşikler içerisinde azot monoksit ve azot dioksit kayda değer miktarda ortaya çıkarak kirletici sınıfına giren, çevre ve canlı sağlığına en fazla zararı verebilecek potansiyele sahip türevlerdir.

Azot monoksit; kokusuz ve renksiz bir gazdır. İnsan sağlığına; görme bozuklukları, solunum sistemi rahatsızlıklar, sinir sistemi hastalıkları, uyku hali ve bilinç kaybı, dolaşım sistemi bozuklukları gibi etkileri vardır. En büyük oluşum kaynağı yanma olaylarıdır. İçten yanmalı motorlarda, yanma başlangıcından dengeye gelene kadar oluşmaya devam eder, buna bağlı olarak yanma sıcaklığı ile direkt ilişkilidir. Azot monoksit oluşumu gerçekleştikten sonra denge durumuna ulaşacak süre geçmeden soğuma gerçekleşirse egzozdan kirletici olarak doğaya atılır.

Azot dioksit; Gaz fazında kahverengi, sıvı fazda sarıya yakın bir renkte, acı ve asidik kokuya sahiptir. Atmosferde gaz halinde bulunur, yanıcı değil yakıcı bir gazdır. Suyla reaksiyona girerek nitrik asit oluşturur. İnsan sağlığına; görme bozuklukları, solunum sistemi ve ileri derecede akciğer rahatsızlıkları, cilt hastalıkları gibi etkileri vardır. Yanma esnasında ortaya çıkan Azot monoksitin oksijen ile reaksiyonu sonucu oluştuğundan dolayı sadece yanma sonrası değil atmosferde de oluşumuna devam eder. Azot monoksite göre oluşumu çok daha azdır [31].

2.1 Azot Oksit Oluşum Mekanizmaları

2.1.1 Termal Azot Oksit Oluşumu

Termal azot oksit oluşumu mekanizması, yanma havasındaki azotun(N_2), yanma havasındaki oksijen(O_2) ile azot oksit(NO_X) üretmek için reaksiyona girdiği süreci tanımlar. Zeldovich tarafından önerilen [32] ve Heywood tarafından geliştirilen [3] bu mekanizma ile içten yanmalı motorlarda azot oksit oluşumu açıklanabilmektedir. Bu oluşum süreci yüksek sıcaklıklar gerektiğinden yanma sıcaklıklığının bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Oluşum yüksek sıcaklık olan bölgelerde olduğu için, tahminleme veya modelleme yapılırken ortalama sıcaklıklar yerine maksimum sıcaklık ölçümünün dikkate alınması daha önemlidir. Ortalama sıcaklıktan daha yüksek olan lokal bölgeler azot oksit oluşumu için çok büyük bir etki yaratabilir ve bu nedenle tahminleme ve modelleme işlemi çok zordur. Termal azot oksit oluşumundaki diğer önemli faktörlerden biri de, yanma gazının azot oksit oluşumu için gerekli yüksek sıcaklıkta ne kadar kaldığının süresidir. Bu süre için de yanma odası içinde meydana gelen türbülans ve oksijen miktarı önemlidir.

Azot oksit üretimi temel olarak Zeldovich mekanizması olarak adlandırılan ve denge reaksiyonları biçiminde yazılan 3 denklem ile tanımlanır:

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

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

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

N_2 molekülündeki güçlü bağların kırılması için yüksek sıcaklık gerekmektedir. Bu nedenle azot oksit oluşum hızındaki belirleyici etken sıcaklıktır. Azot oksit 1400 ^{0}K üzerindeki sıcaklıklarda oluşmaktadır. Azot oksitler hem yanmış gazların içinde hemde alev demetinin çevresinde oluşumuna devam etmektedir [3].

2.1.2 Yakıt Kaynaklı Azot Oksit Oluşumu

Yakıtın içinde bulunan azotun yanma havasındaki oksijen ile reaksiyona girerek azot oksit oluşturduğu süreçtir. Gaz yakıtlar düşük miktarda bağlı azot içerdiğinden azot oksit

oluşumu azdır. Kömür ve petrolde nispeten gaz yakıtlara göre daha fazla bağlı azot vardır ve bu nedenle azot oksit oluşumu fazladır. Yine de içten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtlarda bulunan azot miktarı ve buna bağlı oluşan azot oksit miktarı önemli bir rol oynayamayacak kadar azdır. Yakıttan kaynaklı azot oksit oluşumu için mekanizma tam olarak anlaşılmamakla birlikte aşağıdaki iki denklemle gösterilmiştir.

$$N + OH \leftrightarrow NO + X \quad (2.4)$$

$$N + NO \leftrightarrow N_2 + X \quad (2.5)$$

X burada tam olarak anlaşılamayan diğer ürünleri sembolize etmektedir [3],[33].

2.1.3 Fenimore Azot Oksit Oluşum Mekanizması

Fenimore tarafından öne sürülen[34] azot oksit oluşum mekanizması termal oluşuma göre daha kompleks bir yapıya sahiptir. İstenmeyen azot oksit üretimini açıklayan son süreçtir. Yakıtın yanması sırasında radikal hidrokarbon atomları üretilir. Bu radikaller, yanma havasındaki oksijenle reaksiyona girdiklerinde, azot oksit oluşumu için okside olan geçiş maddeleri oluşturmak için yanma havasındaki azot ile de reaksiyona girerler. Aşağıda ki denklemle bu mekanizmayı açıklamak için kullanılmıştır:

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N \quad (2.6)$$

HCN, burada geçiş maddesi olarak bir dizi reaksiyon ile NO oluşumunu meydana getirir.

$$HCN + N \rightarrow ... \rightarrow NO \quad (2.7)$$

İçten yanmalı motorlarda yaklaşık 5-10% azot oluşumu Fenimore NO mekanizması yoluyla, 90-95% ise Zeldovich yani termal NO mekanizması yoluyla gerçekleşmektedir [35],[36].

2.1.4 N_2O kaynaklı Azot Oksit Oluşum Mekanizması

Diazot monoksit kaynaklı azot oksit oluşumu düşük sıcaklıklarda fakir karışımlı yanmanın olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Oluşan azot oksit miktarı diğer mekanizmalara göre çok azdır. Oksijen atomunun azot molekülü ve radikaller ile girdiği

reaksiyon sonucu diazot monoksit oluşur. Oluşan diazot monoksit molekü oksitlenerek azot oksitleri meydana getirmektedir [35],[36].

$$N_2 + O + M \leftrightarrow N_2O + N + M \quad (2.8)$$

$$N_2O + O \leftrightarrow NO + NO \quad (2.9)$$

2.2 Azot Oksit Emisyonu Oluşumuna Etki Eden Parametreler

İçten yanmalı motorlarda azot oksit emisyonu oluşması için 1400 ^{0}K ve üzeri sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Bu nedenden dolayı silindir içi maksimum sıcaklıkların kontrol altına alınması yanma sırasında reaksiyon oranını azalttığı için azot oksit oluşumunu azaltır. İçten yanmalı motorlarda azot oksit emisyonunlarını yanma öncesi ve yanma sırasında etkileyen önemli parametreler aşağıdaki gibidir.

2.2.1 Yakıt Püskürtme Sistemi

Hem dizel hem de benzinli motorlarda enjeksiyon sistemleri hava ile yakıtın homojen karışması için çok önemlidir. İçten yanmalı motorda meydana gelen proseslerde alev oluşması, yakıtın pülverizasyonu ve homojen olarak yanma havası ile karışması için püskürtme sistemlerinin karakterizasyonu etkilidir [37].

Dizel motorlarda tutuşma gecikmesinin etkisi doğrudan azot oksit oluşumu ile etkilidir. Yakıtın yanma odasına püskürtüldüğü enjektör delik adedi; yakıt miktarı, yakıt basıncı ve pülverizasyonu için kritiktir. Enjektörlerden püskürtülen yakıt taneciklerinin çapı ve hızlı pülverize olması enjektör çıkış hızı dolayısıyla enjektör çapıyla alakalıdır [3],[38]

Yüksek ray basıncı ile enjektöre gelen yakıtın azot oksit emisyonlarını arttırıcı yönde etkisi olduğu bilinmektedir [37].

2.2.2 Ateşleme Zamanı/Tutuşma Gecikmesi

Silindir içerisinde yanma başlangıcının ne zaman başlayacağı doğrudan azot oksit emisyonlarını etkiler. Yanmanın erken olması silindir içi basınçları maksimum değerine

yükseltir ve buna bağlı azot oksit emisyonu artışı olur. Benzinli motorlarda, ateşleme avansının arttırılması ile yakıtın büyük bir bölümü üst ölü noktadan önce tutuşarak üst ölü nokta civarında yanacağı için yüksek silindir içi basınçlar yanmış silindir içi gazların sıcaklıklarını maksimuma taşıyacaktır. Yanmış gazların yüksek sıcaklık ve basınçta uzun süre kalmasıyla azot oksit emisyonunda artış meydana gelecektir. Ateşleme avansının azaltılması ise yakıtın büyük bir kısmının üst ölü noktadan sonra yakılmasını sağlayacak ve böylece maksimum basınç değerleri düşecek, azot oksit emisyonu oluşumu yavaşlayacaktır. Ateşleme avansının etkisi fakir karışımlarda daha fazla, zengin karışımlarda daha az olmaktadır [37].

Dizel motorlarda tutuşma gecikmesinin arttırılması, silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarının fazla olmasına neden olacaktır. Tutuşma ile birlikte yanmanın ilerleyen safhalarında silindir içi basınçlar ve sıcaklıklar maksimum noktalara ulaşacak ve bu etkiyle birlikte azot oksit emisyonlarında artış meydana gelecektir. Püskürtme avansının azaltılması ise silindir içi maksimum basınç ve sıcaklıkların azalmasına, dolayısıyla azot oksit emisyonlarının azalmasına neden olacaktır. Fakat, maksimum basınçların azalması yanmamış yakıt miktarının artmasına, yakıt tüketiminin kötüleşmesine ve is oluşumuna neden olur. Bu yüzden optimum püskürtme avansı değeri is-azot oksit emisyonu dengesi için önemlidir [38].

2.2.3 Hava/Yakıt oranı

Hava fazlalık katsayısının değişimi silindir içi maksimum sıcaklıklar ile doğrudan etkilidir. Aynı zamanda yanma odasında bulunan oksijen konsantrasyonu da belirlemektedir. Fakir karışım sonucunda yanma sıcaklığı düştüğü için zengin karışımda ise oksijen konsantrasyonu azaldığı için azot oksit emisyonlarında azalma meydana gelir [36].

2.2.4 Art Gaz Etkisi

Yanma oluşmadan hemen önce silindir içerisindeki karışım, hava, yakıt buharı ve yanmış art gazlardan meydana gelmektedir. Bu yanmış gazlar, bir önceki çevrimden kalan art gazlar veya azot oksit emisyonlarını kontrol etmek amacıyla silindir içerisine geri

gönderilen yanmış egzoz gazlarıdır (EGR). Art gaz miktarı; yüke, subap zamanlamasına, yakıt/hava oranına, motor hızına ve volumetrik sıkıştırma oranına da bağlıdır. Art gazlar karışımda seyreltici olarak etki ederler ve art gaz miktarının artmasıyla yanma sonrası maksimum silindir içi sıcaklıklar düşer. Bunun nedeni, yanma hızının düşmesi nedeniyle maksimum ısının açığa çıktığı noktanın gecikmesi ve maksimum sıcaklıkların oluşmamasıdır. Dolayısıyla artan art gaz miktarı ile azot oksit emisyonlarıda iyileşme gösterecektir. Fakat yanmanın kalitesi de artan art gaz miktarı ile kötüleşir ve yüksek art gazlar yanmanın bozulmasına ve motorun çalışmasının etkilenmesine neden olur. Yanma kalitesi bozulmadan uygulanan maksimum egzoz gazını silindir içine yeniden gönderme işi ile minimum yakıt sarfiyatı sağlanmaktadır [3],[37].

2.3 Azot Oksit Emisyonu Azaltma Yöntemleri

İçten yanmalı motorlardan atılan emisyonların sınırlandırılmasıyla alakalı uygulanan regülasyonlar, üretici firmaların araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin bu yöne kaymasına neden olmuştur. Günümüzde egzoz emisyon limitlerine uygun motor üretebilmek için yanma öncesi ve sonrası bazı yöntemler geliştirilmiştir. Emisyon kontrol sistemlerinin temel amacı egzozdan atılan zararlı kirleticileri zararsız veya daha az zararlı hale getirmektir. Bu yönde alınan önlemler niteliklerine göre sınıflandırırsak üçe ayrılır.

- Birincil önlemler: Taşıt motorunda kullanılan yakıt bileşiminin emisyon azaltıcı yönde hazırlanması. (Kaynak öncesi önlem)
- İkincil önlemler: Motorda, silindir içinde yanma sırasında üretilen emisyonlara karşı alınan önlemler. (Kaynağında önlem)
- Üçüncül (tersiyer) önlemler: Oluşumuna engel olunamayan kirletici bileşenleri egzoz gazı içerisinden temizleme ile uygulanan yöntemler [37].

Yanmanın gerçekleşmesinden önce alınan önlemlerden bazıları; yakıt bileşiminin iyileştirilmesi, alternatif yakıtların kullanılması. Yanmanın gerçekleşmeden hemen önce motor içerisinde ve yanma odasında yapısal olarak alınan bazı önlemler bulunmaktadır; yanma odası geometrisi , turbo ve intercooler tipinin seçimi, türbülans etkisi gibi. Tezin bu bölümünde dizel motorlarda azot oksitlerin yanma odası içerisinde oluşumu

gerçekleştikten sonra egzoz gazı içerisinden temizlenmesi için uygulanan yöntemler ele alınacaktır. Yanma sonrası ve motor çıkışında ise egzoz gazındaki emisyonların azaltılmasına yönelik günümüzde alınan önlemlerden bazıları şöyledir; EGR, SCR(Seçici Katalitik İndirgeme), Lean-NO_X katalisti [39].

2.3.1 Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR)

Yanma sırasında oluşan azot oksitlerin büyük bir çoğunluğu sıcaklığa bağlı olduğu daha önceki bölümlerde açıklanmıştı. Yanma odası içerisinde bulunan hava-yakıt karışımının yanmış egzoz gazları ile konsantrasyonunun azaltılması sonucunda maksimum yanma sıcaklıkları düşecektir, buna bağlı olarak açığa çıkan azot oksit miktarı azalacaktır. Bu mekanizmayı motor içinde uygulayan sistem bütününe egzoz gazı resirkülasyonu(EGR) denmektedir. EGR, egzoz gazının bir bölümünü silindire tekrardan göndererek, egzoz gazının seyreltici rolünde olmasına neden olmaktadır. Egzoz gazı silindir içerisine girdiğinde oksijen konsantrasyonu azalır ve buna bağlı olarak alevin yapısında değişiklik oluşur. Değişen alev yapısı ise yanma süresinin bir fonksiyonu olduğundan maksimum sıcaklıklar düşüş eğilimine girer. Ayrıca içeriye alınan egzoz gazları yanma odasındaki gazların özgül ısı kapasitesini yükselterekte maksimum gaz sıcaklığının düşmesine neden olur. Düşen sıcaklıklar ile birlikte yakıt ve oksijen moleküllerinin birleşerek reaksiyona girme ihtimali azalır. Buna bağlı olarak reaksiyon hızı ve lokal alev sıcaklığı düşerek azot oksit emisyonlarının azalmasına neden olur. Dizel motorlarda azot oksit ve partikül madde arasında ters orantı vardır. Yanma ne kadar iyiyse egzoz içerisinde bulunan partikül madde miktarı o kadar azdır. Fakat yanmanın iyileşmesi durumunda maksimum yüksek sıcaklıklara ulaşılacağından azot oksit miktarı artacaktır. Dolayısıyla yanma odası içine gönderilen egzoz gazları, yanmanın kötüleşmesine ve partikül maddenin artmasına neden olacaktır. Azot oksit ve partikül madde arasında olan bu dezavantajlı duruma rağmen, optimum seviyede ayarlanan EGR azot oksit oluşumunu partikül madde ve HC emisyonlarında artış olmadan %50-60 seviyelerinde azaltabilir [37],[39].

