

**MİNİMUM YAKIT KRİTERİNE GÖRE BİR DİZEL
MOTORUN KALİBRASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Hakan Barış BENLİGİRAYOĞLU
(503031608)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Can ÖZSOY
Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Kenan KUTLU
Doç.Dr. Vedat TEMİZ

OCAK 2007

ÖNSÖZ

Tüm mühendislik alanlarında karşılaşılan optimizasyon problemi oldukça büyük öneme sahiptir. Günümüz otomotiv sanayinde kullanılan motorlar gün geçtikçe kompleks yapılarla üretilmektedirler. Bu kompleks yapılara çevrenin korunması için gerekli olan kısıtlar eklenince motorlardan en iyi verimi almak için kalibrasyon uygulaması önem kazanmaktadır. Bu çalışma çerçevesinde güncel bir motor tipi olan dizel motorun iki aşamalı modelleme yaklaşımıyla motor haritaları oluşturulmuş, ve bu motor haritalarından nonlinear kısıtlamalı optimizasyon problemi çözülerek minimum yakıt sarfiyatını veren kalibrasyon tabloları elde edilmiştir.

Bu konuda çalışmamı öneren, çalışmanın tüm aşamalarında bana bilgisi ve deneyimi ile destek olan ve yönlendiren hocam Sayın **Prof. Dr. Can ÖZSOY**'a; çalışmam sırasında bilgisinden yararlandığım dayım Bilgisayar Yük. Müh. Serdar YAKUT'a; tüm öğrenim hayatım boyunca desteklerini hep yanımda hissettiğim annem İlhan BENLİGİRAYOĞLU, babam Hamit BENLİGİRAYOĞLU, ablam İrem ARSLAN'a; ve tezim süresince bana destek olan herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2007

Hakan Barış BENLİGİRAYOĞLU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
2. MOTOR KALİBRASYON PROSESİ	3
2.1 Kalibrasyon Prosesi	3
2.1.1 Veri Toplama	5
2.1.2 Veri Eleme	6
2.1.3 Regresyon Analizi (Model Uydurma)	7
2.1.4 Optimizasyon	7
3. İKİ AŞAMALI MODELLEME YAKLAŞIMI	10
3.1 Giriş	10
3.2 Model Açıklaması	11
3.3 Model Seçiminde Kullanılan İstatistik Parametreler	16
3.3.1 Lokal Model Tipi Seçiminde Kullanılan İstatistikler	16
3.3.2 Global Model Tipi Seçiminde Kullanılan İstatistikler	18
3.3.2.1 Küçük-Örnek Akaike Bilgi Ölçütü (AIC _c)	18
3.3.2.2 Düzeltilmiş R ²	19
3.4 İki Aşamalı Modellemede Kullanılan Lokal ve Global Model Tipleri	21
3.4.1 Radyal Tabanlı Fonksiyonlar	21
3.4.2 Kuadratik Fonksiyonlar	22
3.4.3 Karma Radyal Tabanlı Fonksiyonlar	23
4. İKİ AŞAMALI MODELLEME UYGULAMASI	24
4.1 İki Aşamalı Modelleme Blok Diyagramı ve Açıklaması	24
4.2 Tork Cevabının Modellenmesi	25
4.2.1 Global Model Cevap Özellikleri	27
4.3 Değişken Geometrilili Türbin Hızı Cevabının Modellenmesi	30
4.4 Azot Oksit Emisyonu Cevabının Modellenmesi	31
4.5 Silindir İçindeki Artık Gaz Oranı Cevabının Modellenmesi	32

4.6	Egzost Gazı Yakıt Fazlalık Oranı Cevabının Modellenmesi	33
4.7	Egzost Sıcaklığı Cevabının Modellenmesi	34
4.8	Silindir İçindeki En Yüksek Basınç Cevabının Modellenmesi	35
5.	KALİBRASYON PROSESİ	36
5.1	Optimizasyon İçin Kullanılan Program	37
5.2	Optimizasyon Algoritması	38
5.2.1	Dizisel Kuadratik Programlama (SQP)	39
5.2.1.1	Adım Büyüklüğü Hesaplanması	41
5.2.1.2	Çarpanların Hesaplanması	42
5.2.1.3	Hessian Matrisini Güncel BFGS ile Değiştirme	43
5.2.2	SQP (Dizisel Kuadratik Programlama) Algoritması	44
5.3	Amaç Fonksiyonu	45
5.4	Kısıtlamalar	46
5.4.1	Motor Modelinden Gelen Kısıtlar	46
5.4.2	Ek Kısıtların Tanımlanması	47
5.4.2.1	Yakıt Miktarı: (basefuelmass)	47
5.4.2.2	Yakıt Basıncı: (fuelpress)	48
5.4.2.3	Değişken Geometrilili Türbin Kanat Pozisyonu: (grackmea)	48
5.4.2.4	Püskürtme Avansı: (soi)	48
6.	OPTİMİZASYON UYGULAMASI	50
6.1	Motor Cevaplarının Yüklenmesi	51
6.2	Ek Modellerin Yüklenmesi	53
6.3	Optimizasyon Bağımsız Değişkenleri	54
6.4	Optimizasyon Çalışma Noktaları Kümesinin Tanımlanması	55
6.5	Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Tablo	56
6.6	Kalibrasyonda Kullanılacak Tabloların Hazırlanması	58
6.6.1	Püskürtme Avansı Tablosu	58
6.6.2	Yakıt Miktarı Tablosu	59
6.6.3	Yakıt Basıncı Tablosu	59
6.6.4	Değişken Geometrilili Türbin Kanat Pozisyonu Tablosu	60
6.6.5	Egzost Gazı Geri Dönüşüm Oranı Valf Konumu Tablosu	60
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
	KAYNAKLAR	64
	EKLER	66
	EK-A Optimizasyon Ek Kısıtlarının Grafikleri	66
	EK-B Optimizasyon Sonucu Oluşturulan Tabloların Grafikleri	70
	ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

