KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR DİZEL MOTORDA CMA-ES METODU KULLANILARAK NOx-PM EMİSYONLARININ OPTİMİZASYONU

SEYFULLAH BERK

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR DİZEL MOTORDA CMA-ES METODU KULLANILARAK NOx-PM EMİSYONLARININ OPTİMİZASYONU

SEYFULLAH BERK

Yrd.Doç.Dr. Ertan ALPTEKİN		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Prof.Dr. Cenk SAYIN		
Jüri Üyesi,	**Marmara Üniversitesi**	.....
Prof.Dr. Mustafa ÇANAKCI		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.01.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, içten yanmalı motorlarda kalibrasyon parametrelerinin gerçek zamanlı motor testleri ile belirlenmesine dayanan eş zamanlı optimizasyon yaklaşımına, literatürde daha önce denenmemiş bir algoritmanın uygulanması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma, Ford Otosan'da yürütülen kalibrasyon geliştirme projelerindeki dinamometre testlerinin otomatik bir proseste gerçekleşmesine katkı sağlamıştır.

Tez çalışmamda desteğini esirgemeyen ve çalışmalarıma yön veren danışmanım Yard. Doç. Dr. Ertan ALPTEKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda teknik destek sağlayan Ford Otosan'daki ilk yöneticim Didem AYDIN'a ve diğer çalışma arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca bana güvenen ve destek olan sevgili babam Musa BERK, annem Döndü BERK ve en büyük fedakarlığı yapan eşim Diler BERK'e teşekkürlerimi sunarım.

Ocak – 2018 Seyfullah BERK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. MOTOR KALİBRASYONUNDA META-SEZGİSEL OPTİMİZASYON UYGULAMALARI 5
2. MOTOR KALİBRASYONUNDA TEMEL KAVRAMLAR 9
2.1. Motor Dinamometre Test Ortamı 10
2.2. Motor Kalibrasyonu 11
2.2.1. Motor tork kontrolü 12
2.2.2. Hava hattı sistemi kalibrasyonu 14
2.2.3. Yakıt enjeksiyon sistemi kalibrasyonu 21
3. META-SEZGİSEL OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI 28
3.1. Optimizasyon Yöntemleri 28
3.2. Meta-Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri 31
3.3. CMA-ES Yöntemi 34
4. TEST DENEY DÜZENEĞİ 43
4.1. Motor ve Alt Sistemler 43
4.2. Yakıt 44
4.3. Test Cihazları 45
4.4. Data Aktarımı ve Otomasyon Sistemi 48
5. CMA-ES İLE EŞ ZAMANLI KALİBRASYON OPTİMİZASYONU 51
5.1. Optimizasyon Probleminin Oluşturulması 51
5.2. CMA-ES Yönteminin Eş Zamanlı Kalibrasyon Optimizasyonuna Uyarlanması 55
5.3. Sabit Çalışma Noktasında Optimizasyon Çalışması 59
5.3.1. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasında optimizasyon çalışması 61
5.3.2. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasında optimizasyon çalışması 68
5.3.3. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasında optimizasyon çalışması 75
5.4. Emisyon Test Çevrimi Sonuçları 81
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 85
KAYNAKLAR 88
EKLER 95
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 102
ÖZGEÇMİŞ 103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İçten yanmalı motorun parametre diyagramı 9
Şekil 2.2. Motor dinamometre test odası şeması 11
Şekil 2.3. Örnek kalibrasyon yazılım mimarisi 12
Şekil 2.4. EDC17 yazılım mimarisi 13
Şekil 2.5. Dizel motor hava hattı sistemi 14
Şekil 2.6. Turboşarj ünitesinin yapısı 15
Şekil 2.7. Örnek kompresör haritası 17
Şekil 2.8. EGR sistemi 18
Şekil 2.9. EGR oranının egzoz emisyonlarına ve yakıt tüketimine etkisi 19
Şekil 2.10. Hava hattı kontrol yazılımının sadeleştirilmiş yapısı 20
Şekil 2.11. Common-rail enjeksiyon sistemi 22
Şekil 2.12. Piezo-elektrik enjektörün enjeksiyon karakteristiği 23
Şekil 2.13. VCV ve PCV'ye sahip örnek enjeksiyon sistemi 24
Şekil 2.14. Yakıt basınç kontrol yazılımının sadeleştirilmiş yapısı 25
Şekil 2.15. Ana enjeksiyon kontrol yazılımının sadeleştirilmiş yapısı 26
Şekil 3.1. Optimizasyon yöntemlerinin sınıflandırılması 29
Şekil 3.2. Nelder-Mead yöntemi ile bir matematiksel fonksiyonun optimizasyonu 30
Şekil 3.3. Birden çok optimum nokta içeren problem uzayında başlangıç noktasının yakınsanan noktaya etkisi 31
Şekil 3.4. EDA yöntemi ile bir matematiksel fonksiyonun optimizasyonu 33
Şekil 3.5. Farklı kovaryans matrisi ve adım boyutuna sahip popülasyonlar a) Farklı kovaryans matrisi b) Farklı adım boyutu 35
Şekil 3.6. Rassal ve rassal olmayan popülasyonlar a) Rassal dağılımlı b) Rassal olmayan dağılımlı 37
Şekil 3.7. Popülasyon oluşumu a) Normal dağılımlı popülasyon b) Ebeveyn bireyler ve yeni popülasyonun kovaryans matrisi c) Yeni popülasyon 40
Şekil 3.8. CMA-ES algoritması 42
Şekil 4.1. Dinamometre test odasında motor kurulumu 43
Şekil 4.2. Otomasyon sistemi 50
Şekil 5.1. Basitleştirilmiş hava hattı modeli 54
Şekil 5.2. Ana enjeksiyon zamanlaması ve yakıt hattı basıncına göre popülasyon dağılımları a) ζ: 1 b) ζ: 3.3 56
Şekil 5.3. Popülasyon boyutu λ'ya göre yakınsama gerçekleşene kadar emisyon miktarı değişimleri a) NO_X emisyonu b) PM emisyonu 58
Şekil 5.4. NEDC testi a) Tüm motor çalışma noktaları b) İndirgenen çalışma noktaları 60
Şekil 5.5. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasındaki NO_X-PM Pareto eğrisi 62
Şekil 5.6. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait kalibrasyon parametreleri 64

Şekil 5.7. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait amaç fonksiyonu, yakıt tüketimi ve emisyon miktarı değerleri 65
Şekil 5.8. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyona ait silindir basınç ve ısı dağılımı eğrileri 67
Şekil 5.9. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasındaki her bireye ait amaç fonksiyon değeri 68
Şekil 5.10. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasındaki NO_X-PM Pareto eğrisi 69
Şekil 5.11. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait kalibrasyon parametreleri 71
Şekil 5.12. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait amaç fonksiyonu, yakıt tüketimi ve emisyon miktarı değerleri 72
Şekil 5.13. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyona ait silindir basınç ve ısı dağılımı eğrileri 74
Şekil 5.14. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasındaki her bireye ait amaç fonksiyon değeri 75
Şekil 5.15. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasındaki NO_X-PM Pareto eğrisi 76
Şekil 5.16. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait kalibrasyon parametreleri 78
Şekil 5.17. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait amaç fonksiyonu, yakıt tüketimi ve emisyon miktarı değerleri 79
Şekil 5.18. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyona ait silindir basınç ve ısı dağılımı eğrileri 80
Şekil 5.19. 2190 d/d-250 Nm Nm çalışma noktasındaki her bireye ait amaç fonksiyon değeri 81
Şekil 5.20. NEDC testinde baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyona ait NO_X emisyonu ve yakıt tüketimi 83
Şekil A.1. ETS sistemi genel yapısı 96

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Motor dinamometre tipleri 10
Tablo 2.2. Ön enjeksiyon aktivasyon listesi 27
Tablo 3.1. Doğal yaşam ile optimizasyon probleminin ilişkilendirilmesi 32
Tablo 3.2. CMA-ES strateji parametreleri 38
Tablo 4.1. Motora ait teknik bilgiler 44
Tablo 4.2. Yakıt analiz sonuçları 45
Tablo 5.1. Kalibrasyon parametrelerinin sınır ve çözünürlük değerleri 54
Tablo 5.2. Sönüm çarpanı ζ'ye göre yakınsama gerçekleşene kadar oluşan popülasyon adetleri 57
Tablo 5.3. Popülasyon boyutu λ'ya göre yakınsama gerçekleşene kadar oluşan popülasyon ve birey adetleri 58
Tablo 5.4. CMA-ES strateji parametre değerleri 59
Tablo 5.5. NEDC testinden indirgenen en yüksek NOX emisyonuna sahip 10 çalışma noktası 60
Tablo 5.6. 1640 d/d – 70 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri 63
Tablo 5.7. 1640 d/d – 70 Nm çalışma noktasında optimize edilmiş kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri 66
Tablo 5.8. 1880 d/d – 120 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri 69
Tablo 5.9. 1880 d/d – 120 Nm çalışma noktasında optimize edilmiş kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri 73
Tablo 5.10. 2190 d/d – 250 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri 77
Tablo 5.11. 2190 d/d – 250 Nm çalışma noktasında optimize edilmiş kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri 80
Tablo 5.12. Optimizasyon sonunda elde edilen yakıt tüketimi ve emisyon miktarları 82
Tablo 5.13. Optimizasyon işleminin ardından NEDC testinde yakıt tüketimi ve emisyonlarda beklenen teorik iyileşme miktarları 82
Tablo 5.14. NEDC test sonuçları 84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$B^{(g)}$	:	Kovaryans matrisinin öz vektörleri ile oluşturulan ortogonal matris
c	:	Gelişim vektörü öğrenme oranı
$C^{(g)}$	:	g numaralı popülasyonun kovaryans matrisi
c_1	:	Rank-bir matrisi öğrenme oranı
c_C	:	Kovaryans matrisinin gelişim vektörüne ait öğrenme oranı
c_{gas}	:	Egzoz bileşiminin hacimsel derişim miktarı, (ppm)
c_μ	:	Rank-μ matrisi öğrenme oranı
c_σ	:	Adım boyutunun gelişim vektörüne ait öğrenme oranı
d	:	sönüm oranı
$D^{(g)}$	:	Kovaryans matrisinin öz değerlerinin karekökleri ile oluşturulan köşegen matris
d_σ	:	Adım boyutu sönüm oranı
f	:	Optimizasyon uzayını tanımlayan fonksiyon
g	:	Optimizasyon uzayında tanımlı eşitlik fonksiyonu
h	:	Optimizasyon uzayında tanımlı eşitsizlik fonksiyonu
H_a	:	Motor giriş havasındaki nem miktarı, (g/kg)
K_1	:	O ve N_2'un tepkimesinde NO_X formasyonu oran sabiti, (m^3/gmol.s)
K_{-1}	:	NO_X ve N'un tepkimesinde ayrışma oran sabiti, (m^3/gmol.s)
K_2	:	N ve O_2'in tepkimesinde NO_X formasyonu oran sabiti, (m^3/gmol.s)
K_{-2}	:	NO_X ve O'in tepkimesinde ayrışma oran sabiti, (m^3/gmol.s)
k_w	:	Egzoz emisyon ölçümü kuru-yaş çevrim oranı
M_{aux}	:	Yardımcı ekipmanların çektiği yük, (Nm)
m_{egz}	:	Egzoz gazının kütlesel miktarı, (kg/h)
M_{frict}	:	Motor sürtünme torku, (Nm)
m_{gas}	:	Egzoz bileşiminin kütle miktarı, (g/h)
m_{hava}	:	Emiş hava miktarı, (kg/h)
M_{ind}	:	Motor indike torku, (Nm)
M_{pump}	:	Pompalama kayıplarının torka indirgenmiş değeri, (Nm)
M_{shaft}	:	Motor krank şaft torku, (Nm)
$m_{yakıt}$	:	Yakıt kütle miktarı, (kg/h)
n	:	Uzay boyutu
$p^{(g)}$	:	g numaralı popülasyonun gelişim vektörü
$p_C^{(g)}$	:	g numaralı popülasyonun kovaryans matrisi gelişim vektörü
$p_\sigma^{(g)}$	:	g numaralı popülasyonun adım boyutu gelişim vektörü
u_{gas}	:	Egzoz bileşim yoğunluğunun egzoz gazı yoğunluğuna oranı
$w_{C/CO}$	:	C atom ağırlığının CO atom ağırlığına oranı
$w_{C/CO2}$	:	C atom ağırlığının CO_2 atom ağırlığına oranı
$w_{C/yakıt}$	:	C atom ağırlığının yakıt atom ağırlığına oranı
w_H	:	Yakıttaki hidrojen içeriğinin kütlesel oranı
w_i	:	Ebeveyn bireyler ağırlık oranı
w_N	:	Yakıttaki azot içeriğinin kütlesel oranı
w_O	:	Yakıttaki oksijen içeriğinin kütlesel oranı

$x^{(g)}$: g numaralı popülasyondaki birey pozisyonlarını tanımlayan nesne parametresi
$x_{i:\lambda}$: λ elemanlı popülasyondaki i numaralı bireyin pozisyonu
x_l : Nesne parametresinin alabileceği minimum değer vektörü
X^n : x bireylerinin tanımlı olduğu n boyutlu uzay
x_{n_i} : Normalize edilmiş birey pozisyonu
x_u : Nesne parametresinin alabileceği maksimum değer vektörü
$\hat{x}_n$: Normal dağılımlı birim vektörün beklenen değeri
$\langle x \rangle_w^{(g)}$: g numaralı popülasyondaki ebeveyn bireylerin ağırlıklı ortalaması
$z_k^{(g)}$: g numaralı popülasyonda oluşturulan rastgele birim vektör serisi
$z_{sel}^{(g)}$: g numaralı popülasyonun mutasyon vektörü
λ : Popülasyondaki birey sayısı
ξ_k : Ortalama değeri sıfır olan rastgele oluşturulan sayı dizisi
$\sigma^{(g)}$: g numaralı popülasyonun adım boyutu
φ : Amaç fonksiyonu üssel faktörü
N(0,I) : Ortalaması ve kovaryans matrisi sırasıyla 0 ve I olan normal dağılım
ζ : Adım boyutu sönüm çarpanı
ϕ : Optimizasyon uzayında tanımlı kısıt fonksiyonu
μ : Popülasyondaki ebeveyn birey sayısı
μ_{eff} : Efektif seçim oranı

Kısaltmalar

CAN : Controller Area Network (Kontrolör Alan Ağı)
CFD : Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
CMA-ES : Covariance Matrix Adaptation – Evolutionary Strategy (Kovaryans Matris Adaptasyonu – Evrimsel Strateji)
CO : Carbon Monoxide (Karbonmonoksit)
DOC : Diesel Oxidation Catalyst (Dizel Oksidasyon Katalisti)
DPF : Diesel Particulate Filter (Dizel Partikül Filtre)
EDA : Estimation of Distribution Algorithm (Dağılım Kestirim Algoritması)
EGR : Egzoz Gaz Resirkülasyonu
EKÜ : Motor Kontrol Ünitesi
ES : Evrimsel Strateji
ETS : Engine Torque Structure (Motor Tork Yapısı)
GA : Genetik Algoritma
HC : Hydrocarbon (Hidrokarbon)
HCCI : Homogeneous Charge Compression Ignition (Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşleme)
IMEP : Indicated Mean Effective Pressure (İndike Ortalama Efektif Basınç)
KA : Krank Açısı
MAF : Mass Air Flow (Kütlesel Hava Akışı)
MAP : Manifold Absolute Pressure (Manifold Mutlak Basıncı)
NEDC : New European Driving Cycle (Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi)
NH_3 : Amonyak
NO_X : Azot Oksit
ÖYT : Özgül Yakıt Tüketimi

PCV	:	Pressure Control Valve (Basınç Kontrol Valfi)
PM	:	Partikül Madde
PMEP	:	Pumping Loss Mean Effective Pressure (Pompalama Kaybı Ortalama Efektif Basıncı)
PSO	:	Parçacık Sürü Optimizasyonu
RDE	:	Real Driving Emissions
SCR	:	Selective Catalytic Reduction (Seçici Katalitik İndirgeme)
TCP	:	Transmission Control Protocol (İletim Kontrol Protokolü)
ÜÖN	:	Üst Ölü Nokta
VCV	:	Volume Control Valve (Hacimsel Kontrol Valfi)
VGT	:	Variable Geometry Turbocharger (Değişken Geometrili Turboşarj)
WHTC	:	World Harmonized Transient Cycle

BİR DİZEL MOTORDA CMA-ES METODU KULLANILARAK NOx-PM EMİSYONLARININ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, motor kalibrasyonu geliştirme sürecinde gerçekleşen dinamometre testlerinin otomatik olarak yürütülmesi için, test otomasyon sistemine entegre olarak çalışan eş zamanlı optimizasyon algoritmasının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde, eş zamanlı optimizasyon için yalnızca partikül sürü optimizasyonu ve genetik algoritma gibi kısıtlı türdeki yöntemlerin uygulandığı çalışmalar mevcuttur. Bu nedenle, yüksek parametreye sahip problemler için uygunluğu kanıtlanan kovaryans matris adaptasyonu algoritmasının, bu çalışmada uygulanmasına karar verilmiştir.

Eş zamanlı optimizasyon uygulamalarında test süreleri önemli bir kriter olması nedeniyle, optimizasyon algoritması dinamometre testlerine göre güncellenerek, yakınsamanın kontrollü ve hızlı biçimde olması sağlanmıştır. Optimizasyon işlemi, NEDC testinde 2 litre dizel motorun NOx emisyonunda en çok artışa neden olan 3 çalışma noktasında gerçekleşmiştir. Optimizasyon işleminde ana enjeksiyon zamanı, yakıt hattı basıncı, ön enjeksiyon zamanı ve miktarı, emme manifold basıncı ve temiz hava miktarı kontrol edilmiştir. Optimizasyon işlemindeki hedef değerler, her çalışma noktası için çıkarılan NOx-PM Pareto eğrileri ile belirlenmiştir. Pareto eğrilerinin çıkarılmasında da kovaryans matris adaptasyonu algoritmasından faydalanılmıştır.

Optimizasyon hedefleri belirlendikten sonra, her çalışma noktasında optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Sabit çalışma noktalarında, yakıt tüketimi ve PM emisyonunda artış yaşanmadan NOx emisyonunda düşüş sağlanarak, NEDC testinde oluşan toplam NOx emisyonunda %3,8 azalma meydana gelmiştir. Optimizasyon işlemi nokta başına ortalama 65 ölçümde gerçekleşmiştir. Güncellenmiş kovaryans matrisi adaptasyonu ile eş zamanlı optimizasyonun, kalibrasyon geliştirme sürecinde etkin bir yaklaşım olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dizel Motor, Emisyon, Kovaryans Matris Adaptasyonu, Motor Kalibrasyonu, Optimizasyon.

NOx-PM EMISSIONS OPTIMIZATION OF A DIESEL ENGINE USING CMA-ES METHOD

ABSTRACT

In this study, it is aimed to develop an online optimization algorithm to conduct automated dynamometer tests in calibration development process. Optimization algorithm is designed to be integrated within test automation system. There are only limited optimization methods applied in online optimization technics, such as particle swarm optimization and genetic algorithm. For this reason, covariance matrix adaptation, which is effective in high degree optimization problems, was decided to be used in the study.

Since the testing duration is critical in online optimization, algorithm is modified to enable convergance to occur faster and in a controlled way. Optimization was conducted in 3 different operating points of 2 liter diesel engine, where NOx emission impacts NEDC results mostly. Main injection timing, rail pressure, pilot injection quantity and timing, manifold pressure and mass air flow were controlled in optimization process. Optimization targets were determined according to NOx-PM Pareto curve of each operating point. Covariance matrix adaptation was used to generate Pareto curves.

Once optimization targets were determined, optimization took place in each operating point. By decrease of NOx while fuel consumption and PM remains same in steady-state operating points, 3.8% of total NOx emission reduction was obtained in NEDC test. 65 measures were taken for each operating point in optimization process. The modified CMA–ES algorithm is expected to be an efficient method for online calibration optimization.

Keywords: Diesel Engine, Emissions, Covariance Matrix Adaptation, Engine Calibration, Optimization.

GİRİŞ

Motor kalibrasyonu geliştirilmesi, araçlarda bulunan motor kontrol ünitesi (EKÜ) yazılımına gömülü kontrol parametrelerinin uygun olarak ayarlanarak, araçların ideal ve yasal zorunlulukları sağlayacak şekilde çalışmasını sağlama işidir. Çalışmalar süresince yakıt tüketiminin azaltılması, araç performansının arttırılması, emisyon limitlerinin sağlanması ve müşteri beklentisinin karşılanması gibi hedefler yerine getirilmektedir. Azalan emisyon limitleri ve artan müşteri beklentileri nedeniyle, son yıllarda araçta ve özellikle motorda elektronik parçaların sayısı artmış, bu da daha kapsamlı EKÜ yazılımlarının geliştirilmesine neden olmuştur. Günümüz EKÜ yazılımlarında 30.000'e kadar değişken bulunabilmektedir [1]. Yazılım boyutu büyümesine bağlı olarak parametre sayısındaki artış, geliştirme çalışmalarını daha karmaşık hale getirmekte ve proje zamanlarının uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle kalibrasyon geliştirme projelerinde manuel parametre optimizasyonu, yerini matematik tabanlı proseslere bırakmıştır.

Kalibrasyon optimizasyonunda otomatik proses geliştirme fikri 1970'li yıllara dek uzanmaktadır. Yapılan ilk çalışmalarda farklı sektörlerde kullanılan optimizasyon yöntemleri motor kalibrasyon geliştirilmesinde uygulanmıştır [2-4]. Belirlenen çalışma noktalarında kalibrasyon parametreleri (hava-yakıt oranı, ateşleme zamanı ve egzoz gaz resirkülasyonu (EGR) oranı) adım adım değiştirilerek motorun tepkisi nümerik yöntemlerle modellenmiş, ardından modelin optimum noktası türev bazlı tekniklerle tespit edilmiştir. Sonraki yıllarda, daha gelişmiş optimizasyon yöntemleri motor kalibrasyonu üzerinde denenmiştir. Lagrange çarpanları gibi deterministik yöntemlerin kullanıldığı çalışmalarda farklı tipteki motorların kısıtlı sayıdaki kalibrasyon parametreleri kontrol edilerek motorun daha verimli noktada çalışması sağlanmıştır [5]. Deterministik yöntemle, optimizasyon algoritmasının EKÜ yazılımına gömülerek motorun değişken koşullara göre optimum ayarları kendiliğinden tespit etmesine yönelik çalışmalar da yapılmıştır [6].

Deterministik optimizasyon yöntemlerinde, sistemin matematiksel olarak tanımlanması gerektiğinden, içten yanmalı motorlar gibi lineer olmayan sistemlerde

uygulanması oldukça zahmetlidir. Matematiksel tanım gerektirmeyen sezgisel yaklaşımlardaysa, her bir iteratif adımda sistem sonucu daha iyi/kötü olarak değerlendirilerek, daha iyi bir noktaya ulaşılamayana kadar parametre adaptasyonu devam etmekte ve sonrasında algoritma tamamlanmaktadır. Bu nedenle, matematiksel ifadesine ihtiyaç duyulmadan parametre uzayında çalışma imkanı sunan bu tür yaklaşımlar, içten yanmalı motor optimizasyonuna daha uygundur. Optimizasyon işlemi gerçek zamanlı motor testlerinde uygulanabileceği gibi çeşitli yöntemlerle elde edilen motor modelleri de olmaktadır.

Modelleme işlemi için motorun kontrol parametreleri değiştirilerek laboratuvar ortamında data toplamak gerekmektedir. İçten yanmalı motorlarda ateşleme zamanı, hava/yakıt oranı, manifold mutlak basıncı (manifold absolute pressure) (MAP), EGR oranı, turbo pozisyonu gibi parametreler kontrollü olarak değiştirilerek motorun gücü, yakıt tüketimi, emisyon salınımı, sıcaklık ve basınç değerleri ölçülmektedir. Data toplama işleminin ardından, çeşitli yöntemlerle motorun kara kutu modeli oluşturulabilir. İnsan beyninin bilgi işleme tekniğinden esinlenerek geliştirilmiş yapay sinir ağları yönteminde, sistem girdi ve çıktıları işlenerek, bunlar arasındaki ilişkileri tanımlayan bağlantı elemanlarının ağırlıkları, bir yakınsama sağlanana kadar ayarlanmaktadır. İçten yanmalı motor modellemesinde sıklıkla başvurulan bu yöntemde, yakıt tüketimi, azot oksit (NO_x), karbonmonoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) gibi emisyon gazları ve partikül madde (PM) emisyonu modellenebilmektedir [7]. Optimizasyon için kullanılan diğer bir modelleme yöntemi kimyasal kinetik modellemedir. Yakıt demetinin ve yanma prosesinin kimyasal tepkimelerle tanımlandığı modelde emisyon gazları, kurum ve silindir içi sıcaklıkları hesaplanabilmektedir [8]. Ayrıca, optimizasyon için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (computational fluid dynamics) (CFD) modelleri de kullanılmaktadır. CFD modelleri sayesinde, sadece kalibrasyon parametreleri değil, yanma odasının geometrik bilgileri gibi dizayn parametreleri de optimize edilebilir [9-11]. Modelleme işlemi için motor testlerinde kontrol edilecek parametre sayısının artması, deney süresini üssel oranda uzatmaktadır [12]. Test sürelerini düşürmek için, deney tasarımında motorun hangi aralıkta optimum çalışacağı yaklaşık olarak tahmin edilerek, kalibrasyon parametrelerinin değişim aralığı ve dağılımı dikkatlice belirlenmelidir. Aksi takdirde, geniş aralık seçilmesi optimum noktanın bulunduğu bölgenin yeterli hassasiyette

taranmamasına, dar aralık seçilmesi de optimum noktanın aralık dışında kalmasına neden olabilir [13]. Bu gibi durumlarda test ölçümünün tekrar edilmesi gerekir. Ayrıca, homojen dolgulu sıkıştırma ile yanma gibi lineer olmayan davranışların fazla olduğu uygulamalarda modelleme işlemi oldukça zahmetlidir [14].

Eş zamanlı optimizasyon uygulamasındaysa, model bazlı yaklaşımdan farklı olarak, optimizasyon algoritması test otomasyon sistemine entegre edilir ve kalibrasyon parametreleri anlık datalar ile belirlenir. Modelleme işlemine göre daha az sayıda ölçüm alınarak test süresinin azaltıldığı bu yaklaşımda, modelleme kaynaklı oluşan sapmalar gerçekleşmez. Test süresince kalibrasyon parametreleri iteratif yöntemlerle değiştirilerek, yakıt tüketimi, egzoz emisyonu gibi motor özelliklerinin hedef değerlere yaklaşması sağlanır. Literatürde, eş zamanlı optimizasyon uygulamalarına ait çalışmalar kısıtlı miktarda bulunmaktadır ve mevcut uygulamalarda benzer optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır [14-16]. Popülasyon bazlı meta-sezgisel yöntemlere ait çoğu algoritmanın eş zamanlı optimizasyon uygulamasındaki performansları bilinmemektedir. Bu çalışmada, yüksek sayıda parametre kalibrasyonu için uygunluğu kanıtlanan ve eş zamanlı optimizasyon uygulamalarında daha önce denenmeyen kovaryans matris adaptasyonu-evrimsel strateji (covariance matrix adaptation - evolotionary strategy) (CMA-ES) yöntemi ile 4 silindirli 2 litre dizel motorun kalibrasyon optimizasyonu yapılacaktır. İkili enjeksiyon stratejisinin uygulanacağı optimizasyon çalışmasında, ana enjeksiyon zamanı, ön enjeksiyon miktarı ve zamanı, yakıt enjeksiyon basıncı, emme manifoldu basıncı ve emiş hava miktarı kontrol edilerek, yakıt tüketimi, NO_X ve PM emisyonu değerleri iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Yakıt tüketimi ve emisyon iyileştirilmesiyle ilgili yapılan pek çok çalışma olmasına rağmen, bu çalışma motor kalibrasyon prosesinin otomatikleştirilmesine katkı sağlamak amacıyla yürütülmüştür.

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde, literatürdeki çeşitli motor geliştirme süreçlerinde kullanılan meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri anlatılarak, bu çalışmada neden CMA-ES algoritmasının kullanıldığı açıklanmıştır. Bölüm 2'de, motor kalibrasyonu çalışmalarının yapıldığı test ortamının genel özellikleri, kalibrasyon yazılımının temel yapısı, motordaki tork kontrolü, hava emiş sistemi ve yakıt enjeksiyon sistemindeki temel komponentler ve kalibrasyon yazılımıyla etkileşimlerinden bahsedilmiştir. Bölüm 3'de, optimizasyon algoritmalarının genel özelliklerinden bahsedildikten

sonra, bu çalışmada kullanılacak olan CMA-ES yönteminin detaylı açıklaması verilmiştir. Bölüm 4'de, çalışmada kullanılan dizel motora ait teknik bilgiler, ayrıca testte kullanılan otomasyon sisteminin ve ölçüm cihazlarının teknik özellikleri paylaşılmıştır. Bölüm 5'de, motor kalibrasyonundaki hedeflere göre optimizasyon probleminin oluşturulması, CMA-ES yönteminin eş zamanlı kalibrasyona uygun hale getirilmesi, 3 farklı çalışma noktasındaki optimizasyon uygulamaları ve emisyon test çevrimi sonuçları gösterilmiştir.

1. MOTOR KALİBRASYONUNDA META-SEZGİSEL OPTİMİZASYON UYGULAMALARI

Doğadaki evrim teorisi ve sürü davranışlarından ilham alınarak geliştirilen popülasyon bazlı meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri, mühendislik problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [17]. Popülasyon bireyleri arasındaki iletişim, yeni popülasyon oluşumunda kullanılan yöntemler ve popülasyonların çok sayıda bireye sahip olması gibi özellikler, meta-sezgisel optimizasyonun etkin bir yöntem olmasını sağlamıştır [18]. Meta-sezgisel yaklaşımlarda, parametre ayarlaması sistem sonucunu doğrudan daha iyi noktaya yakınsatacak şekilde yapmak yerine kontrollü bir rassallık içerisinde parametreler değiştirilmektedir. Bu sayede, sistemde bulunan farklı optimum noktalardan en iyi sonucu verecek olana ulaşılması sağlanmaktadır. Motor kalibrasyonu optimizasyonunda, meta-sezgisel yöntemlerin klasik yöntemlere göre üstünlükleri kanıtlanmıştır. Yapay sinir ağları ile modellenmiş benzinli motorda türev bazlı klasik optimizasyon ile meta-sezgisel sınıfa ait genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemleri karşılaştırılmıştır [19]. Hava-yakıt oranı ve ateşleme zamanı kontrol edilerek emisyon limitleri içerisinde yakıt tüketiminde düşüş amaçlanan bu çalışmada, klasik yöntemde yerel bir minimum noktaya yakınsanmış ve bu nedenle yakıt tüketimi iyileştirilememişken, GA ve PSO ile yakıt tüketiminde düşüş sağlanmıştır. Motor ölçümleri araç modeline aktarılarak, Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (New European Driving Cycle) (NEDC) sonuçları karşılaştırılmıştır.

Meta-sezgisel yöntemler farklı motor tiplerinin kalibrasyon optimizasyonunda kullanılabilmektedir. Manifold basıncı, EGR oranı, enjeksiyon zamanlaması gibi kalibrasyon parametrelerine ilave olarak enjeksiyon şeklinin de optimize edildiği dizel motor kalibrasyonunda, emisyon ve yakıt tüketimi düşürülmüştür [20]. Değişken supap zamanı ve değişken sıkıştırma oranının benzinli motorda yakıt tüketimine etkisini inceleyen başka bir çalışmada GA kullanılmıştır [21]. Optimizasyon işlemi 1,8L benzinli motorun 1 boyutlu modeli üzerinde uygulanmıştır. Meta sezgisel yöntemin kullanıldığı doğal gazla çalışan motor optimizasyonundaysa, yapay sinir

ağları modelleri kullanılarak hava-yakıt oranı, manifold basıncı, manifold sıcaklığı ve diğer yanma parametreleri ayarlanmıştır [22]. Optimizasyon sonuçları gerçek ölçümlerle kontrol edilmiştir.

Meta-sezgisel yöntemler farklı yanma konseptlerinin analizi için de kullanılmıştır. Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme (homogeneous charge compression ignition) (HCCI) ve difüzyon yanmasının birleştirilmesiyle oluşturulan yanma konseptinin incelendiği bir çalışmada, GA ile CFD modeli üzerinde optimizasyon uygulanmıştır [9]. Manifold basıncı, EGR oranı, ön karışım yakıt oranı ve enjeksiyon zamanlaması kontrol edilerek emisyon, indike yakıt tüketimi ve basınç artış oranları iyileştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ilgili yanma konseptiyle makul seviyede emisyon ve yakıt tüketimine ulaşarak HCCI yanmada oluşan yüksek gürültünün düşürüldüğünü göstermiştir.

CMA-ES yönteminin kullanıldığı bir çalışmada ise dizel motor kalibrasyonunda kullanılan tüm parametrelerin (ana ve pilot enjeksiyon miktarı ve zamanlaması, enjeksiyon basıncı, manifold basıncı ve EGR oranı) motor modeli üzerinden kontrol edilerek, emisyon ve yakıt tüketiminde iyileşme sağlanmıştır [23]. Gerçek ölçüm sonucuna dayanmadan sadece model optimizasyonunun yapıldığı bu çalışmada, elde edilen kalibrasyon parametreleri ile NEDC test sonucunun iyileştirilmesi yapılmıştır.

Meta-sezgisel yöntemler kimyasal kinetik modellerin optimizasyonunda da kullanılmıştır. Dizel motorda fenomenolojik yakıt demeti modeli üzerinde GA ile optimizasyon işlemi uygulanan çalışmada, enjeksiyon formu değiştirilerek yakıt tüketimi, NO_X ve PM emisyonları düşürülmüştür [8]. Çalışmanın devamında, mevcut algoritma geliştirilerek daha iyi arama özelliği ve daha esnek dağılım özelliği göstermesi sağlanmıştır [24]. Enjeksiyon miktarı, enjeksiyon zamanlaması, manifold basıncı, EGR oranı ve türbülans oranı gibi parametreler kontrol edilerek geliştirilen algoritma diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Dizel motorlarda tutuşma prosesi için geliştirilen Shell tutuşma modelindeki faktörlerin doğru olarak belirlenmesi için de GA kullanılmıştır [25]. Shell model sonucunun detaylı kinetik mekanizmalara yakınsaması için yapılan bu çalışmada, farklı hava-yakıt oranı, tutuşma anı sıcaklık ve basıncı, EGR oranı değerlerinde model test edilmiştir. Ayrıca, meta-sezgisel

yöntemler HCCI motorlar için geliştirilen kimyasal kinetik modellerde de kullanılabilmektedir [26, 27].

Meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri sadece kalibrasyon geliştirilmesinde değil, diğer motor geliştirme süreçlerinde de kullanılmaktadır. Motorun yanma odasının CFD modellemesi sayesinde piston geometrisi, püskürtme açısı gibi dizayn parametreleri optimize edilebilmektedir. GA kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmalarında kalibrasyon ve dizayn parametreleri birlikte ayarlandığında daha düşük emisyon ve yakıt tüketimi değerlerine ulaşılabildiği gösterilmiştir [10, 11]. Meta-sezgisel optimizasyon yöntemlerinden, alternatif yakıt çalışmalarında da yararlanılmıştır. Farklı biyodizel içerikli yakıtlarla alınan emisyon, yakıt tüketimi ve diğer ölçümler yapay sinir ağları ile modellenerek, biyodizel oranının dizayn parametresi olması sağlanmıştır [28, 29]. PSO ve GA kullanılarak emisyon ve yakıt tüketiminde iyileşme sağlanmıştır. Optimizasyon uygulamaları egzoz sistemlerinde uygulanarak, daha iyi emisyon çevrim performansı elde edilebilmektedir. Seçici katalitik indirgeme (selective catalytic reduction) (SCR) sisteminin yapay sinir ağları ile modellendiği çalışmada, GA kullanılarak SCR sistemi çıkışı NO_X ve amonyak (NH_3) emisyonları düşürülmüştür [30].

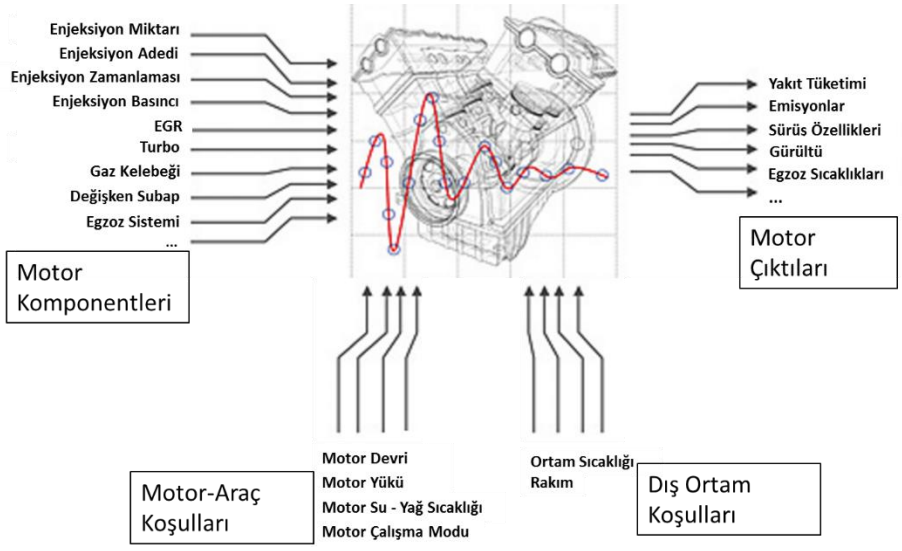
Klasik yöntemlerin, sistemdeki genel optimumu bulmalarındaki eksiklik eş zamanlı optimizasyon uygulamalarında da geçerlidir. Bu nedenle, eş zamanlı optimizasyonda meta-sezgisel yöntemlerin kullanımı daha başarılı sonuçlar vaat etmektedir. Ancak, meta-sezgisel yaklaşımlar popülasyon bazlı olduğundan ve çok sayıda iteratif adım içerdiğinden, eş zamanlı optimizasyon uygulamalarında popülasyondaki eleman sayısını düşürecek şekilde ayarlama gerekmektedir. Sabit devirde ve sabit yakıt miktarında optimizasyon işlemi uygulanan 4,5 litre dizel motorda, PSO algoritması eş zamanlı optimizasyon yöntemine uyarlanarak emisyon seviyelerinde iyileşme sağlanmıştır [31]. Tek ve çift enjeksiyon stratejisinin ayrı olarak optimize edildiği bu çalışmada enjeksiyon zamanlamaları, enjeksiyon basıncı, EGR oranı ve manifold basıncı kontrol edilmiştir. GA ve PSO yöntemlerinin birleştirilerek oluşturulduğu hibrit bir yöntemse, dizel motorda uygulanarak emisyon ve yakıt tüketiminde iyileşme sağlanmıştır [32]. Çalışmada oluşturulan hibrit yöntem ve GA karşılaştırılarak, hibrit yöntemin optimuma yakınsamasının daha hızlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, GA'nın özelleştirilmiş bir versiyonu olan mikro GA yöntemi ile az sayıda bireye sahip

popülasyonlar ile eş zamanlı optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir [33]. Giriş hava sıcaklığı, enjekiyon miktarları ve enjeksiyon zamanlamalarının kontrol edildiği çalışmada, HCCI yanmanın gerçekleştiği tek silindirli araştırma motorunda egzoz emisyonlarında azalma sağlanmıştır.

Meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri pek çok motor geliştirme sürecinde kullanılmasına rağmen, eş zamanlı optimizasyon çalışmalarındaki uygulamaları kısıtlıdır. Meta-sezgisel yöntemlerde evrimsel strateji (ES) sınıfında yer alan CMA-ES yöntemi, çok sayıda parametre içeren optimizasyon problemlerinde küçük popülasyon boyutlarıyla uygulanabilmektedir [34]. Bu çalışmada da, CMA-ES yönteminin eş zamanlı kalibrasyon uygulamalarına uyarlanarak, literatürdeki diğer yöntemlere göre üstünlükleri karşılaştırılacaktır.

2. MOTOR KALİBRASYONUNDA TEMEL KAVRAMLAR

İçten yanmalı motor kalibrasyonu, motor sistemlerini kontrol ederek motorun istenen şekilde çalışmasını sağlama işidir. Motor geliştirme süreçlerinde, yakıt tüketiminin azaltılması, motor performansının arttırılması, yasal emisyon limitlerinin sağlanması gibi hedefler üzerine çalışılmaktadır. Motor kalibrasyonunda kontrol edilen pek çok sistem olmasına rağmen, yakıt ekonomisi ve egzoz emisyon kontrolü için en kritik olanların hava hattı sistemi, yakıt enjeksiyon sistemi ve egzoz sistemi olduğu ifade edilebilir. Motorda bulunan komponentlerin kalibrasyonu yapılırken EKÜ yazılımında gömülü parametreler kullanılmaktadır. Motorda bulunan genel kalibrasyon parametrelerine ilave olarak aracın ömrü boyunca değişkenlik göstereceği dış ortam ve araç koşullarının motor çalışma özelliklerine etkisi Şekil 2.1'deki gibi ifade edilebilir. Otomotiv şirketleri, ortaya çıkarılan ürünlerin tüm bu çeşitlilikte müşteri beklentilerini karşılaması ve yasal zorunlulukları yerine getirmesi için motor kalibrasyonuna oldukça fazla zaman ayırmaktadır [1].



Şekil 2.1. İçten yanmalı motorun parametre diyagramı

2.1. Motor Dinamometre Test Ortamı

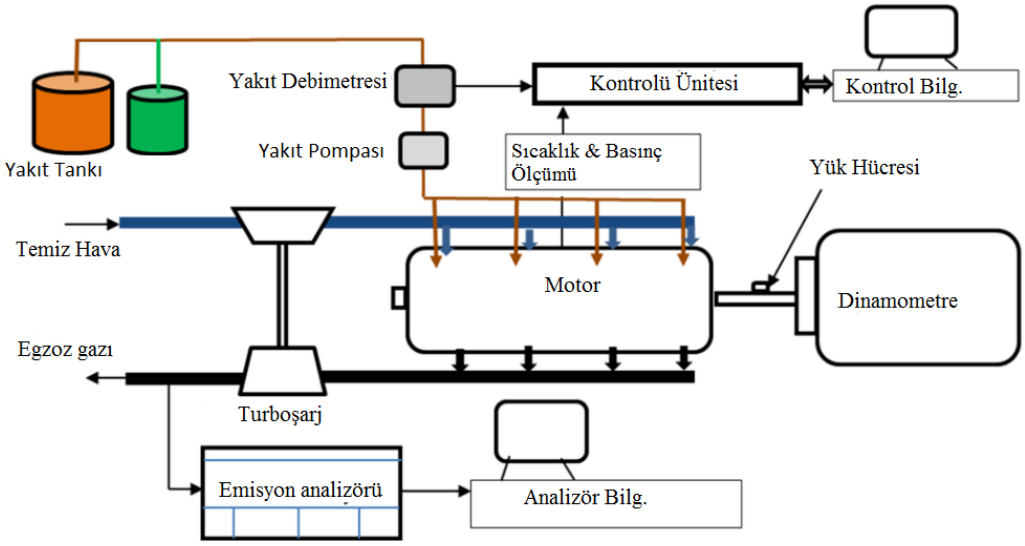
Motor kalibrasyon testleri dinamometre test odalarında yapılmaktadır. Motor volanına ya da dişli kutusu çıkışına bir kavrama ile bağlanan şaftla motorun anlık devrini ve ürettiği torku ölçebilen dinamometreler, çeşitli araç çalışma koşullarını taklit edebilmektedir. Dinamometreler şaft aracılığıyla motora frenleme yaparak, motorun mekanik enerjisini elektrik, ısı gibi farklı enerji türlerine dönüştürür. Dinamometreler enerji dönüşüm ünitelerine göre Tablo 2.1'deki gibi sınıflandırılır. Elektrik motorlu dinamometreler frenleme işlemine ilave olarak gerektiğinde pozitif iş yaparak motoru tahrik edebilirler. Diğer dinamometre tiplerine göre daha pahalı ve karmaşık yapıda olan elektrik motorlu dinamometreler, gelişmiş otomasyon sistemleri sayesinde, motoru istenen çalışma noktasında hassas olarak kontrol edebilmektedir.

Tablo 2.1. Motor dinamometre tipleri [35]

Dinamometre Tipleri	Kontrol Tipi	Enerji Dönüşümü
Eddy akımı	Pasif	Manyetik & Isı
Histerezis	Pasif	Manyetik & Isı
Fan freni	Pasif	Hava Sürtünmesi & Isı
Su freni	Pasif	Sıvı Sürtünmesi & Isı
Hidrolik fren	Pasif	Sıvı Sürtünmesi & Isı
Elektrik motoru	Aktif / Rejeneratif	Elektrik

Motor devri, dinamometre ya da motor üzerinden ölçüm alan bir takometre yardımıyla ölçülmektedir. Motorun şaft torku ise dinamometre içerisindeki kuvvet kolu ve yük hücresi aracılığıyla ya da şaft üzerinde bulunan tork sensörü ile belirlenmektedir. Kalibrasyon geliştirme testlerinde, devir ve tork ölçümüne ilave olarak motor üzerinden çeşitli noktalarda sıcaklık ve basınç ölçümü, egzoz hattında emisyon ölçümü ve yanma odalarında yüksek frekanslı basınç ölçümü yapılmaktadır. Alınan ölçümler eş zamanlı kaydedilerek, kalibrasyon geliştirme süresince motor çıktılarının analiz edilmesi mümkün kılınmaktadır.

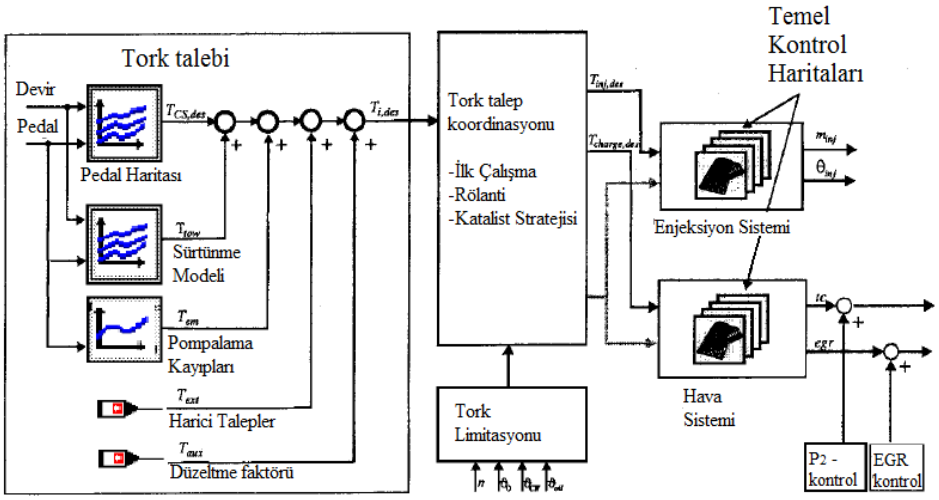
Test odalarında, motorun farklı koşullarda çalışmasını sağlamak için şartlandırma sistemleri kullanılmaktadır. Motor suyu, motor yağı, ortam sıcaklığı ve sıkıştırılmış hava sıcaklıkları kontrol edilerek kalibrasyon çalışmaları için gerekli çalışma şartları ayarlanmaktadır. Şekil 2.2'de motor dinamometre test odasının genel yapısı verilmiştir.



Şekil 2.2. Motor dinamometre test odası şeması

2.2. Motor Kalibrasyonu

Motordaki elektronik komponentler EKÜ'de bulunan yazılım ile kumanda edilmektedir. Yazılım içerisinde bulunan değiştirilebilir parametreler sayesinde komponentlerin ne şekilde çalışacağı kalibrasyon mühendisleri tarafından belirlenmektedir. EKÜ yazılımına erişmek ve parametre kontrolleri için dSPACE, ATI Vision gibi kalibrasyon ara yüz programları kullanılmaktadır. Yazılım içerisinde bulunan parametre tipleri çeşitlilik göstermekle birlikte, en genel olanları başka bir değişkene bağlı olmadan parametrizasyon için kullanılan skaler, bir değişkene göre parametrizasyon için kullanılan eğri ve iki değişkene göre haritadır [36]. Örnek olarak, vites oranına göre motorun maksimum torkunun sınırlandırılması için eğri kullanılırken, yakıt basıncının motor devri ve motor torkuna göre ayarlanması için harita kullanılır. Şekil 2.3'de yazılım yapısının ve içerdiği kontrol bloklarının temsili görüntüsü verilmiştir. Kalibrasyon parametrelerinde oluşturulan sinyaller diğer çeşitli kontrol bloklarından geçerek nihai olarak motor komponentlerinin hangi şekilde çalışacağı belirlenmiş olmaktadır. EKÜ yazılımında motor tork yönetimi, hava-yakıt oranı kontrolü, enjeksiyon sistemi, egzoz emisyon sistemleri, rölanti devir kontrolü, diyagnostik fonksiyonları, supap zamanlaması kontrolü, motor fanı kontrolü, klima kontrolü, seyir kontrolü, immobilizer sistemi gibi çeşitli alt sistemler bulunur. Bu bölümde motor tork kontrolü, hava hattı sistemi ve yakıt enjeksiyon sisteminin çalışma prensibi anlatılmıştır.



Şekil 2.3. Örnek kalibrasyon yazılım mimarisi [37]

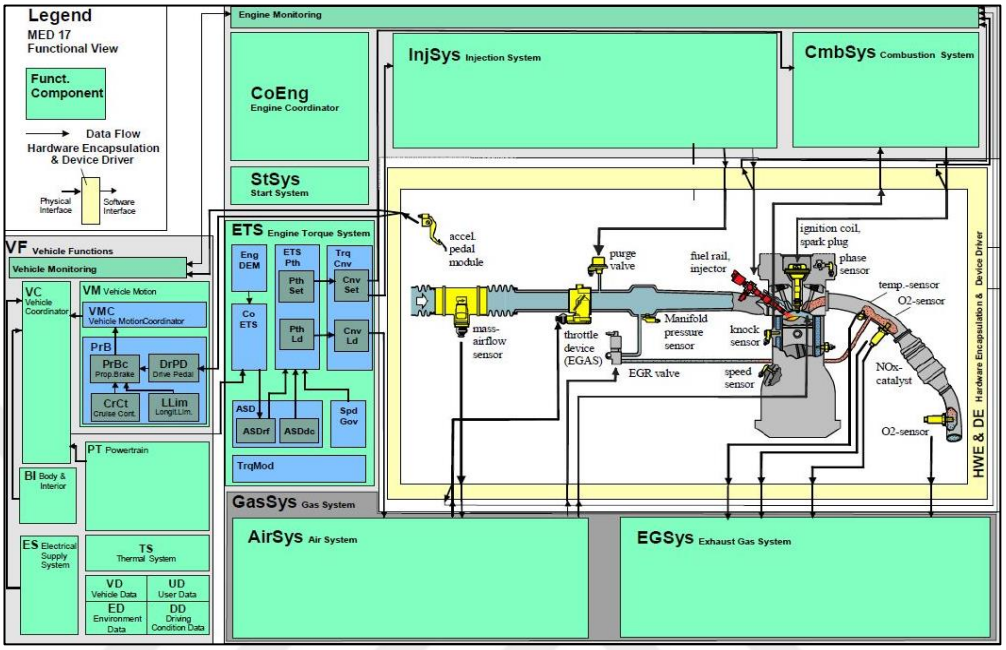
2.2.1. Motor tork kontrolü

İlk EKÜ yazılımlarında, alt sistemler motorda kumanda edilen aksamın ne şekilde çalışacağını birbirinden bağımsız olarak tayin etmekte, oluşan farklı kontrol talepleri düzeltme faktörlerinden geçerek motor aksamına iletilmekteydi. Sistemler arasında koordinasyon bulunmaması, farklı sistemlerin birbiriyle çakışan talepler göndermesine neden olmaktadır. Bosch'un geliştirdiği ME7 yazılımıyla birlikte motor alt sistemleri için ortak parametre olarak indike tork tanımlanmıştır [38]. Motor şaft torku yerine indike torkun ortak parametre olarak tanımlanmasının nedeni, şaft torkunun kumanda edilen sistemlerin kontrolü dışında etkenlerden de etkilenmesidir. Şaft torku M_{shaft}, silindir içi yanma sürecinde oluşan indike tork M_{ind}'den pompalama kayıplarının torka indirgenmiş değeri M_{pump}, motor iç sürtünme torku M_{frict} ve diğer yardımcı ekipmanların çektiği yük M_{aux} çıkartılarak, Denklem (2.1)'deki gibi;

$$M_{shaft} = M_{ind} - M_{pump} - M_{frict} - M_{aux} \quad (2.1)$$

şeklinde hesaplanır. Yazılımda indike tork değerinin parametre olarak kullanılmasıyla, harici sistemlerin (anti patinaj sistemi vb.) doğrudan motor aksamları yerine motor tork kontrol sistemine talep göndermesi yeterli olmaktadır [38]. Tork talebi, yazılımdaki araç fonksiyonları sisteminde bulunan pedal haritasının, motor devri ve pedal pozisyonuna göre doldurulmasıyla oluşmaktadır. Tork talebine seyir kontrolü, hız sınırlayıcı, çekiş kontrolü (araç dinamiği, anti-patinaj vb.) sistemlerinden gelen talepler eklenmektedir. Ardından, vites kontrol sistemi ve diğer elektrik besleme

sistemlerinden gelen talepler eklenerek tork talebi motor tork yapısı (engine torque structure) (ETS) sistemine iletilir. Şekil 2.4'de Bosch'un 2003 yılında devreye aldığı EDC17 yazılımının sadeleştirilmiş yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. EDC17 yazılım mimarisi [39]

ETS sistemine iletilen tork talebi, motor sürtünme haritası ve pompalama kayıpları haritasından gelen sinyallerle indike tork talebine çevrilir; ardından, alternatör, su pompası gibi motor parçalarından gelen talepler eklenir [39]. Tüm talepler toplandıktan sonra, motorun istenen indike torku güvenli şekilde verebilmesi için tork talebi limitasyon kontrollerinden geçirilir. Bu aşamada, sırasıyla yüksek motor devri, aşırı ısınma, yüksek is emisyonu kontrollerine göre indike tork limitlenir. Sonrasında, devir düzensizliği ve rölanti kontrolüne göre indike tork filtrelenir. ETS sisteminin yapısı Ek-A'da verilmiştir.

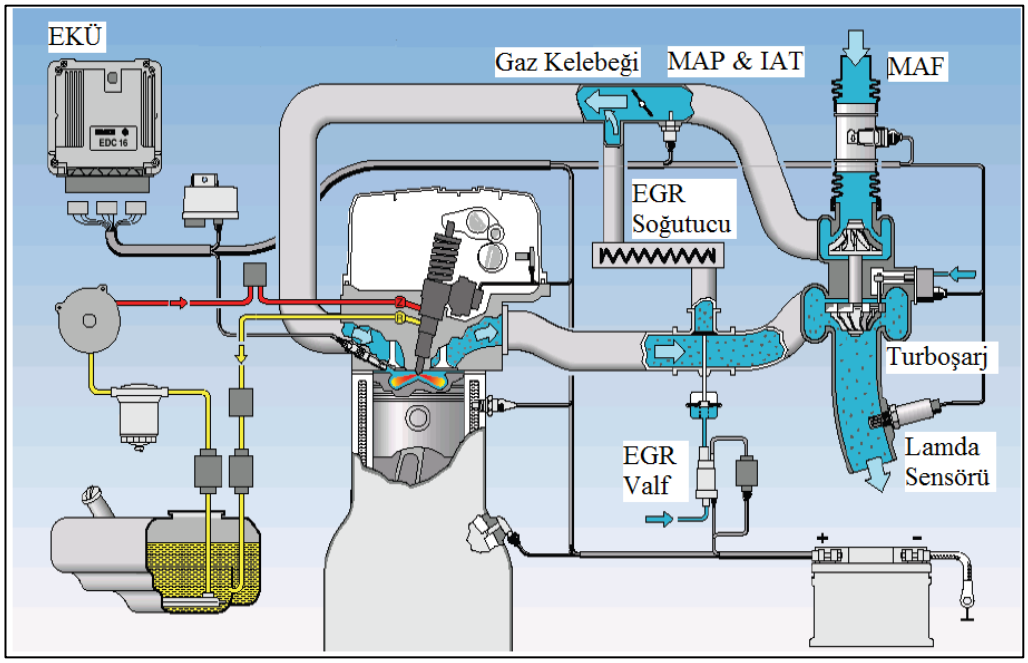
EKÜ yazılımında tanımlanan tork talebi ile gerçek motor torku arasındaki ilişkiyi kurmak için motor tork modeline ihtiyaç bulunmaktadır. Kullanılan EKÜ donanımları yanma tabanlı tork modellemesi için yeterli olmadığından, basitleştirilmiş modeller kullanılmaktadır. Dizel motorda indike torku belirleyen temel parametre yakıt miktarı olduğu için, tork modeli olarak motor devri ve indike torka göre doldurulan yakıt miktar haritaları kullanılır. Modelin doğruluğunu arttırmak için farklı motor sıcaklıkları, farklı enjeksiyon stratejileri (tek enjeksiyon, ön enjeksiyonlu vb.) ve farklı

motor çalışma koşullarına göre (normal, DPF (dizel partikül filtre) rejenerasyonu vb.) yakıt haritaları farklılık göstermektedir.

EDC17 yazılımı sayesinde farklı alt sistemler arasında ortak parametre tanımlanmış ve tork talebi ile gerçek motor torku arasındaki bağlantı kurulmuş olur. Motor indike torkunu etkileyen parametre (EGR oranı, sıkıştırılmış hava basıncı vb.) değişimlerinde tork talebi-fiziksel tork korelasyonu etkileneceğinden, parametre kalibrasyonlarından sonra yakıt miktar haritaları tekrar kalibre edilmelidir. ETS sisteminde yönetilen tork talep sinyali daha sonra hava hattı sistemi ve yakıt sisteminin kontrolünde kullanılmaktadır.

2.2.2. Hava hattı sistemi kalibrasyonu

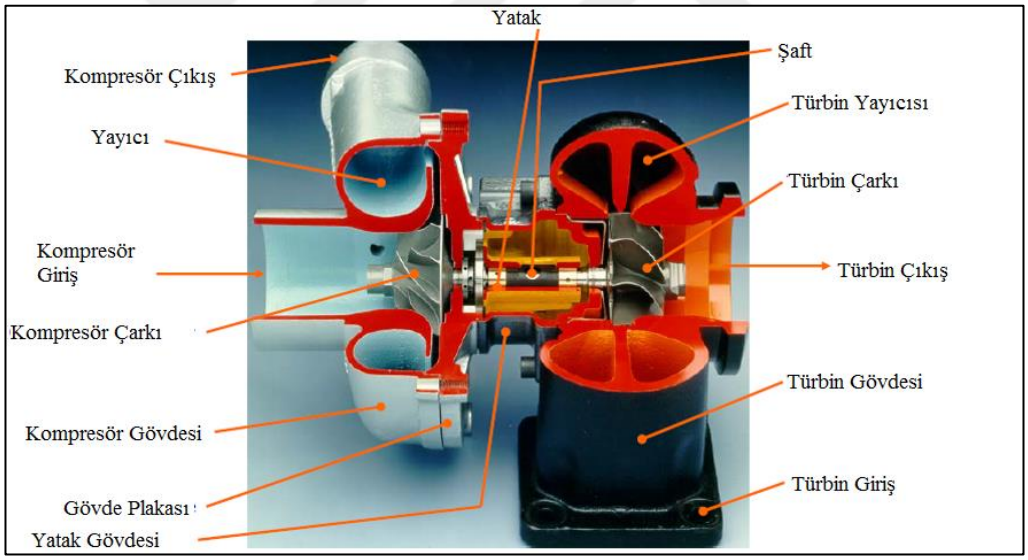
Dizel motorların hava hattı sisteminin kontrolü için EGR valfi, turboşarj ve gaz kelebeği gibi aksamlar kumanda edilir. Motor devri ve torkuna göre haritalandırılan bu komponentlerin kontrolünde sistemde bulunan kütlesel hava akışı (MAF), MAP, giriş hava sıcaklığı ve lambda (oksijen) sensörlerinden gelen geri besleme sinyalleri kullanılır. Motorlarda yakıt ekonomisi ve emisyon iyileştirilmesi için hava kontrol sisteminin optimum kalibrasyonu son derece önemlidir [40]. Dizel motorların hava hattı sisteminin genel yapısı Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Dizel motor hava hattı sistemi [40]

Motorlarda egzoz gazı ile kaybedilen enerjinin geri kazanılarak, yanma odalarına sıkıştırılmış hava iletimini sağlayan üniteye turboşarj denir. Sıkıştırılmış hava yanma odasında oluşan hava hareketlerini arttırarak, yakıtın havayla daha iyi karışmasını sağlar. Böylece, termal verim artarak yakıt tüketiminde iyileşme sağlanır ve HC, CO ve PM emisyonları azaltılmış olur. Ayrıca, sıkıştırılmış hava sayesinde yanma odasına daha fazla yakıt püskürtülerek, doğal emişli motorlara göre birim hacimde daha fazla güç elde edilebilir [41].

Turboşarj ünitesi egzoz manifolduna bağlı türbinden, emilen havayı basınçlandıran kompresörden ve aralarında tahriki sağlayan şafttan oluşur. Kompresör çarkı emdiği havayı gövde içerisinde bulunan yayıcıda basınçlandırır. Basınçlandırma işlemiyle 250 °C sıcaklığa ulaşabilen havanın ara soğutucuda (intercooler) sıcaklığı düşürülerek, yanma odalarına daha fazla miktarda hava alınması sağlanır. Turboşarj ünitesinin yapısı Şekil 2.6'da gözükmektedir.



Şekil 2.6. Turboşarj ünitesinin yapısı [41]

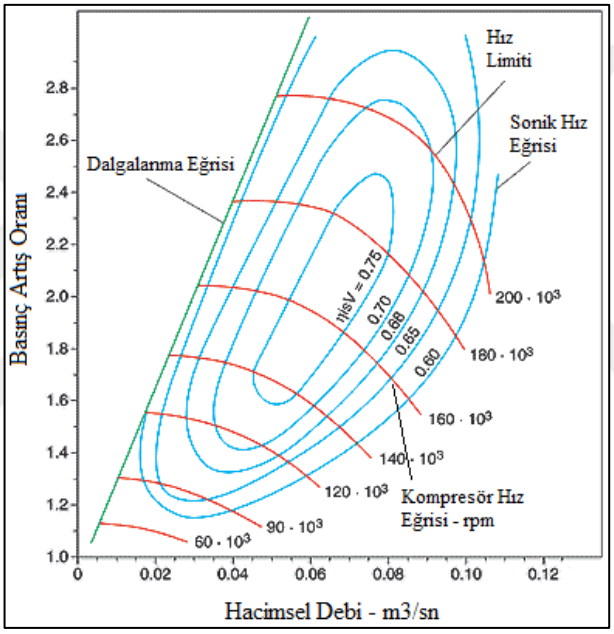
Turboşarj ünitelerin kumanda edilmesinde temel olarak 2 yöntem vardır. Tahliye kontrollü turboşarjlarda, düşük egzoz gazı debisinde daha fazla enerjiden faydalanmak için, tahliye valfi kapatılarak egzoz gazının tamamı türbin çarkına yönlendirilir. Yüksek egzoz gazı debisindeyse türbin hızının veya sıkıştırılmış hava basıncının düşürülmesi için tahliye vanası açılarak egzoz gazının bir miktarının türbin çarkını baypas etmesi sağlanır. Pnömatik kontrollü tahliye valflerinde, bir diyafram aracılığıyla kompresör basıncının eşik değere ulaşmasıyla tahliye valfi kontrol edilir.

Elektronik kontrollü valflerdeyse, pozisyon sensörü sayesinde valfin kademeli olarak kontrol edilmesi mümkün kılınmaktadır. Türbin muhafazasına eklenen kumanda edilebilir kanatçıkların kullanıldığı değişken geometrili turbo (variable geometry turbocharger) (VGT) ise, egzoz gazının türbin çarkına geliş açısı kontrol edilir. Değişken geometrili kanatçıklar kapalı konuma getirilerek egzoz akışının çarka teğet yönde olması sağlandığında, egzoz gazından daha fazla enerji elde edilir. Türbin gücünü düşürmek istendiğinde kanatçıklar açık pozisyona getirilerek, akışın radyal yönde olması sağlanır. Elektronik kumanda sistemiyle VGT tipi turbolar hassas olarak kontrol edilebilmektedir.

Hava yolu kalibrasyonunda turboşarj tasarım limitlerinin sağlanması gerekmektedir, aksi halde konforsuz bir motor kontrolü yaşanır, hatta motorda hasar meydana gelebilir [41]. Turboşarj tasarım limitleri için, özel test ekipmanıyla ya da simülasyon analizleriyle elde edilen kompresör haritaları kullanılmaktadır. Kompresör haritaları, sabit basınç oranında hava debisine bağlı verim eğrilerinin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Sıkıştırma esnasında enerjinin bir kısmı yüksek gaz hızlarında viskozite ile açığa çıkan ısıya dönüştüğünden, türbin gazından iletilen enerjinin tamamı akışkana aktarılamaz. Bu nedenle, motorun kompresör veriminin yüksek olduğu bölgede çalışmasını sağlayacak şekilde kalibrasyon parametreleri belirlenmektedir. Günümüzde otomotivde kullanılan kompresörlerden maksimum %80 civarında verim alınabilmektedir [42]. Şekil 2.7'deki örnek kompresör haritasında görüldüğü üzere, kompresörün çalışma aralığını belirleyen tasarım limitleri sırasıyla hız limiti, dalgalanma eşiği ve sonik hız eşiğidir. Kompresör ve türbin arasında bulunan şaft yatağı çok yüksek hızlarda zarar göreceğinden, kalibrasyon geliştirme çalışmalarında, motorun tüm ömrü boyunca turbo şaft dizayn limitinin aşılmayacağı sağlanmalıdır. Günümüz binek araçlarda kullanılan turboların hız limiti 200.000 devirin üstüne çıkabilmektedir.

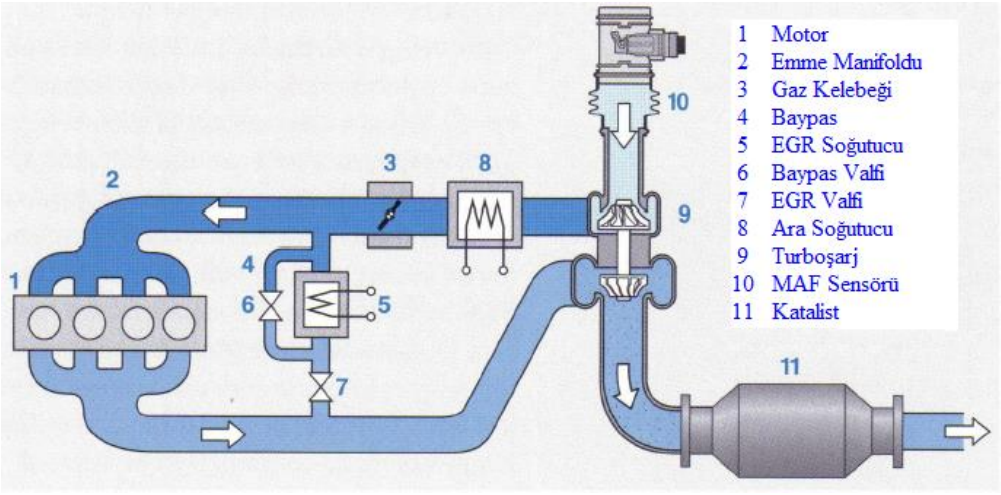
Kompresörün düşük debideki havayı yüksek oranda basınçlandırmasını limitleyen etken kompresör dalgalanmasıdır. Düşük hava akışında yüksek basınç üretmek için çark hızının arttırılması, kanatçık yüzeyindeki basınç kuvvetinin viskoz kuvvetlere baskın gelerek hava akışının çark yüzeyinden ayrılmasına neden olmaktadır. Akışın yüzeyden ayrılmasıyla, sıkıştırma sağlanamaz ve ters yönde kompresör akışı meydana gelir. Ters akış ile yavaşlayan kompresör kendini toparlayarak, istenen

basınçlandırmayı sağlamak için tekrardan hızlanır ve akışın yeniden çark yüzeyinden ayrılmasına neden olur. Bu ani ve devamlı salınım ile motor sarsıntılı çalışır ve kompresör zarar görebilir. Kompresör dalgalanması, dizel motorların düşük devirde yüksek tork almasını engelleyen limitlerden biridir. Diğer bir kompresör tasarım limiti, yüksek hava debisinde ve düşük basınç oranında akışın çark kanatçıkları arasında sonik hıza ulaşmasıyla gerçekleşir. Sonik hızda artık daha fazla hava debisine ulaşılamayacağından kompresörün doğal limitlerine varılmış olur. Kompresörün uzun süre sonik akışta çalışması parça üzerinde hasara sebep olmaktadır, bu nedenle hava sistemi kalibrasyonunda sonik hız eğrisi önemli bir dizayn parametresidir.



Şekil 2.7. Örnek kompresör haritası [41]

Hava sistemindeki diğer önemli ünite NO_X emisyonunu düşürmek için kullanılan EGR sistemidir. Yanmış egzoz gazının bir kısmını soğutucu ve bağlantı boruları ile silindirlere aktarmayı sağlayan EGR sistemi, bir valf aracılığıyla akan gaz miktarını kontrol ederek yanma sıcaklıklarını düşürmektedir. Şekil 2.8'de EGR sisteminin genel yapısı gözükmektedir. Türbin öncesinden alınan yüksek basınca sahip egzoz gazı, motor suyu ile beslenen soğutucudan geçirilerek daha fazla miktarının temiz havayla karışması sağlanır. Soğutucuya eklenen baypas hattı ile EGR gazının sıcaklığı kontrol edilebilir.



Şekil 2.8. EGR sistemi [40]

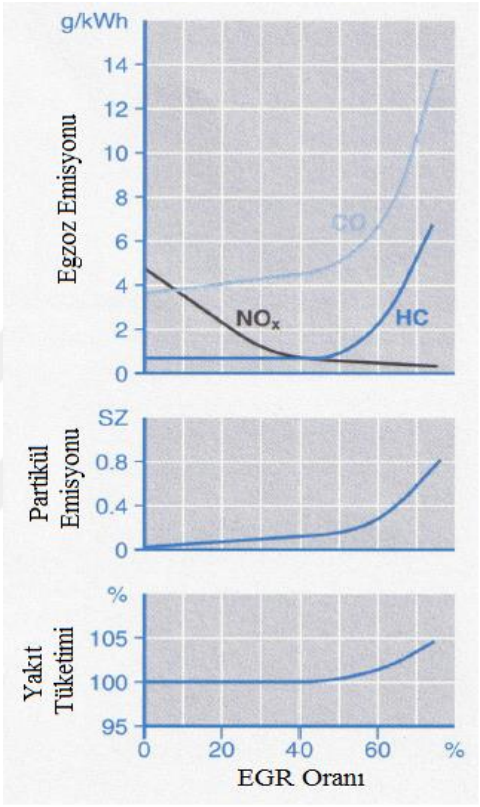
NO_X formasyonu, yüksek yanma sıcaklığında ayrışan N ve O atomlarının genişletilmiş Zeldovich mekanizmasında tanımlanan bir dizi kimyasal tepkimeye girmesi sonucu meydana gelmektedir. NO_X formasyon oranı Denklem (2.2)'deki gibi;

$$\frac{d(NO)}{dt} = K_1[O][N_2] + K_2[N][O_2] - K_{-1}[NO_X][N] - K_{-2}[NO_X][O] \quad (2.2)$$

ifade edilmektedir. K_1 ve K_2 katsayıları, ilgili birleşme tepkimelerine ait sıcaklığa ve tepkime zamanına bağlı oran sabitleridir. Deneysel çalışmalarla bulunan K oran sabitlerinin birimi $m^3/gmol.s$'dir [43]. Formasyon oranı, oran sabitlerinin ilgili tepkime bileşenlerinin derişim miktarları ile çarpılmasıyla belirlenmektedir. Ayrıca, yanma anında NO_X gazının ayrışma tepkimesi de gerçekleşmektedir. Ayrışma tepkimesinde K_{-1} ve K_{-2} oran sabitleri kullanılmaktadır. K oran sabitlerinin değerinin düşürülmesi için yanma sıcaklığı azaltılmalıdır, böylece NO_X formasyonu yavaşlatılabilir. EGR sisteminin kullanılmasıyla da yanma sıcaklığının düşürülmesi amaçlanmaktadır. EGR gazı ile yanma sıcaklığının düşmesinde sırasıyla O_2 oranının düşmesi, egzoz gazının özgül ısısının havanınkinden yüksek olması, EGR'den gelen CO_2 ve su buharının yanma esnasında endotermik ayrışma tepkimesine girmesi ve silindirlere giren kütle miktarının artması etkilidir [44].

EGR sistemiyle NO_X emisyonu düşürülürken PM, CO ve yanmamış HC emisyonlarında artış yaşanır [40]. Alev demetinin merkezi gibi yakıtça zengin bölgelerde yüksek olan PM emisyonu, EGR kullanımına bağlı olarak düşen yanma sıcaklığı ve azalan oksidasyon oranıyla artış göstermektedir. Oksidasyon oranının

düşmesi ve EGR ile silindire taşınan CO_2 gazının ayrışma tepkimesine girmesi de CO emisyonunda artışa neden olmaktadır. EGR kullanımı, dolguyu daha fakir hale getirerek alev demetinin yayılmasını olumsuz etkilediğinden yanmamış HC emisyonunu da arttırır. Ayrıca, EGR kullanımıyla termal verim azalacağı için, yakıt tüketiminde artış meydana gelmektedir. Şekil 2.9'da EGR oranının emisyon gazlarına ve yakıt tüketimine etkisi gösterilmiştir.

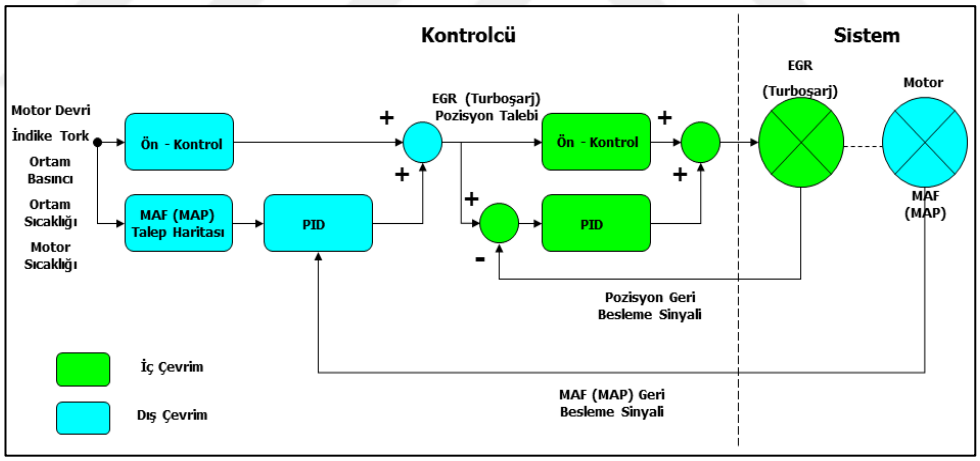


Şekil 2.9. EGR oranının egzoz emisyonlarına ve yakıt tüketimine etkisi [40]

Literatürde, yanma ve emisyon oluşumu üzerine yapılan çalışmalarda EGR oranı tercih edilmesine rağmen, EGR gazının kütlesi motor üzerinde doğrudan ölçülemediği için, kalibrasyon çalışmalarında EGR kontrolü temiz hava miktarı ile sağlanır. EGR oranı, silindirlere giren EGR gaz miktarı m_{EGR}'nin toplam karışıma oranını Denklem (2.3)'deki gibi;

$$\%EGR = \frac{m_{EGR}}{m_{EGR}+MAF} \tag{2.3}$$

ifade etmektedir. EGR ve turboşarj sistemlerinin kontrolünde iç çevrim ve dış çevrim adı verilen iki katmanlı kontrol algoritması kullanılmaktadır [36]. Şekil 2.10'da hava kontrol algoritmasının sadeleştirilmiş yapısı gözükmektedir. Katmanlı yapı sayesinde komponentlerin hava hattında yaşanan gecikme ve salınımlardan en az miktarda etkilenerek kontrolü sağlanmış olur. Motor devri ve yüküne bağlı P, I, D katsayılarının belirlendiği PID kontrolcüsünde, ön kontrol haritası kullanılarak komponentlerin referans alacağı pozisyon değerleri belirlenmiş olur. Böylece, motorun dinamik hareketlerinde komponent pozisyonu öncelikle ön kontrol haritasında belirlenen değere gitmekte, ardından PID kontrolcüsüne göre kontrolü sağlanmaktadır. Komponentlerde kullanılan elektrik motorlarının zarar görmeden güvenli şekilde çalışabildiği aralık %0 ile %100 arasında tanımlanarak EKÜ'nün komponentleri bu aralıkta kumanda etmesi sağlanmaktadır. Sistemin istenen dinamik manevraları sağlayacak hızda ancak fazla salınıma neden olmadan PID parametrizasyonu yapılmalıdır. Yazılımda EGR ve turboşarj aksamlarının bir boyutlu modelleri kullanılarak hava hattı sisteminin kontrolü iyileştirilebilmektedir.