2.3.2 Seçici Katalitik İndirme (SCR)

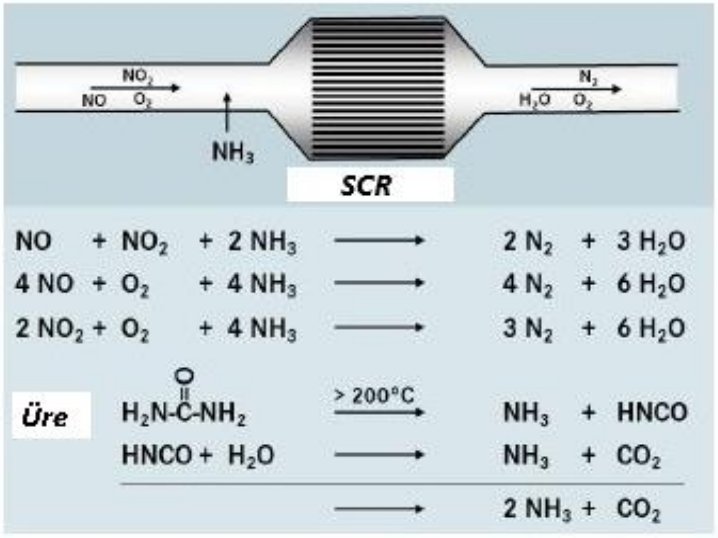
Egzozdan dışarıya atılan azot oksit emisyonları ilave bir kimyasal bileşik ile tepkimeye sokularak çereye zararı olmayan azot ve suya dönüştürülür. Bu sisteme seçici katalitik indirgeme(SCR) adı verilir. Bu sistem yardımıyla azot oksit emisyonları %85-90 aralığında indirgenebilir. SCR; indirgeyicinin, katalizörden egzoz akışının olduğu yöne doğru püskürtülmesi ile azot oksitlerin zararsız bileşenlere indirgenmesi olaylarının bütünüdür. SCR sisteminde en çok kullanılan indirgeyici üre çözeltisidir. Üre çözeltisi püskürtüldüğü zaman damlacıklar pülverize olur ve aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşir [37][39].

$$NO + NO_2 + 2\ NH_3 \rightarrow 2\ N_2 + 3H_2O \quad (2.10)$$

$$4\ NO + O_2 + 4\ NH_3 \rightarrow 4\ N_2 + 6H_2O \quad (2.11)$$

$$2\ NO + O_2 + 4\ NH_3 \rightarrow 3\ N_2 + 6H_2O \quad (2.12)$$

Mevcut regülasyonların karşılanmasında ve gelecekte yenilenecek limitler için SCR teknolojisi kullanımı şu an için kaçınılmaz bir gerçektir.



Şekil 2.1 SCR [40]

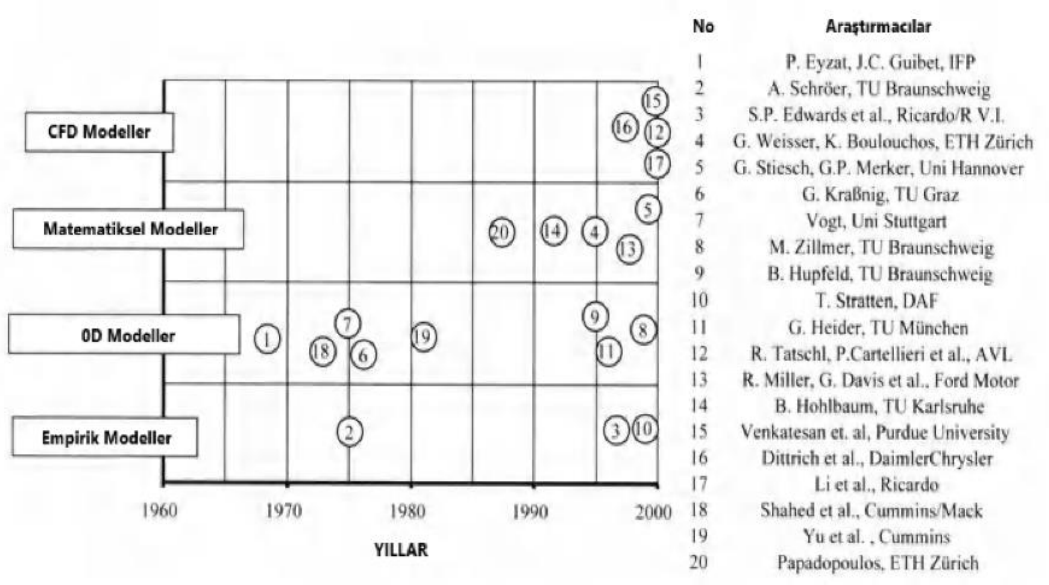
2.3.3 Lean-NO_X Katalisti

Egzoz gazlarının dışarıya atılması süresince azot oksit gazlarının hapsedilerek daha sonra indirgenmesi olayının gerçekleştiği sistemin adı Lean-NO_X katalisti diğer adıyla Lean-NO_X kapanıdır. Bu sistemde egzoz manifoldundan gelen NO gazları platinyum kaplı malzeme içerisine gönderilerek (kapan içerisine) O_2 yardımıyla NO_2'ye dönüşütürülür. NO_2 gazları alkali metan bir kapan ve O_2 ile reaksiyona girerek metal nitrat oluşturur. Daha sonra kapana hapsedilen metal nitrat üzerine yakıt püskürtülerek NO gazlarının reaksiyona girmesi sağlanır ve N_2 açığa çıkar. Bu sistem sayesinde azot oksit emisyonlarında %70-75 azalma meydana gelmektedir [37].

2.4 Azot Oksit Emisyonu Oluşumu Tahminleme Yöntemleri

İçten yanmalı motorlarda emisyonların oluşumunun tahmin edilmesi oldukça zor bir konudur. Bunun nedeni, yanma odasının içerisinde anlık oluşan yanma mekanizmasının, yakıt karışım oranının, çevrimdeki sıcaklıkların ve basıncın zamana bağlı değişkenlik göstermesi ve ayrıntılı dinamik değişkenler içermesindendir. Tahmin yöntemleri, emisyonların oluşum sürecini incelerken termodinamiksel kabuller, değişmeyen sabitler veya yaklaşım teorileri üzerine kuruludur. Günümüzde, deneysel ortamlarda (dinamometre) veya araç çalışma koşullarında (ECU içerisinde gömülü modeller) yapılan emisyon tahminleri yüksek verimlilikte olup motor geliştirici firmalar tarafından kullanılmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda araç çalışma koşullarında anlık sensör ölçümleri ile ECU'ya bilgi gönderilir ve sürüş şartı doğrultusunda (hız-pedal konumu, yol şartları gibi) optimum yakıt tüketimi-emisyon çıktıları için bir strateji izlenir. (yakıt püskürtme açısı, püskürtülen yakıt-üre mikarı gibi.) Son zamanlarda motor üretici firmaları ve araştırmacılar gerçek zamanlı çalışabilen sanal sensörler ve bunlara bağlı tahmin algoritmaları gerçekleştirmişlerdir. Literatürde çok sayıda NO_X modeli vardır.



No	Araştırmacılar
1	P. Eyzat, J.C. Guibet, IFP
2	A. Schröer, TU Braunschweig
3	S.P. Edwards et al., Ricardo/R V.I.
4	G. Weisser, K. Boulouchos, ETH Zürich
5	G. Stiesch, G.P. Merker, Uni Hannover
6	G. Kraßnig, TU Graz
7	Vogt, Uni Stuttgart
8	M. Zillmer, TU Braunschweig
9	B. Hupfeld, TU Braunschweig
10	T. Stratten, DAF
11	G. Heider, TU München
12	R. Tatschl, P.Cartellieri et al., AVL
13	R. Miller, G. Davis et al., Ford Motor
14	B. Hohlbaum, TU Karlsruhe
15	Venkatesan et. al, Purdue University
16	Dittrich et al., DaimlerChrysler
17	Li et al., Ricardo
18	Shahed et al., Cummins/Mack
19	Yu et al. , Cummins
20	Papadopoulos, ETH Zürich

Şekil 2.2 Yıllara göre azot oksit emisyonu modeli yapan araştırmacılar[27]

Sanal sensörler veya bir diğer adıyla çıkarım sensörleri fiziksel azot oksit sensörlerinin yerini alarak parça maliyetlerini düşürmek ve yerleşik hata algoritmalarını geliştirmek (on-board-diagnostic) için kullanılmaktadır. Artan katı emisyon limitleri ile birlikte dizel motorlarda azot oksit oluşumunu öğrenmek ve optimize etmek için ölçümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sensörden alınan bilgiler ECU'ya iletilmekte ve bazı stratejiler izlenmesi veya hata önleme için kullanılmaktadır. Örneğin, SCR indirgeyici dozlamasının kontrolü ve SCR katalizörünün NO_X dönüşümünün verimini bu sensörden alınan bilgi ile kalibre ve kontrol eder. Fiziksel NO_X sensörünün yerine geçebilecek tahminleyici algoritmaların kullanıldığı bazı uygulamalar vardır. Bunlardan ilki fiziksel olarak NO_X sensörünün varlığının teşhis edilmesine yönelik uygulamadır. ECU üzerine yazılan bu algoritma sayesinde egzoz emisyonlarında bulunan azot oksitlerin ölçülüp ölçülmediği, NO_X sensörünün doğru çalışıp çalışmadığının kontrolü yapılır. İkinci geliştirilen uygulama ise fiziksel NO_X sensörünün tamamen kaldırılmasıdır. Fiziksel sensör yerine motor çıkışı NO_X tahminleyici sanal sensörün geliştirilmesi; malzeme temini, entegrasyonu, ECU kablolaması açısından avantaja sahiptir. Tahminleyici sanal sensörün aynı zamanda çıkarımlara güvenmek gibi bir dezavantajıda vardır. Tam olarak geliştirilmemiş ve uygulamaya geçilmiş tahminleyici sensörlerden gelen yanlış ölçüm bilgileri, SCR sisteminin yanlış NO_X çevirmesine, katalizör verimliliğini yanlış algılayıp katalizörün

arızalı olduğu kanısına ve egzoz emisyon limitlerinin aşılmasına neden olabilir. Sanal sensör ile geliştirilen üçüncü bir uygulama ise fiziksel NO_X sensöründen gelen ECU yanıtının tahminleme ile hızlandırılmasıdır. Bunun nedeni, doğrudan NO_X ölçümünü kullanan motor üzerinde bulunan aktüatörlerin kontrol uygulamaları içindir. Bu nedenle, tahminleme yapan sensörün vereceği değer hızlı ve kararlı yanıt verecek şekilde ECU içerisindeki haritalarda hava yolu girdilerini etkilemek için kullanılabilir [6],[11],[24],[27],[30],[41].

Tahminleme uygulamaları için bazı gereksinimlere ihtiyaç vardır. Bunlar:

- Geçici tepki süresi hızlı olmalıdır.
- Tahminleme hatası az olmalıdır.
- Tahminleyici algoritma, her koşula göre kalibre edilmiş ve arıza durumları için doğru sonuç vermelidir.
- Tahminleyiciyi çalıştırmak için gerekli olan ECU kaynağı, fiziksel sensör için gerekli olan kaynağa benzer olmalıdır (Maliyet optimizasyonu için) [11].

Günümüzde, otomotiv geliştiricileri tarafından ECU içindeki uygulamalarda kullanılan üç çeşit tahminleme modeli vardır. Bunlar,

- Fiziksel tabanlı modeller: Karmaşık termodinamik ve yanma süreçlerini içeren, yüksek hesaplama maliyetine sahip.
- Grey Box-yarı fiziksel (semi physical) modeller: Fiziksel modellerin basitleştirilmesinden elde edilen ve orta hesaplama maliyetine sahip.
- Veriye dayalı black box modeller: Fiziksel formüllerin çok azına içeren, yapay sinir ağları kullanımına açık ve düşük hesaplama maliyetine sahip [6],[11].

Tahmin modellemeleri oluşturabilmek için gerekli bazı adımlar vardır, bunlar;

- Girdi tanımlama,
- Model tasarımı,
- Model eğitme,
- Doğrulama [42].

2.4.1 Fiziksel Tabanlı Modeller

Fiziksel tabanlı model, gelişmiş algoritmalar ve artan hesaplama gücü ile ECU uygulamaları için fiziksel formüllere dayalı bir seçenektir. Tam yanma gerçekleşmesi varsayımı altında, silindir içi yanmış bölgelerdeki sıcaklıkların hesaplanmasıyla elde edilebilen NO_X tahmin çıktıları vermektedir. Yanmış bölgelerde NO_X oluşumu ile ilgili yanma reaksiyonu, denge sıcaklıkları ve konsantrasyonları hesaplamalar için gereklidir. Farklı fiziko-kimyasal fenomenlerden oluşan NO_X oluşum mekanizmaları içerisinde; yüksek sıcaklıklar için Zeldovich mekanizması, düşük sıcaklık ve yüksek EGR akış oranı için Fenimore mekanizması ve geliştirilmiş Zeldovich mekanizması iyi bir fiziksel model için uygulanabilir fiziko-kimyasal yöntemlerdir [11],[41]. Krank açısının bir fonksiyonu olarak silindir içi termodinamik koşulların hesaplanmasıyla meydana çıkan sıfır boyutlu termodinamik modeller veya motorun içindeki yanmayı üç boyutlu CFD modelleyen yaklaşımlar fiziksel tabanlı modellerdir [11].

Model uygulamaları incelendiğinde; silindire akışı sağlayan hava yolu, silindir içi konsantrasyonları, basıncı ve yakıtı belirler. Daha sonra yakıt-hava karışımı hesaba katılır. Silindir içi basınç sensörü olduğu durumlarda modelleme daha da kolaylaşır. Açığa çıkan ısı tahmini için genellikle iki bölgeli (yanmış ve yanmamış) formülasyonlar uygulanır. Sıcaklık ve açığa çıkan emisyonların oluşum oranlarının hesaplanması yanmış bölgede modellenir. Daha sonra oluşum formasyonuna geçilir. NO_X oluşum formasyonunun Zeldovich mekanizması ile modellenmesinin tüm sıcaklıklarda yeterli olmadığı, yüksek sıcaklıklarda etkili ve doğruluğu yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sadece Zeldovich mekanizmasına dayanan modellerin düşük sıcaklık bölgelerinde hataların olması kaçınılmazdır [11].

Silindir içi basınç ölçümlerinin sensör ile ölçülmesi ve kullanılması fiziksel tabanlı modeller için önemli ölçüde doğruluğun artmasına yardımcı olabilir. Silindir içi basınç sensörü tutuşma gecikmesinden kaynaklı belirsizlikleri azaltarak açığa çıkan ısı yayılımı hakkında doğrudan bilgi verebilir. Silindir içi basınç ölçüm sensörü mevcut değilse, silindir içi basınç ve ısı yayılım alt modellerinin oluşturulmasına ihtiyaç duyulacak ve hesaplama süresinin artmasına neden olacaktır. Silindir içi basınç sensörüne ek olarak

standart hava yolu giriş ölçümlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin, EGR oranı, enjekte edilen toplam yakıt kütlesi, içeriye alınan hava kütlesi, emme manifoldu basıncı ve sıcaklığı gibi. Tüm bu ölçümler krank açısına bağlı olarak alınmalıdır. Alınan ölçümler ile oluşturulan model yanma tahminlemesi yapacak ve buna bağlı olarak açığa çıkan emisyonları tahminleyecektir. Fiziksel azot oksit tahminleme modellerinde ilk olarak motor termodinamik koşulları modellemesi yapılır. Daha sonra bu sonuçlar yanmış bölgede ki sıcaklık ve hava/yakıt oranı tahminlemesi olmak züere 2 bölgeyi besler. Krank açısına bağlı Zeldovich mekanizması veya gelişitirilmiş mekanizmalar kullanılarak NO_X emisyonu sonuçları elde edilir. Model doğruluğu sensörlerden alınan ölçümlere göre değişmektedir. Örneğin, model girdilerindeki %1'lik hata NO_X emisyonu tahmininde %33 oranında hataya neden olabilmektedir. Silindir içi maksimum basınç ve sıcaklık sensör ölçümlerinin yanlış olması modeli tamamiyle başka noktalara götürebilmekte ve çok büyük hatalara neden olmaktadır. Gerçek zamanlı NO_X tahminlemenin fiziksel tabanlı model ile verimli bir şekilde yapılabilmesi için ECU tahmincisinin geliştirilmesi, sensör doğruluğunun ve hata payı oranlarının iyileştirilmesi ve hesaplama zamanlarının kısaltılması çözülmesi gereken problemlerdir [6],[11],[41].