soi	: Püskürtme avansı
measrpm	: Motor hızı
basefuelmass	: Yakıt miktarı
fuelpress	: Yakıt basıncı
grackmea	: Değişken geometrili turbo kanat pozisyonu
egrift	: Egzost gazı geri dönüşüm valfi konumu
eqrexh	: Egzost gazı yakıt fazlalık oranı
egrmf	: Silindirdeki artık gaz oranı
pkpress	: Silindir içindeki en yüksek basınç
exhtemp	: Egzost sıcaklığı
NO_x	: Azot oksit emisyonu
egrmf	: Egzost gazı geri dönüşüm oranı
Beta_1	: Lokal model sabit katsayısı
Beta_soi	: Lokal model soi terimi katsayısı
Beta_soi²	: Lokal model soi ² terimi katsayısı
bsfc	: Temel özgül yakıt tüketimi
RBF	: Radyal Tabanlı Fonksiyon
AIC_C	: Küçük Örnek Akaike Bilgi Ölçütü
RMSE	: Hataların karelerinin ortalamasının kare kökü
PRESS	: Öngörü hatalarının karelerinin toplamı
ECU	: Elektronik kontrol ünitesi
SQP	: Dizisel kuadratik programlama (Sequential Quadratic Programming)
QP	: Kuadratik Programlama (Quadratic Programming)
H	: Hessian Matrisi
logL	: Logaritma olasılık fonksiyonu
MBC	: Model tabanlı kalibrasyon (Model Base Calibration Toolbox)
CAGE	: Kalibrasyon Programı
KT	: Kuhn-Tucker koşulları
BFGS	: Broydon-Fletcher-Goldfar-Shanno metodu
EPF	: Penaltı fonksiyonu yaklaşımı metodu
FOC	: Birinci derece koşullar (First Order Conditions)
tq_err	: Tork hatası
tq_desired	: İstenen tork

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : Motor haritalamada kullanılan püskürtme avansı taraması 1. test.....	5
Tablo 4.1 : Tork cevabı lokal model tipleri için istatistiksel veriler.....	26
Tablo 4.2 : Tork cevabı için Beta_1 cevap özelliği istatistiksel veriler	28
Tablo 4.3 : Tork cevabı için Beta_soi cevap özelliği istatistiksel veriler.....	28
Tablo 4.4 : Tork cevabı için Beta_soi ² cevap özelliği istatistiksel veriler	29
Tablo 4.5 : Değişken geometrilı türbin hızı cevabı lokal model tipleri için istatistiki veriler.....	30
Tablo 4.6 : Azot Oksit emisyonu cevabı lokal model istatistiki veriler	31
Tablo 4.7 : Silindir içindeki artık gaz oranı cevabı lokal model istatistiki veriler ...	32
Tablo 4.8 : Egzost gazı yakıt fazlalık oranı cevabı lokal model istatistiki veriler ...	33
Tablo 4.9 : Egzost sıcaklığı cevabı lokal model istatistiki veriler.....	34
Tablo 4.10 : Silindir içindeki en yüksek basınç cevabı lokal model istatistiki veriler	35
Tablo 6.1 : Optimizasyon çalışma noktaları kümesi	55
Tablo 6.2 : Optimizasyon sonucunda bağımsız değişkenlerin değerleri	56
Tablo 6.3 : Optimizasyon sonucu amaç fonksiyonu ve kısıtların değerleri 1	56
Tablo 6.4 : Optimizasyon sonucu kısıtların değerleri 2.....	57
Tablo 6.5 : Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre püskürtme avansı tablosu ...	58
Tablo 6.6 : Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre yakıt miktarı tablosu.....	59
Tablo 6.7 : Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre yakıt basıncı tablosu.....	59
Tablo 6.8 : Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre değişken geometrilı türbin kanat pozisyonu tablosu	60
Tablo 6.9 : Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre egzost gazı geri dönüşüm oranı valf konumu tablosu.....	60

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Motor Kontrolör Tablosu.....	2
Şekil 2.1 : Motor bloğu kesiti ve püskürtme avansı.....	4
Şekil 2.2 : Püskürtme avansı taraması – Tork cevabı	6
Şekil 3.1 : Püskürtme avansı taramalarının cevap yüzeyi.....	13
Şekil 3.2 : Radyal Tabanlı Fonksiyon ($(\mu_{1,2,3}=5; \sigma_1=2, \sigma_2=1, \sigma_3=0.5))$	22
Şekil 3.3 : Kuadratik fonksiyon eğrisi	22
Şekil 4.1 : İki aşamalı model blok diyagramı	24
Şekil 4.2 : Tork cevabı 1. test lokal model grafiği.....	26
Şekil 4.3 : Tork cevabı için Beta_1 cevap özelliği grafiği.....	27
Şekil 4.4 : Tork cevabı için Beta_soi cevap özelliği grafiği	28
Şekil 4.5 : Tork cevabı için Beta_soi ² cevap özelliği grafiği.....	29
Şekil 4.6 : Değişken Geometrilili Türbin Hızı 1.test lokal model grafiği	30
Şekil 4.7 : Azot Oksit Emisyon cevabı 1.test lokal model grafiği	31
Şekil 4.8 : Silindir içindeki artık gaz oranı 3. test lokal model grafiği	32
Şekil 4.9 : Egzost gazı yakıt fazlalık oranı 1. test lokal model grafiği	33
Şekil 4.10 : Egzost sıcaklığı cevabı 1. test lokal model grafiği	34
Şekil 4.11 : Silindir içindeki en yüksek basınç cevabı 1. test lokal model grafiği	35
Şekil 5.1 : Etkin Kısıtlama üzerindeki bir noktanın lineer hareketi.....	41
Şekil 6.1 : Tork motor cevap modeli.....	51
Şekil 6.2 : Değişken Geometrilili Türbin Hızı motor cevap modeli	52
Şekil 6.3 : Egzost gazı yakıt fazlalık oranı motor cevap modeli.....	52
Şekil 6.4 : Silindir içindeki en yüksek basınç motor cevap modeli	52
Şekil 6.5 : Egzost sıcaklığı motor cevap modeli	52
Şekil 6.6 : NOX motor cevap modeli.....	53
Şekil 6.7 : Silindir içindeki artık gaz oranı motor cevap modeli	53
Şekil 6.8 : Temel özgül yakıt tüketimi model grafiği	53
Şekil 6.9 : Tork hatası model bağlantıları ve grafiği.....	54
Şekil 6.10 : Optimizasyon sonucu elde edilen bağımsız değişkenlerin grafiği	57