Şekil 2.10. Hava hattı kontrol yazılımının sadeleştirilmiş yapısı

Dış çevrim kontrolündeyse hava sistemi parametrelerinin sağlanması için komponent pozisyon talepleri belirlenmektedir. EGR için dış çevrimdeki geri besleme sinyali MAF sensöründen, turboşarj ünitesi içinse MAP sensöründen alınır. Dış çevrimin talep sinyali motor devri ve indike torka göre doldurulan MAF ve MAP talep haritalarıdır. Hava hattı sisteminde öncelikle, turboşarj kontrolü ile istenen MAP değeri sağlanarak, silindirlere giren sıkıştırılmış hava miktarı belirlenmiş olur. Turboşarj kontrolünün ardından, ikincil kontrol MAF sensörü ile EGR sistemi içindir.

İstenen MAP değeri sağlandıktan sonra, MAF değeri düşürülerek aynı emme manifold basıncı EGR sisteminden aktarılan egzoz gazı ile sağlanır. Böylece, aynı MAP değerinde daha düşük MAF değerleri elde edilmiş olur. MAF değerini düşürmek için gaz kelebeği devreye sokularak EGR sistemine destek olması mümkündür. Gaz kelebeği kısıldığında turboşarj ünitesinin istenen MAP değerini sağlaması için daha çok türbin işi yapacağından, türbin giriş basıncı yükselerek EGR sisteminden daha fazla egzoz gazı aktarılması sağlanır.

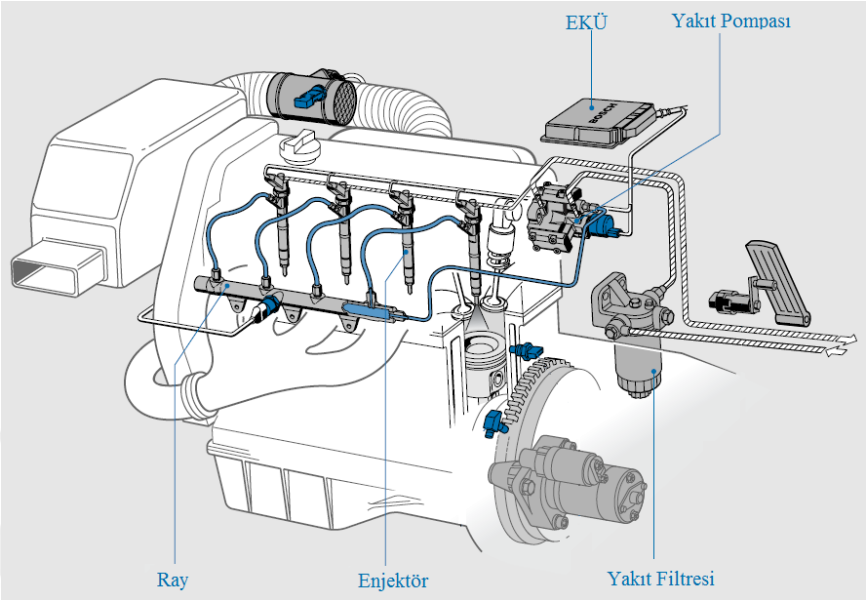
Hava hattı kontrolü farklı ortam koşullarına ve farklı araç koşullarına uygun olacak şekilde yapılmalıdır. Yazılım üzerinde bulunan düzeltme faktörlerinin kalibrasyonuyla her koşulda tasarım limitlerinin sağlanması mümkün olabilmektedir. Örnek olarak, düşük motor sıcaklığında öncelikli hedef motoru ve egzoz sistemini ısıtmak olduğu için, MAP talebi düşük girilerek silindirlere alınan hava miktarı azaltılır ve yanma gazlarının daha yüksek sıcaklığa ulaşması sağlanır. Ayrıca, ortam sıcaklığı ve basıncı gibi dış ortam koşulları değişiklik gösterdiğinde motoru korumak için kalibrasyon haritalarına düzeltme katsayısı gelmektedir. Hava sistemi kontrolünde iç ve dış çevrim kalibrasyonu dinamik kontrol alanına girerken, MAF ve MAP haritalarının doldurulması genel motor kalibrasyonu alanına girmektedir. Motorun düşük yakıt tüketimi, düşük emisyon salınımı gibi hedefleri sağlaması için hava kontrolü kalibrasyonunun hassas bir şekilde yapılması önemlidir.

2.2.3. Yakıt enjeksiyon sistemi kalibrasyonu

Common-rail yakıt enjeksiyon teknolojisi günümüz dizel binek araçlarda en sık kullanılan sistemlerden biridir. Yakıt pompası, ortak hat, enjektörler ve yakıt borularından oluşan sistemde, yakıtın hatta 2.500 bara kadar basınçlandırılmasıyla, enjektörlerin devamlı olarak yüksek basınçlı yakıtla beslenmesi sağlanır. Basınçlı yakıt ortak hatta muhafaza edilerek, yakıt pompasından kaynaklanan basınç dalgalanmaları sönümlenir. Şekil 2.11'de common-rail sistemin yapısı gözükmektedir.

Krank şaftından tahrik edilen yakıt pompasında, eksantrik şaft aracılığıyla silindir içerisinde bulunan pistonlar doğrusal hareket yaparlar. Aşağı yönde hareketiyle yakıtın giriş valfinden geçerek silindirlere dolmasını sağlayan pistonlar, tekrardan yukarı yönde hareket ettiğinde giriş valfinin kapanmasıyla yakıtı sıkıştırır. Piston odasındaki

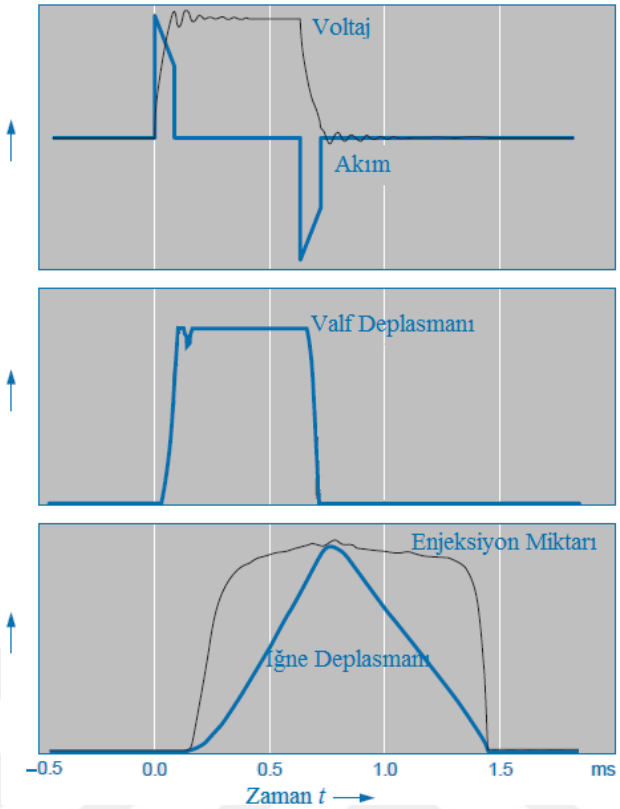
yakıt basıncı hattaki basınç değerine ulaştığında, çıkış valfi açılarak yakıtın yüksek basınç sistemine iletilmesi sağlanır.



Şekil 2.11. Common-rail enjeksiyon sistemi [45]

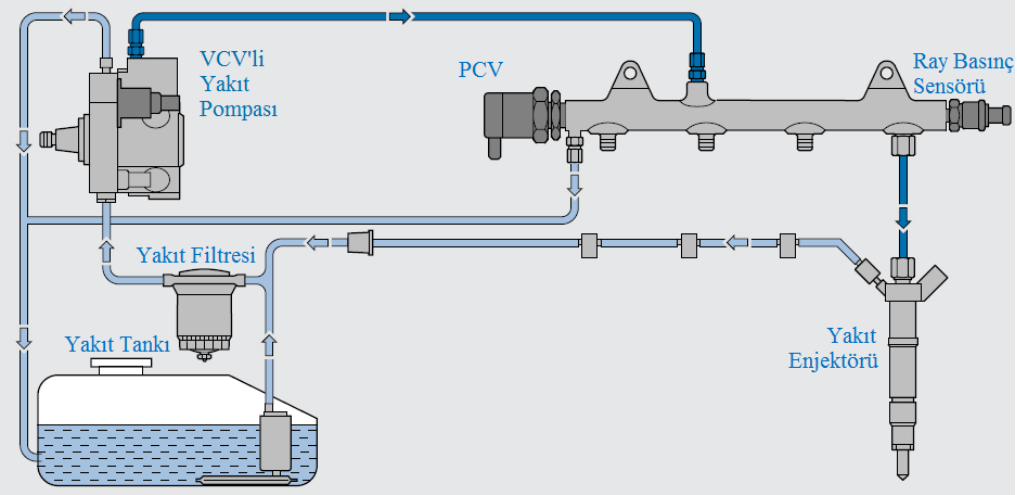
Basınçlandırılan yakıtın yanma odasına püskürtülmesi yakıt enjektörleri ile yapılmaktadır. Dizel yakıtın yanma odasında atomize olması ve yüksek termal verim sağlanması amacıyla, yakıt milimetrenin onda biri çapındaki enjektör deliklerinden yanma odasına püskürtülür. Enjeksiyon miktarı ve zamanlamasının hassas olarak kontrol edilebilmesi için, enjektörler solenoid valf ya da piezoelektrik eleman ile sürülmektedir. Enjektörün sürülmesini sağlayan EKÜ'deki elektronik donanımın enjektör kontrol elemanıyla uyumlu olması gerektiğinden, motorlarda EKÜ ve enjeksiyon sistemi genellikle aynı imalatçı tarafından sağlanmaktadır. Şekil 2.12'de piezoelektrik enjektörün enjeksiyon anındaki akım - voltaj karakteristiği, enjektör elemanlarının hareketi ve enjeksiyon miktarı gösterilmiştir. Voltaj profiliyle oransal olarak değişen piezoelektrik elemanın deplasmanı, enjektör iğnesinin açılmasını ve enjeksiyonun başlamasını sağlamaktadır.

Dizel motor yazılımında enjeksiyon sistemi kontrolü için iki ana sistem vardır. İlk sistemde yüksek yakıt basıncının oluşturulması ve kontrolü sağlanırken, ikinci sistemde enjeksiyonla ilgili olan enjeksiyon adedi, miktarı ve zamanlaması gibi parametreler kontrol edilir.



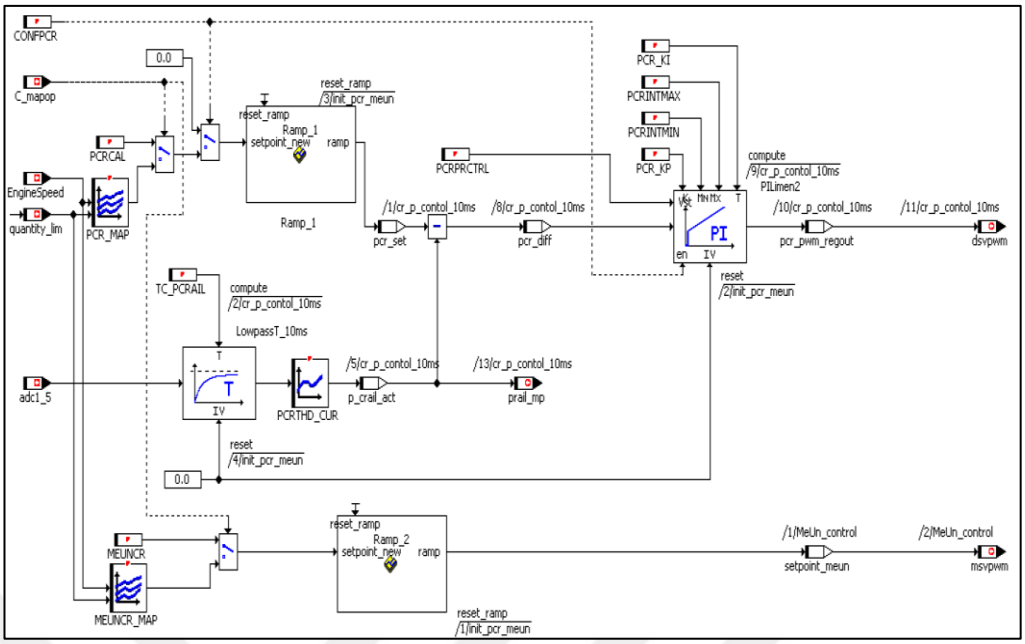
Şekil 2.12. Piezo-elektrik enjektörün enjeksiyon karakteristiği [45]

Kullanılan kontrol valfleri ve pozisyonlarına göre common-rail sistemlerde farklı basınç kontrol konseptleri geliştirilmiştir [45]. Yakıt pompası üzerinde bulunan hacimsel kontrol valfi (volume control valve) (VCV)'ne sahip sistemlerde, pompada bulunan pistonların basınçlandıracağı yakıt miktarı kontrol edilir. Bu sistem sayesinde, motorda ihtiyaç duyulan miktar kadar yakıtın basınçlandırılması sağlanarak, pompanın optimum miktarda güç çekmesi sağlanır. Diğer bir yöntemse yakıt pompasının sabit miktarda yakıtı basınçlandırarak, basınç kontrolünün ortak hat üzerinde bulunan basınç kontrol valfi (pressure control valve) (PCV) tarafından yapılmasıdır. PCV, ortak hattaki fazla yakıtı tanka geri göndererek basıncı kontrol eder. PCV'li sistemler, basınç kontrolü ortak hat üzerinden olduğu için dinamik taleplerde daha iyi performans gösterir. Bazı motorlarda her iki sistemin avantajından yararlanmak için VCV ve PCV birlikte kullanılmaktadır. Şekil 2.13'de iki kontrol valfinin birlikte kullanıldığı yakıt sistemi şeması gözükmektedir. Tüm common-rail sistemlerde basınç kontrolünün sağlanması için ortak hat üzerinde basınç sensörü bulunmaktadır.



Şekil 2.13. VCV ve PCV'ye sahip örnek enjeksiyon sistemi [45]

Hava kontrol sisteminde olduğu gibi, yakıt sistemindeki çoğu kalibrasyon haritası da motor devri ve indike torka bağlıdır. Farklı motor sıcaklığı ve çalışma moduna göre doldurulan basınç kontrol haritalarından çıkan talep değeri rampa fonksiyonundan geçirilerek, ani motor manevraları nedeniyle oluşacak düzensizlikler azaltılır. Yazılımda yakıt hattı basıncını kontrol eden alt sistemin sadeleştirilmiş yapısı Şekil 2.14'de verilmiştir. VCV, basınç talebi ve hat basınç sensöründen gelen geri besleme sinyaliyle çalışan PI kontrolcüsü tarafından yönetilir. Motor devri ve yüküne göre kalibre edilen P ve I katsayıları ile motorun her çalışma noktasında yakıt hattı basıncının hassas şekilde kontrol edilmesi sağlanmaktadır. PCV de açık çevrim kontrolünde çalışarak motor devri ve indike torka bağlı doldurulan pozisyon haritası ile kontrol edilmektedir.

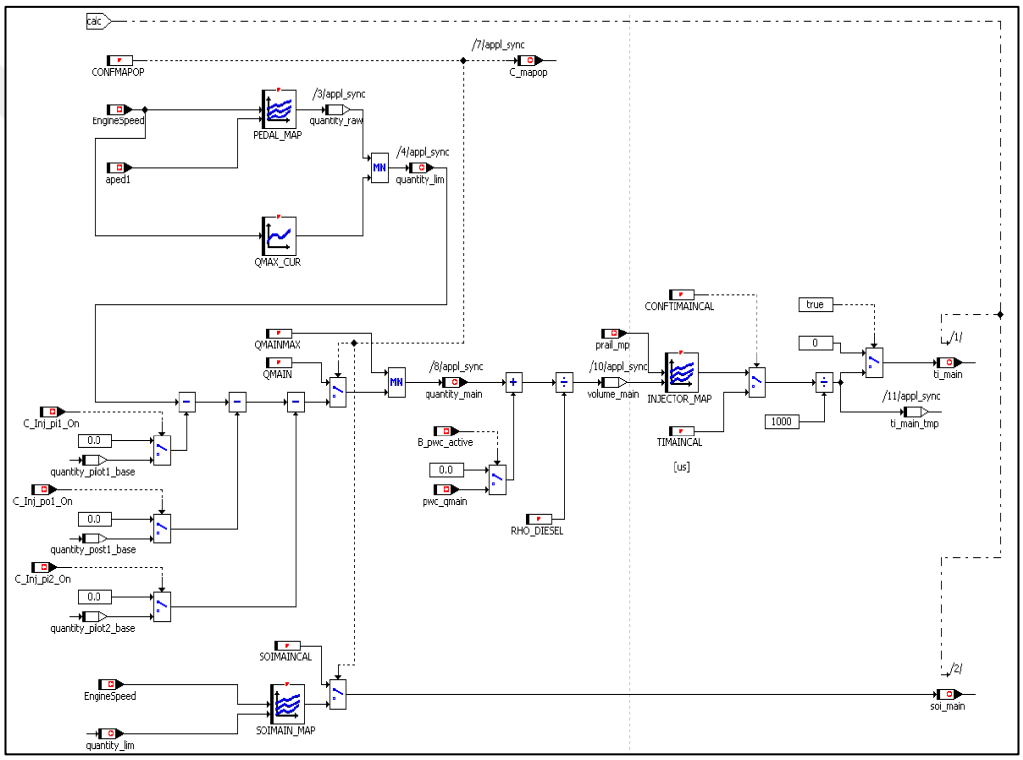


Şekil 2.14. Yakıt basınç kontrol yazılımının sadeleştirilmiş yapısı [36]

Bölüm 2.2.1'de bahsedildiği üzere, motorda istenen tork değerinin sağlanması için gerekli toplam yakıt miktarı enjeksiyon sistemine iletilir. Enjeksiyon kontrol sisteminde belirlenen ön (pilot) ve arka (post) enjeksiyon miktarları toplam miktardan çıkartılarak, ana enjeksiyon miktarı belirlenir. Şekil 2.15'de ana enjeksiyon kontrolünü sağlayan alt sistemin sadeleştirilmiş yapısı gözükmektedir. Kütlesel miktarı belirlenen yakıtın enjektör tarafından püskürtülmesi için, yakıtın hacimsel karşılığının bilinmesi gereklidir. Bunun için, modellenmiş yakıt sıcaklığına bağlı bir eğri ile yakıt yoğunluğu tayin edilerek, püskürtülecek yakıtın hacimsel miktarı tespit edilir. Ardından, imalatçı tarafından doldurulan, hacimsel yakıt miktarı ve hat basıncına göre enjektörün açık kalma süresini veren harita ile enjeksiyon süresi belirlenmiş olur. Üretim varyasyonunu ve yaşlanmadan kaynaklı sapmaları gidermek için enjeksiyon süresine düzeltme faktörü uygulanarak, enjektörlere açık kalma sinyali gönderilir. Enjeksiyon zamanlaması da farklı motor sıcaklığı ve çalışma moduna göre doldurulan haritalar ile kontrol edilir. Motor devri ve indike torka göre krank açısı değerleri haritalara yazılarak, her enjektörün o krank açısında püskürtmeye başlaması sağlanır.

Sürüş konforu ve emisyon azaltma amacıyla dizel motorlarda bir çevrimde 7 adede kadar çoklu enjeksiyon yapılabilir [45]. Yakıtın enjeksiyon sayısı ve enjeksiyonlar arası zamanlamayı tanımlayan enjeksiyon stratejisi ile motorda gücü oluşturulan ana enjeksiyona ilave olarak, ön enjeksiyon ve arka enjeksiyonların kontrolü sağlanır. Ön

enjeksiyon, yanma öncesinde silindir içerisindeki sıkıştırılmış havanın koşullanmasını ve yanma anında ani basınç artışlarının engellenmesini sağlarken, arka enjeksiyon, is emisyonlarının azaltılmasını ve DPF rejenerasyonunda egzoz hattına çiğ yakıt gönderilmesini sağlar. Ön ve arka enjeksiyonların zamanlaması ve miktarları, ana enjeksiyon kontrolünde olduğu gibi motor devri ve indike torka bağlı haritalarla kontrol edilir. Her enjeksiyon için motor sıcaklığı, motor çalışma modu ve enjeksiyon stratejisine göre farklı haritalar vardır. Enjeksiyon miktarları, ana enjeksiyon kontrolündeki gibi enjektör haritası aracılığıyla enjektörlerin açık kalma süresi ile kontrol edilir.



Şekil 2.15. Ana enjeksiyon kontrol yazılımının sadeleştirilmiş yapısı [36]

Kullanılan enjeksiyon stratejileri yazılımda bit sayıları ile tanımlanarak, motor devri, indike tork, su sıcaklığı ve motor çalışma moduna göre strateji kontrol haritalarına girilir. Bu sayede, motorun çalışma noktasına göre enjeksiyon sayılarının değiştirilmesi sağlanır. Tablo 2.2'de farklı ön enjeksiyon stratejilerine karşılık gelen örnek bitsel değerler verilmiştir.

Tablo 2.2. Ön enjeksiyon aktivasyon listesi

Aktivasyon Biti	Ön Enj. - 3	Ön Enj. - 2	Ön Enj. - 1
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	1
4	1	0	1
5	1	0	0
6	1	1	1

3. META-SEZGİSEL OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

3.1. Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon, bir problemin olası çözümleri arasından en iyisinin belirlenmesi işlemidir. Problemin matematiksel olarak ifade edilmesi için, sistem sonucunun skaler parametreler ya da bir takım fonksiyonlar ile ifade edilmesi gerekir. Problemi n boyutlu X uzayında tanımlanan f fonksiyonu ile ifade edecek olursak, fonksiyon girdisi olan λ adet x'in fonksiyonu minimum (ya da maksimum) değerini verecek şekilde tayin ederek optimizasyon işlemi gerçekleştirilir. Optimizasyon problemlerinde x elemanlarının n değişkenlerine göre konumunu veren vektöre nesne parametresi denirken, problemde tanımlanan fonksiyon amaç fonksiyonu olarak adlandırılır [46]. Amaç fonksiyonu optimize edilirken g eşitlik ve/veya h eşitsizlik kısıtlarına uymak, ayrıca nesne parametresini x_l ve x_u ile belirlenen bir aralıkta kontrol etmek gerekebilir. Optimizasyon problemi ve probleme ait kısıt fonksiyonları Denklemler (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4)'deki gibi;

$$f(x) \rightarrow \text{opt.}, \quad x_{i:\lambda}:(u_i,v_i,\ldots)\in X^n \tag{3.1}$$

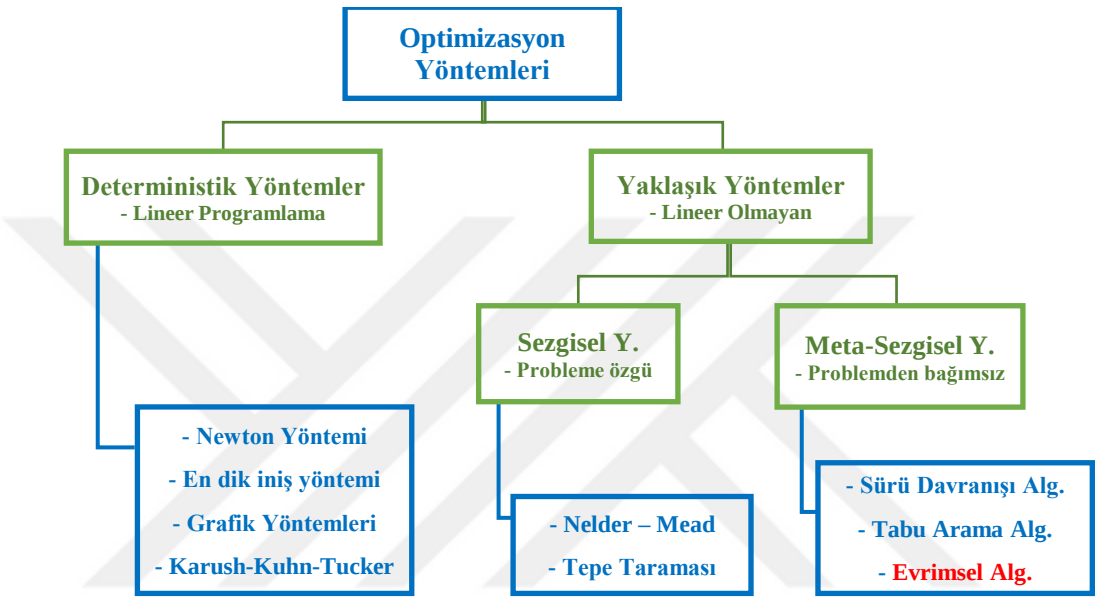
$$g(x_{i:\lambda}) = 0 \tag{3.2}$$

$$h(x_{i:\lambda}) \leq 0 \tag{3.3}$$

$$x_l < x_{i:\lambda} < x_u \tag{3.4}$$

ifade edilmektedir [47]. Optimizasyon yöntemleri problemin tanımı ve değerlendirilme şekillerine göre Şekil 3.1'deki gibi sınıflandırılmaktadır. Lineer problemler için geliştirilen deterministik yöntemlerde fonksiyonun eğim bilgisi kullanılarak problemin en iyi noktası tayin edilmeye çalışılır. Newton yöntemi ve en dik iniş yöntemi deterministik yöntemlere örnek gösterilebilir. Ancak, mühendislik uygulamalarının pek çok alanında lineer olmayan problemler üzerinde çalışılmaktadır [48]. Lineer olmayan problemlerin formülize edilmesi zor ve bazen mümkün olmadığından, deteministik yöntemler bu tür problemlerin optimizasyonunda uygun

değildir. Lineer olmayan problemler için geliştirilen yaklaşık yöntemlerde, fonksiyon ve eğim bilgisi kullanılmadan, nesne parametresine atanan değerler ile problem test edilebilmektedir. Elde edilen ilk set sistem cevabına göre bir sonraki adımda problemin hangi nesne parametresine göre test edileceğine karar verilir. Tarama işlemi problemin artık daha iyi cevap vermediği adıma kadar devam eder ve yakınsanan nesne parametresinin problemin optimum noktası olduğuna hükmedilir[49].



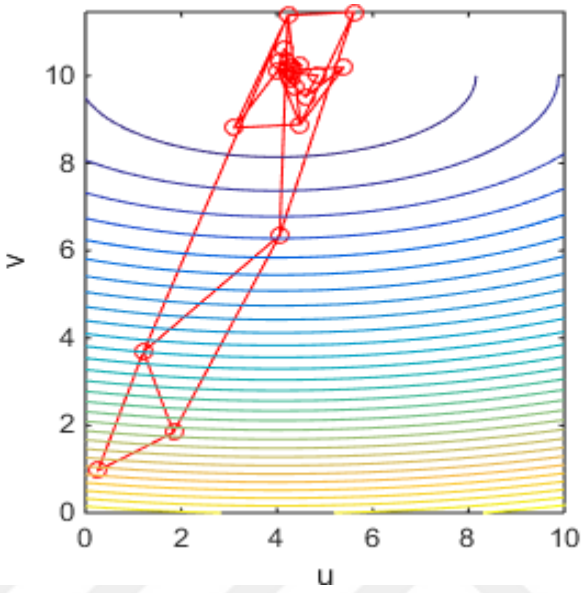
Şekil 3.1. Optimizasyon yöntemlerinin sınıflandırılması [50]

Yaklaşık yöntemler sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler olarak ikiye ayrılır. İki kategoride de problemin matematiksel fonksiyonuna ihtiyaç duyulmaz, ancak kullanılan tarama tekniğinde farklılıklar mevcuttur. Sezgisel yöntemlerde uygulanan başlıca adımlar aşağıda belirtilmiştir [51];

- Nesne parametresinin oluşturulması
- Amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi
- Nesne parametresi ölçeğinin değiştirilmesi

Sezgisel yöntemlerde, nesne parametresinin oluşturulması kullanılan yönteme bağlı olmakla birlikte, parametre boyutu problemin tanımlı olduğu uzaya göre belirlenmektedir. Nesne parametresi oluşturulduktan sonra, ilgili noktalarda sistem test edilerek amaç fonksiyon değerleri elde edilir. Ardından değerlendirme yapılarak, optimum noktanın bulunması muhtemel yönde yeni bir nesne parametresi oluşturulur. Genellikle rastgele eleman oluşumunun yapılmadığı sezgisel yöntemlerde, sistem

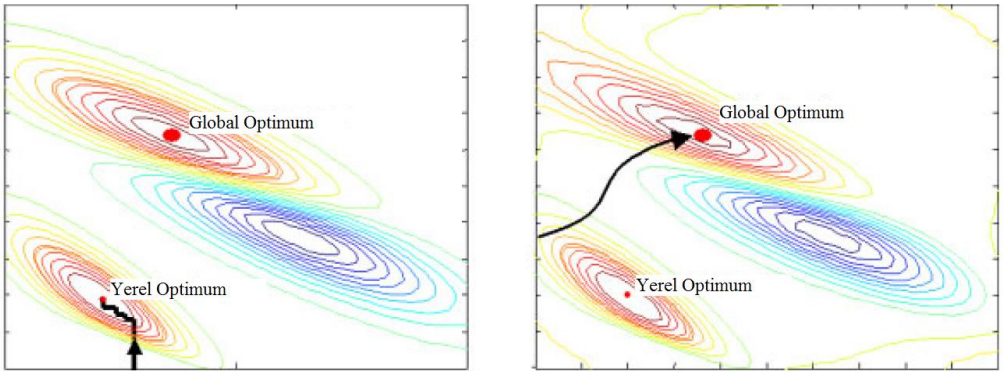
sonucuna göre nesne parametresi ölçeği değiştirilir. Tarama işlemi optimum noktaya yakınsadığında işlem tamamlanmış olur. Şekil 3.2'de Nelder-Mead yöntemi ile 2 boyutlu uzayda tanımlı bir fonksiyonun optimum noktasının tespiti gösterilmiştir[1].



Şekil 3.2. Nelder-Mead yöntemi ile bir matematiksel fonksiyonun optimizasyonu

Sezgisel yöntemlerde nesne parametresinin belirlenmesinde, bir önceki iterasyonda en iyi sistem cevabının alındığı eleman referans alınır. Parametre tayininde herhangi bir rassallık, problemin tipine göre adaptasyon ve parametre elemanları arasında bilgi aktarımı yapılmadığından, bu tarz yöntemler deterministik yaklaşım olarak kabul edilir. Lineer olmayan sistemlerde birden fazla optimum nokta bulunabilmesine rağmen, sezgisel yöntemlerde yakınsanan ilk noktada optimizasyon işlemi tamamlanmaktadır. Yakınsanan noktanın sistemin genel optimum noktası olup olmadığı bilinemediğinden, sezgisel yöntem uygulamalarında problemin iyi tanınması ve kullanılan optimizasyon yönteminin uygunluğu test edilmelidir [1]. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi, birden fazla optimum nokta içeren problem uzayında, başlangıç noktasına göre yakınsanan noktalar farklılık gösterebilir. İçten yanmalı motorlar da çok parametreli ve lineer olmayan sistemler olduğundan, motor kalibrasyonunda daha gelişmiş yöntemler olan meta-sezgisel optimizasyon yöntemi tercih edilmektedir.

[1] Test edilen fonksiyon $f = (u - 4)^2 + 5(v - 10)^2$



Şekil 3.3. Birden çok optimum nokta içeren problem uzayında başlangıç noktasının yakınsanan noktaya etkisi [1]

3.2. Meta-Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri

Birçok optimizasyon probleminde, problemin doğası gereği, her koşulda global optimum noktaya yakınsayan etkin bir algoritma bulunmaz. Bu durum, doğadaki popülasyon davranışlarından esinlenen yeni optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesinde etkili olmuştur. Popülasyon bazlı tekniklerde, problem hakkında az miktarda matematiksel bilgi kullanılarak, optimum nokta popülasyon bireyleri tarafından aranır ve edinilen bilgi popülasyonla paylaşılır [18]. Arama işleminde, taranan bölgedeki optimum noktaya yakınsamak yerine, tarama ölçeği geniş tutularak global optimumun bulunması kolaylaşır. İlk önerildiği zamandan beri, popülasyon bazlı yaklaşımlar mühendislikten sosyal bilimlere kadar farklı alanlardaki problemlere uygulanarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir [17, 52].

Optimizasyon işleminde oluşturulan popülasyonlar, probleme ait nesne parametresini temsil etmektedir. Bunun yanında, popülasyon bireyleri nesne parametresindeki elemanların aldığı değerlere karşılık gelir. Popülasyondaki bireyler amaç fonksiyonu sonuçlarına göre iyi/kötü olarak değerlendirilerek, rassallık ve kullanılan tekniğe ait özellikler ile yeni popülasyon oluşturulur. Tablo 3.1'de doğal hayattaki popülasyon yapısı ile optimizasyon problemi arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Meta-sezgisel yaklaşımlar olarak da adlandırılan popülasyon bazlı yöntemler evrimsel algoritmalar ve sürü davranışı algoritmaları olarak iki gruba ayrılır. Evrimsel algoritmalar, doğal hayattaki güçlü bireylerin yaşaması ve zayıf bireylerin elenmesini temel alarak, çaprazlama, mutasyon ve doğal seçilim mekanizmalarını kullanan bir optimizasyon sınıfıdır. En popüler evrimsel algoritmalar genetik algoritmalar [53],

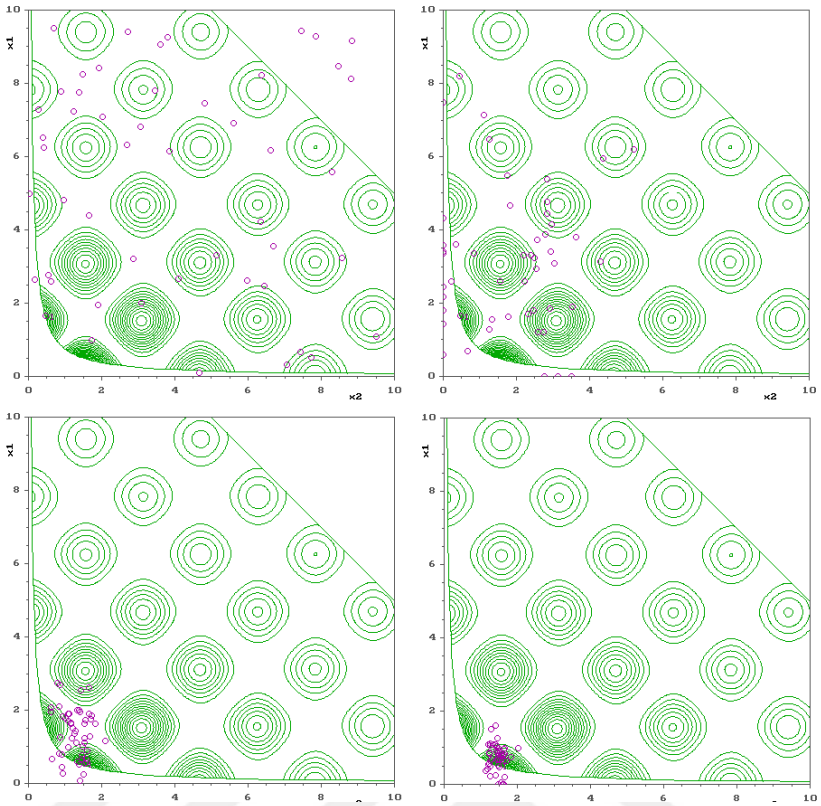
evrimsel algoritmalar [54] ve genetik programlamadır [55]. Evrimsel algoritmada, oluşturulan popülasyonda uygulanan başlıca adımlar aşağıda belirtilmiştir [51];

- Çaprazlama ve mutasyon ile yeni bireylerin oluşturulması
- Bireylerin değerlendirilmesi
- Ebeveyn (en iyi) bireylerin seçilmesi ve zayıf bireylerin elenmesi

Tablo 3.1. Doğal yaşam ile optimizasyon probleminin ilişkilendirilmesi

Doğal Yaşam	Optimizasyon Problemi	Matematiksel İfade
Popülasyonun amacı	Amaç Fonksiyonu	$f(x)$
Popülasyon	Nesne Parametresi	$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$
Birey	Eleman	$x_i = (u_i, v_i)$
Bireye Ait Özellikler	Fonksiyon Değişkenleri	u_i, v_i

Popülasyondaki bireyler aranan kriterlere uygun olarak doğal seçilime tabi tutulurlar. Böylece başarılı bireyler ebeveyn olarak seçilir ve zayıf bireyler elenir. Ebeveyn bireylerin çaprazlanarak oluşturduğu yeni bireylerin, en az ebeveynleri kadar iyi olması sağlanır. Birey oluşumunda rassalık da gözetilerek, çaprazlama işleminde daha iyi özellikler elde edilmeye çalışılır. Evrimsel algoritmalarda bu olguya mutasyon işlemi denir [56]. Sonuç olarak, her popülasyonun bir öncekinden daha iyi olmasına çalışılarak tüm bireylerin istenen başarıda olması sağlanır. Evrimsel strateji türündeki dağılım kestirim algoritması (estimation of distribution algorithm) (EDA) yöntemi ile matematiksel bir fonksiyon üzerinde uygulanan optimizasyon çalışması Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Problem uzayında çok sayıda yerel optimum nokta bulunmasına rağmen algoritma ile global optimum noktaya yakınsama sağlanmıştır.



Şekil 3.4. EDA yöntemi ile bir matematiksel fonksiyonun optimizasyonu [57][1]

Meta-sezgisel yöntemlerdeki bir diğer grup sürü davranışı algoritmalarıdır. Doğada sürü halinde hareket eden hayvanların bireysel hareketleri, sürüdeki diğer hayvanların hareketlerini etkileyerek sürünün amacına daha kolay ulaşmasını sağlar. Bu yaklaşım baz alınarak, nesne parametresindeki her elemanın diğer elemanlarla bilgi paylaşımı içerisinde optimum noktayı bulmasını sağlayacak sürü davranışı algoritmaları geliştirilmiştir. En bilinen sürü davranışı algoritmaları karınca koloni optimizasyonu [58], PSO [59] ve yapay arı koloni optimizasyonudur [60]. Sürü davranışı algoritmalarında temel olarak aşağıdaki adımlar uygulanır [59];

- Her bireyin mevcut ve önceki popülasyonlara göre en iyi pozisyonunun bulunması
- Mevcut popülasyondaki genel en iyi pozisyonun bulunması
- Bireylerin pozisyon ve hızlarının belirlenmesi
- Bireylerin değerlendirilmesi

[1] Keane fonksiyonu: $f = -\frac{\sin^2(x_1-x_2)\sin^2(x_1+x_2)}{\sqrt{x_1^2+x_2^2}}$, $0 \leq x_i \leq 10, i = 1,2$

Evrimsel algoritmadan farklı olarak, sürü davranışı optimizasyonunda zayıf bireyler elenip yeni bireyler meydana gelmez. Bunun yerine, popülasyondaki tüm bireylerin kendi en iyi pozisyonlarına ve sürüdeki en iyi pozisyona sahip bireye göre rassallık içerisinde yeni pozisyonlar belirlenir. Sürü hareketi popülasyon içerisinde haberleşmeden etkilendiğinden, kullanılan haberleşme tekniği optimizasyonda önemli bir parametredir [59]. Tüm bireylerin birbirleriyle haberleşmesi, en iyi bireyin baskın gelerek sürüyü yerel minimum noktaya yakınsamasına neden olacağından, genelde bireylerin sadece yakın elemanlarla iletişim kurmaları sağlanır.