2.4.2 Veriye Dayalı Black Box Modeller

Veriye dayalı black box modellerde fiziksel ilkelere dayanan bir model yapısı yoktur. Büyük veri kümeleri bir yerde toplanarak tanımlanır ve ayıklanır. Ayıklanan verilerin girdileri black box model oluşturularak istenen çıktıya dönüşmesi sağlanır. Ayıklanan verilerin doğruluğu ölçüm noktalarının fazla olduğu bölgelerde çok, düşük olduğu bölgelerde daha az ekstrapolasyon yeteneği sağlar. Modelin kalibre edilemediği noktalarda ise doğruluk oranı düşüktür. Black box modeller oldukça fazla modelleme yöntemi kullanılarak oluşturulabilir. Örneğin, istatistiksel veri kümeleri, ARX modellerinin matematiksel gösterimleri, ölçüm veri serileri, çoklu doğrusal modeller, lineer olmayan modellemeler, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar gibi [11],[41].

Azot oksit emisyonlarının black box modellerle tahmin edilmesi, silindirde meydana gelen fizikokimyasal olayların detaylı formülsel çözümünü gerektirmez. Bu modeller düşük bir karmaşıklık sunarak çözüme ampirik yollardan ulaşmayı sağlar. Bu ampirik

modeller arasında en basit olanları ise motor hızına ve torkuna bağlı olarak iki boyutlu statik haritalardır. Black box modellerin doğruluğu için deneysel çıktılar ile kurulacak olan modelin iç parametreleri çok önemlidir.[27] Yapay sinir ağları yöntemiyle kurulan black box modellerde sonuç için oluşturulacak olan girdilerin birbiriyle bağıntılı olması çok önemlidir. Örneğin, silindir içi basınç, yakıt püskürtme gecikmesi ve silindir içine atılan hava miktarı girdileri olan bir black box modelde azot oksit emisyonları tahminlemesi çok yüksek doğrulukta sonuç verecekken; turbo giriş basıncı, SCR çıkış sıcaklığı ve EGR çıkış basıncı girdileri olan bir modelde azot oksit emisyonları tahminlemesi çok düşük doğrulukta sonuç verecektir.

2.4.3 Grey Box (Yarı fiziksel) Modeller

Grey box modeller, fiziksel tabanlı modelleri ilham alarak geliştirilmiş tahminleme yöntemidir. ECU kaynak kullanımını azaltmak veya fiziksel tabanlı modellerde kullanılan sensör girdileri yerine basitleştirilmiş varsayımlar uygulanması amacıyla geliştirilen modellerdir. Fiziksel tabanlı modellere benzer olarak geliştirilen grey box modellerin yapısında bazı polinom değerlerinin veya çoklu lineer/lineer olmayan modellerin fiziksel anlamı ve mantığı olmamasına karşın giriş ve çıkış parametreleri fiziksel olarak anlamlandırılmış ve mantıklıdır.

İki veya üç bölgeli grey box azot oksit modelinde silindir basıncı bilgisi anahtar parametrelerin hızlı ve sağlam bir şekilde tanımlanmasına yardımcı olur. Model içinde silindir basıncı bilgisi kullanılmasa da, iyi tanımlanmış denklemler ile %3,5'dan daha düşük ortalama hata değeri elde edilebilir. Silindir içi yanma parametrelerinin hesaplanması için ortalama değer ve krank açısı çözümlü modellerin kombinasyonları kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak enjeksiyon başlangıcı, enjeksiyon süresi, ray basıncı, giren hava kütlesi, boost basıncı, motor soğutma suyu sıcaklığı; grey box NO_X modellemesi için ihtiyaç duyulan parametrelerdir. Bilinen bu bilgiler ile ECU sinyalleri kullanılarak grey box modelinin oluşturulabileceği ve tahmin yeteneğinin çok yüksek olduğu doğrulanmıştır. Grey box azot oksit tahmin modelleri girdi olarak silindir içi basınç sinyalini baz aldığı gibi, krank açısına bağlı anlık silindir içi sıcaklık bilgisini de kullanabilir. Grey box modeller aynı zamanda motor kontrolünde de kullanılmaktadır. Hava yolu

dinamiği, grey box olarak modellenmiş parametresel verilerle oluşturulan girdi ve çıktıları kullanabilir. Bunun nedeni black box modellerden daha az sayıda deneysel veri içermesi ve kolay kalibre edilebilmesidir [11].

Grey box bir model, fiziksel tabanlı bir model/denklem üzerine deneysel veriler kullanarak bir bilgisayar programında çözülmüş black box model katsayılarından oluşan tahminleme yöntemidir. Silindir içinde gerçekleşen yanma mekanizmasının fiziksel yöntemlerle oluşturulmuş denklemler ile çözülmesi mümkün değildir, ancak değişken katsayıları ile yanma mekanizmasının modellenmesi hata payını azaltarak gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Grey box modeller, alt modellere (sub-model) sahip tahminlerdir. Literatürde bulunan tüm modeller, integral (krank açısı bazlı) veya integral olmayan yaklaşımla ele alınmıştır (çevrim bazlı).

İntegral olmayan bir yaklaşımda, çevrim başına oluşturulan azot oksit kütlesi, fiziksel değişkenleri ve değişkenlerin katsayıları ile bir formül ile modellenir. Formül fiziksel bir nedenden dolayı oluşturulmamıştır. Formül içinde sabit bir katsayı bulunmaktadır. Azot oksit emisyonları fiziksel denklemlerde sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu için Arrhenius faktörü bu tür bir formülasyona eklenir. Genel formülasyon (2.13)'teki gibidir [42].

$$m_{NOx} = k.\ f\left(e^{ka/Tx}, x_2^{kb}, ..., x_n^{kn} \right) \quad (2.13)$$

k, k_a, k_b, k_n : değişken katsayılar

T_x, x_2, x_n : fiziksel değişkenler

İntegral yaklaşım modelinde, integral aralığı değişkeni krank açısıdır. Krank açısının yanma için anlamlı olan değerleri arasındaki integral fonksiyonu fiziksel değişkenler ile tanımlanır ve değişken katsayıları ile formül bulunur. Genel formülasyon (2.14)'teki gibidir [42].

$$m_{NOx} = \int_{\alpha 1}^{\alpha 2} f\left(x_1, x_2, ..., x_n, k_a, k_b, ..., k_m\right) d\alpha \quad (2.14)$$

k_a, k_b, k_m : değişken katsayılar

x_1, x_2, x_n : fiziksel değişkenler

α : krank açısı

2.5 Model Seçimi

Black box modellerin avantajı minimum hesaplama zamanı sunmasıdır. Fakat veriye dayalı tahminlemenin kuvvetine göre modelin her koşulda doğru çalışacağı varsayımı yapılamaz. Kapsamlı motor parametreleri ve değişen koşullara göre kalibre edilecek black box modellemesi için uzun çalışmalar yapılması gerekebilir. Fiziksel tabanlı ve grey box tabanlı modeller, hesaplama süresi ve sensör setlerinden oluşması nedeniyle maliyet açısından dezavantajlı konumdadır. Fakat, araştırma merkezlerinde iyi kurulabilecek fiziksel tabanlı ve grey box tabanlı bir model, NO_X tahmini için az veri gerektirdiği gibi doğruluğuda çok yüksek olacaktır. Uygulamaya geçecek bir grey box modelde fiziksel tabanlı modelden esinlenmiş parametrelerin kullanımı kapsamlı ve kaliteli tahmin sonuçlarını sağlayacaktır.

Azot oksit emisyonu tahminlemesi yapılması için kullanılacak olan motor, test cihazları ve sensör setlerinin yeterli olmasından dolayı incelenen tahminleme yöntemlerinden grey box modelinin integral olmayan tahminlemesinin kullanılmasına karar verilmiştir.

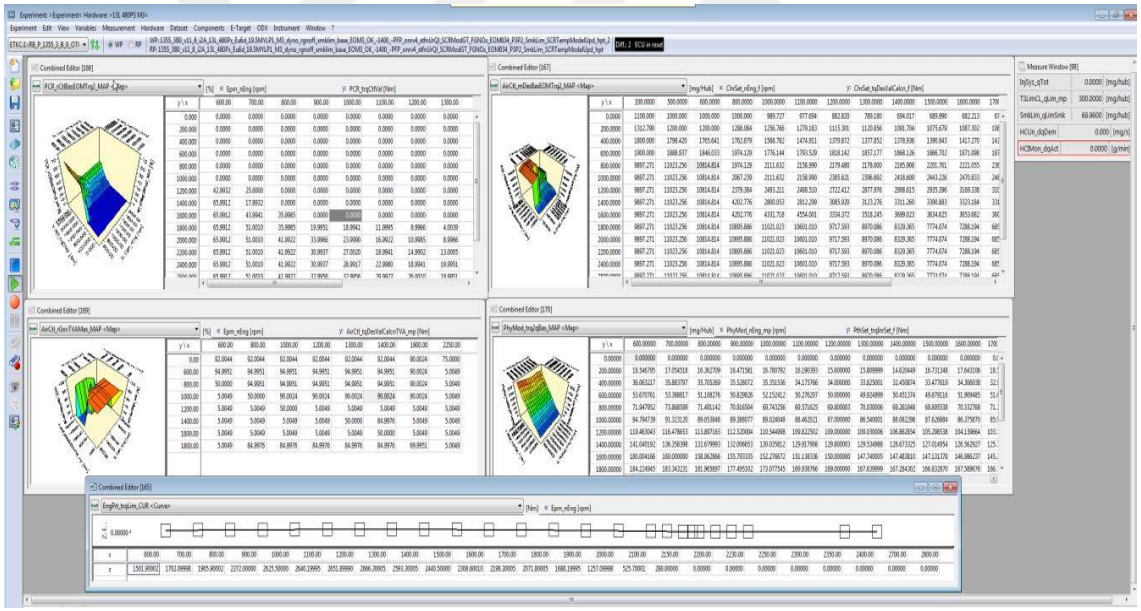
2.6 Test Motoru ve Deney Düzeneği

Çalışmalar esnasında alınacak olan ölçümler için, Ford OTOSAN firmasının 6 silindirli, 12,7 L silindir hacmi olan, turbo sistemli, soğutuculu EGR sistemli, 353 kW maksimum güce sahip, Ecotorq dizel ağır ticari araç motoru kullanılmıştır. Motor geliştirme çalışmaları devam ettiğinden daha detaylı bilgi verilememektedir.

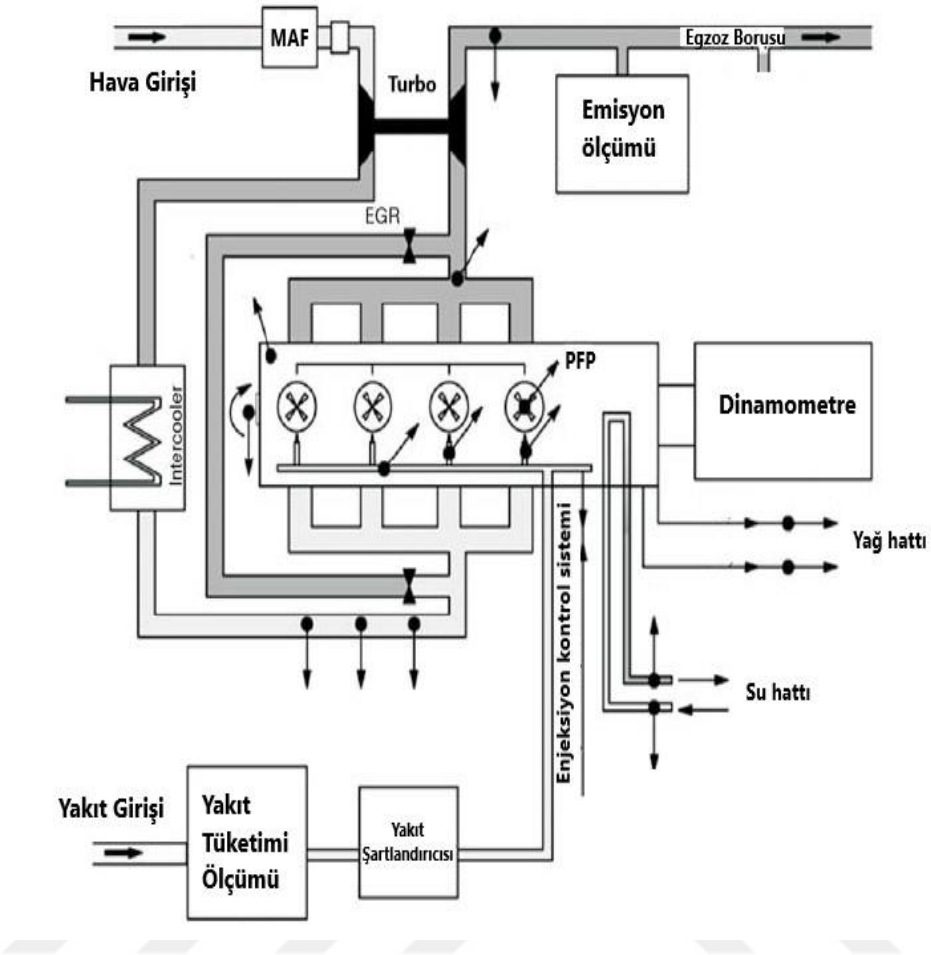
Çalışma Ford OTOSAN firmasının Gölcük yerleşkesinde bulunan Ar-Ge tesisindeki dinamometre test merkezinde yapılmıştır.

Çalışmalar esnasında motordan alınan tork değeri ölçümü 500 kW AC AVL APA INDY S50-4/3001 asenkron, aktif-pasif kontrollü dinamometre tarafından yapılmıştır [43]. Harcanan yakıt tüketimi hesabı coriolis prensibiyle çalışan AVL 735S cihazından ölçülmüştür. İlgili yakıt cihazının ölçüm aralığı 0-125 kg/saat olmakla birlikte ölçüm hassasiyeti %0,12'dir. Test motoruna gönderilen yakıt AVL 735C cihazı tarafından şartlandırılarak 38 ^{o}C sıcaklıkta gönderilmiştir. Yakıt şartlandırıcısı cihazının kontrol aralığı 10-80 °C olup standart sapması ±1 °C'dir [45]. Silindir içi krank mili bazlı basınç

ölçüm sinyali AVLGH22C model sensör ile ölçülmüş ve AVL Indiset 620 basınç analiz cihazı ile çözümlenmiştir. Cihazın çözünürlüğü 0.025 ^{o}KMA(Krank Mili Açısı) ile 1 ^{o}KMA arasındadır Test motoruna gönderilen hava debisinin ölçümü motor üzerinden dahili olarak bulunan MAF sensörü ile ölçülmüş ve ABB marka SensyFlow tipi hassas hava debimetresi ile doğrulanmıştır. Her iki sensöründe ölçüm hata oranı %0,9'dur. Azot oksit emisyonlarının ölçülmesi için motor üzerinde dahili olarak bulunan azot oksit emisyon ölçüm sensörü kullanılmıştır. Test esnasında motorun ECU parametreleri üzerinde değişiklik yapılması ve görüntülenmesi için INCA programı kullanılmıştır [46]. Motor dinamometresi parametrelerinin ayarlanması, kontrol edilmesi, motor üzerinde bulunan sensör setlerinden gelen bilginin okunması ve kayıt alınması için AVL Puma Open 2.5 programı kullanılmıştır [47]. Puma programı ile INCA programı arasında kurulabilen ASAP protokolü sayesinde ECU verileri aynı zamanda Puma ekranında görülebilmekte ve kayıt altına alınabilmektedir.