Şekil A.1 : Maksimum yakıt miktarı ek kısıt grafiği	66
Şekil A.2 : Minimum yakıt basıncı ek kısıt grafiği.....	66
Şekil A.3 : Maksimum yakıt basıncı ek kısıt grafiği	67
Şekil A.4 : Minimum değişken geometrili türbin kanat pozisyonu ek kısıt grafiği..	67
Şekil A.5 : Maksimum değişken geometrili türbin kanat pozisyonu ek kısıt grafiği	68
Şekil A.6 : Minimum püskürtme avansı ek kısıtı	68
Şekil A.7 : Maksimum püskürtme avansı ek kısıtı	69
Şekil B.1 : Motor hızı-istenen tork değerine göre püskürtme avansı grafiği.....	70
Şekil B.2 : Motor hızı-istenen tork değerine göre yakıt miktarı grafiği	70
Şekil B.3 : Motor hızı-istenen tork değerine göre yakıt basıncı grafiği	71
Şekil B.4 : Motor hızı-istenen tork değerine göre değişken geometrili türbin kanat pozisyonu grafiği.....	71
Şekil B.5 : Motor hızı-istenen tork değerine göre egzost gazı geri dönüşüm oranı valf konumu grafiği.....	72

SEMBOL LİSTESİ

i	: Test sayısı
j	: Test içindeki gözlem sayısı
y	: Motor cevabı
m	: Maksimum gözlem sayısı
θ	: Motor parametreleri vektörü
ε	: Lokal modelde normal dağılımlı hata vektörü
σ	: Test içindeki hataların değişimi
C	: Lokal modelin cevap özelliklerinin kovaryans matrisi
p	: Püskürtme avansı taramasındaki cevap özelliği değerleri
X	: Motor çalışma koşulları
β	: Global parametrelerin tahminlerinin vektörü
γ	: Rasgele hataların normal dağılmış vektörü
r	: Cevap özellikleri sayısı
D	: (rxr) Boyutlu varyans-kovaryans matrisi
P	: n adet p vektörünün oluşturduğu matris
Z	: n adet X motor çalışma koşullarının oluşturduğu matris
W	: Blok diagonal ağırlık matrisi
ω	: Dağılım parametreleri vektörü
$\bar{y}$	: y 'nin ortalama değeri
$\hat{y}$	: Öngörülen y değeri
Φ	: Profil fonksiyonu
μ	: RBF merkezlerinin n boyutlu vektörü
λ	: Lagrange çarpanı
β_m	: Lagrange çarpanı
α	: Adım büyüklüğü
d	: Araştırma yönü
q	: İterasyon sayacı

MINİMUM YAKIT KRİTERİNE GÖRE DİZEL MOTORUN KALİBRASYONU

ÖZET

Günümüzde taşıtların tahrikinde kullanılmakta olan benzin ve dizel motorları yüz yılı aşan bir geçmişe sahiptir. Bu süreç içerisinde benzin motorlarının sağladığı yüksek performans özelliklerini, dizel motorlarının özellikle kısmi yüklerdeki yüksek verim özellikleri ile bir araya getirebilecek bir motor tasarımının gerçekleştirilmesi motor üreticilerinin üzerinde durduğu bir konu olmuştur. Taşıtların yakıt tüketiminin azaltılması ve çevre kirliliğine neden olan yanma ürünlerinin kanuni kısıtlara uygun hale getirilmesi konusundaki güncel çabalar, karmaşık yapıları motorların üretilmesine neden olmuştur. Bu konudaki çalışmalar motorun en uygun şartlarda çalışması için elektronik kontrol ünitesinin kalibrasyonunu ön plana çıkarmaktadır. Bu kalibrasyonun adımları veri toplama, veri eleme, model uydurma, optimizasyondan oluşmaktadır. Kalibrasyonun yapılması motorun yakıt tüketimi sırasında gösterdiği tepkilerin izlenebilmesini gerektirmektedir. Bu da motor modellerinin çıkarılması ve motor haritalarının oluşturulması ile sağlanmaktadır. Motor haritalama, motor davranışını ayarlanabilir motor parametrelerinin bir fonksiyonu olarak modelleme prosesidir. Elektronik kontrol ünitelerinin kalibrasyonunda minimum yakıt kriterini sağlamak için motor haritalarından faydalanılmaktadır. Motorların karmaşık yapıları giriş değişkenlerini arttırmakta ve kalibrasyon için yapılması gereken test sayısının artmasına neden olmaktadır. Bu da kalibrasyon için harcanan zamanın artmasını ve analizlerin zorlaşması anlamına gelir.

Mevcut yaklaşımda karşılaşılan bu problemler, iki aşamalı modelleme yaklaşımının motor kalibrasyonuna uygulanması ile giderilmiştir. Bu çalışmanın ilk bölümünü oluşturan iki aşamalı modelleme yaklaşımının uygulanması, ilk aşamasında eğrileri püskürtme zamanı değişimine uydurmayı, ikinci aşamasında bu eğrilerin diğer motor parametrelerinin bir fonksiyonu olarak değişiminin modellenmesini içermektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, iki aşamalı modelleme yaklaşımı ile elde edilen motor modelleri, minimum yakıt kriterini sağlayacak elektronik kontrol ünitelerinin kalibrasyonu için gerekli olan lookup tablolarının oluşturulmasında kullanılmıştır. Bu bölümde nonlinear kısıtlı optimizasyon problemi SQP algoritması kullanılarak çözülmüştür.

Optimizasyon için, Matlab® The Model Based Calibration Toolbox kullanılarak dizel motorun minimum yakıt kriterine göre kalibrasyonu yapılmıştır. İlk bölümde elde edilen motor modelleri ikinci bölümde amaç fonksiyonumuz olan temel özgül yakıt tüketiminin, belli motor hızlarına karşılık gelen istenilen tork değerlerinde, en düşük değerde kalmasını sağlamak için kullanılmıştır. Kullanılan iki aşamalı modelleme yaklaşımı ile motor modellerinin yorumlanması daha kolay hale gelmiş ve optimizasyon programımızda basit bir şekilde kullanılmıştır. Böylece istenilen motor çalışma koşullarında minimum yakıt tüketimini sağlayacak kalibrasyon tabloları oluşturulmuştur.

CALIBRATION OF A DIESEL MOTOR ACCORDING TO MINIMUM FUEL CRITERIA

SUMMARY

Gasoline and diesel motors have been used in the vehicles for more than 100 years. During this period, motor manufacturers have been looking for a motor design which combines the high performance of the gasoline motors with the high efficiency of the diesel motors under low revolution. Targeting low fuel consumption and low emission of the exhaust gases in compliance with the legal environmental law caused motors with complex designs to be manufactured. Calibration of the electronic control unit for the optimum work conditions of the motor became the most important factor in these works. The steps in this calibration are collecting data, eliminating data, regression and optimization. In order to do the calibration, you need to observe the behavior of the motor during fuel consumption. This is achieved by obtaining the motor models and engine maps. Engine mapping is the modeling process of motor behavior as a function of adjustable motor parameters. In the calibration of electronic control units, engine maps are used to obtain minimum fuel consumption. Complex structure of the motors caused the number of input variables and the number of the calibration tests to be increased. This means that more time will be used up for the calibration and the analysis will be more difficult.