Meta-sezgisel yöntemler, içten yanmalı motor kalibrasyonu optimizasyonunda sıklıkla tercih edilmektedir. Bölüm 3.3'de evrimsel algoritmalar sınıfındaki evrimsel stratejinin özelleştirilmiş bir versiyonu olan CMA-ES yöntemi anlatılacaktır.

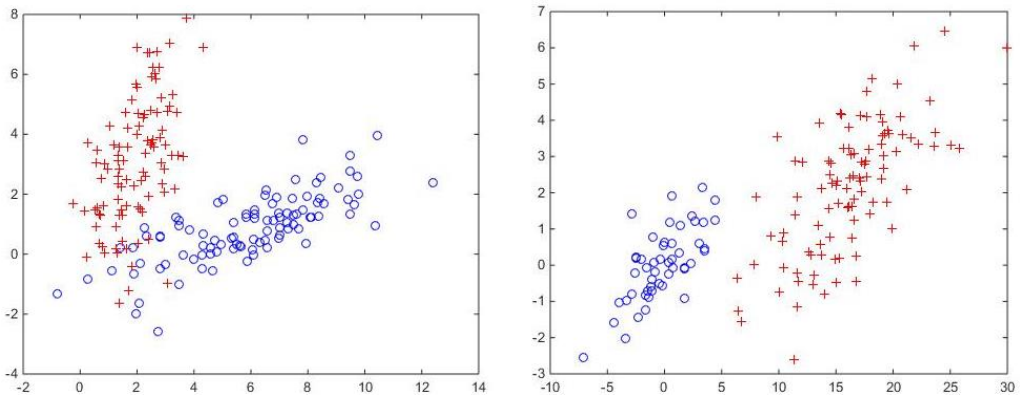
3.3. CMA-ES Yöntemi

CMA-ES evrimsel hesaplamaya dayalı geliştirilen en başarılı yöntemlerden biridir. Popülasyon dağılımının kovaryans matrisi ile belirlendiği ikinci dereceden bu yaklaşım endüstriyel uygulamalarda ve araştırma laboratuvarlarında sıklıkla kullanılmaktadır [61]. CMA-ES yönteminin ait olduğu ES algoritmaları ilk olarak Berlin TÜ öğrencileri tarafından geliştirilmiştir [62]. Evrimsel stratejilerde popülasyon oluşumunda iki yöntem mevcuttur[1];

- $(\mu + \lambda)$-ES: $\mu + \lambda$ bireyli popülasyondaki en zayıf λ birey elenir ve bir sonraki popülasyon için yeni λ birey çaprazlanır.
- (μ, λ)-ES: λ bireyli popülasyondaki en iyi μ elemana göre λ elemanlı yeni bir popülasyon çaprazlanır.

Optimizasyon yöntemlerinde popülasyon pozisyonunu veren nesne parametresinden farklı olarak, ES yöntemlerinde popülasyon karakteristiğini tanımlayan strateji parametreleri kullanılmaktadır. CMA-ES yönteminde kullanılan strateji parametreleri kovaryans matrisi ve adım boyutudur. Şekil 3.5'de, farklı kovaryans matrisi ve adım boyutu değerlerine göre oluşturulan örnek popülasyonlar gösterilmiştir.

[1] CMA-ES yönteminde (μ, λ)-ES yaklaşımı kullanılmaktadır.



Şekil 3.5. Farklı kovaryans matrisi ve adım boyutuna sahip popülasyonlar a) Farklı kovaryans matrisi b) Farklı adım boyutu

Geliştirilen ES yöntemlerinde, daha başarılı bireylerin bulunması için kovaryans matrisi ve adım boyutu parametrelerinin oluşturulması ve optimizasyon sürecindeki adaptasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Rechenberg'in geliştirdiği ES sınıfındaki yöntem, adaptasyon yaklaşımına örnek gösterilebilir [63]. (1, λ)-ES yapısındaki bu yöntemde popülasyondaki λ eleman arasından en iyi bireyin pozisyonu ve standart sapması yeni popülasyon için seçilerek, adaptasyon Denklemler (3.5) ve (3.6)'daki gibi;

$$\sigma_k^{(g+1)} = \sigma^{(g)} \exp(\xi_k) \tag{3.5}$$

$$x_k^{(g+1)} = x^{(g)} + \sigma_k^{(g+1)} N(0,I) \tag{3.6}$$

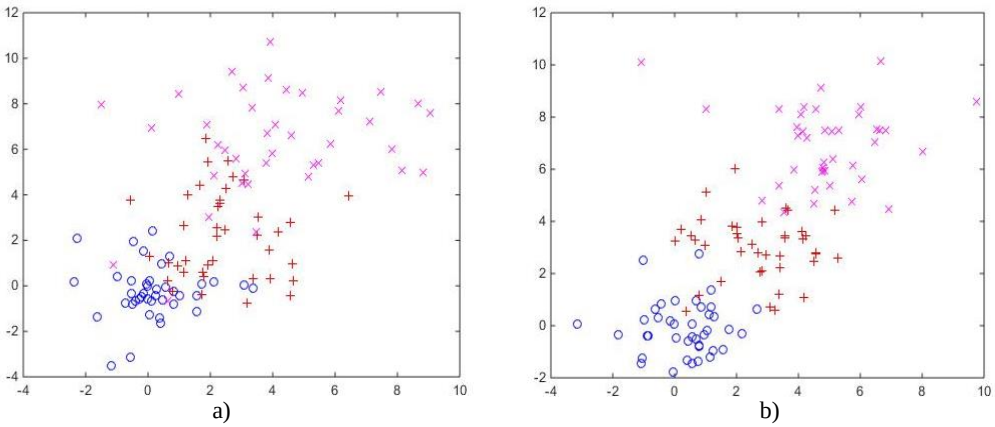
şeklinde tanımlanır. $\sigma_k^{(g)}$ ve $x_k^{(g)}$ sırasıyla g. popülasyondaki k numaralı bireyin adım boyutunu ve konumunu ifade etmektedir. ξ_k, k numaralı birey için oluşturulan rastgele sayıdır. N(0,I) de, merkezi 0 noktasında bulunan ve kovaryans matrisi birim matrise eşit normal dağılımdır. Ebeveyn bireyin adım boyutu, problem uzayında normal dağılımlı rastgele sayılarla çarpılarak yeni popülasyon bireylerinin adım boyutları bulunur. Ardından, ebeveyn bireyin pozisyonu dağılımın merkezi olacak şekilde, her bireyin adım boyutu normal dağılımlı birim matris ile çarpılarak yeni popülasyonun nesne parametresi oluşturulur. Şekil 3.6a'da iki boyutlu uzayda adaptif strateji parametresiyle oluşturulan normal dağılımlı popülasyonlar gözükmektedir. Her yeni popülasyonda, ilgili ebeveyn bireyin adım boyutuna bağlı olarak, popülasyon dağılımı artmıştır.

Strateji parametreleri konfigürasyonu, popülasyon elemanlarının daha iyi sonuç vereceği şekilde yapılmalıdır. Rechenberg'in geliştirdiği normal dağılımlı ES yöntemi her popülasyonda daha iyi bireylerin çaprazlanması için yeterlidir, ancak gerekli hızda olmayabilir. Strateji parametrelerinin rassal olmayan dağılım elde edecek şekilde ayarlanmasıyla, iyi bireylerin çaprazlanması hızlandırılabilir [64]. Rassal olmayan strateji parametreleri ile iyi ve kötü popülasyon elemanları arasındaki fark belirginleştirilir ve daha iyi sistem cevabı verecek nesne parametresi elde edilir. Rassal olmayan dağılımlı evrimsel strateji için (1, λ)-ES yapısındaki Denklemler (3.7) ve (3.8);

$$\sigma_k^{(g+1)} = \sigma^{(g)} \exp\left(\frac{\xi_k}{d}\right) \tag{3.7}$$

$$x_k^{(g+1)} = x^{(g)} + \sigma^{(g)} \exp(\xi_k) N(0,I) \tag{3.8}$$

olarak geliştirilmiştir [64]. Rassal olmayan dağılım yöntemiyle, popülasyonun mutasyon yatkınlığı (dağılımın standart sapması) ile bireylerin adım boyutu değişimi birbirinden bağımsız olarak kontrol edilir. Adım boyutunun belirlenmesinde d sönümleme oranı kullanılarak, yeni popülasyon bireylerine ait adım boyutlarının, önceki popülasyondaki ebeveyn bireye benzer olması sağlanır [56]. Böylece, başarılı bireylerin yeni birey oluşumundaki etkisi arttırılır. Ayrıca, tüm popülasyonun dağılımı sadece başarılı bireyin adım boyutuna göre yapılmasıyla, mutasyon yatkınlığı düşürülmeden popülasyonun çaprazlanması sağlanır. Bu yaklaşım ile ebeveyn bireylere ait özelliklerin yeni popülasyonlara aktarılması kolaylaşır ve başarılı bireylerin tespiti hızlanır. Şekil 3.6b'de rassal olmayan strateji parametreleri ile oluşturulan popülasyonlar gösterilmiştir. Popülasyon dağılımlarının, rassal dağılımlara göre daha kontrollü ve belirli bir yönde olduğu gözükmektedir.



Şekil 3.6. Rassal ve rassal olmayan popülasyonlar a) Rassal dağılımlı b) Rassal olmayan dağılımlı

Hızlı bir optimizasyon işlemi için en uygun strateji parametreleri, optimizasyon probleminin çeşidine ve hatta problemin farklı adımlarına göre değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, optimizasyon işleminde strateji parametrelerinin adaptasyonu ile optimum noktaya daha hızlı yakınsanabilir. Hansen ve Ostermeier tarafından geliştirilen CMA-ES yönteminde, rassal olmayan dağılımların adaptif strateji parametreleri ile oluşturulması sağlanmıştır [56]. CMA-ES yönteminde, λ bireye sahip bir popülasyonun nesne parametresinin belirlenmesi için, μ ebeveyn bireyin konumlarının ağırlıklı ortalaması alınarak yeni popülasyonun merkezi belirlenir[1]. Ardından, dağılımın strateji parametreleri olan C kovaryans matrisi ve σ adım boyutu ile popülasyonun problem uzayındaki dağılımı ve popülasyonun mutasyon yatkınlığı belirlenir. (μ_w, λ)-ES yapısındaki algoritmanın nesne parametresi Denklem (3.9)'daki gibi;

$$x_k^{(g+1)} = \langle x \rangle_w^{(g)} + \sigma^{(g)} N\left(0, C^{(g)}\right) \tag{3.9}$$

şeklinde verilmiştir [56].

[1] Ebeveyn birey pozisyonlarının ağırlıklı ortalaması $\langle x \rangle_w^{(g)} = \left(\sum_{i=1}^{\mu} w_i x_{i:\lambda}^{(g)}\right) / \left(\sum_{i=1}^{\mu} w_i\right)$ denklemiyle bulunur. w ağırlık oranları Tablo 3.2'ye göre belirlenir.

Tablo 3.2. CMA-ES strateji parametreleri [65]

Parametreler	Değerler
λ	$4+\lfloor 3 \ln n \rfloor$
μ	$\lfloor \lambda/2 \rfloor$
$w_i, \quad i=1,\ldots,\mu$	$\ln(\lambda/2+0.5) - \ln i$
μ_{eff}	$\frac{1}{\sum_{i=1}^{\mu} w_i^2}$
c_c	$\frac{4+\mu_{eff}/n}{n+4+2\,\mu_{eff}/n}$
c_1	$\frac{2}{(n+1.3)^2+\mu_{eff}}$
c_μ	$\min\left(1-c_1, 2\frac{\mu_{eff}-2+1/\mu_{eff}}{(n+2)^2+\mu_{eff}}\right)$
c_σ	$\frac{\mu_{eff}+2}{n+\mu_{eff}+5}$
d_σ	$1+2\max\left(0, \sqrt{\frac{\mu_{eff}-1}{n+1}}-1\right)+c_\sigma$

Optimizasyon işlemlerinin performans değerlendirmesinde, sadece son adıma göre karar vermek yerine, önceki tüm popülasyonların gelişim biçimini incelemek gerekmektedir. Benzer şekilde, optimizasyonu hızlandıracak strateji parametreleri belirlenirken, optimizasyon süresince oluşmuş popülasyonların davranışı dikkate alınmalıdır. Bunu sağlamak için, popülasyon pozisyonlarını ifade eden gelişim vektörü tanımlanmıştır [66]. Optimizasyon işlemindeki ardışık tüm adımların toplamı olarak nitelendirilen gelişim vektörü sayesinde, dağılımda daha başarılı bireylerin oluşmasını sağlayacak strateji parametreleri belirlenir. g numaralı popülasyona ait $p^{(g)}$ gelişim vektörü Denklem (3.10)'daki gibi ifade edilerek;

$$p^{(g+1)} = (1-c)p^{(g)} + \sqrt{c(2-c)}z_{sel}^{(g+1)} \tag{3.10}$$

önceki popülasyonların gelişim vektörünü üstel oranda etkilemesi sağlanmıştır. Gelişim vektörü öğrenme oranı $0 < c \leq 1$ olarak seçilerek, gelişim vektörünün önceki popülasyonlardan etkilenme oranı kontrol edilir. Öğrenme oranı c küçüldükçe, önceki popülasyonların gelişim vektörüne etkisi artar ve strateji parametreleri özelinde kullanılan son adımdaki mutasyon vektörü $z_{sel}^{(g+1)}$'nin etkisi azalır. Popülasyonların mutasyon yatkınlığı birbirine paralel olduğunda, gelişim vektörü büyüyecek; birbirine

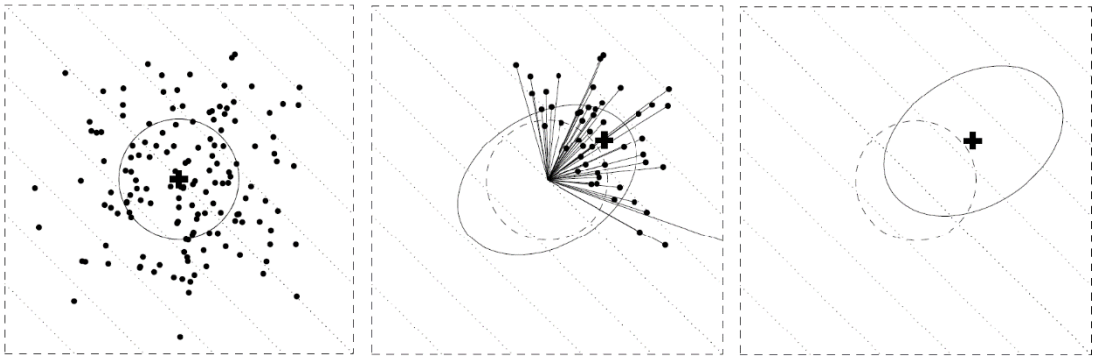
dik yönde olduğunda da, gelişim vektörü küçülecektir. Ancak, bu iki durum da istenen bir şey değildir. Çünkü vektörün büyük olması daha fazla mutasyon yatkınlığına ve vektörün küçük olması daha düşük mutasyon yatkınlığına ihtiyaç olduğu anlamına gelir [56]. Bu nedenle, kovaryans matrisi ve adım boyutunun belirlenmesinde, gelişim vektörü transpozesi ile çarpılarak strateji parametreleri adaptif hale getirilmiştir.

Kovaryans matrisi, bir dağılımdaki değişkenlerin varyansını ve değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlayan simetrik matristir. CMA-ES yönteminde, popülasyonların başarılı bireylere sahip olması için, kovaryans matrisi ile dağılımlar kontrol edilir. g+1 numaralı popülasyonun kovaryans matrisi $C^{(g+1)}$ sırasıyla son popülasyonun kovaryans matrisi $C^{(g)}$, rank-bir matrisi ve rank-μ matrislerinin toplanmasıyla Denklemler (3.11) ve (3.12)'deki gibi;

$$C^{(g+1)} = \left(1-c_1-c_\mu\right) C^{(g)} + c_1 \underbrace{p_c^{(g+1)}\left(p_c^{(g+1)}\right)^T}_{\text{rank-bir matrisi}} + c_\mu \underbrace{\sum_{i=1}^{\mu} w_i y_{i:\lambda} y_{i:\lambda}^T}_{\text{rank-}\mu\text{ matrisi}} \tag{3.11}$$

$$y_i = \left(\frac{x_{i:\lambda}^{(g)} - \langle x \rangle_w^{(g)}}{\sigma^{(g)}}\right) \tag{3.12}$$

şeklinde oluşturulur. Kovaryans matrisi gelişim vektörü $p_C^{(g+1)}$'in transpozesi ile çarpılarak oluşturulan rank-bir matrisi, önceki başarılı popülasyonların yeni dağılımı belirlemesini sağlar. Diğer taraftan, mevcut popülasyondaki ebeveyn bireylerin kovaryansını veren rank-μ matrisi de, son popülasyonun en başarılı bireylerinin yakınsamayı kontrol etmesine olanak verir. Böylece, yerel minimumlardan daha az etkilenerek, global optimum noktaya ulaşmak kolaylaşırken, dağılımların da ebeveyn bireylerin fazla olduğu yönde olması sağlanır [67]. Öğrenme oranları $0 < c_1 + c_\mu \leq 1$ olacak şekilde, rank-bir ve rank-μ matrislerinin kovaryans matrisine etkisi kontrol edilir. c_1 ve c_μ değerleri Tablo 3.2'ye göre belirlenir. Şekil 3.7'de iki boyutlu uzayda kovaryans matrisinin belirlenmesi ve yeni bir dağılımın oluşumu gösterilmiştir.



a) b) c)

Şekil 3.7. Popülasyon oluşumu a) Normal dağılımlı popülasyon b) Ebeveyn bireyler ve yeni popülasyonun kovaryans matrisi c) Yeni popülasyon [67]

Denklem (3.13)'de gelişim vektörünün kovaryans matrisi için özelleştirilmiş hali;

$$p_C^{(g+1)} = (1-c_C)\, p_C^{(g)} + \frac{\sqrt{c_C(2-c_C)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\mu} w_i^2}} \cdot \frac{\langle x\rangle_w^{(g+1)} - \langle x\rangle_w^{(g)}}{\sigma^{(g)}} \tag{3.13}$$

şeklinde verilmiştir. Denklem (3.10)'daki $z_{sel}^{(g+1)}$ yerine mutasyon adımının ağırlıklı ortalaması kullanılarak, gelişim vektörünün kovaryans matrisi hesabına dahil edilmesi sağlanır [67]. Önceki popülasyonların kovaryans matrislerinin gelişim vektörüne etkisini belirleyen öğrenme oranı c_C için uygun değer Tablo 3.2'de verilmiştir. Kovaryans matrisine göre dağılım oluşturmak için lineer cebirden faydalanılır. Kovaryans matrisinin öz değerlerinin karekökü alınarak oluşturulan D_{nxn} köşegen matrisi, normal dağılımlı λ adet rastgele birim vektör z_k ile çarpılarak problem uzayının eksenleri doğrultusunda bir popülasyon oluşturulur[1]. Ardından, kovaryans matrisin öz vektörleri ile oluşturulan B_{nxn} ortogonal matrisi ile döndürme işlemi gerçekleştirilir[2]. Kovaryans matrisinin en büyük öz vektörü popülasyon dağılımın en fazla olduğu yönü belirlemektedir. Denklemler (3.14) ve (3.15) ile sırasıyla popülasyon dağılımı ve nesne parametresi;

$$N\left(0,C^{(g)}\right) = B^{(g)}D^{(g)}z_k^{(g+1)} \tag{3.14}$$

$$x_k^{(g+1)} = \langle x\rangle_w^{(g)} + \sigma^{(g)}B^{(g)}D^{(g)}z_k^{(g+1)} \tag{3.15}$$

[1] Köşegen matris, ilk köşegeni dışındaki tüm elemanları 0 olan matristir.

[2] Ortogonal matris, transpozesi ile tersi eşit olan kare matristir.

şeklinde elde edilir [56][1]. CMA-ES yöntemindeki diğer strateji parametresi, dağılımın mutasyon yatkınlığını belirleyen σ adım boyutudur. Kovaryans matrisi ile dağılımın şekli bulunduktan sonra, adım boyutu ile çarpılarak dağılımın varyansı bulunur. g+1 numaralı popülasyona ait adım boyutu $\sigma^{(g+1)}$'in popülasyon oluşumundaki adaptasyonu Denklem (3.16)'daki gibi;

$$\sigma^{(g+1)} = \sigma^{(g)} \exp\left(\frac{c_\sigma}{d_\sigma} \cdot \frac{\|p_\sigma^{(g+1)}\| - \hat{x}_n}{\hat{x}_n}\right) \tag{3.16}$$

olarak tanımlanmıştır. Adım boyutu, gelişim vektörü $p_\sigma^{(g+1)}$ ile normal dağılımlı birim vektörün beklenen değerinin kıyaslanmasıyla belirlenir. Olasılık kuramı açısından beklenen değer, rassal bir değişkenin alabileceği değerlerin gerçekleşme olasılığına göre ağırlıklı ortalaması olarak tanımlanır[2]. Gelişim vektörünün uzunluğu beklenen değer $\hat{x}_n$'den büyükse adım boyutu büyüyecek, beklenen değerden küçükse adım boyutu küçülecektir. Böylece, gelişim vektörünün tanımında olduğu gibi, adım boyutunun geçmiş popülasyonların davranışlarına göre adaptasyonu sağlanır [67].

Gelişim vektörü öğrenme oranı ve adım boyutu sönüm oranı $0<c_\sigma<1$ ve $d_\sigma \geq 1$ olacak şekilde uygun değerler Tablo 3.2'de verilmiştir. Gelişim vektörü ile adım boyutunun adaptasyonu sayesinde optimizasyon işlemi oldukça hızlanır. Adım boyutu gelişim vektörü Denklem (3.17)'deki gibi;

$$p_\sigma^{(g+1)} = (1-c_\sigma)\, p_\sigma^{(g)} + \frac{\sqrt{c_\sigma(2-c_\sigma)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\mu} w_i^2}} \cdot \frac{\langle x \rangle_w^{(g+1)} - \langle x \rangle_w^{(g)}}{\sigma^{(g)} \cdot D^{(g)}} \tag{3.17}$$

şeklinde tanımlanmıştır [67]. Adım boyutu gelişim vektörü Denklem (3.13)'e oldukça benzerdir, ancak paydaya $D^{(g)}$ matrisi eklenerek, gelişim vektörünün yönden bağımsız olması sağlanır. Optimizasyon işleminde ilk popülasyonun oluşumu için popülasyon boyutu, ebeveyn sayısı, dağılımın merkezi ve adım boyutu probleme göre belirlenmelidir. Gelişim vektörleri ve kovaryans matrisi için başlangıç değerleri Denklemler (3.18) ve (3.19)'daki gibi;

---

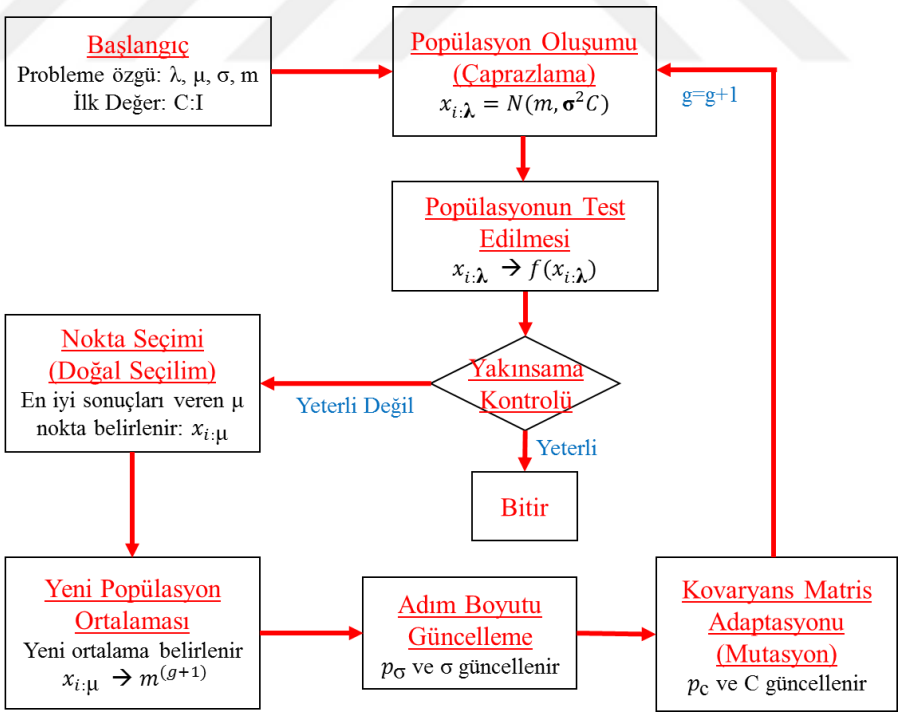
[1] Optimizasyon algoritması MATLAB programında hazırlanmıştır. MATLAB'deki mvnrnd komutu kullanılarak öz değer ve öz vektör hesabı yapılmadan dağılım elde edilmiştir.

[2] Normal dağılımlı birim vektörün beklenen değeri $\hat{x}_n = \sqrt{n}(1 - 1/4n + 1/21n^2)$ şeklinde kabul edilir [50].

$$p_C^{(0)} = p_\sigma^{(g)} = 0 \tag{3.18}$$

$$C^{(0)} = I \tag{3.19}$$

seçilir. CMA-ES yönteminde özetle, her optimizasyon adımında popülasyonun en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip bireyleri ebeveyn birey olarak seçilmektedir. Ardından, ebeveynlerin problem uzayındaki pozisyonlarının ağırlıklı ortalaması ile yeni popülasyonun merkezi belirlenir. Yeni popülasyonun dağılımı, gelişim vektörleri ile elde edilen strateji parametreleri ile oluşturulur. Popülasyon oluşumundan sonra yakınsama kontrolü yapılarak, belirlenen kriterlerin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Optimum noktaya ulaşıldığında, amaç fonksiyonu ya da kontrol parametreleri değerlerine göre optimizasyon tamamlanır. Ayrıca, maksimum popülasyon sayısı ya da maksimum test süresine ulaşıldığında yakınsama gözetilmeden optimizasyon durdurulur. Optimizasyonun basitleştirilmiş algoritması Şekil 3.8'de verilmiştir. Çalışma kapsamında MATLAB'da hazırlanan CMA-ES algoritmasının kodları Ek-B'de verilmiştir.



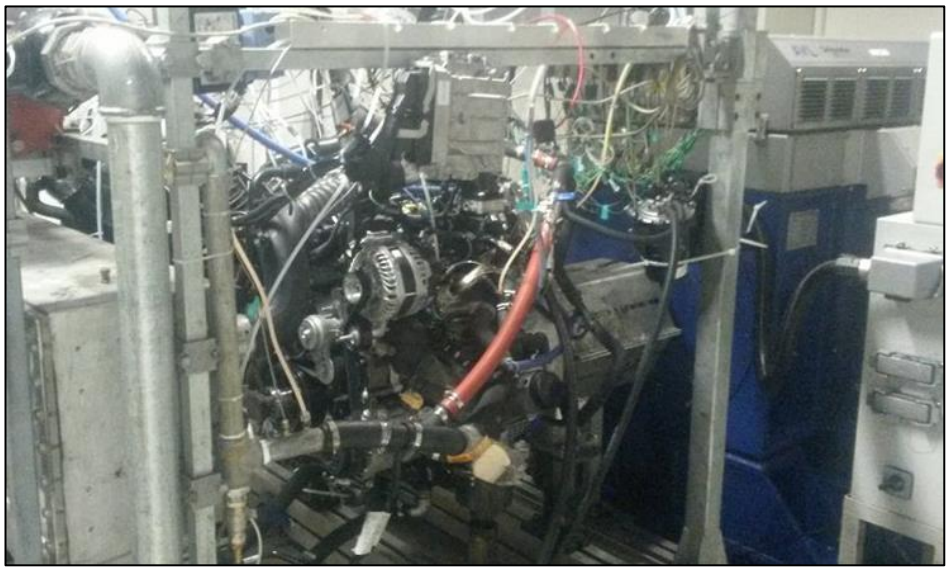
Şekil 3.8. CMA-ES algoritması

4. TEST DENEY DÜZENEĞİ

Bu bölümde, yapılan çalışmada kullanılan dizel motora ait temel teknik bilgiler, testte kullanılan B5 (%95 motorin, %5 biyodizel) dizel yakıtın analiz sonuçları, çeşitli ölçümlerde kullanılan cihazlara ait ölçüm yöntemleri ve hassasiyetleri anlatılmıştır. Ayrıca, test otomasyon sistemi ve optimizasyon algoritmasının entegrasyonu da bu bölümde verilmiştir.

4.1. Motor ve Alt Sistemler

Bu tez çalışmasında, 4 silindirli 2 litre motor hacmine sahip Ford Ecoblue dizel motor kullanılmıştır. 3500 d/d hızda 132,4 kW güç üretebilen motorda, common-rail yakıt enjeksiyon sistemi, ara soğutuculu turboşarj ünitesi ve EU6 emisyon standardı için EGR sistemi bulunmaktadır. Yapılan testlerde motor sonrası emisyon kontrol sistemi kullanılmadığı için, araçta oluşan egzoz karşı basıncı bir klape ile sağlanmıştır. Aktif kontrole sahip AVL DynoExact serisi dinamometreye şaft ile bağlanan motorda, test süresince herhangi bir modifikasyon yapılmamıştır. Test odasındaki motor kurulumu Şekil 4.1'de, motorun teknik detayları Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Dinamometre test odasında motor kurulumu

Tablo 4.1. Motora ait teknik bilgiler

Motor	Ford Ecoblue TDCI
Motor tipi	4 Silindir, sıralı
Kurs hacmi	1995 cc
Çap ve strok	84x90 mm
Sıkıştırma oranı	16.5:1
Ateşleme Sırası	1-3-4-2
Hava Emiş	Turboşarj
Yakıt enjeksiyon	Common-rail
Maksimum güç	132.4 kW, 3500 d/d
Maksimum tork	420 Nm, 1750-2500 d/d

Motorda Honeywell'e ait VGT tipi turboşarj ünitesi bulunmaktadır. Maksimum 240.000 d/d hıza çıkabilen turbo, parça varyasyonu ve olağan dışı koşullara karşı kalibrasyon çalışmalarında 216.000 d/d'e limitlenmektedir. Turbonun maksimum türbin giriş sıcaklığı ve kompresör çıkış sıcaklığı limitleri sırasıyla 810 °C ve 180 °C'dir. Motorda kullanılan EGR sistemi, Pierburg'a ait soğutucu ve valfin entegre yapıda olduğu bir modeldir. EGR valfi DC motor ile kontrol edilmektedir. Ayrıca, EGR sisteminde pnömatik kumanda aracılığıyla kontrol edilen bir baypas hattı bulunmaktadır.

Motorda yakıt enjeksiyonu, Continental'e ait PCV ve VCV'ye sahip PCR5 sistemi ile yapılmaktadır. Piezo eleman ile kontrol edilen 8 delikli yakıt enjektörleri bir çevrimde 7 adede kadar enjeksiyon yapabilmektedir. 90 μm delik çapına sahip enjektörlerin enjeksiyon kapasitesi 350ml/30s'dir. Kullanılan yakıt pompası 2.500 bara kadar basınçlandırabilen DHP1 serisine ait tek pistonlu yakıt pompasıdır. Testlerde, yakıt enjeksiyon sisteminin araçtakiyle aynı koşullarda çalışması için yakıt pompası giriş ve çıkışında sırasıyla 4,5 bar ve 1 bar mutlak basınç sağlanmıştır. Motorda, Continental'e ait SID212 model EKÜ kullanılmaktadır. Continental ve Ford'un ortak geliştirdiği yazılımın kontrolü ve takibi, kontrolör alan ağı (controller area network) (CAN) haberleşme protokolü üzerinden ATI Vision programı ile yapılmıştır.

4.2. Yakıt

Motor test odasında, ayrı hatlardan beslenen 3 farklı yakıtla test koşulabilmektedir. Mevcut yakıtlar, sırasıyla yerli bir firmadan temin edilen dizel ve ithal edilen B5 ve B7 dizel yakıtlarıdır. Çalışmada, tekrarlılığı sağlamak için sadece B5 dizel yakıt kullanılmıştır. B5 dizel yakıtın analiz sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Yakıt analiz sonuçları[1]

Özellik	Birim	Değer	Test Metodu
Karbon oranı	% (kütlesel)	86.53	ASTM D5291
Hidrojen oranı	% (kütlesel)	12.99	ASTM D5291
Oksijen oranı	% (kütlesel)	0.48	Elemental
Sülfür oranı	mg/kg	7.2	IP 490
Su oranı	mg/kg	70	IP 438
Üst ısıl değer	MJ/kg	45.46	IP 12
Alt ısıl değer	MJ/kg	42.70	IP 12
Setan sayısı	-	52.5	ASTM D613
Yoğunluk @ 15 °C	kg/m^3	835.4	ASTM D4052
Viskozite @ 40 °C	mm^2/s	2.6	ASTM D445
Parlama noktası	°C	74	ASTM D93

4.3. Test Cihazları

Testlerde, motor üzerinde çeşitli noktalardan sıcaklık ve basınç ölçümleri alınarak, komponentlerin tasarım limitleri içerisinde kalması ve motorun istenen sınır şartlarda çalışması sağlanmıştır. Hava hattında kompresör girişi, kompresör çıkışı, ara soğutucu çıkışı, emme manifoldu, türbin girişi ve türbin çıkışından sıcaklık ve basınç ölçümleri alınmıştır. Ayrıca, yakıt pompa giriş ve çıkışından ölçümler alınarak enjeksiyon sistemi için gerekli koşullar sağlanmıştır. Motor yağının ölçümleri blok içerisindeki yağ galerisinden, motor suyu ölçümleri de termostat muhafazasından yapılmıştır.

Sıcaklık ölçümünde PT100 tipi termokupllar kullanılmıştır. Basınç ölçümü de ölçüm alınan yere uygun aralıkta seçilen basınç transdüserleri ile yapılmıştır. Sensör kalibrasyonları test öncesinde referans sensörler kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmalarda, kalibrasyon testleri için kritik olan yüksek frekanslı silindir içi basınç ölçümü yapılmıştır. Silindir içi basınç ölçümü için krank kasnağına bağlanan 720 dişli AVL 365CC açısal enkoder ve kızdırma bujisi yuvasına takılan AVL GU22C piezo elektrik basınç sensörü kullanılmıştır. Yük nedeniyle krank şaftında oluşan elastik burulmanın etkisini azaltmak için, basınç sensörü kasnağa en yakın silindire takılmıştır [68]. Piezo elektrik sensörlerin bağıl basınç ölçümü alması nedeniyle, sıkıştırma zamanındaki basınç değişimi analiz edilerek, basınç eğrisi için referans bir değer

[1] Yakıt analizi, Haltermann Carless şirketinin Surrey, İngiltere'deki laboratuvarında yapılmıştır.

türetilmiştir. Çalışmada kullanılan basınç sensörleri 200 saatlik çalışma periyodu ile enstümantasyon personeli tarafından kalibre edilmektedir.

Açısal enkoder ve basınç sensöründen alınan sinyaller AVL IndiSmart Gigabit cihazında yükselticiden geçirilip filtrelenerek, 0,2 krank açısı (°KA) çözünürlükte basınç eğrileri elde edilmiştir. Motor sıfır yükte döndürülüp, maksimum basıncın oluştuğu krank açısından 0,7 °KA sonrası üst ölü nokta (ÜÖN) olarak belirlenmiştir. Termal kayıp açısı olarak adlandırılan bu farkın belirlenmesi için simetri yöntemi kullanılmıştır [69]. Ardından, her ölçümde 100 yanma çevriminin ortalaması alınarak, basınç eğrileri AVL Indicom bilgisayarında analiz edilmiştir. Analizlerde, maksimum silindir basıncı, maksimum basıncın oluştuğu krank açısı, yanma başlangıç ve bitiş zamanları, tutuşma gecikmesi, yanmış yakıt kütle oranları, ortalama indike basınç, ısı dağılımı eğrisi ve yanma kaynaklı gürültü gibi çeşitli hesaplamalar Indicom yazılımı üzerinden yapılmıştır [70]. Direkt püskürtmeli dizel motorlarda, yakıt enjeksiyonunun ardından, buharlaşma nedeniyle ısı dağılımı eğrisi negatif değere inmektedir. Çalışmada, ana enjeksiyonun ardından yanma nedeniyle ısı dağılımı eğrisinin tekrardan pozitif değere eriştiği krank açısı, yanma başlangıcı olarak kabul edilmiştir [71]. Tutuşma gecikmesi de, ana enjeksiyon başlangıcı ile yanma başlangıcı arasında geçen krank açısı olarak değerlendirilmiştir. Isı dağılımı eğrisi, termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak, kapalı hacimdeki gazın basınç değişimi üzerinden hesaplanmıştır [72]. Yanmış yakıt kütle oranları da, ısı dağılımı eğrisinin integrali alınarak bulunan toplam ısı eğrisinin yüzdesel oranı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, yanma bitiş zamanı da %90 yanmış yakıt kütle zamanı olarak belirlenmiştir [71]. Indicom'da analiz sonucu elde edilen yanma değerleri, otomasyon sistemine gönderilerek, diğer ölçümlerle eş zamanlı kayıt altına alınmıştır.

Egzoz emisyon ölçümü için AVL AMA i60 cihazı kullanılmıştır. NO_X, NO, CO_2, O_2, CO, HC ve CH_4 gazlarının ölçülebildiği cihazda, egzoz hattında iki farklı noktadan aynı anda ölçüm alınabilmektedir. Su buharının yoğuşmasını önlemek için, emisyon gazı örneği rezistans ile 191 °C'ye ısıtılmış hatlardan cihaza aktarılmıştır [73]. Testlerde, ölçümlerin doğruluğunu sağlamak için iki ölçüm sondası da türbin çıkışında birbirine yakın noktalarda kullanılmıştır. Emisyon cihazındaki analizörlerin hassasiyetleri ölçüm alınan değerin %2'si ve maksimum ölçüm değerinin %1'inden küçük olanı olarak cihaz kılavuzunda belirtilmiştir. Emisyon analizörlerinin

kalibrasyonu her bir gaz bileşimi için farklı derişimlerdeki referans gazlar ile yapılmaktadır.