Şekil 2.3 INCA programı ekran görüntüsü



Şekil 2.4 Deney düzeneği [48]

BÖLÜM 3

AZOT OKSİT EMİSYON OLUŞUMU TAHMİNLEME MODELİ ve DETAYLARI

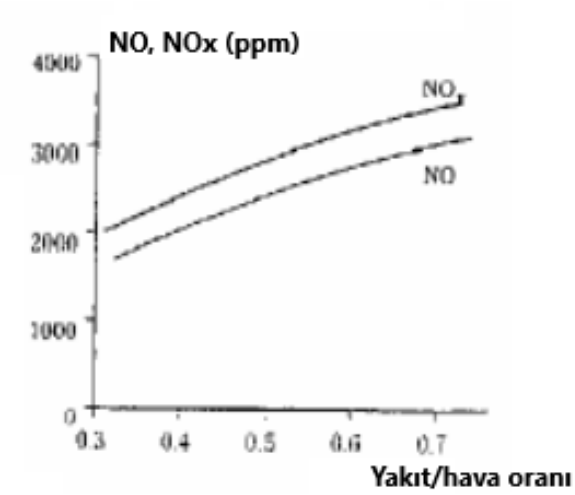
3.1 Girdi Tanımlama

Yarı fiziksel model oluşturulabilmesi için boyutsuz empirik bir formüle ihtiyaç duyulmaktadır. İleri sürülecek olan tahminleme modeli empirik formülünde belirlenecek olan parametrelerin, NO_X oluşumuna doğrudan etkisi olan parametreler olması, modelin hassasiyeti ve yüksek doğrulukta çalışması için çok önemlidir. Yarı fiziksel modele dahil edilmesi gereken girdi değişkenlerini tanımlamak için NO_X oluşum mekanizmasını iyi kavramak gerekir. Oluşum mekanizmasına bağlı olarak ileri sürülecek empirik modelin parametreleri belirlenecektir.

Oluşum mekanizmasına göre NO_X oluşum oranı, üssel olarak yanmış gaz sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle oluşumu üssel olarak genişletecek bir sıcaklık parametresi modelin olmazsa olmazıdır. NO_X oluşumu difüzyon alevinin altındaki yanma sonrası bölgelerde ilerleyerek devam eder fakat seyreltme gerçekleştiğinde donarak oluşum meydana gelir. Bu yüzden oluşum mekanizmasnın iyi anlaşılabilmesi için silindir içerisindeki maksimum sıcaklıkların bilinmesine ihtiyaç vardır. Silindir içi maksimum sıcaklığı ölçmenin en iyi yolu krank mili açısı bazlı silindir içi basınç sensör kullanmak ve bu veriyi çözümlemektir [3],[12-18],[23-26],[29],[30].

Yanma gazı sıcaklığına bağlı olarak NO_X oluşum hızı azot kütlesine ve difüze yanmış gaz bölgesinde bulunan oksijen kütlesine bağlıdır. Silindir içine alınan temiz hava ile oksijen ve azot kütlesi orantılı olacağı için, temiz hava kütlesi miktarı empirik formülde yer alacaktır [3],[19],[20].

Dizel motorlarda yakıt/hava oranı arttıkça oluşan azot oksit miktarı aynı oranda artmaktadır. Silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarıyla azot oksit emisyonu direkt olarak arttığından, yanma odası içerisine püskürtülen yakıt miktarının model empirik formülde yer alması gerekmektedir [3],[11],[13],[16],[17],[20-22],[28],[37].



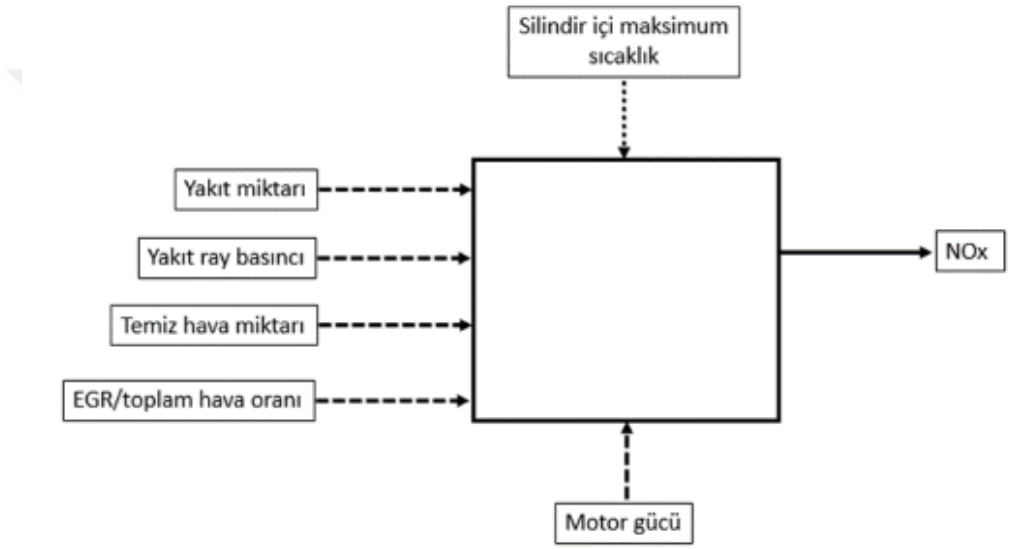
Şekil 3.1 Dizel motorlarda yakıt/hava oranına bağlı NO, NO_X oluşumu [37]

Motorun içine alınan havanın tam yanması için enjekte edilen yakıtın kütlesi ve enjektör ucundan çıkan yakıtın basıncı, karışımın iyi olması ve tam yanmanın gerçekleşmesi için kritiktir. Yanma başlamadan önce silindir odasına püskürtülen yakıtın homojen veya heterojen bir şekilde dağılımı yanma sonucu oluşan basınç ve sıcaklıkları kontrol eder. Buna bağlı olarakta azot oksit emisyonlarının artmasına veya azalmasına neden olur. Tam pülverize olmuş yakıt, yakıtın silindir içerisine yüksek basınçta gönderilmesi sayesinde gerçekleşmektedir. Yakıtın yanma odasına parçacıklarına ayrılarak püskürtülmesi için oluşturlan ray basıncı azot oksit emisyonu oluşumunu doğrudan etkilemektedir ve model empirik formülünde kullanılmasına ihtiyaç vardır [11],[14],[18],[19],[37],[38].

Yanmış egzoz gazlarının bir kısmı yanma odasına tekrar gönderilerek temiz havayı seyreltir ve maksimum yanma sıcaklıklarını düşürür. Maksimum sıcaklıkların düşmesiyle azot oksit oluşumunun azaldığı daha önceki bölümlerde açıklanmıştı. Buna bağlı olarak EGR tarafından gelen yanmış egzoz gazlarının silindir içine alınan temiz havaya oranı,

azot oksit emisyonlarının değişimi için en kritik parametrelerden birisidir ve empirik formülde yer almalıdır. [3],[6],[11],[13],[16],[17],[21],[25],[26],[28],[37],[39],[41].

Dizel motorlar değişken yük koşullarına bağlı olarak azot oksit üretirler. Kısmi yüklerde düşük özgül ısıya sahip azot oluşmaktadır [37]. Motor devri ve torkuna bağlı olarak yanma sonrası açığa çıkan azot oksit miktarında önemli derecede farklılıklar olduğu görülmüştür [11],[13],[14],[16-20],[22-24],[26-30]. Motordan elde edilen güç, devir ve torkun bir fonksiyonu olduğu için empirik formüle dinamometreden ölçülüp hesaplanan güç değeri eklenecektir.



Şekil 3.2 Girdi yapısı

3.1.1 Silindir İçi Maksimum Sıcaklık

Grey box - yarı fiziksel oluşturulacak olan azot oksit emisyonu oluşum modelinin matematiksel girdisi silindir içi maksimum sıcaklık tahminlemesidir.

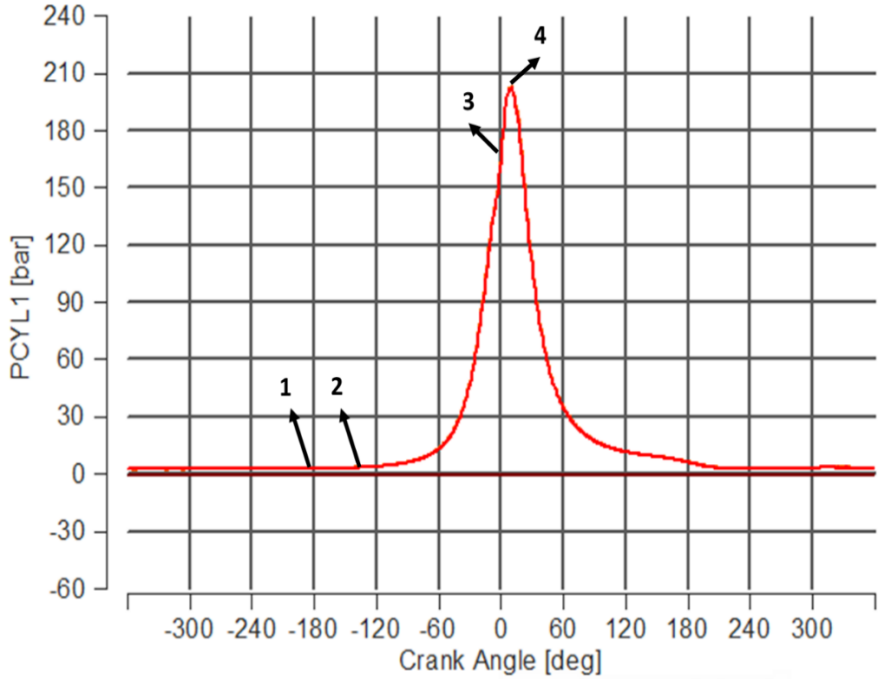
Yanma hesaplamalarının yapılabilmesi için AVLGH22C model silindir içi basınç ölçüm sensörü ile AVL Indiset 620 basınç analiz cihazı kullanılacak ve maksimum sıcaklıklar matematiksel olarak modellenecektir. Silindir içi maksimum sıcaklık tahminlemesi yapılırken, ölçüm noktasının 1 ^{0}KMA bağlı ortalama değeri girdi olarak kullanılacaktır.

Termodinamiğin 1. kanununa göre yanma sonu oluşan ısı enerjisi, silindirde bulunan gazların iç enerjisini arttırır ve mekanik iş elde edilmesine neden olur. Silindir içerisinde oluşan yanma sonucu ortaya çıkan ısının bir miktarı ısı transferi ile kayba uğrar. Bu kayıp yapılacak olan hesaplamalarda ihmal edilecektir.



Şekil 3.3 Silindir içi basınç ölçüm sensörü

Tek bir çevrimin silindir içi basınç sensörü ile alınan ölçüm görüntüsü şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Krank mili açısına bağlı silindir içi basınç ölçümü

Şekil 3.4'te gösterilen noktaların açıklaması şöyledir:

1) Sıkıştırma başlangıcı
2) Emme subabı kapanması
3) Genişleme başlangıcı
4) Maksimum basınç ve sıcaklık noktası

Termodinamiğin 1. kanununa göre yanma denklemi aşağıdaki gibidir,

$$\eta_y H_u = U_4 - U_2 + L_{2,4} \quad (3.1)$$

Bu denklemde,

η_y: Yanma verimi

H_u: Yakıtın alt ısıl değeri (kj/kg)

U_4: 4 noktasındaki gazın iç enerji değişimi (kj/kg)

U_2: 2 noktasındaki gazın iç enerji değişimi (kj/kg)

$L_{2,4}$: 2-4 noktaları arasındaki işi (kj/kg) ifade etmektedir.

Şekil 3.4 ve denklem (3.1) deki gazların, 2 ile 4 noktaları arasındaki iç enerji değişimindeki farkın ürettiği iş, silindir içerisinde yanan hava-yakıt karışımının açığa çıkardığı toplam ısı enerjisine eşittir.

3.4 numaralı şeklin 2 ve 4 noktasındaki gazın iç enerji değişimi yazılırsa,

$$U_4 = \mathrm{w}.c_v^{''}.\left(n_{yu}.n_r\right).(T_4 - 273)\ kj/kg \quad (3.2)$$

$$U_2 = U_2' + U_2'' = (\mathrm{w}.c_v'.n_e + \mathrm{w}.c_v^{''}.n_r).(T_2 - 273) kj/kg \quad (3.3)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerde,

$w.c_v^{''}$: Yanmış gazların sabit hacimde molar ısınma ısısı (kj/kmol.^{0}K)

n_{yu}: Yanma ürünlerinin mol sayısı (kmol/kg)

n_r: Bir önceki çevrimden kalan yanmış gazların mol sayısı (kmol/kg)

T_4: Yanma sonu maksimum sıcaklık (^{0}K)

$U_2' + U_2''$: 2 noktasındaki gazların iç enerji değişimi (kj/kg)

$w.c_v'$: Havanın sabit hacimdeki molar ısınma ısısı (kj/kmol.^{0}K)

n_e: Yanabilen taze dolgunun mol sayısı (kmol/kg)

T_2: Emme sonu sıcaklığını (^{0}K) ifade eder.

Şekil 3.4 için 2 ile 4 noktaları arasında kalan toplam iş yazılırsa,

$$L_{2,4} = P_4V_4 - \rho P_2V_2 \quad (3.4)$$

$$P_4V_4 = (n_{yu} + n_r)\,\bar{R}T_4 \quad (3.5)$$

$$P_2V_2 = \rho(n_e + n_r)\,\bar{R}T_2 \quad (3.6)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerde,

P_4: Maksimum basınç noktası (bar)

P_2: Emme sonu basıncı (bar)

V_4: Maksimum basınç noktasındaki hacim (L)

V_2: Emme sonu hacmi (L)

ρ: dolgunun özgül kütlesi (kg/m^3)

$\bar{R}$: Gaz sabitini ifade eder.

(3.6) ve (3.5) denklemleri (3.4) üzerine yazılırsa,

$$L_{2,4} = \left(n_{yu} + n_r\right)\bar{R}T_4 - \rho(n_e + n_r)\,\bar{R}T_2 \quad (3.7)$$

denklemi ortaya çıkar.

$$\mu = \frac{(n_{yu}+n_r)}{(n_e+n_r)} \quad (3.8)$$

denklemi kmol sayısının gerçek değişim katsayısını ifade eder.

$$\gamma_r = \frac{n_r}{n_e} \quad (3.9)$$

denklemi artık egzoz ürünleri katsayısını ifade eder.

(3.7) denkleminde sadeleştirme yapılırsa son hali (3.10) gibi olur ve yanmış gazların maksimum sıcaklık değeri T_4 sıcaklığı bulunabilir.

$$\frac{(\eta_y H_u)}{n_e(1+\gamma_r)} + \frac{u_2' + \gamma_r u_2''}{1+\gamma_r} + \bar{R}\rho T_2 = \mu(u_4'' + \bar{R}T_4) \quad (3.10)$$

Ortaya çıkan bu denklem ile MATLAB programında matematiksel bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model test motorundan alınan veriler ile beslenerek T_4 yanma sonu maksimum sıcaklık tahminlemesi yapılmıştır [1].

Oluşturulan enerji denklemi için gerekli olan giriş manifoldu ve türbin girişi sıcaklık ve basınç değerleri deney motoru üzerine enstrümante edilmiş sensörler ile ölçülmüştür.

MATLAB programında her veri noktası için ortaya çıkan sıcaklık değeri T_{max} olarak adlandırılacaktır. (EK-A)

3.1.2 Temiz Hava Miktarı

Silindir içine alınan hava miktarı doğrudan yanmayı oluşturan girdilerdendir. Yakıt/hava oranı azot oksit emisyonlarının oluşumu için önemli bir etkendir. Silindir içine alınan temiz hava miktarı kompresör öncesinde ölçülür. Girdi olarak kullanılan temiz hava miktarı parametresi (kg/saat cinsinden) kompresör öncesinde bulunan MAF sensör bilgisi kullanılarak ECU içerisinden AFS_dm kanalından alınacak verilerden oluşacak ve m_{hava} olarak adlandırılacaktır.

3.1.3 Yakıt Miktarı

Azot oksit oluşumunda en etkili parametre yanma ve yanmayı oluşturan girdilerdir. Yakıt miktarı, hava ile oluşacak karışıma bağlı olarak emisyon oluşumunu doğrudan etkiler. Oluşturulan modelde girdi olarak kullanılacak olan anlık yakıt tüketimi miktarı parametresi (mg/strok cinsinden), motor ECU'su içerisinden INCA programı ile okunabilen Injsys_qtot kanalından alınacak verilerden oluşacak ve q_{tot} olarak adlandırılacaktır.

3.1.4 Yakıt Ray Basıncı

Silindir içinde oluşan yanma mekanizmasını doğrudan etkileyen bir diğer parametrede ray basıncıdır. Püskürtülen yakıtın basıncına göre azot oksit oluşumu değişkenlik gösterir. Girdi olarak kullanılacak olan yakıt ray basıncı parametresi (bar cinsinden),

motor üzerinde bulunan ray basıncı sensör bilgisini kullanarak ECU içerisinden INCA programı ile okunabilen RailP_pFlt kanalından alınacak verilerden oluşacak ve p_{ray} olarak adlandırılacaktır.