These problems in the current modeling are overcome by applying the two stage modeling in the calibration of the motor. First part of the thesis is an implementation of the two stage modeling. In the first stage of the two stage modeling, in order to guess the relation between the outputs and the start of the injection, curves are fitted in each test. In the second stage, the change in the curves is modeled as a function of the motor parameters.

In the second part of the thesis, motor models obtained with two stage modeling are used in order to create lookup tables which will be used in the calibration of the electronic control units for the minimum fuel consumption. In this section, we solve the nonlinear constraint optimization problem with using SQP algorithm.

In coherence with this, the calibration of the diesel motor for the minimum fuel consumption is done with Matlab The Model Based Calibration Toolbox. The motor models obtained in the first part of the thesis are used in the second part of the thesis to minimize our objective function which is the base specific fuel consumption at the desired torque values according to the specific motor speeds. With two stage modeling, the interpretation of the motor modeling became easier and the models are used in our optimization program. Calibration tables which will result in minimum fuel consumption for the desired motor conditions are obtained.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Günümüzdeki karmaşık motor yapılarına bakıldığında değişken motor parametreleri arasında en iyi sonucu elde etmek için optimizasyon uygulaması gerekli hale gelmiştir. Bu çalışmada minimum yakıt tüketimini hedefleyerek dizel motorun kalibrasyonu amaçlanmıştır. Kalibrasyonun yapılması için motorun yakıt tüketimi sırasında verdiği karakteristik reaksiyonların izlenebilmesi için motor modellenmesi ve motor haritalarının çıkarılması önemli bir adımdır.

Motor haritalama [1] motor davranışını, ayarlanabilir motor parametrelerinin fonksiyonu olarak modelleme prosesidir; araç sürüldükçe değişen miktarlar açısından motorun çıkışlarını tahmin etmektir. Örneğin, motor hızı ve yakıt karışımı değiştikçe torkun değişiminin tahmin edilmesi.

Motorun yakıt verimini optimize eden elektronik motor kontrolörlerinin kalibrasyonu, motor haritalama prosesinin temel kullanım alanlarından biridir. Motorun çalışma koşulları ve motor elemanlarına gelebilecek zararlardan korunmak için bazı motor parametrelerinin belirli limitler içinde tutulması önemlidir. Örneğin, yanma odasındaki en yüksek basıncın değeri silindir gövdesine ve pistonu zarar vermemesi için belli bir değerin altında olması gerekmektedir.

Motor kontrolörü, motor hızı ve yükünün oluşturduğu iki boyutlu bir dizi olarak tanımlanabilir. Motor kontrolör tablosu basit olarak hava-yakıt karışım oranı, egzost gazı geri dönüşüm oranı ve ateşleme avansı olmak üzere üç kalibrasyon parametresini içerebilir. Her motor hızı ve yükü için motor kontrolörü tarafından bu kalibrasyon parametrelerinin değerleri ayarlanacaktır. (Şekil 1.1)

Kalibrasyon, motor kontrolör tablosunun ayrıntılı olarak doldurulmasıdır. Motor optimizasyon problemi, motor kontrolörünün kalibrasyon parametrelerini istenilen kriterler ve kısıtları göz önüne alarak ayarlayabilmesi için en iyi kalibrasyonu bulmaktır. Bu kriter ve kısıtlar çerçevesinde kalibrasyonu değerlendirme aşamasında motor haritalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Pratikte mümkün olan her kalibrasyonu

Mevcut yaklaşım motor haritalarının çıkarılması için uzun polinomlar çıkarılmasıdır. Fakat bu uydurulan modelin yorumlanma zorluğu gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Bu yaklaşımdaki karmaşık polinomlar araştırmayı daha zor hale getirmektedir.

Şekil 1.1 Motor Kontrolör Tablosu [3]

2

2. MOTOR KALİBRASYON PROSESİ

2.1 Kalibrasyon Prosesi

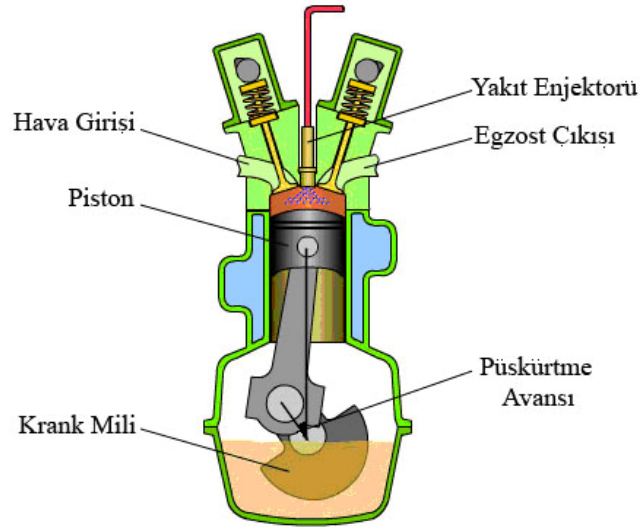
Motor kalibrasyonunun ilk aşaması motor haritalama yapılarak gerekli olan ampirik modellerin oluşturulmasıdır.

Kalibrasyon sonucunda elde edilen look-up tabloları motor kontrolörünün hava yakıt karışımını ve püskürtme avansını en iyi yakıt ekonomisini sağlayacak şekilde ayarlamasına yardım eder. Burada hafıza tabanlı bir motor kontrolü gerçekleştirilmektedir.

Hafıza tabanlı sistemler motorun çıkışlarını ölçmeye gerek duymadan kontrolü gerçekleştirirler. Ayrıca emisyon testlerinin formu ve yakıt ekonomisinin hesaplama yöntemi adaptif bir motor kontrolüne göre daha kolaydır. Bunun yanında hafıza tabanlı bir sistemde üretilen motorlar arasında üretim değişikliği yapılamamasının yanında motorun yaşlanma etkilerine karşıda duyarsızdır.

Bir motor çevriminde, basit olarak kontrolör, motorun dönme hızını (rpm) ve her emme çevriminde yanma odasına giren hava miktarını (load) ölçerek, hazırlanan look-up tabloları yardımı ile kalibrasyon parametrelerini ayarlayacaktır. Kalibrasyon parametreleri olarak hava yakıt karışımı, yakıt basıncı ve püskürtme avansı gösterilebilir. Kalibrasyonun yapısına bağlı olarak parametreler genişletilebilmektedir.