Emisyon cihazının okuduğu ppm cinsinden hacimsel derişim miktarı c_{gas}'ın, bileşim yoğunluğunun egzoz gazı yoğunluğuna oranı u_{gas} ile ve kg/h cinsinden egzoz gazı kütlesel debisi m_{egz} ile çarpılmasıyla, emisyon bileşimlerinin kütlesel miktarı m_{gas}'ın g/h cinsinden değeri Denklem (4.1)'deki gibi;

$$m_{gas} = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot m_{egz} \cdot k_w \tag{4.1}$$

şeklinde hesaplanmıştır [73]. Egzoz gazı kütlesel debisi, kompresörün emdiği anlık hava miktarı ve tüketilen anlık yakıt miktarının toplamı olarak hesaplanır. Ayrıca, CO_2, CO ve O_2 ölçümlerinde egzoz gazının su buharından arındırılması nedeniyle, kütlesel emisyon miktarları kuru-yaş çevrim oranı k_w ile çarpılmıştır [73]. Su buharından arındırılmış egzoz gazı hacminin, yoğuşma öncesindeki egzoz gazı hacmine oranını ifade eden k_w katsayısı Denklemler (4.2) ve (4.3)'deki gibi;

$$k_w = 1{,}008 \left(1 - \frac{1{,}2442\ H_a + 111{,}19\ w_H \frac{m_{yakıt}}{m_{hava}}}{773{,}4 + 1{,}2442\ H_a + \frac{m_{yakıt}}{m_{hava}} k_v\ 1000} \right) \tag{4.2}$$

$$k_v = 0{,}055594\ w_H + 0{,}0080021\ w_N + 0{,}0070046\ w_O \tag{4.3}$$

olarak hesaplanır. H_a, g/kg cinsinden motor giriş havasındaki nem miktarını, $m_{yakıt}$, kg/h cinsinden yakıt tüketimini, m_{hava} ise kg/h cinsinden emiş hava miktarını ifade etmektedir. Ayrıca, w_H, w_N ve w_O sırasıyla yakıttaki hidrojen, azot ve oksijen içeriğinin kütlesel oranıdır. Bölüm 5'de bahsedileceği üzere, motor giriş havası standart hava koşullarında şartlandırılmıştır. Bu nedenle, regülasyonda tanımlanan NO_X emisyonu nem düzeltme faktörü, egzoz gazı hesaplamasına dahil edilmemiştir. Testlerde, PM emisyonu AVL Smoke Meter cihazı ile ölçülmüştür. Egzoz gazı, rezistans ile 65 °C'ye ısıtılmış hattan cihaza aktarılarak, cihazda bulunan filtre kağıdında kurumun birikmesi sağlanmaktadır. Kurum nedeniyle oluşan kararmanın optik reflektometre ile ölçülmesiyle, bu değere karşılık gelen birim egzoz gazı hacmindeki PM emisyonu bulunur. 0,05 mg/m^3 hassasiyetle alınan ölçümler, egzoz gazının yoğunluğu kullanılarak kütlesel miktara çevrilmiştir.

Yakıt tüketiminin belirlenmesi için AVL 735S yakıt ölçüm cihazı kullanılmıştır. %0,12 toleransla ölçüm alabilen cihaz, yakıt giriş sıcaklığını 40 °C'ye, giriş basıncını 6 bar'a kadar şartlandırabilmektedir. Common-rail enjeksiyon sisteminin çalışma prensibi gereği, enjektörler ve pompadan bir miktar yakıt tanka geri gönderilir. Test odasında, geri dönüş yakıtı motor besleme hattına bağlanarak, devridaim yapan yakıtın ölçüm cihazındaki rezervuarla beslenmesi sağlanmıştır. Bu sayede, rezervuarda azalan miktara göre yakıt tüketimi ölçülmektedir. Testlerde, giriş hava debisi ABB Sensyflow cihazı ile ölçülmüştür. Sızdırmazlık sağlanarak hava kutusu girişine bağlanan cihaz ile %1 hassasiyette ölçüm alınmıştır.

Dinamometre testlerinde egzoz emisyonu, yakıt tüketimi ve giriş hava debisi ölçümünün doğruluğunu sağlamak için, karbon dengesi eşitliği tanımlanmıştır [74]. Denklem (4.1), (4.2) ve (4.3) kullanılarak kütlesel miktarları belirlenen CO_2, CO ve HC gazları atom ağırlık oranları $w_{C/CO}$, w_{C/CO_2} ve $w_{C/yakıt}$ ile çarpılarak, yakıt tüketim miktarı türetilebilir. Yürütülen optimizasyon çalışmasında da Denklem (4.4)'de verilen,

$$0{,}97 < \frac{m_{yakıt}}{\{m_{HC}\} + \left\{[w_{C/CO} \cdot m_{CO}] + \left\{w_{C/CO_2} \cdot m_{CO_2}\right\}\right\} / (w_{C/yakıt})} < 1{,}03 \qquad (4.4)$$

eşitliği kullanılarak alınan her ölçümün karbon dengesi şartını sağladığı kontrol edilmiştir. Harcanan yakıttaki karbon atom miktarının egzoz gazındaki karbon atomuna eşit olmasına dayanan bu yöntem ile ölçümlerde dengesel farkın %3'den küçük olması sağlanmıştır.

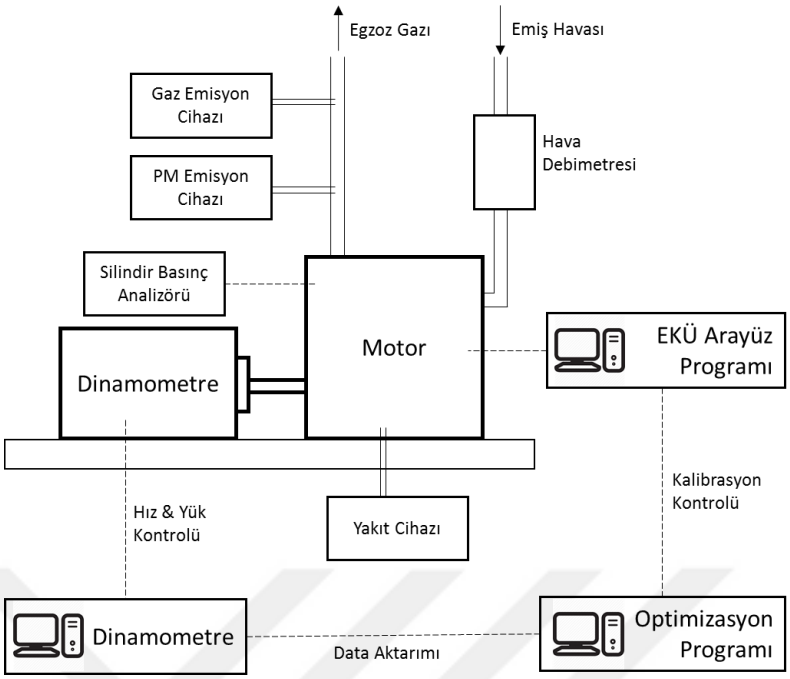
4.4. Data Aktarımı ve Otomasyon Sistemi

Ölçüm cihazlarından alınan veriler dinamometre otomasyon sistemi AVL Puma Open'a gönderilip, eş zamanlı kayıt altına alınmıştır. Sıcaklık sensörleri ve giriş hava debimetresinin ürettiği analog voltaj sinyalleri analog-dijital dönüştürücü ile otomasyon sistemine aktarılmakta ve transfer fonksiyonu ile 10 Hz frekansta fiziksel değerleri okunmaktadır. Basınç ölçümünde kullanılan transdüserlerin ürettiği dijital sinyal CAN hattı üzerinden otomasyon sistemine aktarılmaktadır. Basınç ölçümleri 10 Hz frekansta ölçülmüştür. Ayrıca, PM emisyonu ve yakıt tüketim ölçümü de CAN hattı üzerinden otomasyon sistemine gönderilmiştir. Yüksek frekanslı silindir içi

basınç ölçümlerinde alınan her çevrime ait basınç eğrileri analiz bilgisayarında kayıt altına alınırken, 1 Hz frekansla yapılan analiz hesaplamaları iletim kontrol protokolü (transmission control protocol) (TCP) ile otomasyon sistemine aktarılmıştır. Gaz emisyon ölçümleri de, emisyon cihazına ait bilgisayarda yapıldıktan sonra, TCP ile otomasyon sistemine 1 Hz frekansta aktarılmıştır.

Optimizasyon süresince, her ölçümden önce 1 dakika beklenerek motordaki tüm fiziksel değerlerin rejime oturması sağlanmış, ardından 40 saniyelik datanın ortalaması alınarak, o çalışma noktasının ölçümü yapılmıştır. Yakıt tüketimi ve PM emisyonu ölçümünde, diğer ölçümlerden farklı olarak, kayıt süresince ortalama ölçüm cihazlar üzerinden yapılarak, nihai ölçüm değeri otomasyon sistemine gönderilmektedir.

Optimizasyon algoritmasının dinamometre test odasına entegrasyonunda, algoritmanın hazırlandığı MATLAB programı ile otomasyon sistemi ve EKÜ ara yüz programları arasında haberleşme kurulmuştur. Otomasyon sistemi ile MATLAB arasında TCP kurularak, ölçüm datalarının optimizasyon algoritmasına aktarılması sağlanmıştır. Ölçüm sonuçlarının algoritma tarafından değerlendirilmesinin ardından, sonraki adımdaki kalibrasyon parametreleri belirlenmektedir. Belirlenen kalibrasyon parametrelerinin EKÜ'ye aktarılması için ATI Vision'a ait uygulama ara yüz programlama kodlarından faydalanılmıştır. Kalibrasyon parametreleri, ara yüz programı aracılığıyla EKÜ'ye gönderilerek, motorun istenen koşullarda çalışması mümkün olmaktadır. Test odasında kullanılan cihazların şematik kurulumu ve optimizasyon algoritmasının otomasyon sistemine entegrasyonu Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Otomasyon sistemi

5. CMA-ES İLE EŞ ZAMANLI KALİBRASYON OPTİMİZASYONU

Egzoz emisyon sınırlamaları, artan müşteri beklentileri ve teknolojik yenilikler nedeniyle, günümüzde üretilen binek ve ticari araçlarda pek çok sensör ve elektronik aksam bulunmaktadır. Denemeler yaparak, aracın en ideal şekilde çalışmasını sağlayacak komponent parametrelerinin belirlenmesi, oldukça zaman alan bir yaklaşımdır. Manuel kalibrasyon da denilen bu yöntemde, tüm komponentlerin ideal parametre değerlerinin belirlenmesi değişken ortam ve araç koşullarında mümkün olmayabilir. Bu nedenle, matematiksel optimizasyon yöntemlerinin kalibrasyon çalışmalarına uyarlanmasıyla, optimum çalışma koşullarının otomatik bir biçimde tespiti mümkün olmaktadır.

Bu bölümde, gerçek zamanlı kalibrasyon için optimizasyon problemi oluşturularak, CMA-ES algoritmasının yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinde iyileşme göstermesi sağlanmıştır. Optimizasyon algoritmasının gerçek zamanlı kalibrasyon testlerine uygun hale gelmesi için, strateji parametrelerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. Uygulanan çalışma noktası bazlı optimizasyon işlemlerinin ardından, elde edilen iyileştirmeler test çevriminde doğrulanmıştır.

5.1. Optimizasyon Probleminin Oluşturulması

Kalibrasyon çalışmalarında optimizasyon işleminin uygulanması için, optimizasyon probleminin tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, geliştirme safhasındaki bir dizel motorun özgül yakıt tüketiminin (ÖYT) minimuma indirilmesi, NO_X ve PM emisyonunun belirlenen hedef değerlere düşürülmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, optimizasyonun amaç fonksiyonları Denklemler (5.1), (5.2) ve (5.3)'deki gibi;

$$\text{ÖYT}(x) \rightarrow \min \tag{5.1}$$

$$NO_x(x) \leq \text{Limit}_{NO_x} \tag{5.2}$$

$$PM(x) \leq \text{Limit}_{PM} \tag{5.3}$$

olarak ifade edilebilir. Geliştirilen optimizasyon algoritmasının kalibrasyon iş paketlerine katkısını anlamak için amaç fonksiyonları sınırlı sayıda belirlenmiştir. Ancak, optimizasyon işlemi sonunda yanmada oluşan değişimin değerlendirilmesi için, baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyonda oluşan HC ve CO emisyonu, yanma analiz hesaplamaları ve türbin girişinden alınan sıcaklık ve basınç değerleri de her çalışma noktası için incelenmiştir. Optimizasyon işlemi gerçek zamanlı motor kalibrasyon testlerinde uygulanacağı için, problemin, optimum noktaya en kısa sürede yakınsanacağı şekilde kurulması önemlidir. Model bazlı optimizasyon uygulamalarında tercih edilen çok amaç fonksiyonlu yaklaşımlar yerine, yakıt tüketimi ve emisyon iyileşmesi hedefleri tek amaç fonksiyonuna indirgenerek optimizasyon işleminde bunların birlikte sağlanması amaçlanmıştır. Optimizasyon probleminin genel amaç fonksiyonu Denklem (5.4)'deki gibi;

$$f(x) = \left[\left(\frac{NO_x}{NO_{x_{hedef}}} \right)^2 + \left(\frac{PM}{PM_{hedef}} \right)^2 \right]^{0.5\,\varphi} + \left(\frac{BSFC}{BSFC_{hedef}} \right)^{\varphi} + \phi \qquad (5.4)$$

şeklinde oluşturulmuştur [32]. Amaç fonksiyonuna üssel faktör φ eklenerek, yakınsamanın yavaş kaldığı uygulamalarda, optimizasyon hızının arttırılması sağlanmıştır. Üssel faktör değerleri Bölüm 5.3'de verilen farklı çalışma noktalarındaki optimizasyon işlemleri için deneme yaparak belirlenmiştir. Ayrıca, amaç fonksiyonuna ϕ kısıt fonksiyonu eklenerek, testler esnasında motorun çeşitli sistemlerine ait dizayn limitlerinin aşılması engellenmiştir. Bu limitler, silindir içi basıncı, türbin giriş sıcaklığı, kompresör çıkış sıcaklığı ve turbo hızı için belirlenen maksimum değerlerdir. Dizayn limitleri aşıldığında, kısıt fonksiyonu değeri, limit değerle olan farkın üssel oranında artacağından, optimizasyonun o yönde ilerlemesi kontrol atına alınmıştır [75]. Kısıt fonksiyonu Denklem (5.5)'de;

$$\phi(t) = \begin{cases} 0, & t<\text{Limit} \\ 10.(t-\text{Limit})^6, & t\geq\text{Limit} \end{cases} \qquad (5.5)$$

olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon işleminde kontrol edilecek parametre sayısı, problemin tanımlı olduğu uzayın boyutunu belirlemektedir. Testlerde daha fazla sayıda parametrenin kontrol edilmesi, optimum noktanın bulunması için daha büyük boyutlu popülasyon kullanımına ve test sürelerinin uzamasına neden olmaktadır. Bu sebeple, motorda bir çevrimde 7 adede kadar enjeksiyon yapılabilmesine rağmen,

enjeksiyon stratejisi bir ön enjeksiyon ve bir ana enjeksiyon şeklinde seçilmiştir. Çalışmada, enjeksiyon sisteminde kontrol edilen parametreler ana enjeksiyon zamanı, yakıt hattı basıncı, ön enjeksiyon zamanı ve ön enjeksiyon miktarı olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon zamanı, püskürtmenin ÜÖN'dan kaç °KA sonrasında başladığını tanımlamaktadır. Hava hattı sisteminde, turboşarj, EGR ve gaz pedalının kontrolünde kullanılan MAP ve MAF değerleri optimizasyon parametreleri olarak belirlenmiştir. Talep edilen MAP ve MAF değerleri EKÜ yazılımında bulunan kapalı çevrim kontrolcüler tarafından sağlanmaktadır.

Optimizasyon süresince kalibrasyon parametrelerindeki değişimin neden olduğu tork değişimlerinde, otomasyon sistemi pedal sinyali ile toplam yakıt miktarını kontrol ederek, motorun aynı yükü vermesini sağlamaktadır. Bu nedenle, bir çevrimde püskürtülen toplam yakıt miktarı optimizasyon parametresi olarak belirlenmemiştir. Yük değişimlerinden bağımsız olarak, kullanılan aktif kontrollü dinamometre motor devrini istenen değerde tutabilmektedir. Belirlenen 6 kalibrasyon parametresine göre, optimizasyon probleminin tanımlı olduğu uzaydaki bir popülasyon bireyi Denklemler (5.6) ve (5.7)'deki gibi;

$$x_{i:\lambda}:\left(\text{Ana Enj Zmn}_i, \text{Ykt Bas}_i, \text{Ön Enj Mik}_i, \text{Ön Enj Zmn}_i, \text{MAP}_i, \text{MAF}_i\right) \in X^6 \quad (5.6)$$

$$x_l < x_{i:\lambda} < x_u \quad (5.7)$$

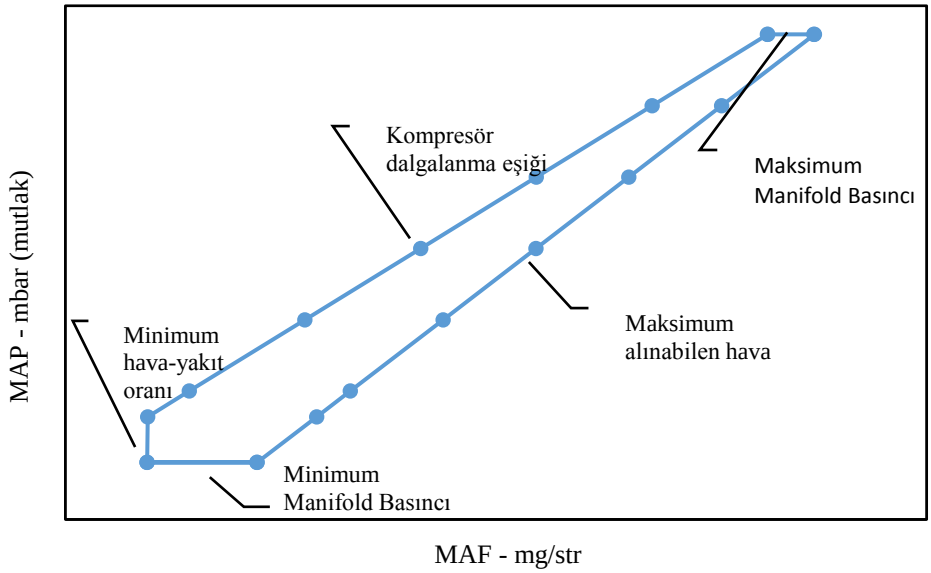
olarak ifade edilir. Motorda istenmeyen çalışma koşullarının oluşumuna karşı, kalibrasyon parametreleri x_l ve x_u ile belirlenen aralıkta kontrol edilmektedir. Ana enjeksiyon zamanının çok erkene alınması, yanmanın piston ÜÖN'ya ulaşmadan gerçekleşmesine neden olacağı için, pistonun geri tepmesine ve motorun zarar görmesine neden olur. Ayrıca, geç püskürtme de yanmanın egzoz zamanına kaymasına neden olacağı için termal verimi düşürecektir. Minimum ve maksimum yakıt hattı basıncı, minimum enjeksiyon miktarı ve minimum ön enjeksiyon zamanlaması enjeksiyon sisteminin izin verdiği aralıkta belirlenmiştir. Maksimum ön enjeksiyon miktarı ve maksimum ön enjeksiyon zamanlaması diğer çalışmalardaki tecrübi bilgiye göre belirlenmiştir. MAP değeri atmosferik basınç ve hava hattının dizayn limitleri arasında tanımlanmıştır. MAF değeri de hava hattının karakteristiğine ve yanmaya

bağlı olarak belirlenmiştir. Her bir kalibrasyon parametresine ait alt limit, üst limit ve çözünürlük değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kalibrasyon parametrelerinin sınır ve çözünürlük değerleri

x - Kalibrasyon Parametreleri	x_l – Minimum Değer	x_u – Maksimum Değer	Çözünürlük
Ana Enj. Zamanlaması - °KA	-10 (ÜÖN'dan önce)	25 (ÜÖN'dan sonra)	0.1
Yakıt Hattı Basıncı - bar	600	2200	10
Ön Enj. Miktarı - mg/str	1	4	0.1
Ön Enj. Zamanlaması - °KA	3 (Ana Enj.'dan önce)	25 (Ana Enj.'dan önce)	0.1
MAP - mbar (mutlak)	1000	2500	10
MAF - mg/str	bkz. Şekil 5.1	bkz. Şekil 5.1	10

MAF limitlerinin belirlenmesi için basitleştirilmiş hava hattı modeli oluşturulmuştur. Bölüm 2'de bahsedildiği üzere, yüksek basınç artış oranlarında sıkıştırılan hava miktarını limitleyen olgu kompresör dalgalanmasıdır. Kullanılan turboya ait kompresör haritasından alınan dalgalanma eğrisi ile her çalışma noktası için minimum MAF miktarı, MAP'a bağlı oluşturulmuştur. Ayrıca, yanmanın kararsız hale gelmesini engellemek amacıyla minimum hava yakıt oranına göre de MAF değeri limitlenmiştir. Maksimum MAF, EGR'nin kapalı olduğu durumda hacimsel verim dikkate alınarak hesaplanan silindirlere giren teorik hava miktarı olarak belirlenmiştir. Motorun çalışma noktasına göre farklılık gösteren bu limitler, Şekil 5.1'de temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Basitleştirilmiş hava hattı modeli

Optimizasyonda kullanılan kalibrasyon parametreleri farklı mertebelerde olduğundan, parametrelere normalizasyon uygulanarak, algoritmanın normalize edilmiş nesne parametresi x_n'i kontrol etmesi sağlanmıştır. Minimum ve maksimum parametre değerleri sırasıyla 0 ve 10'a denk gelecek şekilde normalizasyon işlemi Denklemler (5.8), (5.9) ve (5.10)'daki gibi;

$$x_i = x_l, \qquad x_{n_i}<0 \tag{5.8}$$

$$x_i = x_{n_i} \frac{x_u - x_l}{10} + x_l, \qquad 0<x_{n_i}<10 \tag{5.9}$$

$$x_i = x_u, \qquad x_{n_i}>10 \tag{5.10}$$

şeklinde uygulanmıştır. Kalibrasyon parametreleri minimum ve maksimum değerlerden öteye gitmeyeceği için, algoritmanın normalize değerleri 0 ve 10'dan öteye taşıması beklenmemektedir. Bu nedenle, optimizasyon algoritmasında normalize edilen değişkenlerde herhangi bir sınırlama uygulanmamıştır. Optimizasyon işleminin tamamlanması için yakınsama kriteri ve maksimum popülasyon sayısı olmak üzere iki kriter belirlenmiştir. Son 3 popülasyonun ağırlıklı ortalamasının amaç fonksiyonu değeri bir öncekinden daha iyi olmadığında ya da popülasyon sayısı 30'a vardığında optimizasyon işlemi tamamlanmaktadır. Çalışmada, tüm popülasyonlardaki en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip bireye ait parametre değerlerinin, optimizasyon probleminin optimum noktası olduğu kabul edilmiştir.

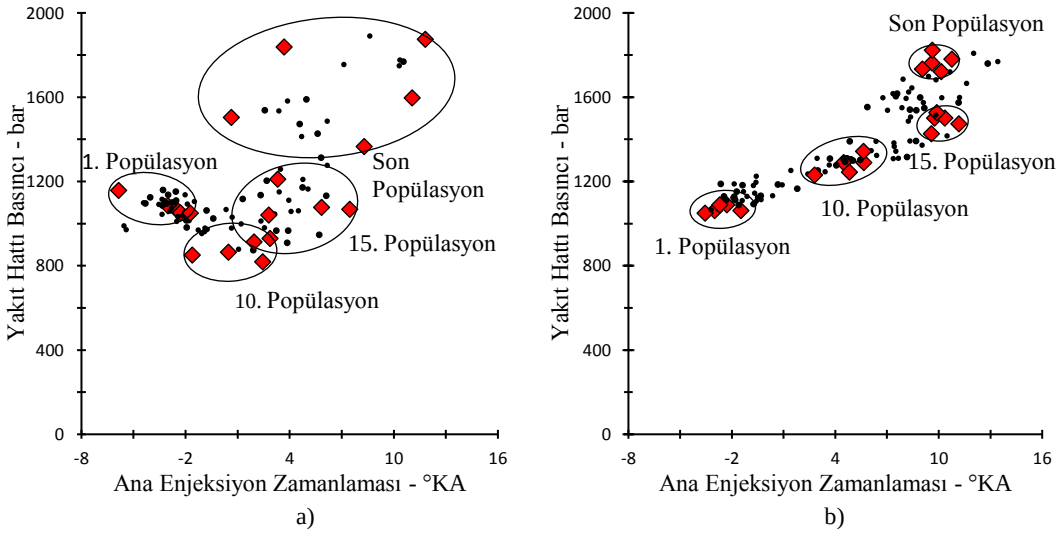
5.2. CMA-ES Yönteminin Eş Zamanlı Kalibrasyon Optimizasyonuna Uyarlanması

Meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri genel olarak matematiksel fonksiyonlarda veya sistemlere ait modeller üzerinde uygulanacak şekilde tasarlanmaktadır. Böylece, popülasyon boyutları büyük tutularak optimum noktanın bulunması garanti altına alınır. Ancak, gerçek zamanlı testler ya da CFD analizleri gibi optimizasyon süresinin kritik olduğu uygulamalarda yakınsama işleminin en az sayıda elemanla tamamlanması önemlidir. Bu nedenle, optimizasyon algoritmalarının problemin türüne göre uyarlanması gerekmektedir [76].

Motor dinamometre otomasyon sistemine entegre edilen CMA-ES algoritmasının eş zamanlı kalibrasyon optimizasyonuna uygunluğunu test etmek amacıyla, türbin çıkış NO_X ve PM emisyonlarının sırasıyla 48 g/h ve 4 g/h değerlerini sağlayacak kalibrasyon parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır. 2000 d/d-190 Nm çalışma noktasında yapılan testlerde, ÖYT optimizasyona dahil edilmemiştir. Bölüm 3'de verilen baz CMA-ES strateji parametreleri kullanıldığında, tekrarlı denemelerde popülasyon dağılımlarının yüksek olduğu ve algoritmanın yakınsama performansının değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Eş zamanlı optimizasyonda orijinal strateji parametrelerinin kullanılmasına rağmen yakınsamanın başarılı olmaması, popülasyon boyutunun küçük tutulmasıyla ilgilidir [77]. Popülasyonlardaki yüksek varyasyon Şekil 5.2a'da ana enjeksiyon zamanlaması ve yakıt hattı basıncı değerlerine göre gösterilmiştir. Oluşan yüksek varyasyonu azaltmak için adım boyutundaki sönüm oranına eklenen ζ çarpanı kademeli olarak arttırılarak, popülasyon dağılımları ve yakınsama performansları karşılaştırılmıştır. Adım boyutunun güncellenmiş hali Denklem (5.11)'deki;

$$\sigma^{(g+1)} = \sigma^{(g)} \exp\left(\frac{c_\sigma}{d_\sigma \zeta} \cdot \frac{\left\|p_\sigma^{(g+1)}\right\| - \hat{x}_n}{\hat{x}_n}\right) \tag{5.11}$$

olarak hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Ana enjeksiyon zamanlaması ve yakıt hattı basıncına göre popülasyon dağılımları a) ζ: 1 b) ζ: 3,3

Karşılaştırmalı testlerde, sönüm miktarı arttıkça yakınsamanın tekrarlı olarak sağlandığı ancak optimizasyon süresinin uzadığı görülmüştür. Her bir sönüm faktörü için algoritma 5 kez test edilerek, yakınsama sağlanana kadar oluşan popülasyon sayıları Tablo 5.2'de verilmiştir. Sönüm miktarının daha yüksek değerlere çıkarılması, popülasyon dağılımlarındaki varyasyonun etkisizleşmesine ve bazı denemelerde yakınsamanın başarısız olmasına neden olmuştur. Bu nedenle, eş zamanlı kalibrasyon optimizasyonu için en uygun sönüm faktörü değeri 3.3 olarak belirlenmiştir. Sönüm faktörü güncellenerek popülasyon dağılımlarında elde edilen iyileşme Şekil 5.2b'de gözükmektedir.

Tablo 5.2. Sönüm çarpanı ζ'ye göre yakınsama gerçekleşene kadar oluşan popülasyon adetleri

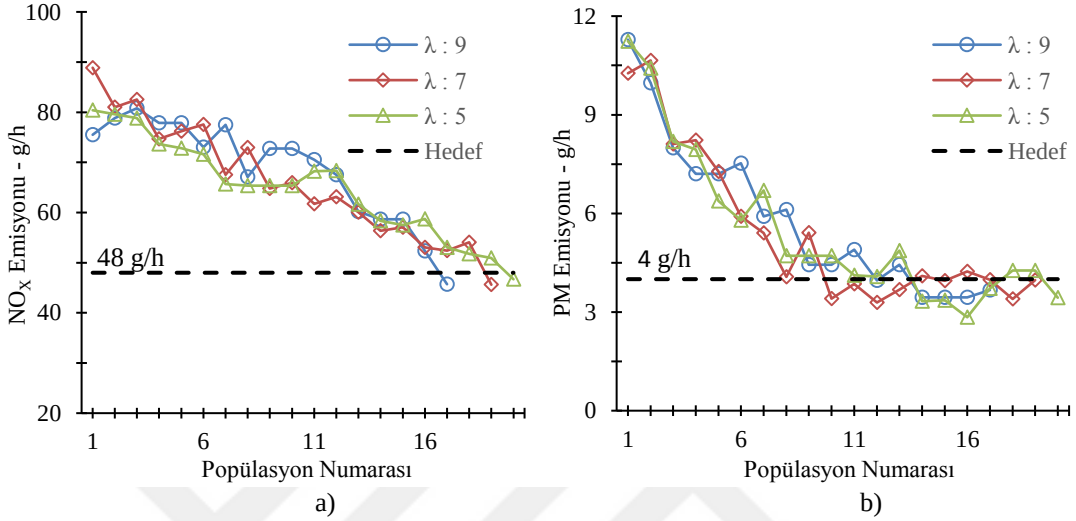
ζ	#1	#2	#3	#4	#5	Ortalama Popülasyon Sayısı
1	18	22	16	-	7	Dağılım fazla, tekrarlanabilirlik düşük
2	17	19	-	23	15	Dağılım fazla, tekrarlanabilirlik düşük
3,3	17	24	14	22	20	Ortalama: 19,4
5	23	20	23	16	24	Ortalama: 21,2
10	29	31	25	-	-	Dağılım az, yakınsama başarısız

"-" sembolleri yakınsamanın başarısız olduğu denemeleri ifade etmektedir.

Adım boyutundaki sönüm miktarının artması optimizasyon süresini arttırdığı için, popülasyon boyutu değiştirilerek bu kayıp telafi edilmeye çalışılmıştır. Popülasyon boyutu azaltılarak, optimizasyonda oluşacak popülasyon adedinin artmasına rağmen, toplamda daha az miktarda birey oluşturulabilir. Bu sayede, yakınsama gerçekleşene kadar geçecek test sürelerinin kısaltılması amaçlanmıştır. Popülasyon boyutundaki değişimin test sürelerine etkisini belirlemek için, motorun tekrardan 2000 d/d-190 Nm çalışma noktasındaki türbin çıkışındaki NO_X ve PM emisyon değerlerini sırasıyla 48 g/h ve 4 g/h mertebelerine indirgeyecek optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Popülasyon birey sayısı kademeli olarak 9'dan düşürülerek, istenen NO_X ve PM emisyonu değerlerine ulaşılıncaya dek oluşan popülasyon adetleri belirlenmiştir. Şekil 5.3'de, farklı birey sayılarıyla yapılan denemelerde oluşan popülasyonlardaki en iyi değere sahip bireylerin NO_X ve PM emisyon miktarları gösterilmiştir. Beklendiği gibi, birey sayısı azaldıkça popülasyon sayısında artış olmuştur, ancak optimizasyon süresince oluşan toplam birey sayısında azalma sağlanarak test süreleri kısaltılmıştır. Her birey sayısı için 5 kez tekrarlanan testlerde oluşan toplam birey adedi ve test

süreleri Tablo 5.3'de verilmiştir. 5 bireye sahip popülasyonlarda en kısa test süreleri elde edildiği için, optimizasyon çalışmalarında bu şekilde devam edilmiştir. Birey sayısının 5'den daha fazla düşürülmesi algoritmanın yakınsamada başarısız olmasına neden olmuştur.



Şekil 5.3 Popülasyon boyutu λ'ya göre yakınsama gerçekleşene kadar emisyon miktarı değişimleri a) NO_X emisyonu b) PM emisyonu

Tablo 5.3. Popülasyon boyutu λ'ya göre yakınsama gerçekleşene kadar oluşan popülasyon ve birey adetleri

λ	#1	#2	#3	#4	#5	Ortalama Popülasyon Sayısı	Ortalama Toplam Birey Sayısı	Ortalama Test Süresi
4	-	25	-	-	22	-	-	-
5	20	25	26	21	22	22.8	114	171 dk.
7	19	21	23	23	23	21.8	152.6	229 dk.
9	17	23	13	25	17	19	171	257 dk.

"-" sembolleri yakınsamanın başarısız olduğu denemeleri ifade etmektedir.

Birey sayısı 9'dan 5'e düşürüldüğü için ebeveyn sayısı da 4'den 2'ye düşürülmüştür. Ağırlık oranları ve öğrenme oranları CMA-ES yöntemindeki baz değerlere göre belirlenmiştir. Oluşturulan ilk popülasyonun dağılımının düşük olması için adım boyutu σ_1=0.2 seçilmiştir. İlk popülasyonun kovaryans matrisi birim matris olarak seçilmiştir. Yapılan güncellemelerin öncesinde ve sonrasındaki parametre değerleri Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4. CMA-ES strateji parametre değerleri

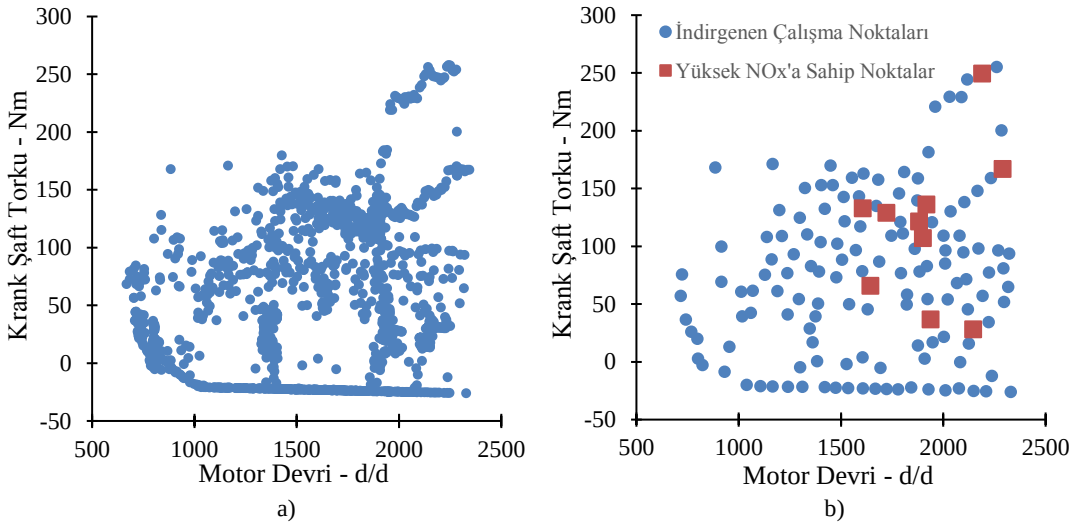
Parametre	İlk Değer	Son Değer
λ	9	5
μ	4	2
w_i, i=1,…,μ	1.609, 0.916, 0.511, 0.223	1.099, 0.406
μ_{eff}	0.153	0.332
c_c	0.400	0.401
c_1	0.037	0.037
c_μ	0.146	0.042
c_σ	0.193	0.206
d_σ	1.193	1.206
ζ	1	3.3
σ_1	0.2	0.2
C_1	[I]	[I]

5.3. Sabit Çalışma Noktasında Optimizasyon Çalışması

Motor kalibrasyonu testlerinde uygulanan en yaygın yaklaşımlardan biri nokta bazlı kalibrasyon iyileştirme yöntemidir [13]. Bu yaklaşımda, kalibrasyon haritalarının eksen değerlerine denk gelen çalışma noktalarında, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonu gibi motor tepkilerinde iyileşme üzerine çalışılır. Çalışma yapılacak noktaların seçiminde, emisyon çevrim testindeki ağırlıkları ve aracın ömrü boyunca o noktalarda çalışacağı süreler göz önünde bulundurulur. Nokta bazlı iyileştirmeler sonrasında, haritada agresif geçişlere neden olmadan diğer hücrelere interpolasyon uygulanır. Bu çalışmada da, NEDC test çevrimindeki türbin çıkış NO_X emisyonunun düşürülmesi amaçlanan Ford Ranger motorunda, sabit çalışma noktalarında optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Türbin çıkış NO_X emisyonunun düşürülmesi ile SCR sisteminde kullanılan NH_3 tüketiminin azaltılması hedeflenmiştir. Optimizasyon işleminde ayrıca, türbin çıkış PM emisyonunda artış olmaması ve yakıt ekonomisinde iyileşme amaçlanmıştır.

NEDC çevriminde NO_X emisyonunda en çok artışa neden olan noktaların tespiti için, şasi dinamometresinde 2 Hz frekansta alınan EKÜ ve egzoz emisyon kayıtları incelenmiştir. Egzoz emisyon ölçümlerinde yaşanan gecikme nedeniyle, emisyon kayıtları zaman ekseninde kaydırılarak EKÜ kayıtlarıyla senkron hale getirilmiştir. Motor devri ve motor yüküne göre test kayıtlarındaki benzer noktalar ağırlık merkezi prensibine göre birleştirilerek, test çevrimi 142 çalışma noktasına indirgenmiştir. Şekil 5.4'de NEDC testindeki tüm motor çalışma noktaları ve indirgenen noktalar gösterilmiştir. Birleştirilen noktalardaki anlık NO_X emisyonu değerlerinin indirgenen

noktalara eklenmesiyle, bu noktalardaki NO_X emisyonu toplamının çevrimde oluşan toplam NO_X miktarına eşit olması sağlanmıştır. İndirgenen noktaların çevrimdeki ağırlıklarının tespiti için, her noktadaki NO_X emisyonu miktarının çevrimdeki toplam miktara oranı hesaplanmıştır. Böylece, optimizasyon işleminin çevrim sonucuna en çok katkı sağlayacağı çalışma noktaları belirlenmiş olur. Bu yaklaşımın temel eksiği dinamik motor manevralarının hesaba katılmamasıdır. Ayrıca, indirgenen noktaların belirlenmesinde çevrim boyunca değişiklik gösteren motor suyu sıcaklığı göz ardı edilmiştir. Tablo 5.5'de NEDC çevrimindeki NO_X emisyonunun %45'ini oluşturan 10 çalışma noktası ve bu noktalara ait ağırlık oranları verilmiştir.