3.1.5 EGR/Toplam Hava Oranı

Silindir içerisine alınan egzoz gazı ile yanma maksimum sıcaklıkları düşecek ve böylece azot oksit emisyonları etkilenecektir. Bu yüzden silindir içerisine alınan EGR miktarı önemli bir parametredir. EGR miktarı doğrudan ölçülebilen bir parametre değildir. ECU içerisinde, dizayn verilerinden oluşturulan, çok kuvvetli doğrulukta tahminlemesi tanımlanmış kanal üzerinden (kg/saat cinsinden) değer görülmektedir. INCA programı üzerinde tanımlanan kanal ismi ASMod_dmEGRDs'dir. EGR oranının etkisinin daha iyi görülebilmesi için silindir içerisine alınan toplam hava miktarına (EGR+temiz hava) oranı modelde girdi verisi olarak kullanılacak ve $\frac{m_{EGR}}{m_{hava}}$ olarak adlandırılacaktır.

3.1.6 Motor Gücü

Motor gücü, motorun dinamometre üzerinde anlık devrine ve torkuna bağlı olarak oluşan bir fonksiyondur. Maksimum tork ve hız eğrisi altında kalan her noktayı model içerisinde daha iyi ifade edebilmek için bir diğer ölçülebilen girdi parametresi olarak motor gücü seçilmiştir. Motor gücü PUMA programının ekranı üzerinde tanımlanan POWER kanalından (BG cinsinden) alınan verilerle modelde kullanılacak ve P olarak adlandırılacaktır.

3.1.7 Azot Oksit

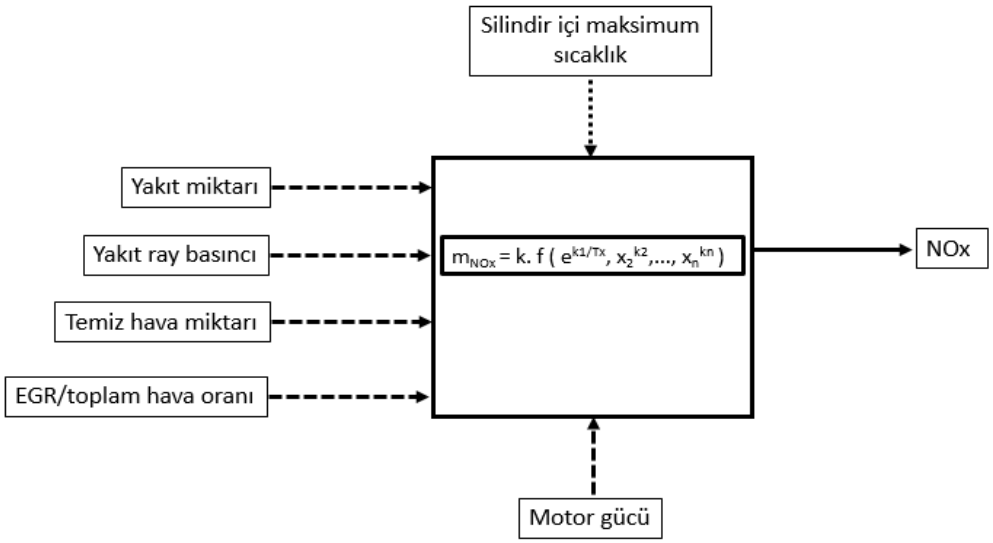
Azot oksit miktarı, deney motoru üzerinde dahili olarak bulunan NO_X ölçüm sensörü üzerinden gelen bilgiler ile modele hedef girdisi olarak verilecektir. Sensörden gelen ölçüm bilgisi INCA programı üzerinde tanımlı Exh_rNOxNSCDs kanalından (ppm cinsinden) okunacaktır. Model eğitiminde sonuç girdisi olarak kullanılacak olan NO_X miktarı m_{NOx} olarak adlandırılacaktır.



Şekil 3.5 Motor üzerinde bulunan dahili NO_X sensörü

3.2 Model Tasarımı

Azot oksit emisyonlarının oluşum tahminlemesi için grey box-yarı fiziksel integral olmayan modelleme yöntemi seçileceği bölüm 2.5'te anlatılmıştı. Model, bir çevrimde yanma sonrası motor çıkışında üretilecek olan NO_X kütlesini ppm cinsinden tahminleyecektir. Empirik formül için tanımlanan girdiler şekil 3.2'de gösterilmiş ve yarı fiziksel model yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 3.6 Model yapısı

Model tahminleme tasarım aşamasında, regresyon analiz yönteminin iyi seçilmesi integral olmayan empirik formülün yüksek doğrulukta sonuç vermesine katkıda bulunacaktır. Birbirine bağımlı ve bağımsız değişkenlerin yerine birden fazla bağımsız değişkenin olduğu integral olmayan yarı fiziksel modellerin empirik formül önermeleri çözümlemelerinde tam logaritmik model regresyon analizi kullanılmaktadır. Tam logaritmik model regresyonu aşağıdaki denklemler ile ifade edilir [49];

$$Y = k.e^{k_1/X_1}.X_2^{k_2}.X_3^{k_3}.X_4^{k_4} \ldots . X_t^{k_t} \quad (3.11)$$

$$lnY = lnk + k_1/X_1 + k_2.lnX_2 + k_3.lnX_3 + k_4.lnX_4 \ldots . + k_t.lnX_t \quad (3.12)$$

(3.11) ile önerilen empirik formül çözümü tam logaritmik model regresyonu yöntemi ile (3.12) denklemleri ile çözülür. Denklemlerde Y sonuç girdisini, X'ler girdi verisini k değerleri ise katsayıları ifade etmektedir.

(3.11) ile ifade edilen tam logaritmik model regresyonu denklemi empirik formüle uyarlanırsa;

$$m_{NOx} = k.e^{\frac{k_1}{T_{max}}}.m_{hava}^{k_2}.q_{tot}^{k_3}.p_{ray}^{k_4}.(\frac{m_{EGR}}{m_{hava}})^{k_5}.P^{k_6} \quad (3.13)$$

denklemi elde edilir.

$k, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ ve k_6: tam logaritmik fonksiyonun katsayıları

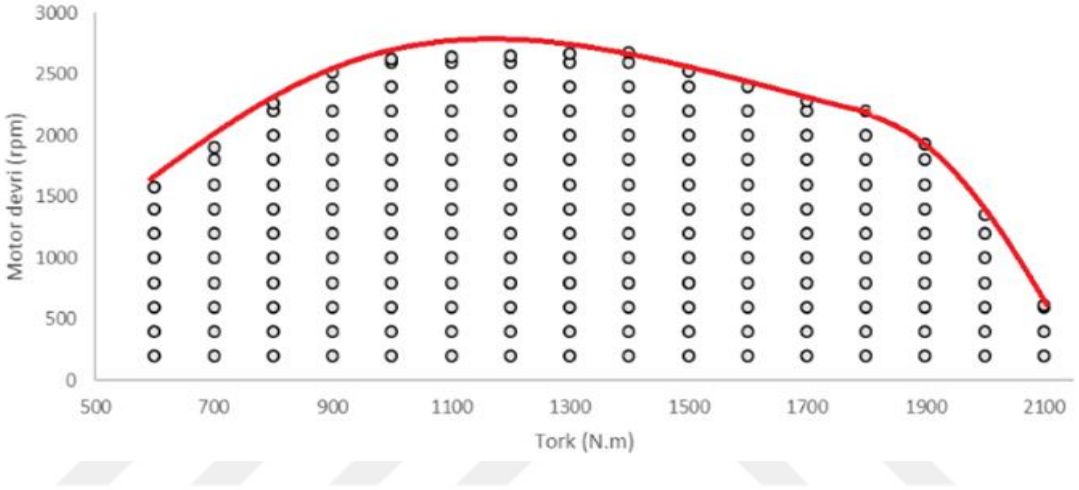
Deney motorundan toplanacak olan datalardan sonra girdiler ve sonuç çıktısı MATLAB programına girilecek ve katsayı tahminlemesi yapılacaktır [50]. Katsayılar belirlendikten sonra deney motoru için NO_X üretimi tahmin sonucu empirik formülünün son hali ortaya çıkacaktır.

3.3 Model Eğitme

Kurulacak olan modelin parametre katsayılarını belirleme ve belirlenen parametre katsayılarını doğrulamak için deney motorunda seri üretimde kullanılan baz kalibrasyon ile motor haritalama testi koşulmuştur. Koşulan bu testin amacı belirlenen model girdi

parametreleri ile modeli eğitmek ve kurulan modelin motor test merkezinde sabit noktalarda doğru sonuç vermesini sağlamaktır.

Motor haritalama testinin özelliği, motor devri-tork haritasını belirlenen aralıklar içinde taramaktır. Modeli eğitmek için hazırlanan test toplam 185 statik noktadan oluşan şekil 3.7'de gösterilmiş motor haritalama testidir. Test sonuçlarının sağlıklı olması için her noktada 60 saniye beklenmiş ve 30 saniye ölçüm alınarak ortalama değerler veri listesine kaydedilmiştir.

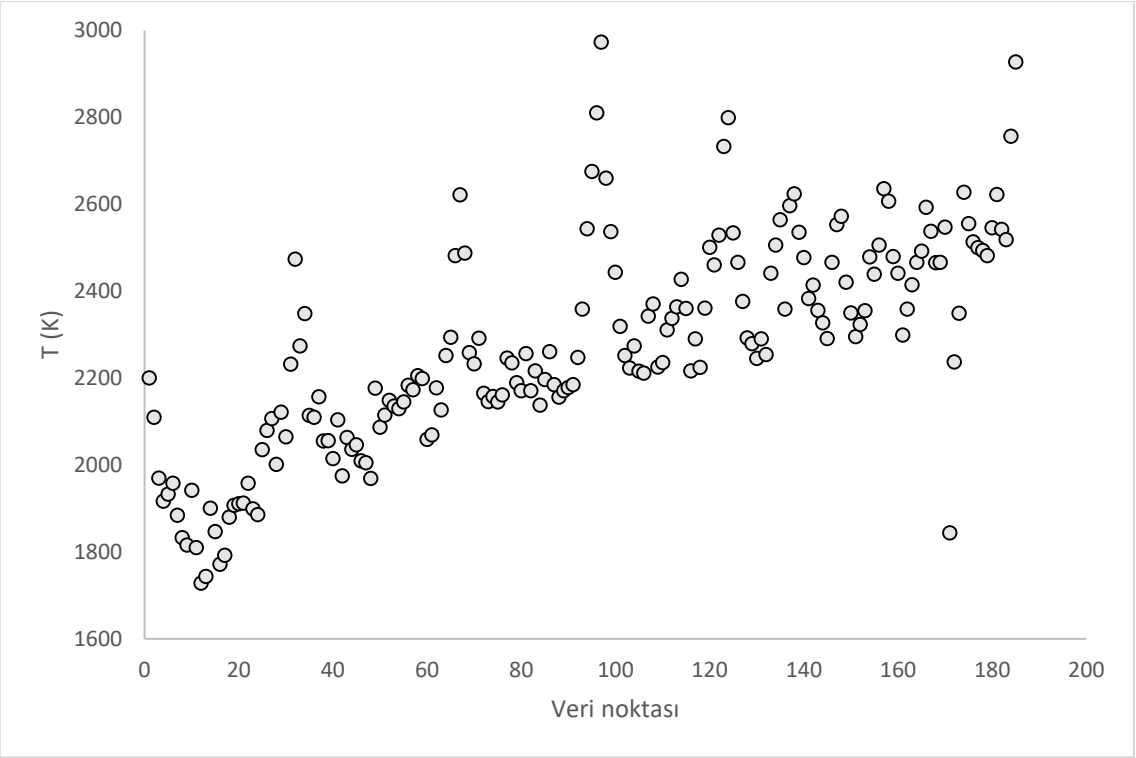


Şekil 3.7 Motor haritalama testi

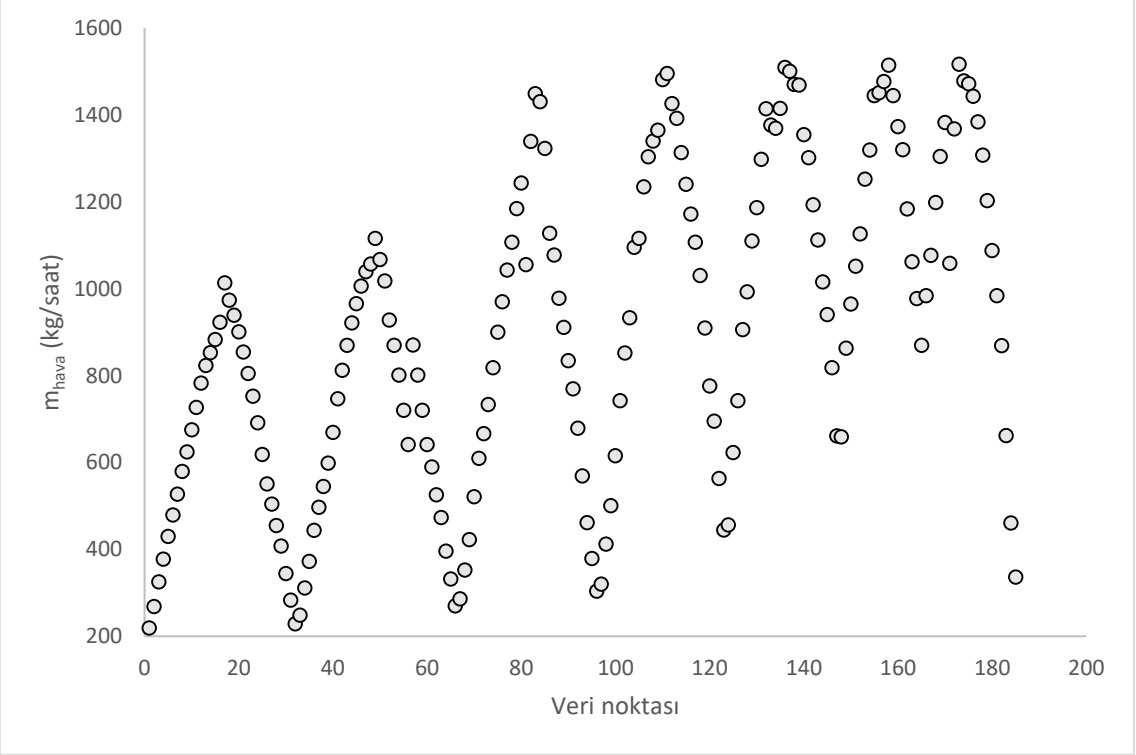
Testin girdi parametreleri şekil 3.8, şekil 3.9, şekil 3.10, şekil 3.11, şekil 3.12, şekil 3.13, şekil 3.14'te gösterilmiştir. Minimum ve maksimum veri girdi ve sonuç noktaları çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Her girdinin minimum ve maksimum noktası birbirinden bağımsızdır. Her bir parametre girdisinin minimum ve maksimum noktaları arasındaki değerler matematiksel bir kurala göre dizilmemiştir. Bu da modelin her noktada farklı veri setiyle eğitilmesine katkı sağlamıştır.