Püskürtme avansı milin dönmesi sırasında oluştuğundan milin dönme açısı cinsinden ifade edilmektedir. Püskürtme avansı, püskürtme sırasında krank milinin dönme açısıdır ve pistonun en üst noktada olmasına göre ölçülür. Pistonun üst ölü noktaya gelmeden önce yapılan püskürtme sırasındaki milin konumu ile üst ölü noktadaki konumunun açı cinsinden farkı püskürtme avansını belirler (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Motor bloğu kesiti ve püskürtme avansı

Kalibrasyonun amacı kısıtlara bağlı olarak en iyi yakıt ekonomisini sağlayan tabloları bulmaktır. Optimizasyon uygulaması sırasında kalibrasyona paralel olarak kısıtlanmalı optimizasyon kullanılmıştır. Belirli gazların emisyon limitleri, egzost sıcaklığındaki limitler, motorun çalışma bölgesinin getirdiği limitler bu kısıtlamalara örnek olarak verilebilir. Kanunlarla kısıtlanmış gazlar azot oksit (NOX), karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) gazlarıdır. Yakıt tüketimi ve egzost gazı emisyonları bir sürüş çevrimi boyunca ölçülür, araç çalışma çevrimleri boyunca çalıştırılır ve tüketilen toplam yakıt miktarı ve üretilen emisyonlar ölçülür. Bu kompleks kriterler, optimizasyonda motor üzerinde deneyler yapılmasının yanında bir regresyon modelin kullanılmasının nedenlerinden biridir.

Motor haritalaması yapılırken, motorun davranışı motor hızı, motora giren hava miktarı, hava-yakıt karışımı, geri dönüşümü yapılan egzost gazı miktarı ve püskürtme avansı cinsinden tanımlanır. Motor davranışının modellenmesi gereken özellikleri, güç çıkışı, yakıt tüketimi, yasalarla kısıtlanmış egzost gazı emisyonları ve egzost sıcaklığıdır. Motorun çalışma bölgesi ve aracın sürülebilirliğiyle ortaya çıkan kısıtlar, motor haritalamadan farklı tekniklerle ele alınır. Hava-yakıt karışım oranı karbon monoksit emisyonu kontrolü ve egzost sıcaklığını düşürme, egzost gazı geri dönüşüm oranı azot oksit emisyonu kontrolü ve ateşleme avansı hem azot oksit hem de yakıt ekonomisi kontrolü için kullanılır.

Kalibrasyonun adımları, veri toplama, veri eleme, regresyon (model uydurma) ve optimizasyon olmak üzere dört alt prosesten oluşmaktadır [3].

2.1.1 Veri Toplama

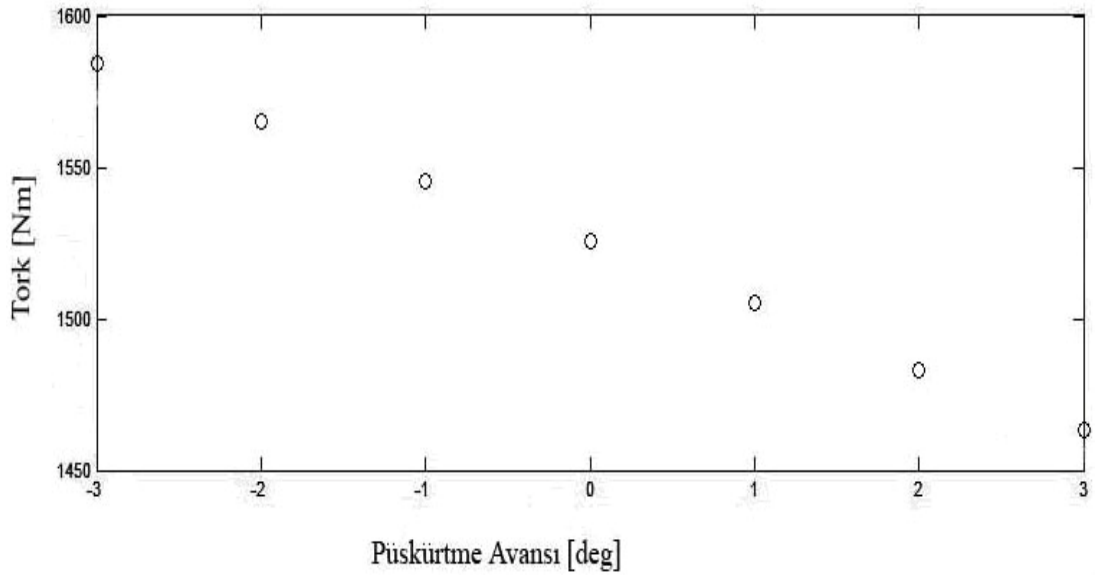
Verilerin toplanırken motor kararlı bir şekilde çalışırken veri noktaları kaydedilir. Bu veriler bir mühendisin denetimi altında dinamometreden toplanır.

İki aşamalı modelleme yaklaşımı uygulamasında veri, püskürtme avansı belli bir aralıkta değiştirilirken motor hızı (rpm), egzost gazı geri dönüşüm oranı (egr), yakıt miktarı (fuelmass), yakıt basıncı (fuelpress), değişken geometrilili türbin kanat pozisyonu (grackmea) sabit tutularak sağlanır. Daha sonra püskürtme avansı, maksimum ve minimum uygulanabilir değerler arasında değiştirilir ve tork (TQ), egzost sıcaklığı ve egzost emisyonları gibi çıkışlar bu belli sayıdaki değişik ateşleme avansı değerlerinde kaydedilir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Motor Haritalamada Kullanılan Püskürtme Avansı Taraması 1.Test