Şekil 5.4. NEDC testi a) Tüm motor çalışma noktaları b) İndirgenen çalışma noktaları

Tablo 5.5. NEDC testinden indirgenen en yüksek NO_X emisyonuna sahip 10 çalışma noktası

Nokta	Motor Devri - d/d	Motor Yükü - Nm	NO_X Emisyonu Ağırlık Oranı - %
1	1940	40	8,18
2	1640	70	6,37
3	1880	120	5,91
4	1720	130	5,59
5	2190	250	5,22
6	2290	170	3,26
7	1610	130	3,21
8	1920	140	2,71
9	1900	110	2,39
10	2150	30	2,36

Çalışmalarda, en yüksek NO_X emisyonu ağırlık oranına sahip 3 noktada optimizasyon işlemi planlanmıştır. Ancak, hava hattı sisteminin iç çevrim kontrolünden kaynaklanan bir salınım nedeniyle, 1 numaralı nokta optimizasyona dahil edilmemiştir. Ayrıca, 3

numaralı noktaya yakın olması sebebiyle, 4 numaralı nokta yerine tam yük bölgesine yakın olan 5 numaralı nokta tercih edilmiştir. Bu nedenle, optimizasyon işlemi 2,3 ve 5 numaralı noktalarda uygulanmıştır.

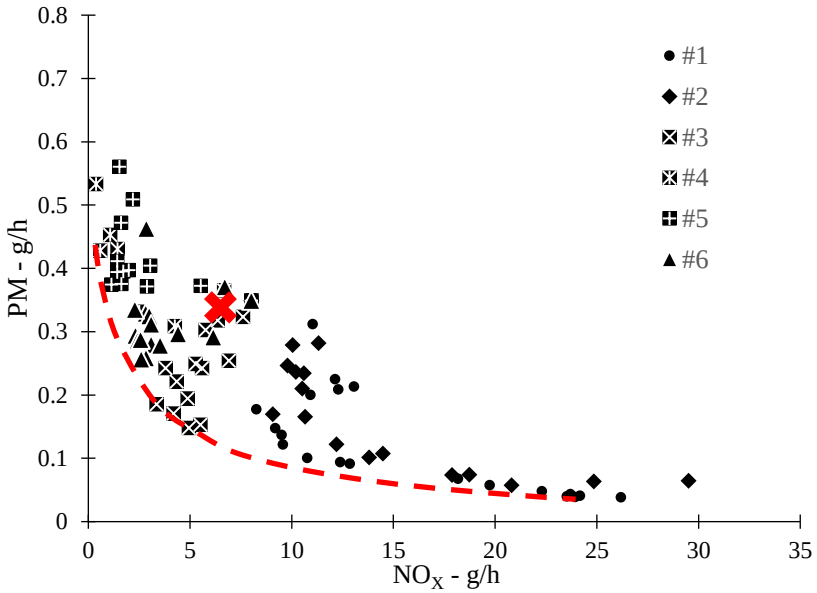
Denklem (5.4)'de verilen genel amaç fonksiyonundaki hedef değerlerin belirlenmesi için, optimizasyon işlemi öncesinde, seçilen çalışma noktalarında NO_X-PM Pareto eğrileri oluşturulmuştur. Pareto eğrilerinin elde edilmesinde güncellenmiş CMA-ES algoritmasından yararlanılmıştır. Opimizasyon problemi tek amaç fonksiyonuna göre oluşturulduğu için, her çalışma noktasında 6 farklı tarama işlemi uygulanarak, farklı mertebelerdeki NO_X-PM değer çiftleri elde edilmiştir. Bir çalışma noktasındaki her bir tarama işleminde, aynı kalibrasyon parametrelerinden başlanarak baz emisyon değerlerine göre farklı ağırlıktaki emisyon hedef değerleri (düşük NO_X - yüksek PM, yüksek NO_X - düşük PM vb.) kullanılmıştır. Bu aşamada ÖYT değeri tarama işlemine dahil edilmemiştir. Oluşturulan Pareto eğrileri ile, baz kalibrasyonda oluşan PM emisyonunda artışa neden olmadan elde edilecek minimum NO_X emisyon değerleri tespit edilmiş olur.

Her çalışma noktasında Pareto eğrileri oluşturulduktan sonra, yakıt ekonomisi ve NO_X emisyonunun belirlenen miktara düşmesini sağlayacak optimizasyon işlemleri uygulanmıştır. Bölüm 5.3.1, 5.3.2 ve 5.3.3'de türetilen Pareto eğrileri, optimizasyon süresince değişen kalibrasyon parametreleri, ÖYT ve emisyon değerleri, popülasyonlardaki tüm bireylerin amaç fonksiyonu değerleri her çalışma noktası için verilmiştir. Testlerde motor sınır koşulları kontrol edilerek, tüm ölçümlerin aynı şartlar altında alınması sağlanmıştır. Motor su ve yağ sıcaklığı 90±3 °C, hava emiş sıcaklığı ve bağıl nemi sırasıyla 25±3 °C ve %50±5 , ara soğutucu sonrası sıkıştırılmış hava sıcaklığı 40±3 °C olarak kontrol edilmiştir.

5.3.1. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasında optimizasyon çalışması

Optimizasyon işleminin uygulandığı 2 numaralı 1640 d/d-70 Nm çalışma noktası NEDC testinde 124 saniye çalışma süresine denk gelmektedir. Tablo 5.5'deki en düşük motor gücüne sahip noktalardan biri olan bu noktanın, test çevriminde yaklaşık 300 mg NO_X emisyonuna neden olduğu tahmin edilmektedir. Geliştirme safhasında olan baz kalibrasyonda bu noktada 2 ön enjeksiyon yapılmasına rağmen, optimizasyon işleminde karşılaştırma yapabilmek için tek ön enjeksiyon stratejisine geçilmiştir.

Birim zamandaki NO_X emisyonu düşük olmasına rağmen çalışma süresinin yüksek olması nedeniyle, bu noktadaki optimizasyon işleminin çevrim sonuçlarına etkisinin büyük olması beklenmektedir. NO_X-PM Pareto eğrisi ve baz kalibrasyon emisyon değerleri Şekil 5.5'de verilmiştir. Grafikte bulunan kırmızı çarpı işareti baz kalibrasyona ait emisyon miktarını temsil etmektedir. Optimizasyon işleminde hedef değerler olarak baz kalibrasyonda oluşan 0,35 g/h PM emisyonu, Pareto eğrisine göre aynı PM emisyonunda elde edilebilecek minimum değer olan 1 g/h NO_X emisyonu ve baz kalibrasyona göre %10 düşürülmüş ÖYT değeri seçilmiştir. Belirlenen tüm hedeflere ulaşılması beklenmemesine rağmen, optimizasyon hedefleri ideal olarak seçilerek tüm değerlerde iyileşme amaçlanmıştır.



Şekil 5.5. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasındaki NO_X-PM Pareto eğrisi

Tablo 5.6'da baz kalibrasyon parametreleri, yanma analiz değerleri, yakıt tüketimi, egzoz emisyonları ve türbin giriş sıcaklık-basınç ölçümleri verilmiştir. VGT tipi turboya sahip motorlarda, düşük yüklerde NO_X emisyonunun düşürülmesi için yüksek EGR oranı etkili bir yaklaşımdır [78]. Bu nedenle, atmosferik basıncın 22 kPa üstünde %34 EGR oranına sahip sıkıştırılmış hava silindirlere gönderilmektedir. NO_X emisyonunun düşük tutulması için ana enjeksiyon zamanlaması da ÜÖN'dan rötardadır. Düşük motor devrine rağmen, yanma başlangıcı, ana enjeksiyon başlangıcından 3,4 °KA sonra gerçekleşmektedir. Tutuşma gecikmesinin fazla olması, düşük MAP değeri ve düşük ön enjeksiyon miktarının, yanma odasında yakıtın hava

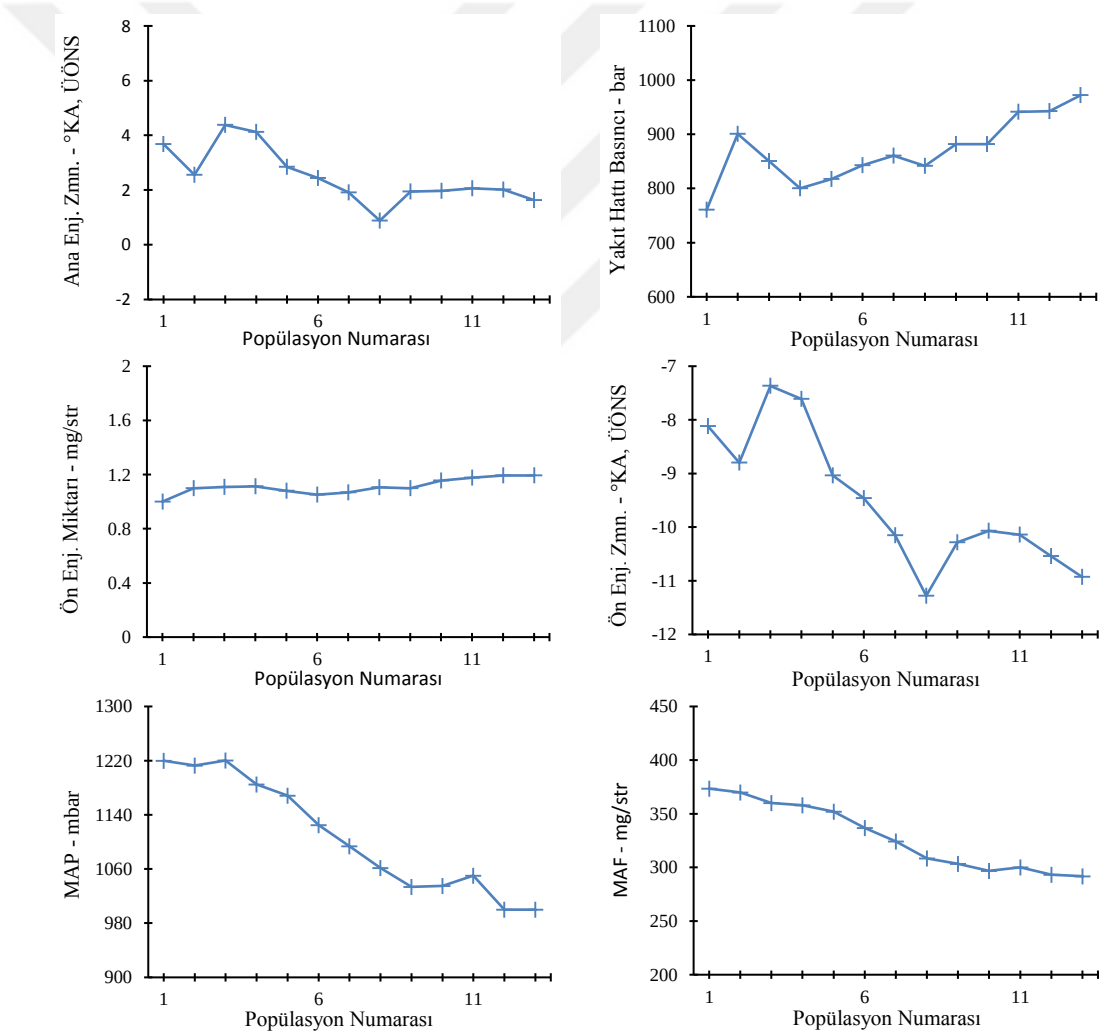
ile karışmasını yavaşlatması nedeniyledir [79]. Baz kalibrasyondaki ön enjeksiyon miktarı teke düşürüldüğü için maksimum basınç artış oranı 4,38 bar/°KA'na yükselmiştir. Ayrıca, enjeksiyon zamanlamasının rötarda olması ve EGR oranının yüksek olması nedeniyle CO emisyonunun yüksek olduğu görülmektedir. Araçta, egzoz sisteminde bulunan dizel oksidasyon katalisti (diesel oxidation catalyst) (DOC) sayesinde, yüksek CO emisyonu atmosfere salınmadan indirgenmektedir.

Tablo 5.6. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri

Ana Enjeksiyon Miktarı	mg/str	13,6
Ana Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	3,8
Yakıt Hattı Basıncı	bar	760
Ön Enjeksiyon Miktarı	mg/str	1,0
Ön Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	-8,0
MAP	mbar (mutlak)	1220
MAF	mg/str	370
EGR Oranı	%	34
Hava Fazlalık Katsayısı	-	1,77
Maksimum Silindir Basıncı	bar	53,8
Maksimum Basınç Oluşma Zamanı	°KA, ÜÖNS	16,2
Yanma Başlangıç Zamanı	°KA, ÜÖNS	7,2
%50 Yanmış Yakıt Kütle Zamanı	°KA, ÜÖNS	15,7
Yanma Sonu Zamanı	°KA, ÜÖNS	33,9
Yanma Gürültüsü	dBA	79,2
Maksimum Basınç Artış Oranı	bar/°KA	4,38
IMEP	bar	5,81
PMEP	bar	0,18
ÖYT	g/kWh	239,7
NO_X	g/h	6,32
PM	g/h	0,35
HC	g/h	2,07
CO	g/h	53,16
Türbin Giriş Sıcaklığı	°C	327
Türbin Giriş Basıncı	kPa	91,9

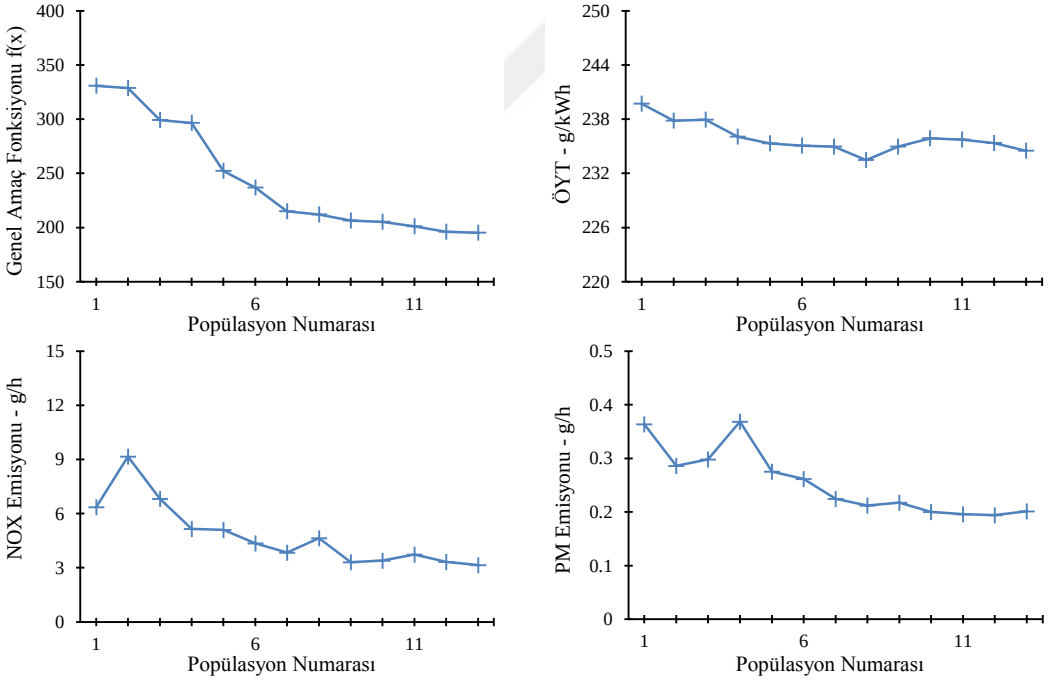
Baz kalibrasyon üzerinden uygulanan optimizasyon işlemindeki kalibrasyon parametreleri ve motor değerleri değişimi sırasıyla Şekil 5.6 ve 5.7'de gösterilmiştir. Grafiklerde, her popülasyondaki en iyi amaç fonksiyonuna sahip bireylere ait değerler verilmiştir. İlk popülasyonda, baz kalibrasyon değerlerine yakın ve düşük varyasyonlu bir dağılım oluşturulmuştur. İkinci popülasyonda, yakıt hattı basıncı artmış ve ana enjeksiyon zamanlaması ÜÖN'ya kaymıştır, ayrıca ön enjeksiyon zamanlaması da ana enjeksiyona yaklaşmıştır. Parametre değişimlerinin ardından yakıt tüketimi düşmesine rağmen, NO_X emisyonunda artış meydana geldiği için genel amaç fonksiyonunda belirgin bir iyileşme sağlanamamıştır. Üçüncü popülasyonda, yakıt tüketiminde az bir

artış ile NO_X emisyonunda düşüş sağlayan ana enjeksiyonun tekrardan rötara alınması, yakıt hattı basıncının bir miktar azaltılması ve MAF miktarının düşürülmesi işlemleri yapılmıştır. Beşinci popülasyonda, ana enjeksiyonun bir önceki noktaya göre ÜÖN'ya yakınlaşması ve ön enjeksiyonun daha erkene çekilmesi, ayrıca MAP ve MAF değerlerinin birlikte azaltılması sayesinde yakıt tüketimi ve PM emisyonunda iyileşme sağlamıştır. Sekizinci popülasyonda, optimizasyon süresinceki en düşük ÖYT değerine ulaşılmıştır. Ancak, bu noktada NO_X emisyonunun yüksek olması nedeniyle, sonraki adımlarda yakıt ekonomisinden feragat edilerek NO_X emisyonunda azalma sağlanmıştır. Son popülasyonlarda, kademeli olarak yakıt hattı basıncının arttığı, ön enjeksiyonun avansa kaydığı, MAP ve MAF değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.6. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait kalibrasyon parametreleri

Optimizasyon işlemi genel olarak incelendiğinde, ana enjeksiyonun ÜÖN'ya yaklaştığı görülmektedir. Bu sayede, yanmanın daha küçük bir hacimde başlamasıyla, termal verimin arttığı ve ÖYT'nin düştüğü söylenebilir. Optimizasyon boyunca, ön enjeksiyon az miktarda artış göstermiştir ve zamanlama avansa kaymıştır. Böylece, ön enjeksiyonun yanma odasında daha fazla yayılarak, tutuşma gecikmesinin azalması ve daha kontrollü bir yanmanın oluşması sağlanmıştır. Manifold basıncı da kademeli olarak atmosferik basınca kadar düşüş göstermiştir. Düşük hava basıncında yakıt demetinin yanma odasında daha fazla ilerlemesi nedeniyle PM emisyonunda artış beklenmiştir [80]. Ancak, yakıt hattı basıncının optimizasyon boyunca yükselerek yakıt atomizasyonunu arttırması PM emisyonunun artmasını engellemiştir. Ayrıca, EGR miktarının artış göstermesi, NO_X emisyonunu düşürmüştür. Son popülasyonlarda, düşük manifold basıncında istenen MAF miktarının sağlanması için gaz kelebeği devreye girerek, artış gösteren türbin işi, emme manifolduna daha çok EGR'nin akmasını sağlamıştır.



Şekil 5.7. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait amaç fonksiyonu, yakıt tüketimi ve emisyon miktarı değerleri

Optimizasyon işlemi 13. popülasyonda tamamlanmıştır. Tablo 5.7'de optimum kalibrasyon parametreleri ve motora ait değerler verilmiştir. Bu sonuçlara göre yakıt tüketiminde %2,2 azalma sağlanırken, NO_X emisyonu 6,32 g/h'den 3,95 g/h'e, PM emisyonu 0,35 g/h'den 0,25 g/h'e düşmüştür. Türbin işinin baz kalibrasyona göre

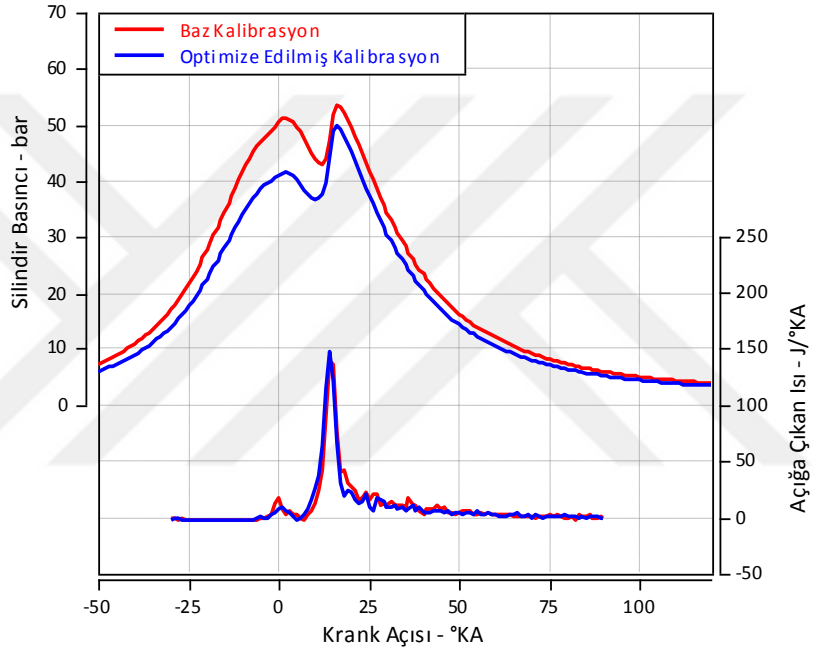
azalması sayesinde, yanma analiz sonucundaki pompalama kaybı ortalama efektif basıncının (PMEP) azaldığı gözükmektedir. PMEP, basınç-hacim diyagramında çizdirilen silindir içi basınç eğrisinin altında kalan negatif işin kurs hacmine bölünmesiyle elde edilir. Ayrıca, tutuşma gecikmesinin azalması ve yanma süresinin kısalması, yanmanın daha küçük silindir hacminde gerçekleşmesini ve termal verimin artmasını sağlamıştır. Buna rağmen, optimizasyon sonunda türbin giriş sıcaklığında artış meydana gemiştir. Bu durum, MAP'ın düşürülmesi nedeniyle azalan gaz kütlesinin yanma süresince daha fazla ısınmasıyla ilgilidir. Oluşan yüksek egzoz gazı sıcaklığı, emisyon test çevriminin başında soğuk olan egzoz emisyon katalistlerinin daha çabuk ısınarak, verimli çalışma koşullarına ulaşmasını hızlandırabilir. Tutuşma gecikmesinin azalmasına rağmen, artan yakıt hattı basıncı nedeniyle maksimum basınç artış oranı yükselmiştir. Bu durum, basınç eğrileri ile modellenen yanma gürültüsü değerinde de artışa neden olmuştur. Düşük çalışma yüküne rağmen yanma gürültüsünün artmış olması, bu noktada ilave tedbirler alınmasını gerektirmektedir. HC emisyonu, optimizasyon işleminin ardından artmıştır. HC emisyonundaki bu artış, düşük motor devrinde ve yüksek basınçta püskürtülen yakıtın silindir duvarlarına temas etmesi nedeniyle, yanmanın bu bölgede tam olarak gerçekleşememesi ile ilgilidir [40]. Ayrıca, EGR oranının artması da CO emisyonunu arttırmıştır [81]. Yükselen HC ve CO emisyonlarının DOC sayesinde egzoz çıkışında artışa neden olmayacağı ön görülmektedir [40]. Şekil 5.8'de baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyon parametreleri ile oluşan silindir içi basınç ve ısı dağılımı eğrileri verilmiştir.

Tablo 5.7. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasında optimize edilmiş kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri

Ana Enjeksiyon Miktarı	mg/str	13,1
Ana Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	2
Yakıt Hattı Basıncı	bar	970
Ön Enjeksiyon Miktarı	mg/str	1,2
Ön Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	-10,6
MAP	mbar (mutlak)	1010
MAF	mg/str	290
EGR Oranı	%	38,2
Hava Fazlalık Katsayısı	-	1,41
Maksimum Silindir Basıncı	bar	50,3
Maksimum Basınç Oluşma Zamanı	°KA, ÜÖNS	15,6
Yanma Başlangıç Zamanı	°KA, ÜÖNS	5,2
%50 Yanmış Yakıt Kütle Zamanı	°KA, ÜÖNS	14,7
Yanma Sonu Zamanı	°KA, ÜÖNS	31,3
Yanma Gürültüsü	dBA	80,2

Tablo 5.7. (Devam) 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasında optimize edilmiş kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri

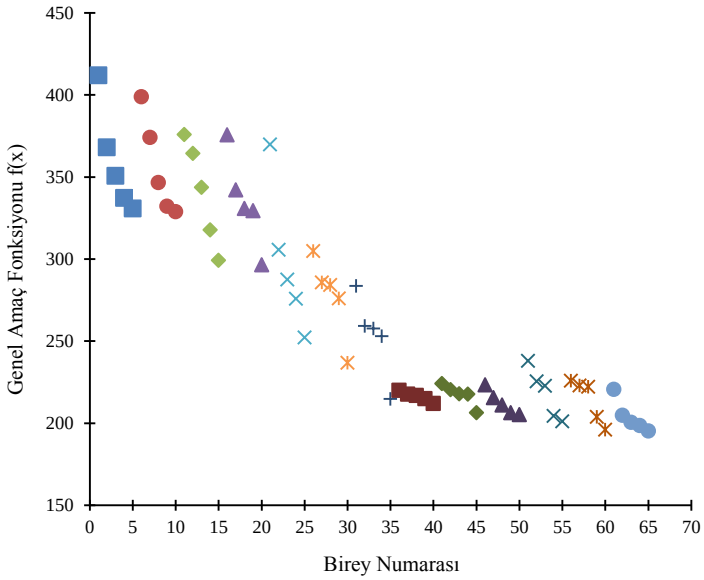
Maksimum Basınç Artış Oranı	bar/°KA	5,20
IMEP	bar	5,70
PMEP	bar	0,08
ÖYT	g/kWh	234,5
NO_X	g/h	3,95
PM	g/h	0,25
HC	g/h	2,37
CO	g/h	60,2
Türbin Giriş Sıcaklığı	°C	344
Türbin Giriş Basıncı	kPa	60,5



Şekil 5.8. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyona ait silindir basınç ve ısı dağılımı eğrileri

Optimizasyon işlemi sayesinde egzoz emisyon miktarları Şekil 5.5'de verilen NO_X-PM Pareto eğrisine yaklaşmıştır, ancak amaç fonksiyonunda ÖYT'nin de bulunması nedeniyle tam yakınsama sağlanamamıştır. Optimizasyon işleminde oluşan tüm bireylerin amaç fonksiyonu değeri Şekil 5.9'da verilmiştir. İlk popülasyonlarda iyi noktaların tespiti fazla olduğundan, CMA-ES algoritmasının birey dağılımlarını yüksek tuttuğu gözükmektedir. Sekizinci popülasyondan itibaren, optimum noktaya yaklaşıldığı için adım boyutu düşürülerek daha dar bir alanda tarama işlemi devam etmiştir. On üçüncü popülasyonun ardından önceki popülasyonlara göre daha iyi

değerlere yakınsanmaması nedeniyle optimizasyon işlemi tamamlanmıştır. 65 adet bireyin oluştuğu optimizasyon işlemi yaklaşık 100 dakika sürmüştür.



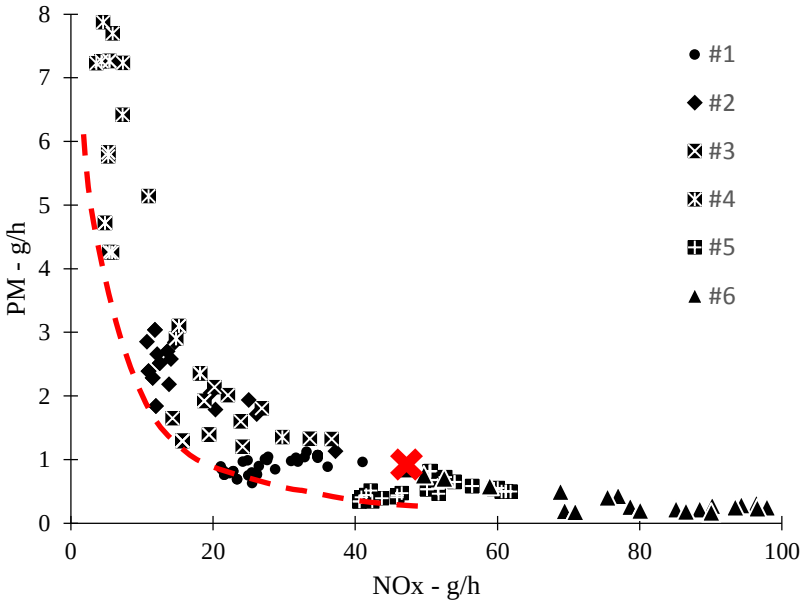
Şekil 5.9. 1640 d/d-70 Nm çalışma noktasındaki her bireye ait amaç fonksiyon değeri

5.3.2. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasında optimizasyon çalışması

Optimizasyon işleminin uygulandığı 3 numaralı 1880 d/d-120 Nm çalışma noktası NEDC testinde 21 saniye çalışma süresine denk gelmektedir. Motor haritasında orta devir ve orta yükte bulunan bu noktada, emisyon çevrimi boyunca 250 mg NO_X emisyonu oluştuğu tahmin edilmektedir. Baz kalibrasyonda bu çalışma noktasında tek ön enjeksiyon yapıldığı için, kalibrasyonda herhangi bir değişiklik yapılmadan optimizasyon işleminde kullanılmıştır. NO_X-PM Pareto eğrisi ve baz kalibrasyon emisyon değerleri Şekil 5.10'da verilmiştir. Bir önceki çalışma noktasına benzer şekilde, optimizasyon işleminde hedef değerler olarak baz kalibrasyonda oluşan 0,94 g/h PM emisyonu, Pareto eğrisine göre aynı PM emisyonunda elde edilen minimum değer olan 20 g/h NO_X emisyonu ve baz kalibrasyona göre %10 düşürülmüş ÖYT değeri seçilmiştir.

Tablo 5.8'de baz kalibrasyon parametreleri ve motora ait değerler verilmiştir. Baz kalibrasyon EGR oranı, önceki çalışma noktasındaki EGR oranından daha az miktardadır. Ana enjeksiyon zamanlamasının da, önceki noktadaki baz kalibrasyon değerine benzer olduğu gözükmektedir. Yakıt ekonomisi için, manifold basıncı yüksek

tutularak yakıtın havayla daha iyi karışması sağlanmıştır. Yüksek basınçta püskürtme, tutuşma gecikmesininin azaltılmasında etkili bir yöntemdir [82]. Bu nedenle, yakıt hattı basıncı yükseltilerek tutuşma gecikmesi azaltılmıştır. Motor gürültüsü bu çalışma noktası için belirlenen sınır değerdedir. Baz kalibrasyonda, ön enjeksiyon miktarı önceki çalışma noktasına göre daha yüksektir. Ayrıca, motor devrinin artması nedeniyle ön enjeksiyon zamanlaması avansa kaydırılmıştır.



Şekil 5.10. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasındaki NO_X-PM Pareto eğrisi

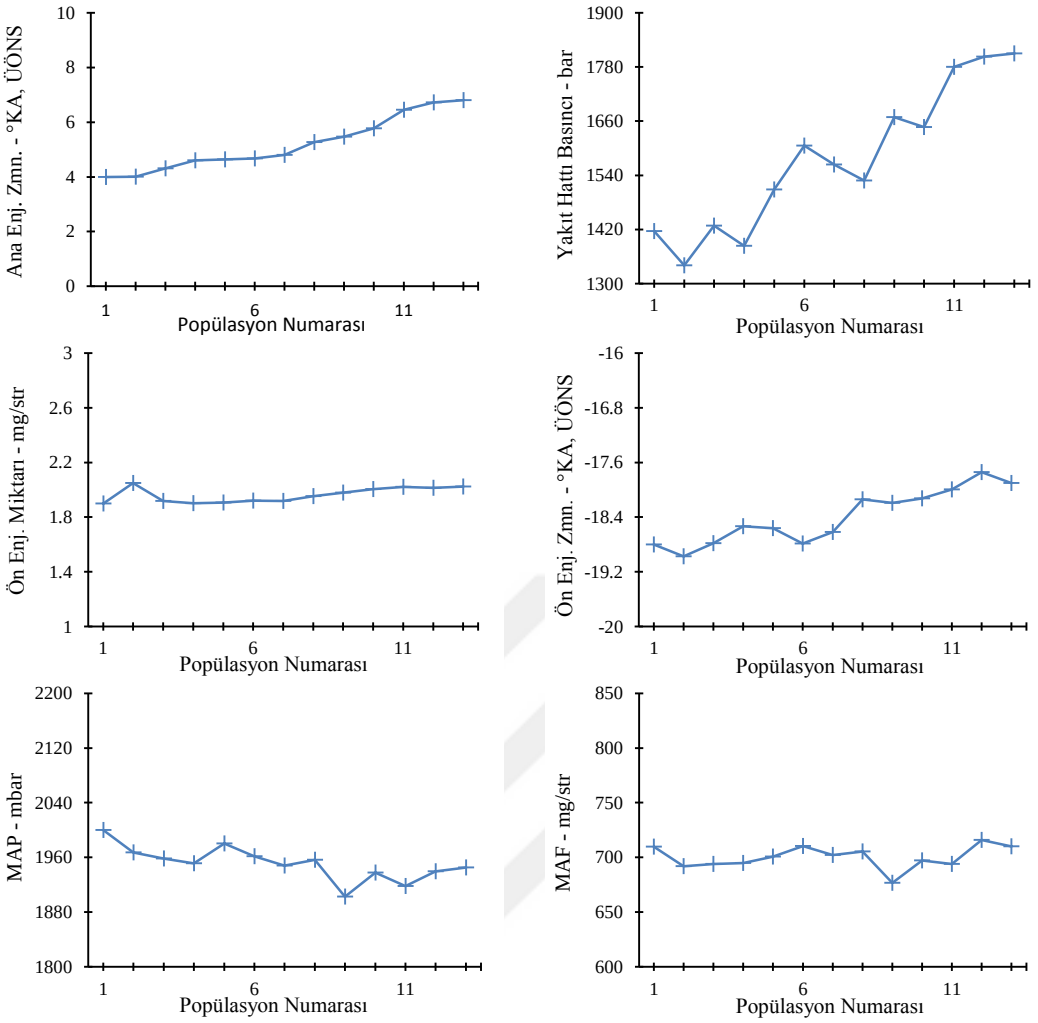
Tablo 5.8. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri

Ana Enjeksiyon Miktarı	mg/str	22,7
Ana Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	4
Yakıt Hattı Basıncı	bar	1430
Ön Enjeksiyon Miktarı	mg/str	1,9
Ön Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	-18,8
MAP	mbar (mutlak)	2000
MAF	mg/str	710
EGR Oranı	%	24,5
Hava Fazlalık Katsayısı	-	2,01
Maksimum Silindir Basıncı	bar	89,1
Maksimum Basınç Oluşma Zamanı	°KA, ÜÖNS	15,6
Yanma Başlangıç Zamanı	°KA, ÜÖNS	6,2
%50 Yanmış Yakıt Kütle Zamanı	°KA, ÜÖNS	14,6
Yanma Sonu Zamanı	°KA, ÜÖNS	28,1
Yanma Gürültüsü	dBA	79,8
Maksimum Basınç Artış Oranı	bar/°KA	4,34
IMEP	bar	9,63
PMEP	bar	0,69

Tablo 5.8. (Devam) 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri

ÖYT	g/kWh	234,7
NO_X	g/h	44,0
PM	g/h	0,94
HC	g/h	1,43
CO	g/h	27,3
Türbin Giriş Sıcaklığı	°C	372
Türbin Giriş Basıncı	kPa	203,3

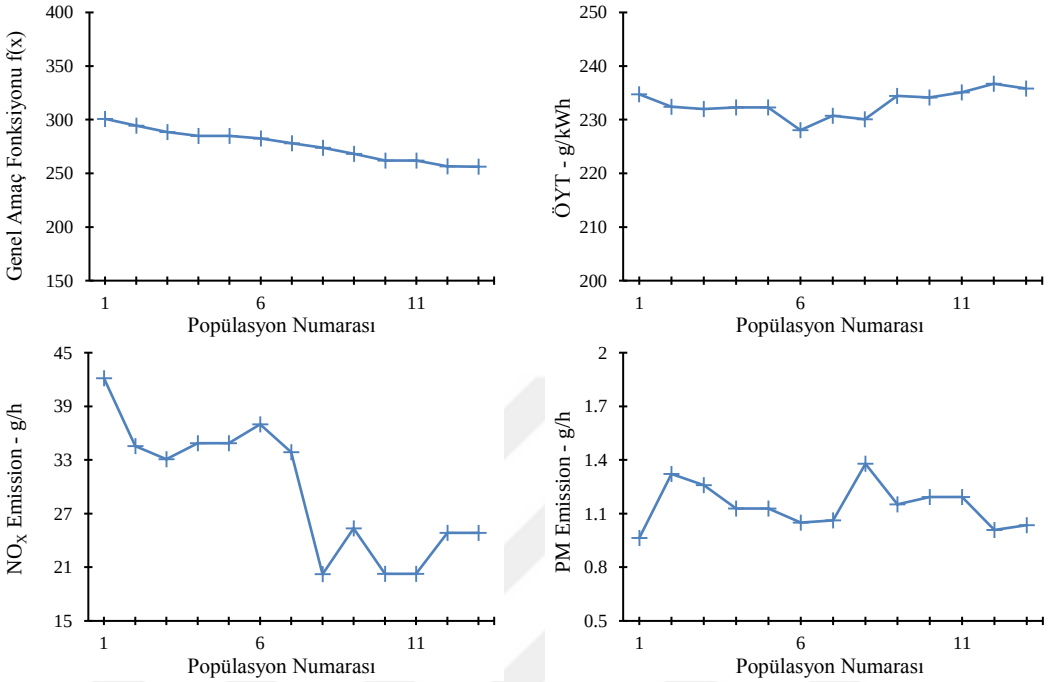
Baz kalibrasyon üzerinden uygulanan optimizasyon işlemindeki her popülasyonun en iyi bireyine ait kalibrasyon parametreleri ve motor değerleri sırasıyla Şekil 5.11 ve 5.12'de gösterilmiştir. Uygun ön enjeksiyon parametreleri ile dizel motorda termal verim arttırılabilmektedir [83]. Bu nedenle ikinci popülasyonda, ön enjeksiyon miktarının baz kalibrasyona göre artması ve zamanlamanın avansa kayması yakıt tüketimine katkı sağlamıştır. Ayrıca, manifold basıncının ve MAF miktarının düşmesi, NO_X emisyonunu azaltmış ve PMEP azaldığı için motor verimine katkı sağlamıştır. NO_X emisyonunun azaltılması için yakıt hattı basıncı da düşürülmüştür, fakat bu değişiklik PM emisyonunda artışa neden olmuştur. Altıncı popülasyonda, optimizasyon işlemindeki en düşük ÖYT değerine ulaşılmıştır. Yakıt hattı basıncı ve MAF'ın arttırılarak ve ön enjeksiyonun avansa alınarak iyileşmenin sağlandığı bu adımda, NO_X emisyonunun artış göstermesi nedeniyle genel amaç fonksiyonundaki iyileşme kısıtlı kalmıştır. Bu nedenle, sonraki popülasyonlarda NO_X emisyonunda iyileşme sağlayacak parametre değişiklikleri ağırlık kazanmıştır. Sekizinci popülasyonda, ana enjeksiyonun ÜÖN'dan uzaklaşması ve yakıt hattı basıncının düşürülmesi sayesinde optimizasyon işlemindeki en düşük NO_X emisyonuna ulaşılmıştır. Ancak, yapılan bu değişiklikler yanma kalitesini düşürdüğü için PM emisyonunda belirgin bir artışa neden olmuştur. Son popülasyonlarda kademeli olarak ana enjeksiyonun rötara alınması, yakıt hattı basıncının arttırılması, ön enjeksiyonun avansa alınması ve manifold basıncının düşürülmesi gibi parametre değişiklikleri ile NO_X ve PM emisyonlarında iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 5.11. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait kalibrasyon parametreleri

Optimizasyon işlemi genel olarak incelendiğinde, ana enjeksiyonun ÜÖN'dan uzaklaşmasıyla NO_X emisyonunun azaldığı söylenebilir. Enjeksiyonun rötara alınması oksidasyon hızını düşüreceği için, ÖYT ve PM emisyonunun bundan olumsuz etkilenmesi beklenmektedir. Bu nedenle, yakıt hattı basıncı optimizasyon boyunca artarak, yanmanın daha erken ve küçük silindir hacminde gerçekleşmesini sağlamıştır, böylece ÖYT artışı kısıtlı miktarda olmuştur. Ayrıca, yakıt atomizasyonundaki artış ile PM emisyonunda azalma sağlanmıştır. Ön enjeksiyon zamanlamasının ana enjeksiyona göre farkı optimizasyon boyunca artmıştır. Bu sayede, ön enjeksiyonun yanma odasında daha fazla yayılarak, tutuşma gecikmesinin azalmasında katkı sağlamıştır. Ön enjeksiyon miktarında belirgin bir değişiklik yaşanmamıştır. Manifold basıncında ise optimizasyon boyunca düşüş eğilimi görülmüştür. Ancak, MAF miktarında optimizasyon işleminin sonunda değişim yaşanmadığından dolayı EGR

oranı azalmıştır. Optimizasyon işlemindeki NO_X hedefine rağmen EGR oranında düşüş yaşanmasının nedeni, ÖYT ve PM hedeflerinin genel amaç fonksiyonundaki ağırlıklarıyla ilgilidir.