Çizelge 3.1 Girdi parametreleri minimum maksimum değerleri

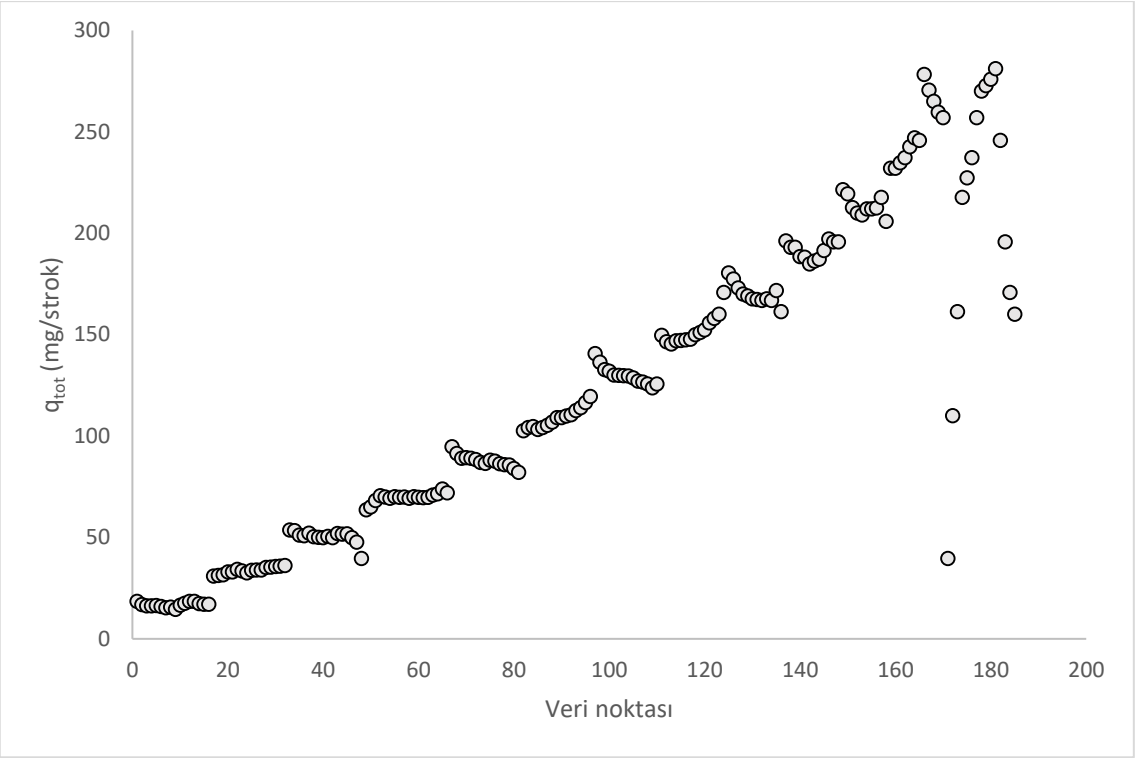
	T_{max} (K)	m_{hava} (kg/saat)	q_{tot} (mg/strok)	p_{ray} (bar)	$\frac{m_{EGR}}{m_{hava}}$	P (BG)	NO_X (ppm)
Min.	1727,886	219,5	14,58	437,007	0,0185	0,1	186
Maks.	2973,039	1516,98	281,08	2099,411	0,349	481,7	3779



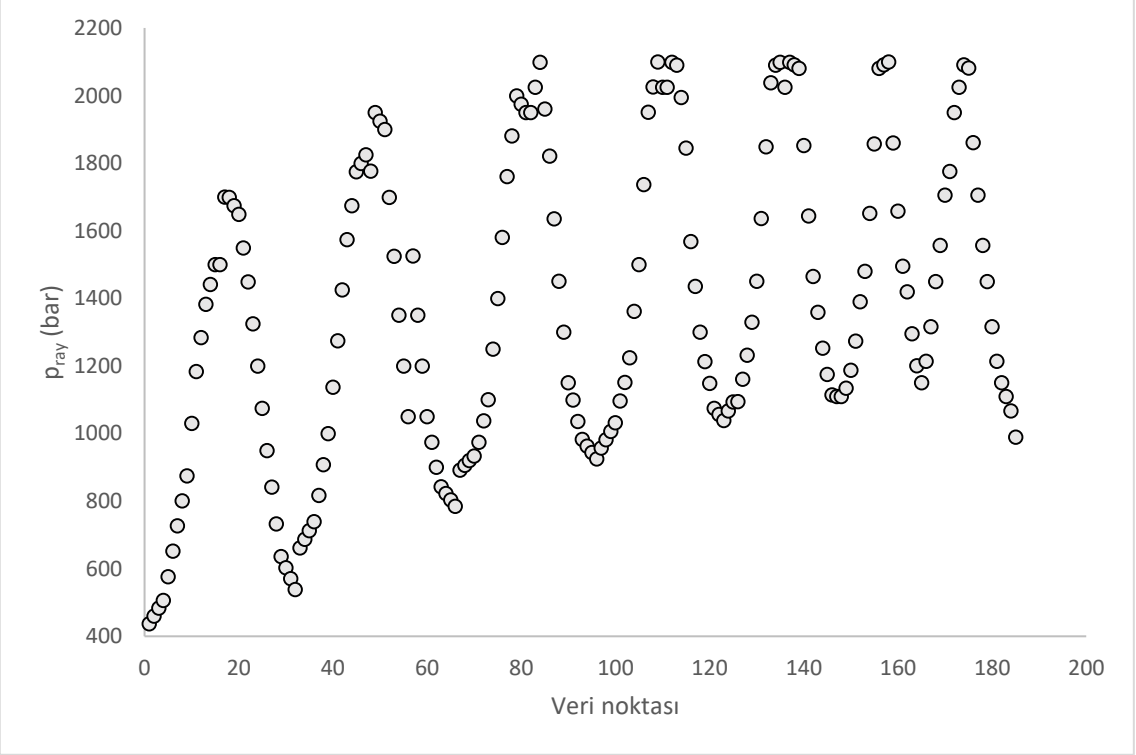
Şekil 3.8 Silindir içi maksimum sıcaklık veri noktaları



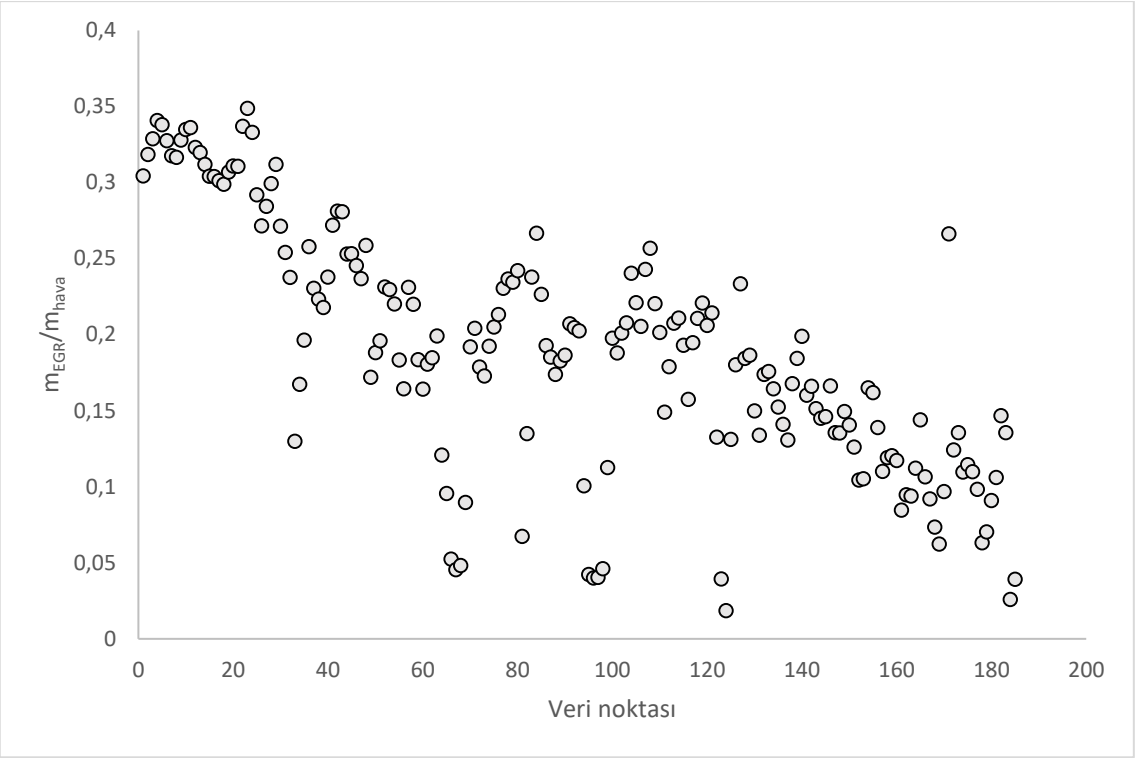
Şekil 3.9 Temiz hava miktarı veri noktaları



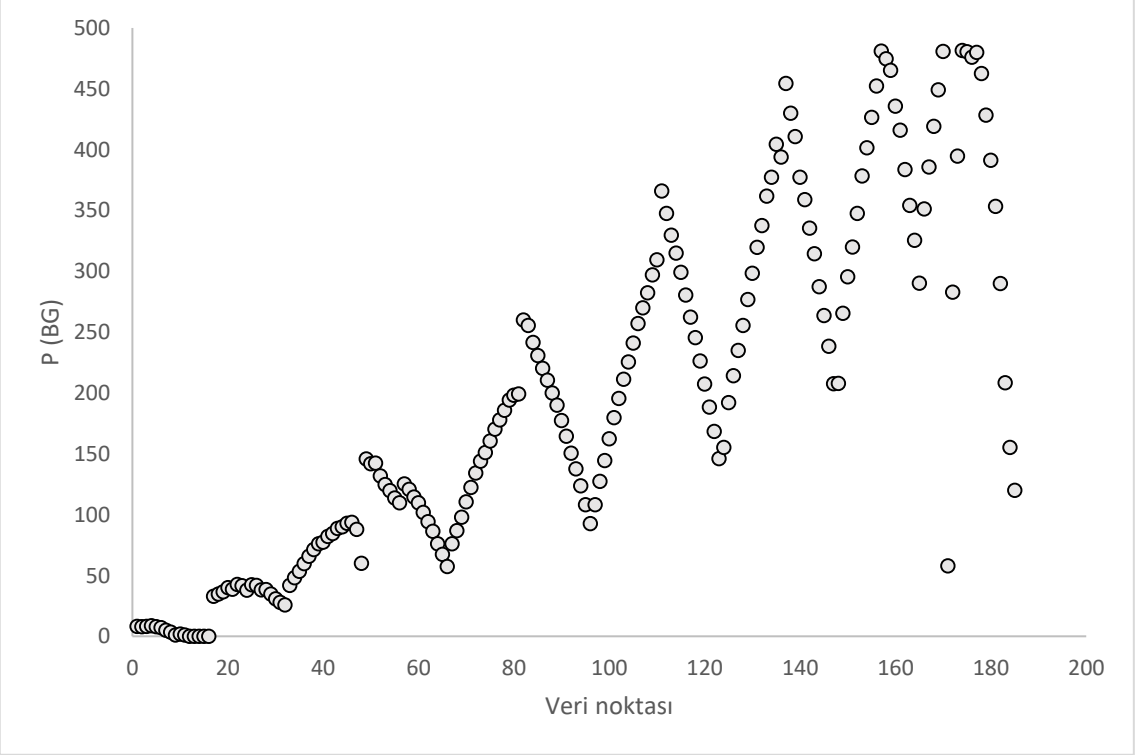
Şekil 3.10 Yakıt miktarı veri noktaları



Şekil 3.11 Yakıt ray basıncı veri noktaları

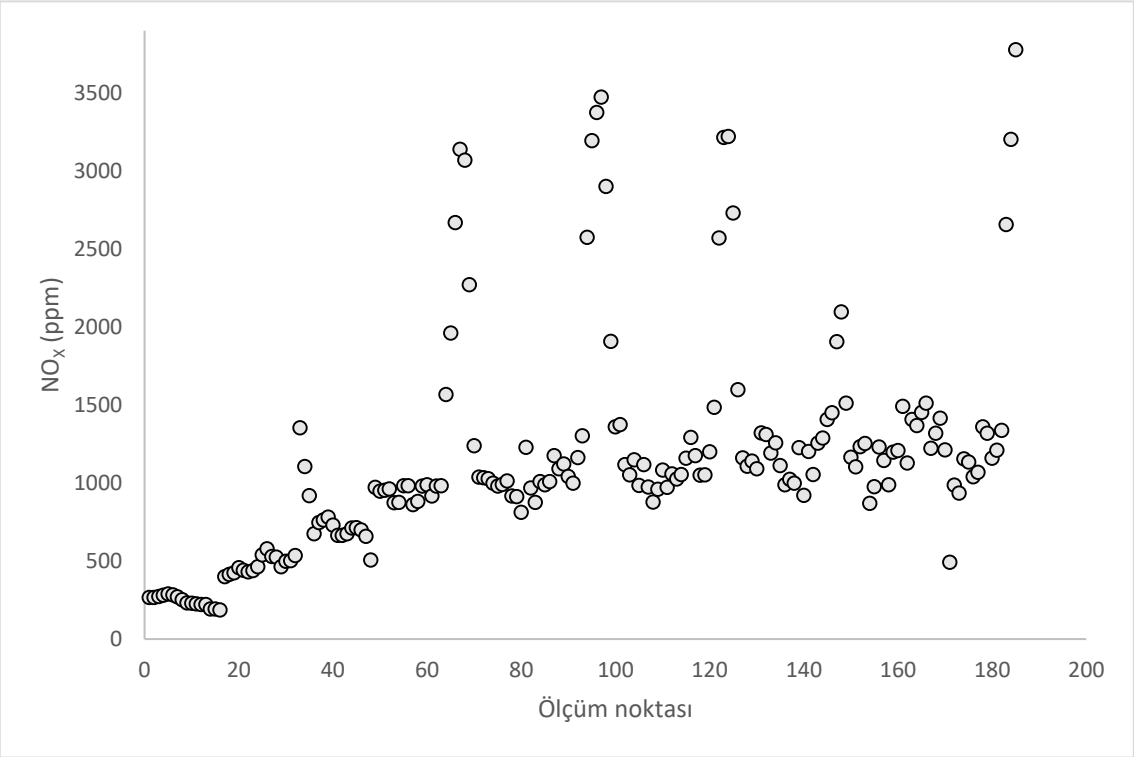


Şekil 3.12 EGR/toplam hava oranı veri noktaları



Şekil 3.13 Motor gücü veri noktaları

Motor haritalama testi için belirlenen motor devri ve tork noktaları için hedef girdisi olan NO_X ölçüm sonuçları ise şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 NO_X ölçüm sonuçları

Veri noktalarından alınan hesaplamalar ve ölçümler ile modelin veri seti ortaya çıkmıştır. Çoklu doğrusal regresyon analizi ile verilerin katsayısı analiz edilmiştir [49]. Parametre katsayı analizine göre hesaplanan katsayılar çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Girdi parametreleri katsayıları

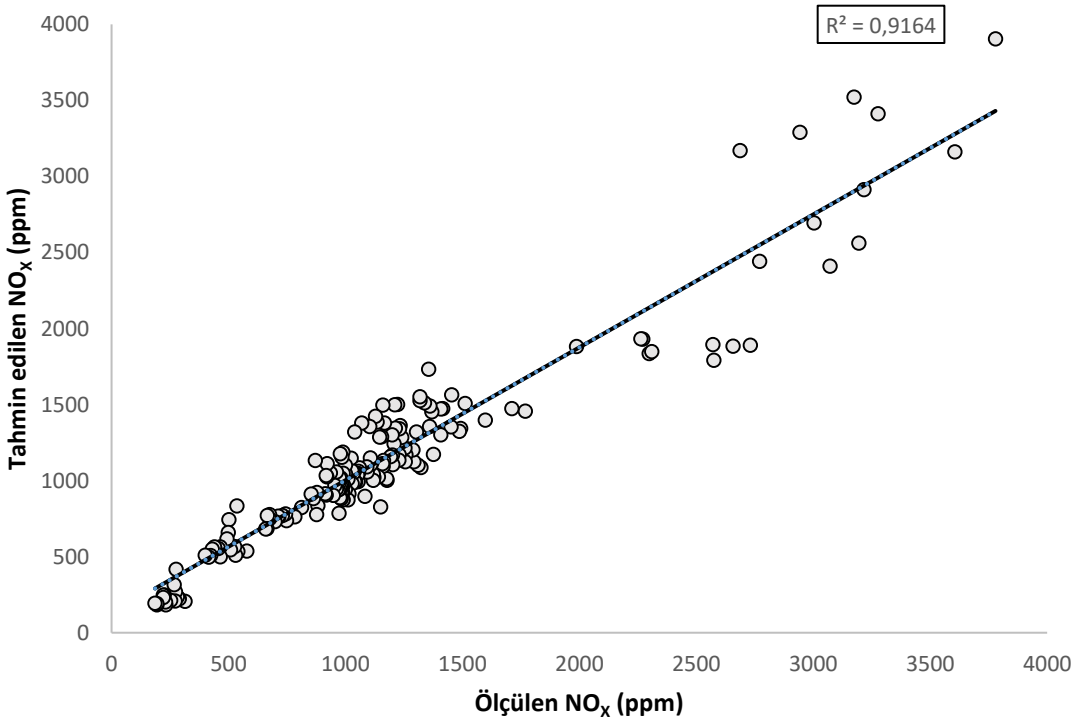
Katsayı	k	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
Değer	2,385	3930,615	-1,683	0,831	1,343	-0,142	0,083

Hesaplanan katsayılara göre deney motoru için azot oksit emisyonu tahminlenen grey box-yarı fiziksel model empirik formül denklemi (3.14) gibi olmuştur.