DEĞİŞKENLER	BİRİMLER	1	2	3	4	5	6	7
Püskürtme Avansı	deg	-3	-2	-1	0	1	2	3
Motor Hızı	rev/min	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Yakıt Miktarı	mg/inject	200	200	200	200	200	200	200
Türbin kanat Poz.	ratio	0,43333	0,43333	0,43333	0,43333	0,43333	0,43333	0,43333
Egzost gaz oranı valf yüksekliği	mm	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Yakıt Basıncı	Mpa	90	90	90	90	90	90	90
Tork	Nm	1584,477	1565,1234	1545,3751	1525,4417	1504,9534	1483,3019	1462,9802
Değişken Geometrilili Turbo Hızı	rev/min	12327,85	12369,101	12409,811	12451,817	12492,637	12504,887	12570,26
En Yüksek Basınç	Pa	16950295	17098994	17222382	17324366	17419645	17427509	17601461
Egzost Sıcaklığı	°C	1015,713	1019,3466	1023,0987	1026,6971	1030,261	1036,4694	1037,7028
Azot Oksit Emisyonu	kg/hr	0,566804	0,5372374	0,5089069	0,4832225	0,4593076	0,4272618	0,4175937
Kalan Egzost Gazının Hava Gaz Toplamına Oranı	ratio	0,154909	0,1552648	0,1556197	0,1559698	0,1563064	0,1569671	0,157032
Egzost Gazı Yakıt Fazlalık Oranı	ratio	0,666017	0,6630502	0,6601363	0,6570505	0,6540484	0,6546499	0,6485176

Farklı püskürtme avansı değerlerinde çıkışlar farklı kombinasyonlar da toplanır. Bir motor haritasının oluşturulması için toplanan verinin 250 ile 350 arasında farklı püskürtme avansı değeri içermesi gerekmektedir. Bu verinin toplanması önemli ölçüde zaman ve paranın harcanması anlamına gelmektedir.



Şekil 2.2 Püskürtme avansı taraması – Tork cevabı

Şekil 2.2 püskürtme avansı taraması yapılırken elde edilen tork cevabının grafiğini göstermektedir. Bu grafik Tablo 2.1 den elde edilen değerler kullanılarak çizdirilmiştir.

2.1.2 Veri Eleme

Toplanan veriler bilgisayar programları yardımı ile bir eleme işlemi uygulanarak bir kısım verinin elenmesi yoluna gidilir.

Programlardan biri gözlem-gözlem temelinde veri kümesi içindeki veri tutarlılığını kontrol etmek için kullanılır. Verilen tüm kararlar mühendislik esasına dayanmaktadır ve genellikle ölçme aygıtlarının hatalı veya uygun sınırlar dışında çalıştıklarını belirtir ve veri kümesi içindeki bir noktanın işaretlenip işaretlenmeyeceği kararı verilirken herhangi bir model göz önünde bulundurulmaz. Burada her gözlem tek tek ele alınarak tutarlılık kontrolü yapılır.

Yapılan tutarlılık kontrolü değişkenlerin düzgünlük derecesini iki farklı yolla kontrol eder. İlk yol, motor koşullarının püskürtme avansı değeri taraması sırasında bir tolerans değeri içinde kalıp kalmadığının kontrolüdür. İkinci yol, her püskürtme avansı değeri taramasında değişmesi beklenen değerleri gözden geçirir ve bunların tümüne kuadratik bir eğri uydurur; eğer R^2 istatistik değeri belli bir eşik değerinden fazla ise o püskürtme avansı değeri noktası silinir. Bir noktayı kaldırmanın R^2 değerinin eşik değerini aşmasını ne şekilde etkileyeceğini görmek amacıyla her

nokta dönüşümlü olarak silinir. R^2 değerinde en büyük artışı sağlayan nokta işaretlenir, aksi takdirde tüm test işaretlenir.

2.1.3 Regresyon Analizi (Model Uydurma)

İki aşamalı modelleme yaklaşımına uygun veri toplandıktan ve bu veri içinde eleme yapıldıktan sonra veriye polinom regresyon modelleri uydurulur. Bu regresyon modelleri bir sonraki aşamada motor kontrol ünitesinin kalibrasyonunda kullanılır.

Regresyon sonucunda elde edilen modeller motor girişleri olan püskürtme avansı, motor devri, yakıt miktarı, yakıt basıncı, türbin kanat pozisyonu ve egzost gaz oranı valf yüksekliği cinsinden polinomlardır. Modellenen cevaplar ise tork, değişken geometrili turbo hızı, silindir içindeki en yüksek basınç, egzost sıcaklığı, azot oksit emisyonu, silindir içinde kalan egzost gazının hava gaz toplamına oranı, egzost gazı yakıt fazlalık oranıdır.

Kullanılan iki aşamalı modelleme yaklaşımında tork püskürtme avansının bir fonksiyonu olarak gösterilir. Ama veri modellendiğinde sabit seviyedeki yakıt akış oranı torkun bir fonksiyonu olarak ele alınır.

Uydurulan modelin veriye ne kadar uyduğu yani modelin kalitesi bilgisayar programı ile kontrol edilir. Buradaki amaç her bir püskürtme avansı değeri taramasında uydurulan kuadratik eğri ile motor haritalama ile elde edilmiş modelin değerini karşılaştırarak motor haritalama modelinin veriye hangi bölgelerde kötü yaklaştığını tayin etmek için yapılır.

Yapılan bu işlemten sonra kötü yaklaşım gösteren modeller tekrar eğri uydurma işlemine tabi tutulur. Bu eğri uydurma işlemi veriye modelin en iyi şekilde uydurulduğu düşünülene kadar tekrarlanır.

2.1.4 Optimizasyon

Optimizasyon verilerin iyi bir şekilde değerlendirilmesine dayanmaktadır. En iyi kalibrasyonun seçilmesi için verilen kısıtlar ve motor koşulları altında mümkün olan her kalibrasyonun değerlendirilmesi gerekmektedir. Böylece en iyi kalibrasyon kısıtlamalara bağlı olarak seçilen amaç fonksiyonumuzu minimum veya maksimum yapan seçilir. Pratikte mümkün olan tüm kalibrasyonları birer birer sıralamak imkansızdır, bazı optimizasyon tekniklerinden yararlanmak gerekir.

Cassidy tarafından kullanılan lagrangian çarpanları temeline dayanan bir metot ile optimizasyon tekniği geliştirilmiştir [4] ve CALAID bilgisayar programı ile uygulanmaktadır. Kalibrasyonu değerlendirmek için Cassidy motora bağlanmış bir bilgisayar yardımıyla deneyler yaparken, Ford tekniği, bir kalibrasyonu değerlendirmek için motor haritalama modelini kullanmaktadır.

CALAID programının amacı motorun çalışma koşulları üzerinde uygulanan kısıtlar ve kanuni emisyon kısıtları çerçevesinde yakıt tüketimini optimize etmektedir. Optimizasyon için gerekli veriler önceden dizayn edilmiş bir sürüş çevrimi boyunca toplanır. Motorun çalışma limitleri motor haritalama veri kümesinden oluşturulan veriler ile hazırlanır [5].