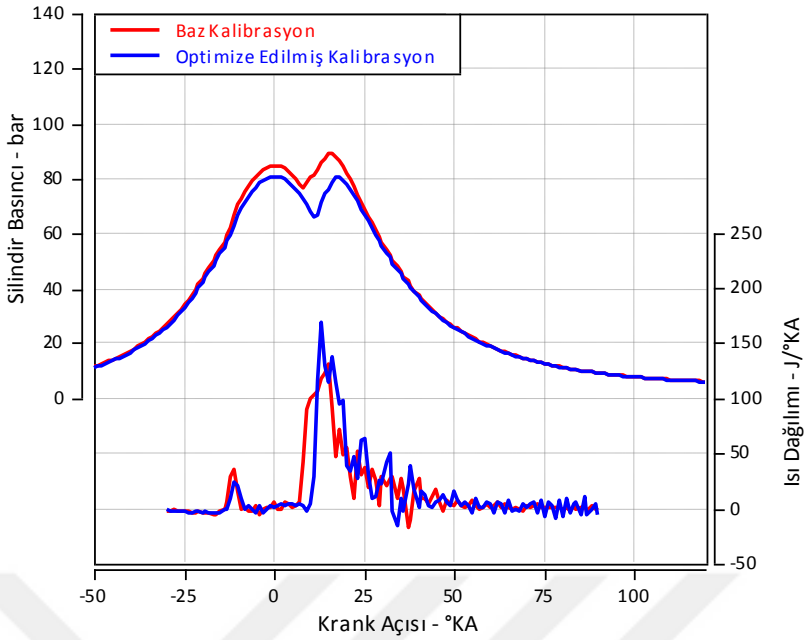
Şekil 5.12. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait amaç fonksiyonu, yakıt tüketimi ve emisyon miktarı değerleri

Optimizasyon işlemi 13. popülasyonda sona ermiştir. Tablo 5.9'da optimum kalibrasyon parametreleri ve motora ait değerler verilmiştir. Bu sonuçlara göre NO_X emisyonu 44 g/h'den 24,8 g/h'e düşerken, PM emisyonu 0,94 g/h'den 1,03 g/h'e yükselmiştir. Ayrıca, yakıt tüketiminde %0,5 artış meydana gelmiştir. Yanma analiz sonuçları karşılaştırıldığında, ana enjeksiyonun rötara alınması nedeniyle maksimum basınç değerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, PMEP'in optimizasyon sonunda bir miktar azaldığı gözükmektedir. Ön enjeksiyon parametrelerinin değişimine rağmen, yakıt hattı basıncının artması ve ana enjeksiyonun rötara kayması tutuşma gecikmesini arttırmıştır. Bu nedenle, yanma başlangıcı baz kalibrasyona göre yaklaşık 3 °KA geç gerçekleşmiştir. %50 yanmış yakıt kütle zamanı da 2 °KA rötara kaymıştır. Yanmanın rötara doğru kayması ÖYT değerini de arttırmıştır. Ayrıca, maksimum basınç artış oranı ve yanma gürültüsü değeri artış göstermiştir. Optimizasyon sonunda CO emisyonunda da az miktarda artış yaşanmıştır. Artan CO emisyonunun DOC sayesinde egzoz çıkışında artışa neden olmayacağı ön görülmektedir. MAP talebinin düşmesine bağlı olarak azalan türbin işi nedeniyle türbin çıkış basıncı azalmıştır. Azalan türbin

giriş basıncı ile PMEP'in azaldığı ve hacimsel verimin arttığı söylenebilir. Türbin giriş sıcaklığı da yanmanın rötara kayması ve silindirlere alınan hava miktarının azalması nedeniyle artmıştır. Şekil 5.13'de baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyon parametreleri ile oluşan silindir içi basınç eğrileri ve ısı dağılımı eğrileri verilmiştir.

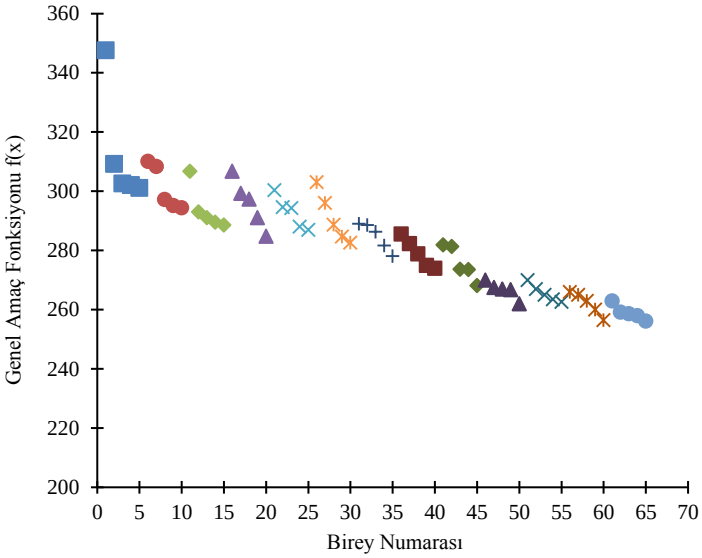
Tablo 5.9. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasında optimize edilmiş kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri

Ana Enjeksiyon Miktarı	mg/str	22,7
Ana Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	6,8
Yakıt Hattı Basıncı	bar	1810
Ön Enjeksiyon Miktarı	mg/str	2,0
Ön Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	-17,8
MAP	mbar (mutlak)	1945
MAF	mg/str	710
EGR Oranı	%	21,3
Hava Fazlalık Katsayısı	-	2,00
Maksimum Silindir Basıncı	bar	80,9
Maksimum Basınç Oluşma Zamanı	°KA, ÜÖNS	17,8
Yanma Başlangıç Zamanı	°KA, ÜÖNS	9,2
%50 Yanmış Yakıt Kütle Zamanı	°KA, ÜÖNS	16,6
Yanma Sonu Zamanı	°KA, ÜÖNS	30,7
Yanma Gürültüsü	dBA	82,4
Maksimum Basınç Artış Oranı	bar/°KA	4,59
IMEP	bar	9,53
PMEP	bar	0,58
ÖYT	g/kWh	235,8
NO_X	g/h	24,8
PM	g/h	1,03
HC	g/h	1,35
CO	g/h	29,7
Türbin Giriş Sıcaklığı	°C	392
Türbin Giriş Basıncı	kPa	190,5



Şekil 5.13. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyona ait silindir basınç ve ısı dağılımı eğrileri

Optimizasyon sonucunda Şekil 5.10'da verilen NO_X-PM Pareto eğrisine oldukça yaklaşılmıştır, ancak yakıt tüketiminde hedeflenen iyileşme sağlanamamıştır. Optimizasyon işleminde oluşan tüm bireylerin amaç fonksiyonu değeri Şekil 5.14'de verilmiştir. 13 popülasyonda tamamlanan optimizasyon işleminde toplam 65 birey oluşmuştur. İlk 6 popülasyondaki dağılımın, sonraki popülasyonlara göre daha fazla olduğu gözükmektedir. Bu popülasyonlarda, adım boyutu yüksek tutularak tarama kabiliyeti yüksek tutulmuştur. Optimum noktaya yaklaştıkça popülasyon dağılımları azalmıştır. Optimizasyon işlemi boyunca devamlı olarak genel amaç fonksiyonu değerlerinde iyileşme sağlanmıştır. Bu nedenle, CMA-ES strateji parametrelerinin optimizasyon problemine uygun olarak belirlendiği söylenebilir. On üçüncü popülasyonun ardından önceki popülasyonlara göre daha iyi değere yakınsanmaması nedeniyle optimizasyon işlemi tamamlanmıştır. Optimizasyon işlemi yaklaşık 100 dakika sürmüştür.

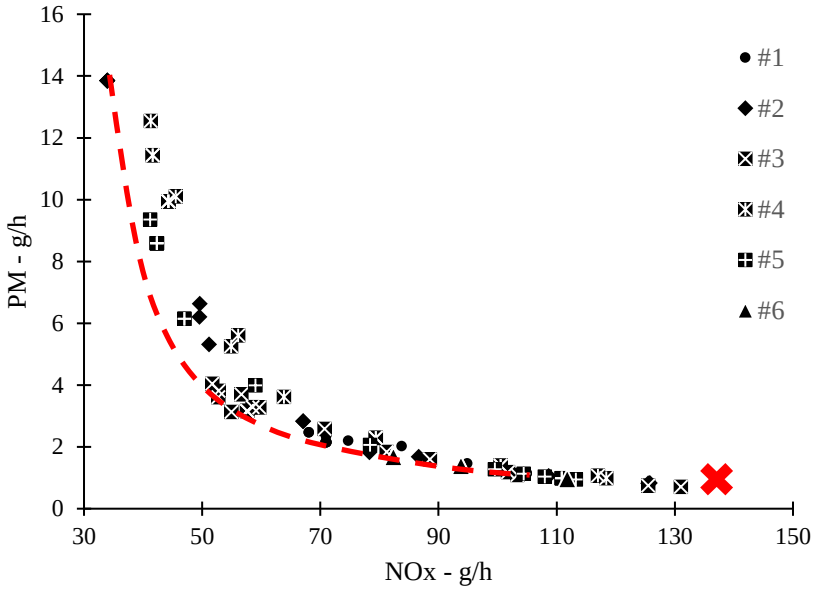


Şekil 5.14. 1880 d/d-120 Nm çalışma noktasındaki her bireye ait amaç fonksiyon değeri

5.3.3. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasında optimizasyon çalışması

Optimizasyon işleminin uygulandığı son nokta 5 numaralı 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasıdır. NEDC testindeki maksimum yük bölgesinde bulunan bu nokta, test çevriminde 6 saniye çalışma süresine denk gelmekte ve yaklaşık 210 mg NO_X emisyonuna neden olmaktadır. Baz kalibrasyon üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan optimizasyon işlemi uygulanmıştır.

Çalışma süresi kısa olmasına rağmen, birim zamandaki NO_X emisyonu miktarının fazla olması nedeniyle, bu çalışma noktasının NEDC testindeki ağırlık oranı %5,22 olarak hesaplanmıştır. Bu noktaya ait NO_X-PM Pareto eğrisi ve baz kalibrasyon emisyon değerleri Şekil 5.15'de verilmiştir. Baz kalibrasyon emisyon değerleri Pareto eğrisi üzerinde bulunmaktadır. Bu nedenle, NO_X emisyonunda iyileşme sağlanması için PM emisyonundan feragat edilmesi gerekmektedir. Hedef değerler olarak 90 g/h NO_X emisyonu, 1,6 g/h PM emisyonu ve baz kalibrasyona göre %10 düşürülmüş ÖYT değerleri seçilmiştir.



Şekil 5.15. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasındaki NO_X-PM Pareto eğrisi

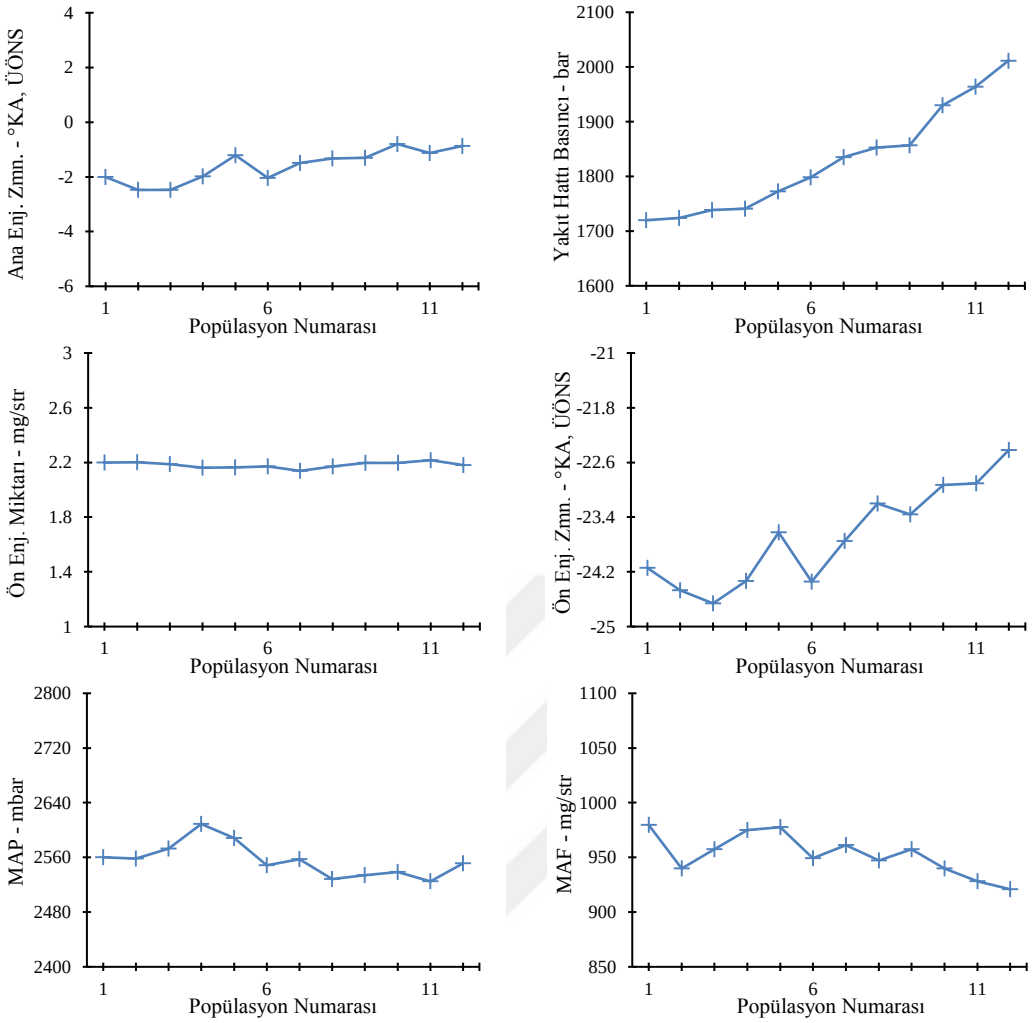
Tablo 5.10'da 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasındaki baz kalibrasyon parametreleri ve motora ait değerler verilmiştir. Yanmanın, yüksek devirde ve yükte, fazla rötarda oluşmaması için ana enjeksiyon ÜÖN'dan önce ve yüksek yakıt hattı basıncında gerçekleşmektedir. Yakıt hattı basıncının yüksek olmasının diğer bir nedeni, püskürtülen fazla miktardaki yakıtın hava ile karışmasının kolaylaşmasıdır. Toplam yakıt miktarına bağlı olarak ön enjeksiyon miktarı da önceki noktalara göre yüksektir. Yakıtın hava ile iyi şekilde karışması için manifold basıncı dizayn limitlerinin izin verdiği ölçüde yüksek tutulmuştur. Dizel motorlarda EGR oranının yükselmesi, PM emisyonunun artmasına neden olmaktadır [44]. Bu nedenle, yüksek motor devrinde azalan yanma zamanının PM emisyonunu olumsuz etkilememesi için EGR oranı düşük tutulmuştur. Yüksek yakıt basıncı ve manifold basıncı sayesinde tutuşma gecikmesi düşük miktardadır. Yanma gürültüsü limitler dahilindedir.

Baz kalibrasyon üzerinden uygulanan optimizasyon işleminde kalibrasyon parametrelerinin ve motor değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 5.16 ve 5.17'de gösterilmiştir. İkinci popülasyonda, MAF miktarının düşürülmesi ile EGR oranı artarak NO_X emisyonunda düşüş yaşanmıştır. Ancak, ÖYT ve PM emisyonunda artış olduğundan genel amaç fonksiyonundaki iyileşme kısıtlı kalmıştır. Genel amaç fonksiyonunda belirgin ilk iyileşme PM emisyonunda azalma sağlanan altıncı popülasyonda meydana gelmiştir. Yakıt hattı basıncının artması PM emisyonunu

azaltırken, MAP ve MAF miktarlarının düşmesi NO_X emisyonunun artmasına engel olmuştur. Ayrıca, ana enjeksiyon zamanı da bir önceki popülasyona göre avansa kaymıştır. Amaç fonksiyonundaki diğer belirgin iyileşme onuncu popülasyonda gerçekleşerek, NO_X emisyonunda artış yaşanmadan ÖYT ve PM emisyonu azalmıştır. Bu adımda, avansta bulunan ana enjeksiyon zamanlaması ÜÖN'ya yakınlaşmış, yakıt hattı basıncında artış meydana gelmiş ve MAF miktarı düşmüştür. Son popülasyonlarda, kademeli olarak ana enjeksiyonun rötara kayması, yakıt hattı basıncının yükselmesi, ön enjeksiyonun ÜÖN'ya yaklaşması ve MAF miktarının düşmesi gerçekleşmiştir. Bu sayede NO_X emisyonunda bir miktar daha iyileşme sağlanmıştır.

Tablo 5.10. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri

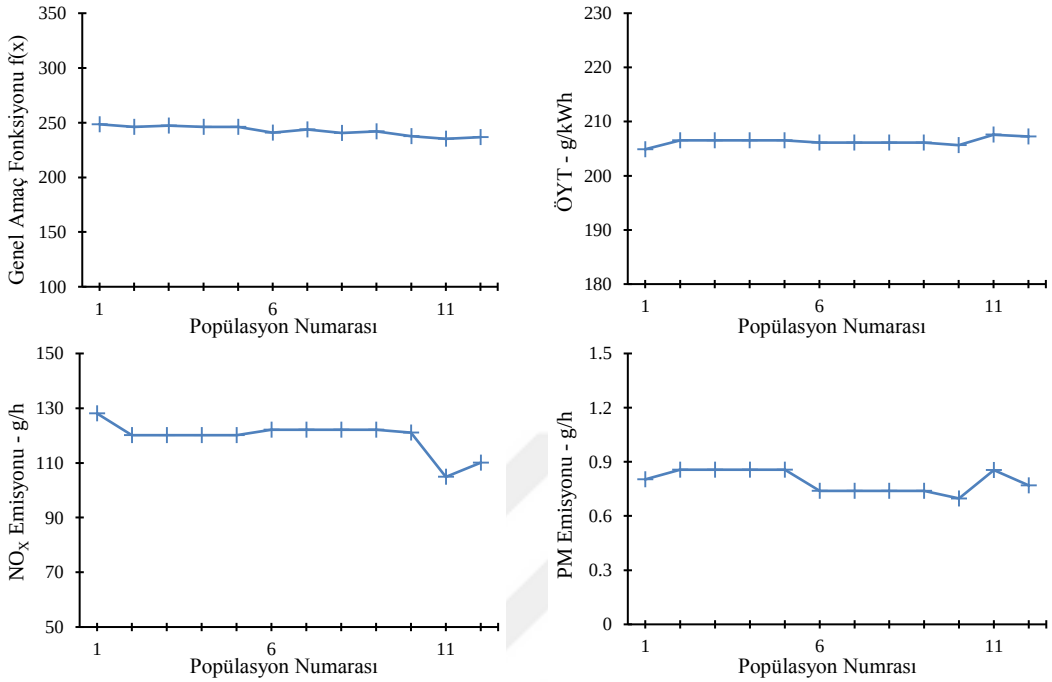
Ana Enjeksiyon Miktarı	mg/str	42,6
Ana Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	-2
Yakıt Hattı Basıncı	bar	1720
Ön Enjeksiyon Miktarı	mg/str	2,2
Ön Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	-24,1
MAP	mbar (mutlak)	2560
MAF	mg/str	980
EGR Oranı	%	17
Hava Fazlalık Katsayısı	-	1,53
Maksimum Silindir Basıncı	bar	143,8
Maksimum Basınç Oluşma Zamanı	°KA, ÜÖNS	15,4
Yanma Başlangıç Zamanı	°KA, ÜÖNS	-0,8
%50 Yanmış Yakıt Kütle Zamanı	°KA, ÜÖNS	12,9
Yanma Sonu Zamanı	°KA, ÜÖNS	30,6
Yanma Gürültüsü	dBA	77,7
Maksimum Basınç Artış Oranı	bar/°KA	5,11
IMEP	bar	17,97
PMEP	bar	0,35
ÖYT	g/kWh	205,3
NO_X	g/h	135,5
PM	g/h	0,70
HC	g/h	1,69
CO	g/h	22,1
Türbin Giriş Sıcaklığı	°C	502
Türbin Giriş Basıncı	kPa	243,2



Şekil 5.16. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait kalibrasyon parametreleri

Baz kalibrasyondaki emisyon değerlerinin NO_X-PM Pareto eğrisi üzerinde bulunduğu yukarıda belirtilmişti. Pareto eğrisinin optimizasyon uzayını sınırlandırması ve belirlenen NO_X ve ÖYT hedeflerinin optimizasyon uzayında ters yönlerde gelişim gerektirmesi nedeniyle, 5 numaralı çalışma noktasındaki optimizasyon işlemi diğer noktalara göre kısıtlı gerçekleşmiştir. Yakıt tüketiminde artış olmadan NO_X emisyonunun düşürülmesi için silindirlere alınan toplam hava miktarının aynı kalacak şekilde EGR oranının arttırılması etkin bir yöntemdir [44]. Optimizasyon işleminde de manifold basıncı baz kalibrasyona göre yaklaşık aynı kalırken, MAF değeri düşürülmüştür. Ayrıca, ana enjeksiyonun rötara kayması ve yakıt hattı basıncının artış göstermesi bu çalışma noktasında da gerçekleşmiştir. Yakıt hattı basıncı optimizasyon işlemi sonunda 2000 barın üzerine çıkmıştır. Ön enjeksiyon miktarında değişiklik yaşanmazken, zamanlama son popülasyonlarda ana enjeksiyona yaklaşmıştır. Yapılan

parametre değişikliklerinin ardından, yakıt tüketiminde bir miktar artış yaşanarak NO_X emisyonunda düşüş sağlanmıştır.

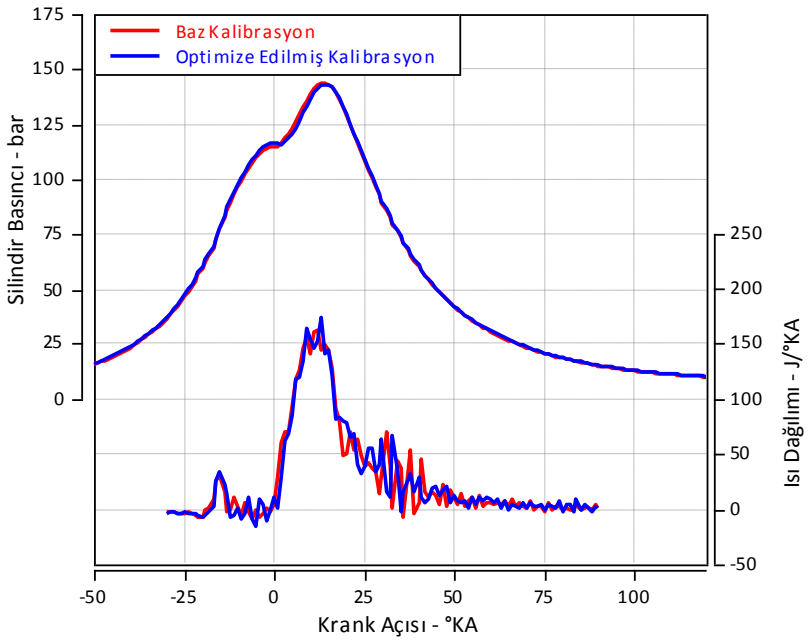


Şekil 5.17. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasındaki her popülasyonun en iyi bireyine ait amaç fonksiyonu, yakıt tüketimi ve emisyon miktarı değerleri

Optimizasyon işlemi 12. popülasyonda sona ermiştir. Tablo 5.11'de optimum kalibrasyon parametreleri ve motora ait değerler verilmiştir. Bu sonuçlara göre NO_X emisyonu 135,5 g/h'den 110,1 g/h'e düşerken, PM emisyonu 0,70 g/h'den 0,77 g/h'e yükselmiştir. Yakıt tüketiminde de %1 artış meydana gelmiştir. Yanma analiz sonuçları karşılaştırıldığında, değerlerin birbirine yakın oldukları gözükmektedir. Maksimum silindir basıncında 1 bar düşüş yaşanmıştır. Yüksek motor devrine rağmen, yakıt hattı basıncının artışı sayesinde tutuşma gecikmesi 0,7 °KA'na düşmüştür. Ayrıca, ana enjeksiyon zamanlamasının avanstan ÜÖN'ya 1,2 °KA yaklaşması nedeniyle, yanma başlangıcında 0,8 °KA ve %50 yanmış yakıt kütle zamanında 0,5 °KA kayma meydana gelmiştir. Yanma gürültüsünde ve maksimum basınç artış oranında limit içerisinde kalan bir artış yaşanmıştır. PMEP optimizasyon sonunda yaklaşık aynı miktardadır. Ana enjeksiyon zamanlamasının rötara kaymasıyla nedeniyle, türbin giriş sıcaklığında 8 °C artış yaşanmıştır. Optimizasyon sonucunda CO ve HC emisyonları yaklaşık aynı değerlerdedir. Şekil 5.18'de baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyon parametreleri ile oluşan silindir içi basınç ve ısı dağılımı eğrileri verilmiştir.

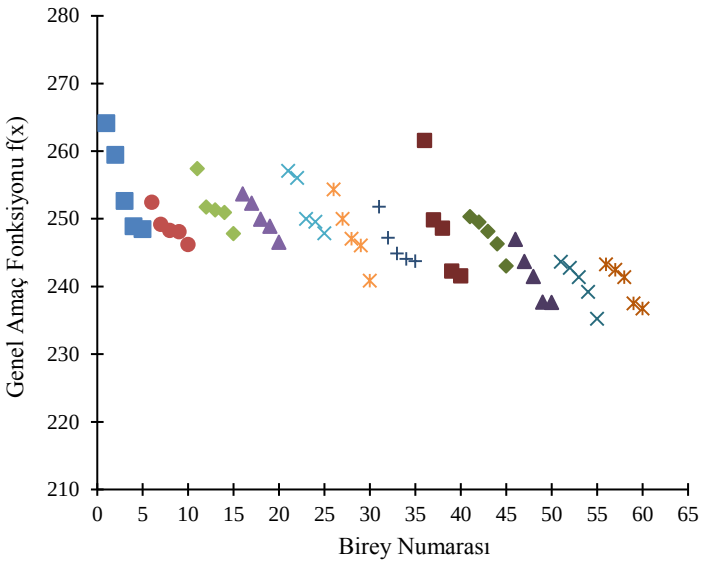
Tablo 5.11. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasında optimize edilmiş kalibrasyon, yanma analizi, emisyon ve performans değerleri

Ana Enjeksiyon Miktarı	mg/str	43
Ana Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	-0,7
Yakıt Hattı Basıncı	bar	2010
Ön Enjeksiyon Miktarı	mg/str	2,2
Ön Enjeksiyon Zamanlaması	°KA, ÜÖNS	-22,4
MAP	mbar (mutlak)	2560
MAF	mg/str	920
EGR Oranı	%	20,7
Hava Fazlalık Katsayısı	-	1,42
Maksimum Silindir Basıncı	bar	143,1
Maksimum Basınç Oluşma Zamanı	°KA, ÜÖNS	15,2
Yanma Başlangıç Zamanı	°KA, ÜÖNS	0,0
%50 Yanmış Yakıt Kütle Zamanı	°KA, ÜÖNS	13,4
Yanma Sonu Zamanı	°KA, ÜÖNS	31,1
Yanma Gürültüsü	dBA	79,1
Maksimum Basınç Artış Oranı	bar/°KA	5,41
IMEP	bar	18,00
PMEP	bar	0,37
ÖYT	g/kWh	207,3
NO_X	g/h	110,1
PM	g/h	0,77
HC	g/h	1,46
CO	g/h	22,6
Türbin Giriş Sıcaklığı	°C	510
Türbin Giriş Basıncı	kPa	246,3



Şekil 5.18. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasında baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyona ait silindir basınç ve ısı dağılımı eğrileri

Optimizasyon sonucunda elde edilen NO_X emisyonundaki iyileşme Şekil 5.15'de verilen NO_X-PM Pareto eğrisine uyumlu olacak şekilde, PM miktarında artış yaşanarak sağlanmıştır. Ancak, optimizasyonda yakıt tüketimi hedefi nedeniyle, NO_X emisyonu istenen değere düşürülememiştir. Optimizasyon işleminde oluşan tüm bireylerin amaç fonksiyonu değeri Şekil 5.19'da verilmiştir. 12 popülasyonda tamamlanan optimizasyon işleminde 60 adet birey oluşmuştur. Her adımda iyi noktaya ulaşma hızının yavaş olması nedeniyle, optimizasyon algoritması popülasyon adım boyutunu yüksek tutarak, popülasyon dağılımlarının fazla olmasını sağlamıştır. Bu sayede, her popülasyonda sürekli bir iyileşme yakalanmıştır. Optimizasyon işlemi yaklaşık 90 dakika sürmüştür.



Şekil 5.19. 2190 d/d-250 Nm çalışma noktasındaki her bireye ait amaç fonksiyon değeri

5.4. Emisyon Test Çevrimi Sonuçları

Bölüm 5.3'de, her çalışma noktasındaki en iyi sonuçları veren optimizasyon işlemlerinin anlatımı yapılmıştır. Oysa optimizasyon çalışmalarında, algoritmanın tekrarlı olarak başarı gösterdiğinin kontrolü için, her çalışma noktasında en az 3 deneme bulunmaktadır. Genel olarak, yapılan denemelerde aynı kalibrasyon parametrelerine yakınsanmıştır. Tablo 5.12'de en iyi amaç fonksiyonu değerine ulaşan 3 optimizasyon işleminin yakıt tüketimi ve emisyon miktarları gösterilmiştir. Tablodaki değerler, optimizasyon işlemi sonunda yakınsanan kalibrasyon parametreleri ile alınan 2 adet tekrarlı ölçümün ortalamasıdır.

Tablo 5.12. Optimizasyon sonunda elde edilen yakıt tüketimi ve emisyon miktarları

Çalışma Noktası	Süre - sn.	Optimizasyon Nr.	ÖYT - g/kWh	NO_X - g/h	PM - g/h
1640 d/d - 70 Nm	124	Baz Kalibrasyon	239,7	6,32	0,35
		#1	234,5	3,95	0,25
		#2	233,2	4,92	0,25
		#3	235,3	4,83	0,22
1880 d/d - 120 Nm	21	Baz Kalibrasyon	234,7	44,0	0,94
		#1	235,8	24,8	1,03
		#2	237,2	25,0	0,99
		#3	234,9	31,4	0,75
2190 d/d - 250 Nm	6	Baz Kalibrasyon	205,3	135,5	0,70
		#1	207,3	110,1	0,77
		#2	206,9	115,7	0,68
		#3	208,4	114,3	0,84

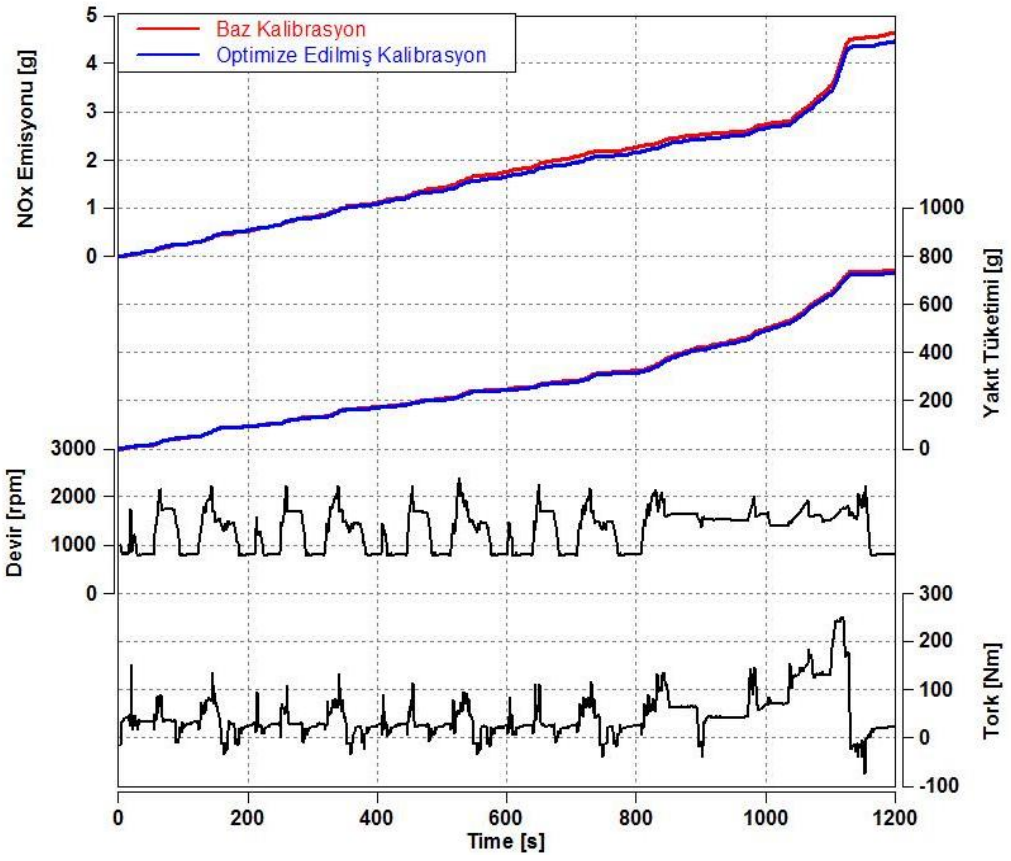
NEDC testi boyunca beklenen teorik kazanım, her çalışma noktası için elde edilen yakıt tüketimi ve emisyon miktarlarındaki iyileşmelerin ortalaması alınarak Tablo 5.13'de verilmiştir. Optimizasyon işleminin çevrime etkisinin tespiti için, indirgenen noktalara ait çalışma süreleri kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre, sadece 3 noktada optimizasyon işlemi uygulanarak baz kalibrasyona göre NO_X emisyonunda %4,7 iyileşme mümkün olmaktadır. Ayrıca, PM emisyonunda %0,6 düşüş ile optimizasyon hedefi yakalanmıştır. Yakıt tüketiminde ise belirlenen hedefler sağlanamamıştır, ancak NO_X emisyonundaki iyileşmenin yakıt tüketimini arttırmadan gerçekleşmesi nedeniyle optimizasyon işleminin başarılı olduğu söylenebilir.

Tablo 5.13. Optimizasyon işleminin ardından NEDC testinde yakıt tüketimi ve emisyonlarda beklenen teorik iyileşme miktarları

Çalışma Noktası	Yakıt Tüketimi	NO_X	PM
1640 d/d - 70 Nm	-2,2 g	-81,6 mg	-3,8 mg
1880 d/d - 120 Nm	+0,2 g	-98,6 mg	-0,1 mg
2190 d/d - 250 Nm	+0,2 g	-36,8 mg	+0,1 mg
Oransal İyileşme	-%0,2	-%4,7	-%0.6

Teorik olarak hesaplanan sonuçların doğrulanması için baz kalibrasyonla ve Bölüm 5.3'de belirlenen parametrelere göre güncellenen kalibrasyon ile motor dinamometresinde NEDC testi koşulmuştur. Araç test çevrimi olan NEDC testinin motor dinamometresinde koşulması için, şasi dinamometresinden alınan EKÜ motor devri ve indike tork sinyalleri otomasyon sistemine girilmiştir. Motor yükü olarak indike tork kullanılmasının nedeni, indirgenen noktalardaki çalışma sürelerinin dinamometre testindekiyle bire bir aynı olmasının sağlanması içindir. Kalibrasyondaki

sürtünme ve pompalama kaybı haritaları bu test için sıfırlanarak pedal sinyali ile istenen EKÜ indike torku elde edilmiştir. Ayrıca, kontrolün kolaylaşması için pedal haritası doğrusallaştırılmıştır. Bu işlemlerin ardından, NEDC testindeki manevralar motor dinamometresinde bire bir taklit edilebilmiştir. Sürekli PM ölçümü alımı için uygun cihaz sağlanamadığından, dinamometre testlerinde sadece yakıt tüketimi ve gaz emisyonu bileşenleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.20'de baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyon ile NEDC testinde zamana bağlı toplam NO_X emisyonu ve yakıt tüketim miktarları gösterilmiştir.