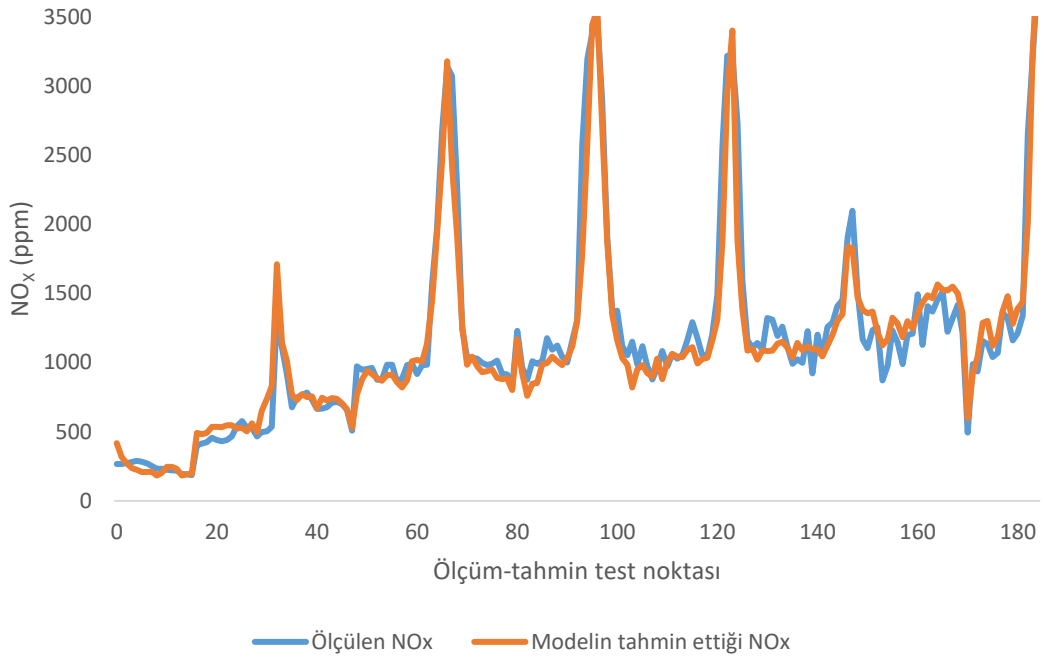
$$m_{NOx} = 2{,}385 . e^{\frac{3930{,}615}{T_{max}}} . m_{hava}^{-1{,}683} . q_{tot}^{0{,}831} . p_{ray}^{1{,}343} . \left(\frac{m_{EGR}}{m_{hava}}\right)^{-0{,}142} . P^{0{,}083} \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'te ileri sürülen empirik model formülü incelendiğinde bölüm 2.1'de anlatılan azot oksit emisyonlarının oluşum ilkesi ile örtüştüğü sonucuna varılabilir. Pozitif katsayıya sahip silindir içi maksimum sıcaklıkların çok düşük olduğu noktalarda azot oksit emisyonlarının artışı gözlemleneceği bölüm 2.1'de anlatılmıştı. Temiz hava miktarının negatif katsayı değeri ve yakıt miktarının pozitif katsayı değeri, hava yakıt oranı arttığında yanmamış gaz oranının artacağı ve azot oksit emisyonlarının artacağı ilkesi ile paralel sonuç göstermiştir. Ray basıncının pozitif katsayısı, yakıt püskürtme basıncı ile azot oksit emisyonunun pozitif ilişkisini göstermiştir. EGR/toplam hava oranına ait negatif katsayı ise EGR oranının artışının azot oksit emisyonlarını azaltmasına katkı sağladığı görülmüştür. Son olarak deney motorunun güç parametre katsayısı incelendiğinde güç artışının azot oksit emisyonunu pozitif etkilediği ileri sürülen empirik denklemde görülmektedir.

Model eğitim verileri empirik formüle uygulandığında, ölçülen NO_X (ppm) değerleri ile eğitim verisi için tahmin edilen NO_X (ppm) değerleri için verilerin birbiriyle uyum düzeyleri kontrol edilmiştir (R^2). Empirik model denkleminin tahmin gücünü gösteren analiz şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Empirik model formülü tahmin gücü



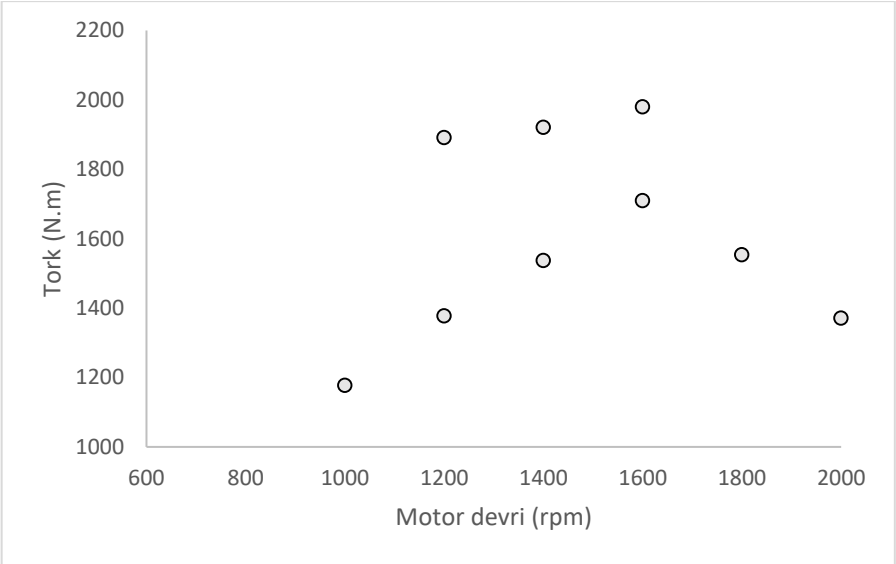
Şekil 3.16 NO_X ölçüm ve tahmin sonuçlarının kıyaslanması

Eğitim verilerinden elde edilen empirik model formülünün azot oksit emisyonu tahmin sonuçları ile ölçülen azot oksit emisyonu sonuçları şekil 3.16'da gösterilmiştir. Model tahmini ile ölçüm sonuçları uyumu R^2 değerinin 0,9164 olduğu hesaplanmış ve modelin kullanılabilirliğine karar verilmiştir.

3.4 Doğrulama

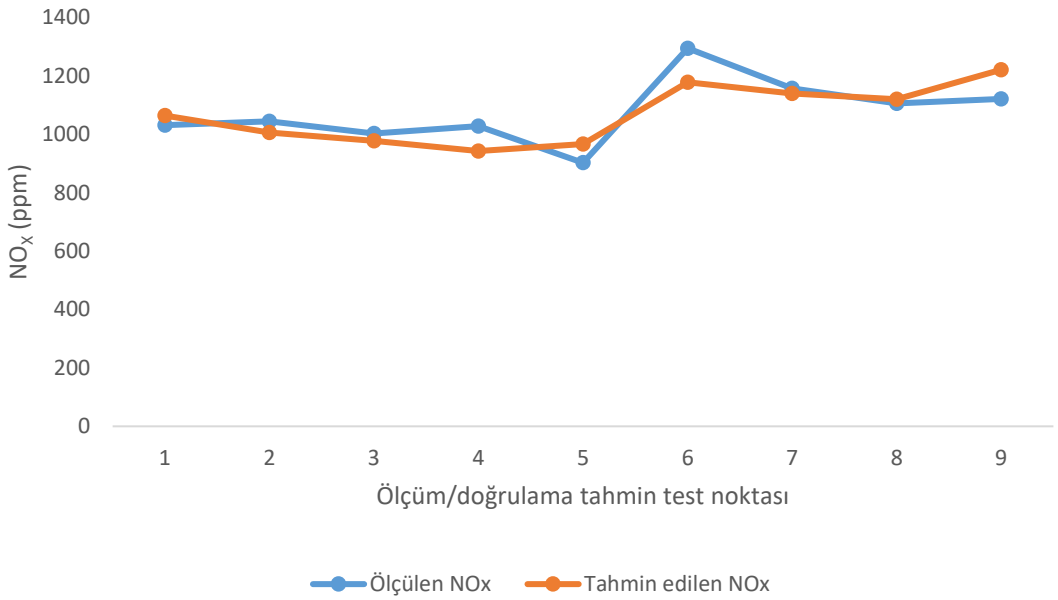
Azot oksit emisyonu model formülü eğitilmiş ve empirik formül oluşturularak modelleme çalışması tamamlanmıştır. İleri sürülen empirik formül, eğitim datasında kullanılmış baz kalibrasyon ile test edilecektir. Şekil 3.17'de rastgele seçilen motor devri-tork statik noktalarında test edilerek modelin çalışılabilirliği gösterilecektir.

Model doğrulaması ile test ortamında kullanılan motordan çıkan azot oksit emisyonu sensörü ölçümü ile modelin tahminlediği değer karşılaştırılacaktır. Karşılaştırma sonucunda motor dahili azot oksit emisyonu ölçüm sensörünün test ortamında doğru çalışıp çalışmadığını tahminleyen bir model ortaya çıkacaktır.



Şekil 3.17 Model doğrulama statik noktaları

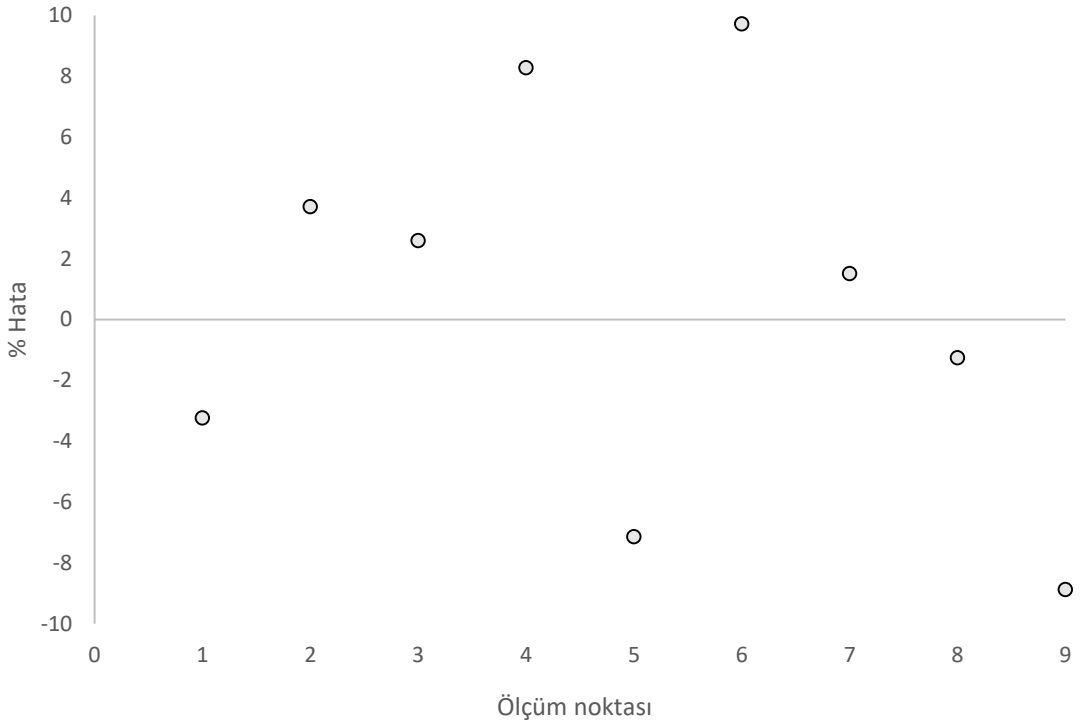
Doğrulama test noktaları için koşulan test sonucuna göre verilerin alındığı PUMA programı üzerinde azot oksit emisyon modeli tahminini gösteren NOx_tahmin (ppm) kanalı tanımlanmış ve sonuçları bu kanal üzerinden okunmuştur. Azot oksit emisyonu ölçüm sonuçları ve tahmin sonuçları şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 NO_X ölçüm ve doğrulama tahmin sonuçlarının kıyaslanması

Model doğrulaması için koşulan testin sonuçları koşan test verileri için incelendiğinde minimum hata oranının %1,24 maksimum hata oranının %9,73, ortalama hata oranı %5,14 olduğu görülmüştür. Hata oranı hesaplaması denklem (3.15)'te gösterilmiştir. İfade edilen denkleme göre her bir doğrulama test noktasının hatası şekil 3.19'da gösterilmiştir.

Hata oranı= ((Ölçülen NO_X – Modelin hesapladığı NO_X)/Ölçülen NO_X)*100 (3.15)



Şekil 3.19 Model doğrulama hata oranı

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İçten yanmalı motorlarda NO_X emisyonlarını fiziksel sensörler ile ölçüm yapmak yerine sanal sensörler ile tahminlemek için fiziksel, yarı fiziksel ve black box model yöntemi kullanılabilir. Bu tez çalışmasında integral olmayan yarı fiziksel modelleme yöntemi kullanılmıştır. Modelleme çalışması; girdi tanımlama, model tasarımı, model eğitme ve modeli doğrulama yaklaşımı ile yapılarak kabul edilebilir doğrulukta sonuç elde edilmiştir. Literatürde yer alan diğer çalışmalar incelendiğinde ortalama %1 ile %19 [42][29] hata oranı olan modeller başarılı kabul edilmişken, doğrulama testinde maksimum %9,73, ortalama %5,14 hata oranı görülmüştür.

Modelleme çalışması esnasında integral olmayan yarı fiziksel empirik bir formül ileri sürülmüş ve formül girdi parametreleri analiz edilmiştir. Girdi parametreleri ile literatürdeki çalışmalar kıyaslandığında tutarlılık olduğu görülmüştür. Bu tezde yer alan model empirik formül önerisi ileri sürülürken, literatürde bu konuya ilgili yapılan çalışmalar incelenmiş ve daha önce yapılan yarı fiziksel modelleme çalışmalarında kullanılmamış girdi parametre kombinasyonu (Silindir içi maksimum sıcaklık, temiz hava miktarı, yakıt miktarı, yakıt ray basıncı, EGR/toplam hava oranı ve motor gücü) kullanılmıştır. Formülde yer alan EGR kütlesinin silindir içine alınan toplam havanın kütlesine oranı ve güç verisi modele özgünlük katarak sonucun yüksek doğruluğuna katkıda bulunmuştur.

Bu çalışma sonucunda dinamometre tesisinde, silindir içi basınç sensör seti ile birlikte koşulan statik testlerin NO_X emisyon sonuçları, fiziksel olarak ölçüm yapan sensör veya cihazlar ile kıyaslanabilecek ve ölçüm doğruluğu konusunda fikir verecektir. Bu model,

girid parametreleri aynı olacak şekilde farklı test motorlarından alınacak eğitim verisi ve her test motoruna özel belirlenecek katsayılar ile dinamometre tesisinde uygulanabilir.

Modelin dezavantajlı olduğu durumlar incelendiğinde:

- Silindir içi basınç sensörü ölçümleri model içinde girdi verisi olarak kullanıldığı için maliyet nedeniyle seri üretim araçlarda fiziksel sensörün yerini alamaz.
- MATLAB programında silindir içi sıcaklık tahminlemesi yapıldığı için statik test noktalarında uygulanabilirliği mevcuttur. Dinamik test noktaları için, modelin çalışacağı bilgisayarın anlık veri akışının çok yüksek hızda yapması gerekliliği vardır. Ayrıca bu noktalar için tekrardan eğitim testi koşularak model katsayı kalibrasyonuna ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada önerilen model gelecekte aşağıdaki yöntemler kullanılarak geliştirilebilir:

- Fiziksel olarak kullanılan silindir içi basınç ölçüm sensörü yerine ölçüm doğruluğu çok yüksek black-box model basınç verisi kullanılabilir. Bu sayede sensör maliyeti elemine edilmiş olup, model seri üretim araç ECU'sunda kullanılabilir.
- Çok fazla test noktasından oluşan veri setiyle model eğitilerek model doğruluğu arttırılabilir.
- Model tahmin sonucuna göre oluşturulacak olan bir harita ile modelin her test noktasında farklı sabit katsayıya sahip olması sağlanabilir. Böylece dinamik bir yarı fiziksel model kullanımı oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

[1] Deniz, O., (2008), İçten yanmalı motorlar-Ders notu, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

[2] Semenov, N. N., (1935), Chemical Kineticss and Chain Reactions, Oxford University Press, Londra.