Program, verilerden elde edilen regresyon modelini kullanarak, istenilen motor devri ve tork değerleri için minimum yakıt tüketimini sağlayacak şekilde püskürtme avansı, temel yakıt tüketimi, yakıt basıncı, türbin kanat pozisyonu ve egzost gaz oranı valf yüksekliği değerlerini en iyi yakıt ekonomisini bulana kadar değiştirmeye devam eder. Bilgisayar programı, motor haritalama modellerinden yola çıkılarak yakıt tüketimi ve kısıtlanmamış emisyon miktarları hesaplanır. Bu ilk adımdan sonra CALAID, emisyonların istenilen limitler içinde kaldığı optimum yakıt tüketimi için kalibrasyonunu belirler. Optimizasyon yapılırken püskürtme avansı sürekli olarak en iyi yakıt tüketimini sağlayan püskürtme avansından geciktirilir. Böylece belli motor ayarlarında maksimum torku veren püskürtme avansından küçük püskürtme avansı değerlerinde motor çıkışını bilmemiz yeterli olur.

Kalibrasyon burada tork tanım bölgesi yapılarak oluşturulur, istenen motor devri ve tork değerleri için optimum kalibrasyon parametreleri ayarlarını veren bir kalibrasyondur. Son olarak program, motor devri ve tork ifadelerinin bir fonksiyonu olan kalibrasyonu, motor devri ve yük ifadelerinin fonksiyonu olan bir kalibrasyona dönüştürür. Bu interpolasyon yapılarak gerçekleştirilir ve gereklidir çünkü motor kontrolörü tork değeri yerine yük değerini ölçer.

Optimizasyonun sınırları, motor haritalama modelinin oluşturulması için kullanılan veri kümesi noktaları ile kısıtlanmıştır. Bunun nedeni motor haritalamada kullanılan ampirik modeller, ekstrapolasyon için kullanıldıklarında doğru sonuçlar vermeyebilirler.

Kalibrasyonun geçerli olması için son adımda elde edilen sonuçlar bir test aracında uygulanarak emisyon sınırlarının sağlandığı ve herhangi bir problemin olup olmadığı kontrol edilir. Eğer sınırlamalar sağlanmıyorsa optimizasyon ek kısıtların eklenmesi ile yeniden yapılır.

3. İKİ AŞAMALI MODELLEME YAKLAŞIMI

3.1 Giriş

Motor modelini oluşturmak için mevcut yaklaşımla elde edilen uzun polinomlar modeli, modelin oluşturulması ve yorumlanmasını zor hale getirmektedir. Bu polinom modellerinin üzerinde yapılan araştırmalar zaman ve para yönünden araştırmaları zor hale getirir.

Motoru haritalamak için iki aşamalı model yaklaşımının kullanılması daha uygundur. Bu yaklaşım ile veri daha kolay anlaşılır ve yorumlanır. İki aşamalı model veri toplama metoduyla uyumlu olup tekrarlamalı ölçüm modeli formunda veriler elde edilir.

Veri motor devri, temel yakıt miktarı, yakıt basıncı, türbin kanat pozisyonu ve egzost gaz oranı valf yüksekliği değerleri sabit tutulurken, püskürtme avansının değiştirilmesi ve farklı motor devri, temel yakıt miktarı, yakıt basıncı, türbin kanat pozisyonu ve egzost gaz oranı valf yüksekliği değerleri için tekrarlanarak iki aşamalı proses şeklinde toplanır.

Verinin bu yapısı iki aşamalı modellemeye uygundur; ilk aşamada çıkışlar ve püskürtme avansı arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için her testte eğrilerin uydurulması yapılırken ikinci aşamada bu eğrilerin motor parametrelerinin fonksiyonu olarak değişiminin modellenmesini yapılır.

Modellemeyi iki aşamada değerlendirmenin avantajı, her aşamadaki modeller karmaşık terimler içermediğinden yorumlanması daha basittir. Holliday [1] ateşleme avansı motor verisini nonlineer tekrarlamalı ölçüm analizi metoduyla kullanıp iki aşamalı modellemeyi ilk uygulayan kişidir. Verilerin bu şekilde modellenmesi ölçülen cevaplarla tekrarlanan ölçüm faktörleri arasında bir ilişkiyi içerir. Holliday çalışmasının ilk aşamasında her tarama için motor çıkışlarını ateşleme avansı cinsinden modellemiş, ikinci aşamada bağımsız tarama parametreleri içindeki değişimler global motor çalışma koşullarının bir fonksiyonu olarak modellenmiştir.

Modellemenin ilk aşamasında nonlinear fonksiyon kullanılarak, bir eğri uydurulur. İkinci aşamada ise modelleme veri seti içindeki motor parametrelerine bağlı cevap özellikleri modelleri kullanılarak basitleştirilecektir [6]. Her iki aşamada, doğru modelin seçilmesi, cevap özelliklerinin bulunması, parametrelerin ve hataların elde edilmesi için gelişmiş istatistik yöntemlerinin kullanılmasına izin verir.

Böylece iki aşamalı modelleme yaklaşımı, veri setimizden elde edilen motor haritalarının daha kolay yorumlanabilir olmasını sağlamaktadır.

3.2 Model Açıklaması

Motor haritalama modellerinin oluşturulması için iki aşamalı modelleme yaklaşımında lokal ve global modeller olarak iki tür model bulunmaktadır [7]. Kalibrasyonda kullanılacak motor çıkış modellerin oluşturulması için bu modellerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. İki aşamalı modellemenin ilk aşaması lokal modelin oluşturulmasıdır. Lokal model bir gözlem seti içindeki motor çıkışlarını püskürtme avansının bir fonksiyonu cinsinden ifade eder. Bu ilk aşamanın genel ifadesi;

$$y_i^{(j)} = f_i(s_i^{(j)}, \theta_i) + \varepsilon_i^{(j)} \quad j = 1, 2, \dots, m_i \quad (3.1)$$

şeklinde verilir. Burada;

i : test sayısı,

j : bir test içindeki gözlem sayısı,

$y_i^{(j)}$: i. testte j. gözlem esnasında elde edilen çıkış ($i=1, \dots, n$),

$s_i^{(j)}$: j. gözlem sırasındaki püskürtme avansı değeridir.

θ_i : parametre vektörü (rx1) boyutlu.

$\varepsilon_i^{(j)}$: ortalaması sıfır ve varyansı σ^2 olan rasgele hata değişkeninin normal dağılımıdır.

Bağımsız normal dağılım hatalarının tahmini, parametrelerin en küçük kareler tahminleri anlamına gelmektedir, bu aynı zamanda maksimum olasılık parametreleridir [9].