Şekil 5.20. NEDC testinde baz kalibrasyon ve optimize edilmiş kalibrasyona ait NO_X emisyonu ve yakıt tüketimi

Test sonuçlarına göre NO_X emisyonundaki iyileşme doğrulanmıştır. Test çevrimi boyunca motor çıkışındaki toplam NO_X emisyonunda 178 mg azalma sağlanarak, %3,8 düşüş gerçekleşmiştir. Yakıt tüketiminde de %0,6 iyileşme sağlanmıştır. Bölüm 5.3'de, CO ve HC emisyonlarında çalışma noktası bazlı artış yaşanmasına rağmen, çevrim sonucunda bu emisyonlar çok az miktarda artış göstermiştir. Bunun nedeni, CO ve HC emisyonlarının motorun ilk çalışma anından ve optimizasyon

uygulanmayan diğer çalışma noktalarından daha çok etkilenmesi sebebiyledir. NEDC testindeki yakıt tüketimi ve motor çıkış emisyon miktarları Tablo 5.14'de verilmiştir. Çalışmanın yapıldığı motor ve egzoz sistemleri henüz geliştirme safhasında olduğundan, egzoz çıkışındaki emisyon miktarları paylaşılmamıştır.

Tablo 5.14. NEDC test sonuçları*

	Birim	Baz Kalibrasyon	Optimize Edilmiş Kalibrasyon
Yakıt Tüketimi	g/100 km	6682	6648
NO_X Emisyonu	g/km	0.422	0.406
CO Emisyonu	g/km	1.481	1.492
HC Emisyonu	g/km	0.103	0.106

*Emisyon ölçümleri türbin çıkışından alınmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, NEDC testinde NO_X emisyonunda en çok artışa neden olan noktalar belirlenerek, 3 farklı çalışma noktasında optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Optimizasyon işleminde, ana enjeksiyon zamanı, yakıt hattı basıncı, ön enjeksiyon zamanı ve miktarı, emme manifold basıncı ve temiz hava miktarı kalibrasyon parametreleri olarak seçilmiştir. Çalışmada, her noktadaki optimizasyon işleminden önce Pareto eğrileri oluşturularak, elde edilecek minimum NO_X emisyonu belirlenmiştir. Ancak, bu işlem optimizasyon işleminin yürütülmesi için değil, yalnızca, geliştirilen algoritmanın optimum emisyon miktarlarına yakınsama performansının değerlendirilmesi içindir. Bu nedenle, optimizasyon işleminin başında hedef değerler belirlenerek, doğrudan optimizasyon işlemine başlanabilir. Optimizasyon işlemlerinde, CMA-ES algoritmasının adaptif strateji parametreleri sayesinde, ilk popülasyonlarda dağılım yüksek tutularak daha iyi amaç fonksiyonu değerlerine hızlı şekilde ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Son adımlardaysa, popülasyon dağılımları azalarak optimum noktaya hassas biçimde yakınsanmaktadır.

Optimizasyon boyunca, kalibrasyon parametrelerinde önemli değişimler olmasına rağmen, her çalışma noktasında ortalama 65 ölçüm alınarak işlem tamamlanmıştır. Optimizasyon algoritmasının test otomasyon sistemine entegre edilmesi sayesinde, 3 çalışma noktasındaki optimizasyon işlemi toplamda 5 saatte tamamlanabilmektedir. 3 noktada yapılan optimizasyon işleminin ardından, motor dinamometresinde koşan NEDC testinde NO_X emisyonunda %3,8 azalma sağlanmıştır. NO_X emisyonuna en çok neden olan 10 çalışma noktasında optimizasyon işlemi uygulandığında, teorik olarak %9,7 azalma beklenmektedir. Optimize edilen kalibrasyonla, NEDC testinde yakıt tüketiminde de %0,5 azalma sağlanmıştır. Genel amaç fonksiyonuna dahil edilmeyen CO ve HC emisyonlarında ise artış yaşanmasına rağmen, egzoz sisteminde bulunan DOC sayesinde egzoz çıkış emisyon değerlerinde değişim olmamıştır.

Yapılan optimizasyon işlemlerinde, yakıt hattı basıncı ve ana enjeksiyon zamanının en etkili 2 parametre olduğu görülmektedir. Yakıt hattı basıncı tüm denemelerde baz kalibrasyona göre yaklaşık 300 bar yükselmiştir. Yakıt hattı basıncında sürekli artış

yaşanmasının nedeni, optimizasyon hedefleri arasında yanma gürültüsünün olmaması olarak açıklanabilir. Ana enjeksiyon zamanı da bazı çalışma noktalarında 4 °KA kadar değişim göstermiştir. Hava hattı sistemindeki parametreler incelendiğinde, optimizasyon işlemlerinin başında manifold basıncı ve temiz hava miktarı birlikte değişim gösterdikten sonra, manifold basıncının optimum noktaya yakınsadığı ve kalan popülasyonlarda hava miktarında bir miktar daha değişim yaşandığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, oluşturulan hava hattı modelindeki hava miktarı değerinin manifold basıncına bağlı olarak belirlenmesiyle ilgilidir. Algoritmada hava miktarı yerine EGR oranının parametre olarak kullanılmasının bu etkiyi azaltacağı söylenebilir. Ön enjeksiyon parametrelerinin de yanmaya belirgin bir etki yaptığı gözlemlenmiştir. Sadece ön enjeksiyonda değişim yaşandığı bazı adımlarda yakıt tüketiminde iyileşme sağlanmıştır.

Optimizasyon işlemi sadece 3 çalışma noktasında uygulandığı için, kalibrasyon haritalarında agresif geçişler meydana gelmemiştir. Ancak, her çalışma noktasında bağımsız uygulanacak optimizasyon işlemleri kalibrasyon parametrelerinde ani değişime sebep olacağından, sürüş konforunun olumsuz etkilenmesi beklenmektedir. Model bazlı optimizasyon çalışmalarında da önemli bir kriter olan harita geçişleri, ileride yapılacak çalışmalarda eş zamanlı kalibrasyon uygulamasına dahil edilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca, NEDC test çevriminde motor suyu sıcaklığı 25 °C'den 90 °C'ye kadar değişmesine rağmen, optimizasyon işlemi sabit su sıcaklıklarında uygulanmıştır. Çevrim sonucunda daha fazla iyileşme sağlanması için, çevrimde indirgenen noktalar farklı su sıcaklığı bölgelerine göre belirlenip, optimizasyon işlemi açısından ayrı değerlendirilebilir.

Yapılan çalışmada ön enjeksiyonun yanmaya önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, gelecek çalışmalarda, birden fazla ön ve arka enjeksiyonun optimizasyon problemine dahil edilmesiyle daha verimli motor koşulları elde edilebilir. Hatta, enjeksiyon stratejisinin kendisi optimizasyon parametresi olarak değerlendirildiğinde, algoritmanın en uygun stratejiyi belirlemesi sağlanabilir. Ayrıca, optimizasyon işlemini basitleştirmek için sadece yakıt tüketimi, NO_X ve PM emisyonları amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Bu nedenle, optimizasyon işlemi sonunda HC, CO emisyonu ve motor gürültüsünde artış olduğu gözlemlenmiştir. Gelecek çalışmalarda amaç fonksiyonu genişletilerek diğer önemli motor değerlerinde

iyileşme sağlayacak optimizasyon işlemleri yürütülebilir. Bunlara ilave olarak, *Real Driving Emissions* (RDE) ve *World Harmonized Transient Cycle* (WHTC) gibi dinamik emisyon testlerinde daha fazla katkı sağlanması için motor manevralarında da optimizasyon işlemi uygulanabilir.

Optimizasyon işleminde tespit edilen kalibrasyon parametreleri, geliştirme safhasında olan motor projesine bire bir dahil edilmemiştir. Ancak, elde edilen kazanımların tespiti sayesinde kalibrasyon haritalarında yapılan genel güncellemeler ile yürütülen bu çalışma NO_X emisyonunun proje hedefini sağlamasında önemli katkı sağlamıştır.

Bu çalışma, Ford Otosan'daki motor kalibrasyonu geliştirme prosesinin iyileştirilmesi amacıyla yürütülmüştür. Çalışmanın sonucunda, kalibrasyon mühendislerinin dinamometre testlerinde harcayacağı sürenin azaltılarak, optimum kalibrasyon parametrelerinin tespitinin insansız bir süreçte yürütülmesine olanak sağlanmıştır. Böylece, proje sürelerinin kısalmasıyla kalibrasyon geliştirme sürecinin daha verimli hale gelmesi mümkün olmuştur. Bu çalışmada paylaşılan datalar deneysel uygulamalar olup, Ford Motor Company ve Ford Otosan'a ait herhangi bir ticari ürüne referans teşkil etmemektedir.

KAYNAKLAR

[1] Röpke K., von Essen, C., DoE in Engine Development, *Qual. Reliab. Engng. Int.*, 2008, **24**(1), 643–651.

[2] Auiler J. E., Zbrozek J. D., Blumberg P. N., Optimization of Automotive Engine Calibration for Better Fuel Economy – Methods and Applications, *International Automotive Engineering Congress and Exposition*, Detroit, USA, 28 February - 4 March 1977.

[3] Baker R. E., Daby E. E., Engine Mapping Methodology, *International Automotive Engineering Congress and Exposition*, Detroit, USA, 28 February - 4 March 1977.

[4] Cassidy J. F., A Computerized On-Line Approach to Calculating Optimum Engine Calibrations, *International Automotive Engineering Congress and Exposition*, Detroit, USA, 28 February - 4 March 1977.

[5] Schmitz G., Oligschlager U., Eifler G., Lechner H., Automated System for Optimized Calibration of Engine Management Systems, *SAE International Congress & Exposition*, Detroit, USA, 1-3 February 1994.

[6] Franklin M. L., Kittelson D. B., Leuer R. H., Pipho M. J., Synchronous, Simultaneous Optimization of Ignition Timing and Air-Fuel Ratio in a Gas-Fueled Spark Ignition Engine, *SAE International Congress & Exposition*, Detroit, USA, 1-3 February 1994.

[7] Martinez J. D., Palacios E., Velazquez Carrillo G. A., Modeling of Internal Combustion Engine Emissions by LOLIMOT Algorithm, *Procedia Technology*, 2012, **3**(1), 251-258.

[8] Hiroyasu T., Miki M., Kamiura J., Watanabe S., Hiroyasu H., Multi-Objective Optimization of Diesel Engine Emissions and Fuel Economy Using Genetic Algorithms and Phenomenological Model, *Powertrain & Fluid Systems Conference*, San Diego, USA, 21-24 October 2002.

[9] Kokjohn S., Reitz R., A Computational Investigation of Two-Stage Combustion in a Light-Duty Diesel Engine, *SAE Int. J. Engines*, 2008, **1**(1), 1083-1104.

[10] Lee C. W, Ge H. W., Reitz R., Kurtz E., Willems W., Computational Optimization of a Down-Scaled Diesel Engine Operating in the Conventional Diffusion Combustion Regime Using a Multi-Objective Genetic Algorithm, *Combustion Science and Technology*, 2012, **184**(1), 78-96.

[11] Kim D., Park S., Optimization of Injection Strategy to Reduce Fuel Consumption for Stoichiometric Diesel Combustion, *Fuel*, 2012, **93**(1), 229-237.

[12] Hafner M., Steps Towards an Optimization of the Dynamic Emission Behavior of IC Engines: Measurement Strategies - Modeling - Model Based Optimization, *SAE Small Engine Technology Conference*, Pisa, Italy, 28-30 November 2001.

[13] Castagne M., Bentolila Y., Chaudoye F., Halle A., Nicolas F., Sinoquet D., Comparison of Engine Calibration Methods Based on Design of Experiments (DoE), *Oil & Gas Science and Technology*, 2008, **63**(4), 563-582.

[14] Killingsworth N. J., Aceves S. M., Flowers D. L., Espinosa-Loza F., Krstic M., HCCI Engine Combustion-Timing Control: Optimizing Gains and Fuel Consumption via Extremum Seeking, *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, 2009, **17**(6), 1350-1361.

[15] Sugihira S., Ichikawa K., Ohmori H., Starting Speed Control of SI Engine Based on Online Extremum Control, *SICE Annual Conference*, Kagawa, Japan, 17-20 September 2007.

[16] Tan Q., Divekar P., Chen X., Zheng M., Tan Y., Exhaust Gas Recirculation Control Through Extremum Seeking in a Low Temperature Combustion Diesel Engine, *American Control Conference*, Oregon, USA, 4-6 June 2014.

[17] Ahn C. W., *Advances in Evolutionary Algorithms: Theory, Design and Practice*, 1st ed., Springer, Berlin, 2006.

[18] Elbeltagi E., Hegazy T., Grierson D., Comparison Among Five Evolutionary-Based Optimization Algorithms, *Advanced Engineering Informatics*, 2005, **19**(1), 43-53.

[19] Vossoughi G. R., Rezazadeh S., Development of an Integrated Computer Environment for Optimization of Engine Management System Calibration, *SAE World Congress*, Michigan, USA, 8-11 March 2004.

[20] Hessel R. P., Reitz R., Diesel Engine Injection Rate-Shape Optimization Using Genetic Algorithm and Multi-Dimensional Modeling for a Range of Operating Modes, *15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Madison, USA, 14-17 May 2002.

[21] Ye Z., Washko F., Lai M. C., Genetic Algorithm Optimization of Fuel Economy for PFI Engine with VVT-VCR, *IEEE International Conference on Control Applications*, Taipei, Taiwan, 2-4 September 2004.

[22] Kesgin U., Genetic Algorithm and Artificial Neural Network for Engine Optimization of Efficiency and NO_X Emission, *Fuel*, 2004, **83**(7), 885-895.

[23] Langouet H., Metivier L., Sinoquet D., Tran Q. H., Engine Calibration: Multi-Objective Constrained Optimization of Engine Maps, *Optimization and Engineering*, 2011, **12**(3), 407-424.

[24] Hiroyasu T., Miki M., Nakayama S., Hanada Y., Multi-Objective Optimization of Diesel Engine Emissions and Fuel Economy Using SPEA2+, *Conference on Genetic And Evolutionary Computation*, Washington, USA, 25-29 June 2005.

[25] Hamosfakidis V., Reitz R., Optimization of a Hydrocarbon Fuel Ignition Model for Two Single Component Surrogates of Diesel Fuel, *Combustion and Flame*, 2003, **132**(3), 433-450.

[26] Huang H., Su W., Application of Micro-Genetic Algorithm for Calibration of Kinetic Parameters in HCCI Engine Combustion Model, *Frontiers of Energy and Power Engineering*, 2008, **2**(1), 86-92.

[27] Su W., Huang H., Development and Calibration of a Reduced Chemical Kinetic Model of n-heptane for HCCI Engine Combustion, *Fuel*, 2005, **84**(9), 1029-1040.

[28] Etghani M. M., Shojaeefard M. H., Khalkhali A., Akbari M., A Hybrid Method of Modified NSGA-II and TOPSIS to Optimize Performance and Emissions of a Diesel Engine Using Biodiesel, *Applied Thermal Engineering*, 2013, **59**(1), 309-315.

[29] Wong K. I., Wong P. K, Cheung C. S., Vong C. M., Modeling and Optimization of Biodiesel Engine Performance Using Advanced Machine Learning Methods, 2013, *Energy*, **55**(1), 519-528.

[30] Faghihi E. M., Shamekhi A. M., Development of a Neural Network Model for Selective Catalytic Reduction (SCR) Catalytic Converter and Ammonia Dosing Optimization Using Multi Objective Genetic Algorithm, *Chemical Engineering Journal*, 2010, **165**(2), 508-516.

[31] Karra P. K., Kong S. C., Diesel Engine Emissions Reduction Using Particle Swarm Optimization, *Combustion Science and Technology*, 2010, **182**(7), 879-903.

[32] Zhang Q., Ogren R. M., Kong S. C., A Comparative Study of Biodiesel Engine Performance Optimization Using Enhanced Hybrid PSO–GA and Basic GA, *Applied Energy*, 2016, **165**(1)**,** 676-684.

[33] Canakci M., Reitz R. D., Effect of Optimization Criteria on Direct-Injection Homegeneous Charge Compression Ignition Gasoline Engine Performance and Emissions Using Fully Automated Experiments and Microgenetic Algorithms, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2004, **126**(1), 167-177.

[34] Hansen N., Müller S. D., Koumoutsakos P., Reducing the Time Complexity of the Derandomized Evolution Strategy with Covariance Matrix Adaptation (CMA-ES), *Evolutionary Computation*, 2003, **11**(1), 1-18.

[35] Killedar J. S., *Dynamometer: Theory and Application to Engine Testing*, 1st ed., Xlibris Corporation Press, Bloomington, 2012.

[36] Hammel C., *EDC17 V3.6.00 Software and Calibration Documentation*, 1st ed., Bosch GmbH Press, Stuttgart, 2016.

[37] Hafner M., Isermann R., Multi-Objective Optimization of Feedforward Control Maps in Engine Management Systems Towards Low Consumption and Low Emissions, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2003, **25**(1), 57-74.

[38] Gerhardt J., Hönninger H., Bischof H., A New Approach to Functional and Software Structure for Engine Management Systems - BOSCH ME7, *SAE International Congress & Exposition*, Detroit, USA, 23-26 February 1998.

[39] Hammel C., Jessen H., Boss B., Traub A., Tischer C., Hönninger H., A Common Software Architecture for Diesel and Gasoline Engine Control Systems of the New Generation EDC/ME(D)17, *SAE World Congress*, Detroit, USA, 3-6 March 2003.

[40] Reif K., *Diesel-Engine Management: Systems and Components*, 1st ed., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.

[41] Capon G., *Turbocharger Applications and Matching*, 1st ed., Ford Motor Company Press, Dunton, 2015.

[42] https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/compressor_maps/, (Ziyaret tarihi: 6 Kasım 2017).

[43] Hanson R. K., Salimian S., Survey of Rate Constants in H/N/O System, Editors: Gardiner W. C., Burcat A., *Combustion Chemistry*, 1st ed., Springer-Verlag, New York, 361-421, 1984.

[44] Ladommatos N., Abdelhalim S., Zhao H., The Effects of Exhaust Gas Re-Circulation on Diesel Combustion and Emissions, *International Journal of Engine Research*, 2000, **1**(1), 107-126.

[45] Dietsche K. H, *Diesel Fuel-Injection System, Common Rail*, 2nd ed., Robert Bosch GmbH Press, Plochingen, 2005.

[46] Turhan Ö., *Mühendislikte Optimizasyon Uygulamaları*, İTÜ Makine Fakültesi Yayınları, İstanbul, 2011.

[47] Williams H. P., *Model Building in Mathematical Programming*, 5th ed., Wiley, West Sussex, 2013.

[48] Arora S., Barak B., *Computational Complexity: A Modern Approach*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

[49] Pearl J., *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, 1st ed., Addison-Wesley Pub. Co., Boston, 2017.

[50] Ncibi K., Sadraoui T., Faycel M., Djenina A., A Multilayer Perceptron Artificial Neural Networks Based a Preprocessing and Hybrid Optimization Task for Data Mining and Classification, *International Journal of Econometrics and Financial Management*, 2017, **5**(1), 12-21.

[51] Parkinson A. R., Balling R. J., Hedengren J. D., *Optimization Methods for Engineering Design: Applications and Theory*, Brigham Young University Press, Utah, 2013.

[52] Akduman B., Türkay B., Service Restoration in Electric Distribution Systems Using Evolutionary Algorithms, *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, Bursa, Turkey, 2-5 December 2010.

[53] Mitchell M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, 1st ed., MIT Press, Cambridge, 1998.

[54] Beyer H. G., Schwefel H. P., Evolution Strategies: A Comprehensive Introduction, *Natural Computing*, 2002, **1**(1), 3-52.

[55] Koza J., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, 1st ed., MIT Press, Cambridge, 1992.

[56] Hansen N., Ostermeier, A., Completely Derandomized Self-Adaptation in Evolution Strategies, *Evolutionary Computation*, 2001, **9**(2), 159-195.

[57] Simionescu P. A., Beale D. G., Dozier G. V., Constrained Optimization Problem Solving Using Estimation of Distribution Algorithms, *Congress on Evolutionary Computation*, Portland, USA, 19-23 June 2004.

[58] Dorigo M., Stützle T., *Ant Colony Optimization*, 1st ed., MIT Press, Cambridge, 1992.

[59] Kennedy J., Eberhart R., Shi Y., *Swarm Intelligence*, 1st ed., Morgan Kaufmann, San Francisco, 2001.

[60] Pham D. T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S., Zaidi M., The Bees Algorithm - A Novel Tool For Complex Optimization Problems, *2nd Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems*, 3-14 July 2006.

[61] Igel C., Hansen N., Roth S., Covariance Matrix Adaptation for Multi-objective Optimization, *Evolutionary Computation*, 2007, **15**(1), 1-28.

[62] Rechenberg I., Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem, *Royal Aircraft Establishment Conference*, Farnborough, 11-12 July 1965.

[63] Rechenberg I., *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, 1st ed., Frommann-Holzboog Verlag, Stuttgart, 1973.

[64] Ostermeier A., Gawelczyk A., Hansen N., A Derandomized Approach to Selfadaptation of Evolution Strategies, *Evolutionary Computation*, 1994, **2**(4), 369-380.

[65] Hansen N., Benchmarking a BI-Population CMA-ES on the BBOB-2009 Function Testbed, *ACM-GECCO Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Montreal, Canada, 8-12 July 2009.

[66] Hansen N., Ostermeier A., Adapting Arbitrary Normal Mutation Distributions in Evolution Strategies: The Covariance Matrix Adaptation, *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Nagoya, Japan, 20-22 May 1996.

[67] Hansen N., The CMA Evolution Strategy: A Comparing Review, Editors: Lozano J. A., Larranaga P., Inza I., Bengoetxea E., *Towards a New Evolutionary Computation*, 1st ed., Springer, Berlin, 75-102, 2006.

[68] Storm X., Salminen H., Virrankoski R., Niemi S., Hyvonen J., Analysis of Cylinder Pressure Measurement Accuracy for Internal Combustion Engine Control, *SAE World Congress Experience*, Detroit, USA, 4-6 April 2017.

[69] Nilsson Y., Eriksson L., Determining TDC Position Using Symmetry and Other Methods, *SAE World Congress*, Detroit, USA, 8-11 March 2004.

[70] Prudenz K., *AVL Indicom v2.7: Exploration Guide*, 1st ed., AVL List GmbH Press, Graz, 2014.

[71] Lakshminarayanan P. A., Ignition Delay in a Diesel Engine, Editors: Aghav Y. V., *Modelling Diesel Combustion*, 1st ed., Springer, New Delhi, 59-78, 2010.

[72] Heywood J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1st ed., McGraw-Hill, New York, 1988.

[73] European Commission, Measures to Be Taken Against the Emission of Gaseous and Particulate Pollutants from Compression-Ignition Engines and Positive Ignition Engines for Use in Vehicles, *Status of United Nations Regulation*, ECE 49-06, 3-386, 2016.

[74] Burke R. D., Brace C. J., Hawley J. G., Critical Evaluation of On-Engine Fuel Consumption Measurement, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2011, **225**(6), 829-844.

[75] Bryan K., Shibberu Y., Penalty Functions and Constrained Optimization, Rose-Hulman Institute of Technology, https://www.rose-hulman.edu/~bryan/lottamath/penalty.pdf (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2017)

[76] Wickman D, Senecal P, Reitz R., Diesel Engine Combustion Chamber Geometry Optimization Using Genetic Algorithms and Multi-Dimensional Spray and Combustion Modeling, *SAE World Congress*, Detroit, USA, 12-14 April 2011.

[77] Hansen N., Kern S., Evaluating the CMA Evolution Strategy on Multimodal Test Functions, *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Birmingham, UK, 18-22 September 2004.

[78] Hawley J. G., Wallace F. J., Cox A., Horrocks R. W., Bird G. L., Reduction of Steady State NO_X Levels from an Automotive Diesel Engine Using Optimized VGT/EGR Schedules, *SAE International Congress & Exposition*, Detroit, USA, 1-4 March 1999.

[79] Han Z., Uludogan A., Hampson G., Reitz R., Mechanism of Soot and NO_X Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine, *SAE International Congress & Exposition*, Detroit, USA, 26-29 February 1996.

[80] Tanin K. V., Wickman D. D., Montgomery D. T., Das S., Reitz R., The Influence of Boost Pressure on Emissions and Fuel Consumption of a Heavy-Duty Single-Cylinder D.I. Diesel Engine, *SAE International Congress & Exposition*, Detroit, USA, 1-4 March 1999.

[81] Abdalla K. N., Mustafa E.A., Effect of Exhaust Gas Recirculation on CO Emissions from A Turbocharged Diesel Engine, *University Of Khartoum Engineering Journal*, 2014, **4**(2), 43-48.

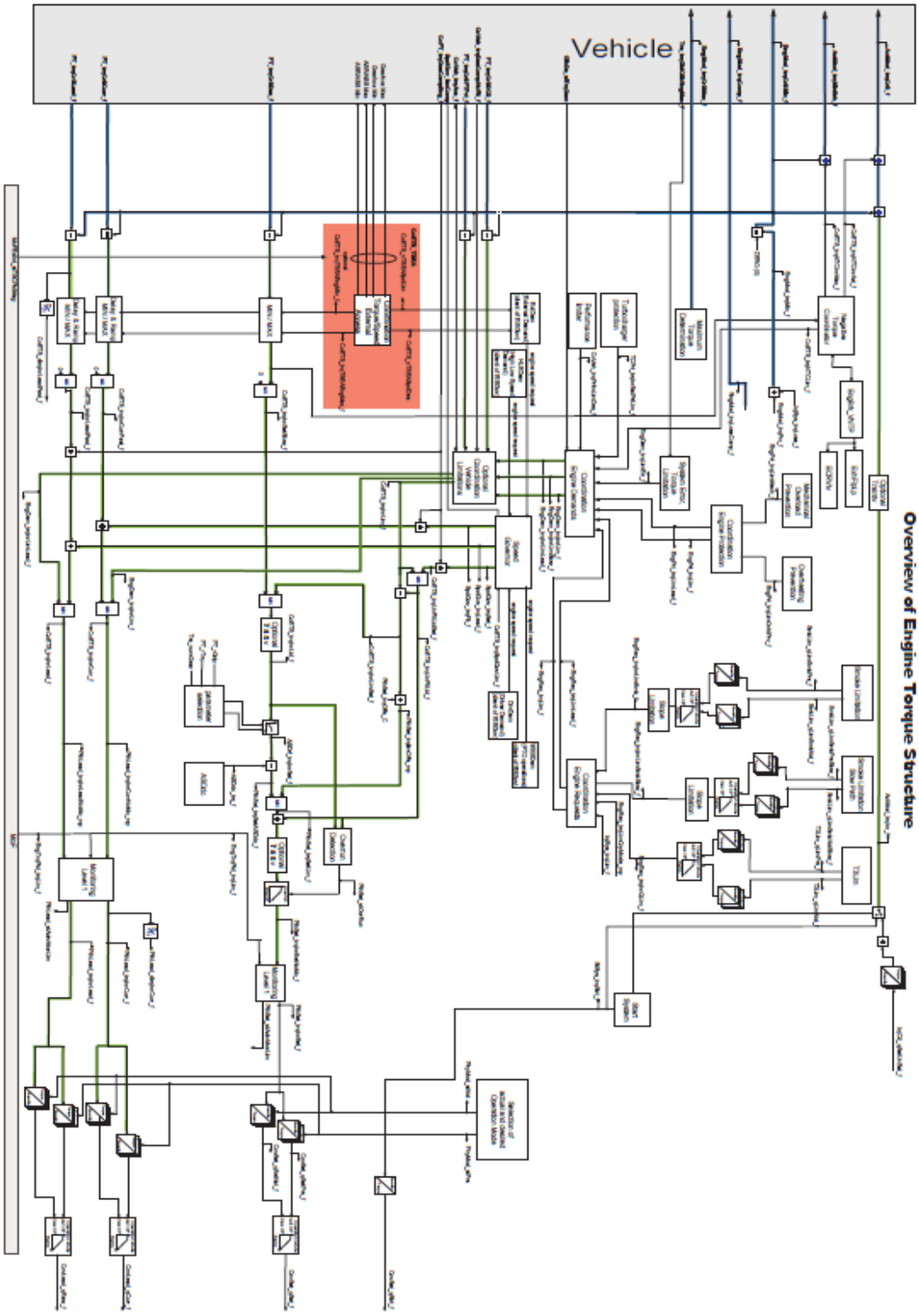
[82] Tanin K.V., An Experimental Study of the Effects of Boost Pressure and Ultrahigh Pressure Fuel Injection on D.I. Diesel Emissions and Performance, M.S. Thesis, University of Wisconsin-Madison, Institute of Technology, Wisconsin, 1999.

[83] Badami M., Mallamo F., Millo F., Rossi E., Experimental Investigation on the Effect of Multiple Injection Strategies on Emissions, Noise and Brake Specific Fuel Consumption of an Automotive Direct Injection Common-Rail Diesel Engine, *International Journal of Engine Research*, 2003, **4**(4), 299-314.

EKLER

Ek-A

Bölüm 2.2.1'de anlatılan ETS sisteminin genel yapısı Şekil A.1'de verilmiştir;



Şekil A.1. ETS sistemi genel yapısı [36]

Ek-B

MATLAB'de hazırlanan CMA-ES algoritmasının kodları aşağıda verilmiştir;

```
% Covariance Matrix Aadaptation Evolution Strategy (CMA-ES)
% Seyfullah Berk
clc;
clear;
close all;

%% Optimizasyon Problemi
nVar=6;    % Uzay boyutu
td=3; % torque match tol.
VarSize=[1 nVar];

%% CMA-ES Ayarlamaları
% Maksimum İterasyon Sayısı
MaxIt=50;
h=0;
 % Popülasyon boyutu
lambda=(round(3*log(nVar)))*1;
% Evebeveyn sayısı
mu=round(lambda/2);
 % Ebeveyn ağırlık oranı
w=log(mu+0.5)-log(1:mu);
w=w/sum(w);
 mu_eff=1/sum(w.^2);
 % Adım boyutu parametreleri
sigma0=0.1;
cs=(mu_eff+2)/(nVar+mu_eff+5);
ds=1+cs+2*max(sqrt((mu_eff-1)/(nVar+1))-1,0);
ENN=sqrt(nVar)*(1-1/(4*nVar)+1/(21*nVar^2));

% Kovaryans Güncelleme Parametresi
cc=(4+mu_eff/nVar)/(4+nVar+2*mu_eff/nVar);
c1=2/((nVar+1.3)^2+mu_eff);
alpha_mu=2;
cmu=min(1-c1,alpha_mu*(mu_eff-2+1/mu_eff)/((nVar+2)^2+alpha_mu*mu_eff/2));
hth=(1.4+2/(nVar+1))*ENN;

%% İlk Popülasyon
 ps=cell(MaxIt,1);
pc=cell(MaxIt,1);
C=cell(MaxIt,1);
sigma=cell(MaxIt,1);

ps{1}=zeros(VarSize);
pc{1}=zeros(VarSize);
C{1}=eye(nVar);
sigma{1}=sigma0;
```

```
 empty_individual.Position=[];
empty_individual.Step=[];
empty_individual.Cost=[];
empty_individual.Cost2=[];
empty_individual.Cost3=[];
empty_individual.Cost4=[];
empty_individual.Cost5=[];
empty_individual.fuel=[];
A=1;
M=repmat(empty_individual,MaxIt,1);
M(1).Position=[5.33 1 0 4 1.1 2.6];
N(1).Position=FitnessFunction(M(1).Position,speed,fuel)
M(1).Step=zeros(VarSize);

%% Otomasyon sistemine komut gönderme bölümü, sadeleştirmek için çıkarıldı
..
%% Otomasyon sistemine komut gönderme bölümü, sadeleştirmek için çıkarıldı

M(1).Cost=Measure.Data(1);
M(1).Cost2=Measure2.Data(1);
M(1).Cost3=Measure3.Data(1);
M(1).Cost4=Measure4.Data(1);
M(1).Cost5=Measure5.Data(1);

M(1).fuel=fuel;
Torque=Measure_Torque.Data(1);

BestSol=M(1);
 BestCost=zeros(MaxIt,1);
Cost2=zeros(MaxIt,1);
Cost3=zeros(MaxIt,1);
Cost4=zeros(MaxIt,1);
Cost5=zeros(MaxIt,1);
Par1=zeros(MaxIt,1);
Par2=zeros(MaxIt,1);
Par3=zeros(MaxIt,1);
Par4=zeros(MaxIt,1);
Par5=zeros(MaxIt,1);
Par6=zeros(MaxIt,1);

Par1(1)=N(1).Position(1);
Par2(1)=N(1).Position(2);
Par3(1)=N(1).Position(3);
Par4(1)=N(1).Position(4);
Par5(1)=N(1).Position(5);
Par6(1)=N(1).Position(6);
pop=repmat(empty_individual,lambda,1);

for g=1:MaxIt                    %% Popülasyon çevrimi
```

```
    % Generate Samples
    %pop=repmat(empty_individual,lambda,1);
    for i=1:lambda       %%Birey çevrimi
        pop(i).Step=mvnrnd(zeros(VarSize),C{g});
        pop(i).Position=M(g).Position+sigma{g}*pop(i).Step;
        N(i).Position=FitnessFunction(pop(i).Position,speed,fuel);
        A=i;

%% Otomasyon sistemine komut gönderme bölümü, sadeleştirmek için çıkarıldı
..
%% Otomasyon sistemine komut gönderme bölümü, sadeleştirmek için çıkarıldı

        pop(i).fuel=fuel;
        pop(i).Cost=Measure.Data(1); %Amaç fonksiyonu
        pop(i).Cost2=Measure2.Data(1); %OYT g/kWh
        pop(i).Cost3=Measure3.Data(1); %NOx g/kWh
        pop(i).Cost4=Measure4.Data(1); %Soot Mass g/kWh
        pop(i).Cost5=Measure5.Data(1);

        subplot(2,2,1)
        plot(N(i).Position(1),N(i).Position(2),'ro')
        xlabel('SOI Main')
        ylabel('Rail')
        hold on
        subplot(2,2,2)
        plot(N(i).Position(3),N(i).Position(4),'ro')
        hold on
        xlabel('Qnt Pi')
        ylabel('SOI Pi')
        subplot(2,2,3)
        plot(N(i).Position(5),N(i).Position(6),'ro')
        hold on
        xlabel('MAP')
        ylabel('MAF')

        if g==-1            g
            prompt = 'Devam edilsin mi? Y/N [Y]: ' ;
            str = input(prompt,'s');
            if isempty(str)
                str = 'Y';
            else

            break
            end
        end

        if pop(i).Cost<BestSol.Cost
            BestSol=pop(i);
        end
```

```
    popn(i,g).Position=N(i).Position;
    popn(i,g).Step=pop(i).Step;
    popn(i,g).Cost=pop(i).Cost;
    popn(i,g).Cost2=pop(i).Cost2;
    popn(i,g).Cost3=pop(i).Cost3;
    popn(i,g).Cost4=pop(i).Cost4;
    popn(i,g).Cost5=pop(i).Cost5;
end


% Bireylerin sıralanması
Costs=[pop.Cost];
[Costs, SortOrder]=sort(Costs);
pop=pop(SortOrder);
SortOrderF=fliplr(SortOrder);
popn(:,g)=popn(SortOrderF,g);

% Save Results
BestCost(g)=BestSol.Cost;
Cost2(g)=BestSol.Cost2;
Cost3(g)=BestSol.Cost3;
Cost4(g)=BestSol.Cost4;
Cost5(g)=BestSol.Cost5;

% Sonuçları Göster
disp(['Iteration ' num2str(g) ': Best Cost = ' num2str(BestCost(g))]);

if g>10
    if (BestCost(g)-BestCost(g-1))/BestCost(g-1)==0
        h=h+1;
    end
end

% İşlemi Durdur
if g==MaxIt | h==4
    break;
end

% Oralamayı Güncelle
M(g+1).Step=0;
M(g+1).fuel=0;
for j=1:mu
    M(g+1).Step=M(g+1).Step+w(j)*pop(j).Step;
    M(g+1).fuel=M(g+1).fuel+w(j)*pop(j).fuel;
end
M(g+1).Position=M(g).Position+sigma{g}*M(g+1).Step;
N(g+1).Position=FitnessFunction(M(g+1).Position,speed,M(g+1).fuel);

A=g+1;
```

```
%% Otomasyon sistemine komut gönderme bölümü, sadeleştirmek için çıkarıldı
..
%% Otomasyon sistemine komut gönderme bölümü, sadeleştirmek için çıkarıldı

    M(g+1).Cost=Measure.Data(1);
    M(g+1).Cost2=Measure2.Data(1);
    M(g+1).Cost3=Measure3.Data(1);
    M(g+1).Cost4=Measure4.Data(1);
    M(g+1).Cost5=Measure5.Data(1);

    Par1(g+1)=N(g+1).Position(1);
    Par2(g+1)=N(g+1).Position(2);
    Par3(g+1)=N(g+1).Position(3);
    Par4(g+1)=N(g+1).Position(4);
    Par5(g+1)=N(g+1).Position(5);
    Par6(g+1)=N(g+1).Position(6);

    if M(g+1).Cost<BestSol.Cost
        BestSol=M(g+1);
    end

    % Adım boyutunu güncelle
    ps{g+1}=(1-cs)*ps{g}+sqrt(cs*(2-cs)*mu_eff)*M(g+1).Step/chol(C{g})';
    sigma{g+1}=sigma{g}*exp(cs/ds*(norm(ps{g+1})/ENN-1))^0.3;

    % Kovaryans matrisini güncelle
    if norm(ps{g+1})/sqrt(1-(1-cs)^(2*(g+1)))<hth
        hs=1;
    else
        hs=0;
    end
    delta=(1-hs)*cc*(2-cc);
    pc{g+1}=(1-cc)*pc{g}+hs*sqrt(cc*(2-cc)*mu_eff)*M(g+1).Step;
    C{g+1}=(1-c1-cmu)*C{g}+c1*(pc{g+1}'*pc{g+1}+delta*C{g});
    for j=1:mu
        C{g+1}=C{g+1}+cmu*w(j)*pop(j).Step'*pop(j).Step;
    end

    [V, E]=eig(C{g+1});
    if any(diag(E)<0)
        E=max(E,0);
        C{g+1}=V*E/V;
    end
end
```

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Berk S.**, Alptekin E., Diesel Engine Emission Optimization Using Modified CMA-ES Algorithm, *V. International Automotive and Vehicle Technologies Conference*, Istanbul, Turkey, 6-7 October 2017.

[2] Cengiz C., Ayyıldız A., Karaköz S., Coşkun A., **Berk S.**, Combustion Visualization of Partially Premixed and Non Premixed Diesel Fuel on Single Cylinder Optical Engine, *2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, Turkey, 25-27 October 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Seyfullah Berk 1988'de Kocaeli'de doğdu. Lise öğrenimini Kocaeli Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu. O tarihten bu yana, Ford Otosan'da motor kalibrasyon mühendisi pozisyonunda çalışmaktadır. 2015 yılında Koceli Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Ayrıca, evli ve bir çocuk babasıdır.