[3] Heywood, J., (1988), Internal Combustion Engine Fundementals, McGraw-Hill Book Co., New York.

[4] Özener, O., (2013), Diesel Motorlarında Pilot Püskürtmenin Performans ve Emisyon Açısından Optimizasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] Borman, L. G. ve Kenneth, W., (1998), Combustion Engineering, McGraw-Hill Book, New York.

[6] Merker, G. P., Schwarz, C., Stiesch, G. ve Otto, F., (2006), Simulating Combustion, Simulation of Combustion and Pollutant Formation for Engine-Development, Springer Verlag, Germany.

[7] Ferguson, C. R., (1985), Internal Combustion Engines Applied Thermosciences, John Wiley and Sons, Indiana.

[8] Schafer, F. ve Basshuysen, R. V., (1995), Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines, Springer Verlag, Germany.

[9] United States Environmental Protection Agency, Transportation, Air Pollution and Climate Change, https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change, 09.12.2018

[10] The International Council ona Clean Transportation, https://www.theicct.org, 09.12.2018

[11] Kihas, D. ve Uchanski, M. R., (2015), "Engine-Out NOx Models for on-ECU Implementation: A Brief Overview", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2015-01-1638.

[12] Karaky, H., Mauviot, G., Tauzia, X. ve Maiboom, A., (2015), "Development and Validation of a New Zero-Dimensional Semi-Physical NOx Emission Model for a D.I. Diesel Engine Using Simulated Combustion Process", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2015-01-1746.

[13] Lee, S., Lee, Y., Kim, G. ve Min, K., (2017), "Development of a Real-Time Virtual Nitric Oxide Sensor for Light-Duty Diesel Engines", MDPI Energies 2017-10-284.

[14] Benz, M., Hehn, M., Onder, C. H. ve Guzzella, L., (2011), "Model-Based Actuator Trajectories optimization for a Diesel Engine Using a Direct Method", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 032806.

[15] Finesso, R. ve Spessa, E., (2014), "A real time zero-dimensional diagnostic model for the calculation of in-cylinder temperatures, HRR and nitrogen oxides in diesel engines", Energy Conversion and Management, 79(2014) 498-510.

[16] Arregle, J., Lopez, J. J., Guardiola, C. ve Monin, C., (2008), "Sensitivity Study of an NOx Estimation Model for On-Board Applications", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2008-01-640.

[17] Guardiola, C., Lopez, J. J., Martin, J. ve Garcia-Sarmiento, D., (2011), "Semiempirical in-cylinder pressure based model for NOx prediction oriented to control applications", Applied Thermal Engineering, 31(2011) 3275-3286.

[18] d'Ambrosio, S., Finesso, R., Fu, L., Mittica, A. ve Spessa, E., (2014), "A control-oriented real-time semi-empirical model for the prediction of NOx emissions in diesel engines", Applied Energy, 130(2014) 265-279.

[19] Hirsch, M., Alberer, D. ve Re, L., (2008), "Grey-Box Control Oriented Emissions Models", 17th International Federation of Automatic Control World Congress, Seoul, 8514-8519.

[20] Brahma, A., Upadhyay, D., Serrani, A. ve Rizzoni, G., (2004), "Modeling, Identification and State estimation of Diesel Engine Torque and NOx Dynamics in response to fuel quantity and timing excitations", Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston, 2166-2171.

[21] Nelson-Gruel, D., Chamaillard, Y. ve Aljarbouh, A., (2016), "Modeling and Estimation of the pollutants emissions in the Compression Ignition Diesel Engine", 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA), Buenos Aires, 317-322.

[22] Grahn, M., Johansson, K. ve McKelvey, T., (2014), "Data-driven Emission Model Structures for Diesel Engine Management System Development", International Journal of Engine Research, 193202.

[23] Carlucci, A. P., Benegiamo, M., Camporeale, S. ve Ingrosso, D., (2017), "Improvement of the Control-Oriented Model for the Engine-Out NOx Estimation Based on In-Cylinder Pressure Measurement", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2017-24-0130.

[24] Querel, C., Grondin, O. ve Letellier, C., (2013), "A Semi-physical NOx model for diesel engine control", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2013-01-0356.

[25] Timoney, D. J., Desantes, J. M., Hernandez, L., Lyons ve C. M., (2005), "The development of a semi-empirical model for rapid NOx concentration evaluation

using measured in-cylinder pressure in diesel engines", J. of Automobile Engineering, 219(D): 621-629

[26] Savva, N. S. ve Dimitrios, T. H., (2016), "Evaluation of a Semiempirical, Zero-Dimensional, Multizone Model to Predict Nitric Oxide Emissions in DI Diesel Engines' Combustion Chamber", Journal of Combustion, 6202438.

[27] Gartner, U., Hohenberg, G., Daudel, H. ve Oelschlegel, H., (2004), "Development and Application of a Semi-Empirical NOx Model to Various HD Diesel Engines", Thermo and Fluid Dynamic in Diesel Engines 2, Springer-Verlag, Germany, 286-312.

[28] Guardiola, C., Pla, B., Blanco-Rodriguez, D. ve Calendini, P. O., (2014), "ECU-oriented models for NOx prediction. Part 1: a mean value engine model for NOx prediction", J. of Automobile Engineering, 1-24.

[29] Schmitt, J. C., Fremovici, M., Grondin, O. ve Berr, F. L., (2009), "Compression ignition engine model supporting powertrain development", 2009 IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulating and Modeling, Ruell-Malmaison, 48-55.

[30] Querel, C., Grondin, O. ve Letellier, C., (2012), "State of the Art and Analysis of Control Oriented NOx Models", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2012-01-0723.

[31] The National Institute for Occupational Safety and Health, Chemical, https://www.cdc.gov/niosh/topics/chemical, 11.12.2018.

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

[33] Schwerdt, C., (2006), "Modelling NOx-Formation in Combustion Process", Yüksek Lisans Tezi, Department of Automatic Control Lund University, Lund.

[34] Fenimore, C. P., (1972), "Formation of Nitric Oxide from Fuel Nitrogen in Ethylene Flames", Combustion and Flame, 19-289-296.

[35] Yüksek, L., (2013), "Dizel motorlarında ısı salınımının azot oksit emisyonlarına etkisinin teorik ve deneysel olarak araştırılması", Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[36] Warnatz, J. , Maas, U. ve Dibble, R. W., (2001), Combustion, Springer-Verlag, Berlin.

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

[38] İlkılıç, C., Behçet, R., Aydın, S. ve Aydın, H., (2009), "Dizel motorlarında azot oksitlerin oluşumu ve kontrol yöntemleri", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.

[39] Soylu, Ş., (2009), "Toplu taşımada kullanılan otobüslerden kaynaklanan emisyonların analizi, seyir çevrimlerinin oluşturuluması ve emisyon

yayılımlarının modellenmesi", T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı ve TEMSA Ar&Ge Tek A.Ş. Destekli SAN-TEZ Projesi, Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü,Sakarya

[40] Gözen, E., (2015), "Investigation of RCCI Engine Emission and Performance", Master Thesis, Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul Technical University, İstanbul.

[41] Isermann, R., (2014), "Engine Modeling and Control, Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines", Springer Verlag, Germany.

[42] Ciliberti, P. D., (2017), "Development of NOx Estimator ECU Models for SCR After Treatment System in Diesel Engine", Ph. D. Thesis, Politecnico di Bari Department of Mechanics, Mathematics and Management, Bari.

[43] AVL List GmbH, AVL Dynamometers, https://www.avl.com/tr/dynamometers1, 12.02.2019.

[44] AVL List GmbH, AVL Fuel Mass Flow Meter and Fuel Temperature Control, https://www.avl.com/-/avl-fuel-mass-flow-meter-and-fuel-temperature-control, 12.02.2019.

[45] AVL List GmbH, AVL Combustion Measurement Equipment, https://www.avl.com/-/avl-combustion-measurement-equipment, 12.02.2019.

[46] ETAS GmbH, INCA Software Product, https://www.etas.com/en/products/inca_software_products, 12.02.2019.

[47] AVL List GmbH, AVL Puma Open 2 Testbed Automation Platform, https://www.avl.com/-/avl-puma-open-2-, 12.02.2019.

[48] Ozener, O., Yuksek, L. ve Ozkan, M., (2013), "Artificial Neural Network Aprroach to Predicting Engine-out Emissions and Performance Parameters of a Turbo Charged Diesel Engine", Thermal Science, Vol.17 153-166.

[49] Rawlings, J. O., Pantula, S. G. ve Dickey, D. A., (1998), "Applied Regression Analysis a Research Tool, Second Edition", Springer-Verlag New York.

[50] Mathworks Company, MATLAB, https://www.mathworks.com/products/curvefitting/features.html#regression

EK-A

SİLİNDİR İÇİ MAKSİMUM SICAKLIK MATLAB KODLARI

Bölüm 3.1.1'de anlatılan silindir içi maksimum sıcaklık verisinin matematiksel model ile MATLAB programında hazırlanmış kodları aşağıda verilmiştir. Deney motoru ile ilgili spesifik bilgiler, motorun halen seri üretimde olmasından dolayı gizlenmiştir.

```
%Yanma verimi
nu_yanma=xx;
R=8.314;
%Diesel motorlar için 0.75-0.85 arasıdır
%CxHyOz dinamometrede kullanılan diesel yakıt analizi sonucu
C=0.xx;
H=0.xx;
O=0.xx;
Hu=xx; %Alt ısıl değeri [kj/kgyakıt]
%n_e taze dolgunun kmol sayısı
O_min=1/12*C+1/4*H-1/32*O; %[kmolo2/kgyakıt]
L_min=O_min/0.21;
load('C:\Users\ndonmez1\Desktop\matlab\data.mat');
%%motordan alınan datalar
```

```
load('C:\Users\ndonmez\Desktop\matlab\T_AIR_O2_N2_CO2_H2O.mat');
AFR=xlsread('data.xlsx','model2','F2:F186');
VOLEFF=xlsread('data.xlsx','model2','G2:G186');
P_TUR_I=xlsread('data.xlsx','model2','I2:I186');
T_TUR_I=xlsread('data.xlsx','model2','K2:K186');
P_MAN=xlsread('data.xlsx','model2','M2:M186');
T_MAN=xlsread('data.xlsx','model2','O2:O186');
P1=xlsread('data.xlsx','model2','C2:C186');
P2=xlsread('data.xlsx','model2','D2:D186');
Pmax=xlsread('data.xlsx','model2','E2:E186');
NOx=xlsread('data.xlsx','model2','R2:R186');
power=xlsread('data.xlsx','model2','T2:T186');
qtot=xlsread('data.xlsx','model2','U2:U186');
railp=xlsread('data.xlsx','model2','V2:V186');
m_toplamhava=xlsread('data.xlsx','model2','X2:X186');
lambda=AFR/14.7;
L_ger=lambda*L_min;
n_e=L_ger; %[kmol taze dolgu / kg yakıt] n_e:Taze dolgunun kmol sayısı
% %Taze dolgunun yanması sonucu açığa çıkan ürünler
%for i=1:length(data)
n_co2=C/12; %(kmolCo2/kgyakıt)
n_h2o=H/2; %(kmolh2o/kgyakıt)
```

```
n_n2=0.79*L_min*lambda; %(kmoln2/kgyakıt)

n_o2=0.21*(lambda-1)*L_min; %(kmolo2/kgyakıt)

n_yu=n_co2+n_h2o+n_n2+n_o2; %[kmol yanma ürünleri / kg yakıt]

%n_yu:Yanmış ürünlerin kmol sayısı

mu_thermal=n_yu./n_e;

%mu_thermal:kmol sayısının teorik değişim katsayısı

% %Artık egzoz ürünlerinin katsayısı: gamma_r

epsilon=xx; %Ecotorq 13L sıkıştırma oranı

epsilon_g=xx; %bilinen ön genişleme oranı

gamma_r=(1./(VOLEFF.*(epsilon-
1))).*(P_TUR_I./P_MAN).*(T_MAN./T_TUR_I);

%P1:Emme sonu basıncı, Indicom'dan gelen -142KMA için (emme
sonu subap

%kapanma açısı)

%P2:Sıkıştırma sonu basıncı, Indicom'dan gelen 0 KMA için

n1=log(P2./P1)/log(epsilon); %n1 katsayı

ro=Pmax./P2; %ro: Patlama oranı

k_ady=xx; %adyabatik üs(bilinen)

T1=T_MAN.*((P1./P_MAN).^((k_ady-1)/k_ady));%emme sonu
sıcaklığı

T2=T1.*(epsilon.^(n1-1)); %T2: Sıkıştırma sonu sıcaklığı

mu=(mu_thermal+gamma_r)./(1+gamma_r); %kmol sayısının
gerçek değişim katsayısı

% %gazların iç enerji hesaplaması

T=T_AIR_O2_N2_CO2_H2O(:,1);
```

```
u_air=T_AIR_O2_N2_CO2_H2O(:,2);
u_o2=T_AIR_O2_N2_CO2_H2O(:,3);
u_n2=T_AIR_O2_N2_CO2_H2O(:,4);
u_co2=T_AIR_O2_N2_CO2_H2O(:,5);
u_h2o=T_AIR_O2_N2_CO2_H2O(:,6);
u_air_int=interp1(T,u_air,T2);
u2_1=u_air_int; %2(sıkıştırma sonu) noktasındaki sıcaklığa uygun olan
% %1kmol yanma ürününün iç enerjisi
u_o2_int=interp1(T,u_o2,T2);
u_n2_int=interp1(T,u_n2,T2);
u_co2_int=interp1(T,u_co2,T2);
u_h2o_int=interp1(T,u_h2o,T2);
%yanma ürünlerinin fraksiyon katsayısı
r_co2=n_co2./n_yu;
r_h2o=n_h2o./n_yu;
r_n2=n_n2./n_yu;
r_o2=n_o2./n_yu;
u2_2=(r_o2.*u_o2_int)+(r_h2o.*u_h2o_int)+(r_n2.*u_n2_int)+(r_co2.*u_co2_int);
%2 (sıkıştırma sonu) noktasındaki sıcaklığa uygun olan 1 kmol yanma ürününün iç enerjisi (kj/kmol yanma ürünü)
sabit=(((nu_yanma*Hu)./(n_e.*(1+gamma_r)))+(u2_1+u2_2.*gamma_r)./(1+gamma_r)+(R.*ro.*T2))./mu;
%end
```

```
%Her bir dataya göre hesaplanan iç enerji değeri
for i=1:length(r_o2)
for j=1:length(u_o2)
r_o2xu_o2(i,j)=r_o2(i)*u_o2(j);
end
end
for i=1:length(r_co2)
for j=1:length(u_co2)
r_co2xu_co2(i,j)=r_co2(i)*u_co2(j);
end
end
for i=1:length(r_n2)
for j=1:length(u_n2)
r_n2xu_n2(i,j)=r_n2(i)*u_n2(j);
end
end
for i=1:length(r_h2o)
for j=1:length(u_h2o)
r_h2oxu_h2o(i,j)=r_h2o(i)*u_h2o(j);
end
end
u_toplam_x=r_h2oxu_h2o+r_n2xu_n2+r_co2xu_co2+r_o2xu_o2;
T_transpose=T';
```

estimate_sabit=T_transpose.*R+u_toplam_x; %tüm sıcaklık değerlerine göre sabit değer sonuçları

Tmax=interp1(estimate_sabit(1,:)',T,sabit); %iç enerji değişimini interpole ederek Tmax sonucu

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Naim DÖNMEZ

Doğum Tarihi ve Yeri :24.01.1991 Osmangazi/BURSA

Yabancı Dili :İngilizce

E-posta :naim_donmez@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine müh.	Yıldız Teknik Üni.	2019
Lisans	Makine müh.	Yıldız Teknik Üni.	2014
Lise	Fen Bilimleri	Bursa Erkek Lisesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2018	Ford Otomotiv San. A.Ş.	Dinamometre Motor Test ve Kalibrasyon Müh.
2015	Ford Otomotiv San. A.Ş.	Proje&Otomasyon&Bakım Müh.

YAYINLARI

Makale

1. Donmez, N., Ozener, O. (2019). “Modeling of NOx Emissions in Internal Combustion Engine”, International Journal of Engineering Research and Advanced Technology, Vol.5 Issue 4, 36-43.