$y_i^{(j)}$ tüm motor çıkışlarının cevaplarını barındıran bir vektördür. f_i fonksiyonu θ_i parametrelerinin nonlinear bir fonksiyonudur, her cevap için deneylerle oluşturulabilir. Modelin oluşturulması için farklı fonksiyonlar kullanılabilir.

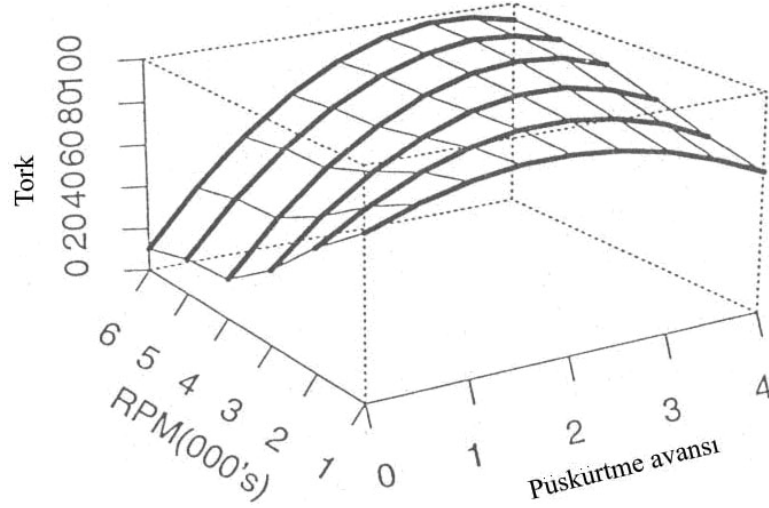
Lokal model i. test süresince alınan ölçümlerle birlikte hem sistematik hem de rasgele değişim hakkında bilgi verir. Sistematik değişim f fonksiyonu ile ifade edilirken, rasgele değişim rasgele hatalar vektörü üzerinde yapılan dağılım tahminleri yolu ile karakterize edilir. Buradan, rasgele hatanın dağılımı için bir modelin tanımlanması testler arası modellerin açıklanması ile tamamlanır. ε_i hata ifadesi normal bir dağılım takip etmektedir. Bu durumda,

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_i^2 C_i) \quad (3.2)$$

σ_i^2 : i. test için test içindeki hataların değişimidir.

Püskürtme avansı ve diğer motor parametreleri cinsinden torkun nasıl ifade edileceğine bakılır. Fakat lokal modelin genel ifadesinde yer alan θ_i ifadesi modelin yorumlanmasını zor hale getirecektir. Bunun nedeni θ_i ifadesinin modelin yorumlanabilir değerlerini içermesi olasılığı azdır. Bu nedenle θ_i ifadesi modelin ikinci aşamasında cevap özellikleri kullanılarak global modelin elde edilmesinde kullanılır [7]. Cevap özelliklerinin mühendislik yorumu bulunmaktadır, eğri uydurma parametreleri genellikle sezgisel yoruma sahip değildirler. Çalışmamızda bulunan üç adet cevap özelliği modeli motor parametreleri olan motor devri, temel yakıt miktarı, yakıt basıncı, türbin kanat pozisyonu ve egzost gaz oranı valf yüksekliği terimlerini içeren fonksiyonlardır.

Modelleme yapısı püskürtme avansına dayalı bir yapı olduğundan Şekil 3.1 deki grafiğe benzer mühendislik bilgisi dâhil edilebilir. Bu yaklaşım ortaya konmuş olduğundan, veri elde edilirken deneysel tasarım seçiminde bu bilgidен yararlanılır.



Şekil 3.1 Püskürtme avansı taramalarının cevap yüzeyi [3]

Cevap özellikleri modelleri oluşturulurken uydurulan eğrinin geometrik özellikleri ile nasıl birleştirileceği testlerin tanımlanması açısından önemlidir. Tahmin edilen değerleri elde etmek için bir eğri kullanılacağından bu önemlidir.

Cevap özellikleri içindeki değişimin modellenmesi global değişkenlerin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Cevap özellikleri modelleme prosedürünün ikinci aşamasını oluşturmaktadır. p_i cevap özellikleri vektörü olmak üzere genel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$p_i = X_i\beta + \gamma_i \quad ; i = 1, 2, \dots, r \quad (3.3)$$

p_i : i. püskürtme avansı taramasındaki r adet cevap özelliği değerleri,

X_i : i. püskürtme avansı taramasındaki motorun çalışma koşulları,

β : global parametre tahminlerinin vektörü, uygun prosedürü ile tahmin edilecektir,

γ_i : rasgele hataların normal dağılmış vektörü,

r : cevap özellikleri sayısıdır.

γ için hataların dağılımı ile ilgili bazı varsayımların yapılması gerekmektedir. Bu genel olarak normal bir dağılım olacaktır ve şu şekilde ifade edilir;

$$\gamma_i \sim N_r(0, D) \quad (3.4)$$

D : (rxr) Boyutlu, varyans-kovaryans matrisidir.

Bu D matrisi simetrik ve pozitif tanımlıdır. D'nin ana diyagonalında cevap özellikleri tahminleri ile oluşturulan testler arasındaki varyanslar, diyagonal dışındaki terimler cevap özellikleri çiftleri arasındaki kovaryansı temsil eder. Bu ek kovaryans terimlerinin tahmini çok değişkenli bir analizde parametre tahmininin doğruluğunu geliştirir.

Lokal modelin ve global modelin hata terimleri ε_i ve γ_i olarak ifade edilmiştir. ε_i gözlem yapılırken meydana gelen ölçüm hatası veya sistemdeki karışıklıklar ile ilgiyi hatayı gösterir. γ_i ise kopyalama hatası olarak adlandırılabilir. Farklı günlerde toplanan aynı püskürtme avanslarının cevap özellikleri ortam koşulları değişeceğinden farklı olacaktır. γ_i bu hatayı temsil eder.

Lokal ve global modellerin oluşturulmasından sonra bu modellerin birleştirilmesi gerekmektedir. İlk olarak, cevap özellikleri vektörü p_i 'ye ait olan dağılım tahminlerinin gözden geçirilmesi gerekmektedir. Cevap özelliklerinin tahmini $\tilde{p}_i = g_i(\tilde{\theta}_i)$ ifadesi ile yapılır. $\tilde{\theta}_i$ i. ateşleme avansı değeri taramasına en küçük kareler uydurmasından elde edilen $\tilde{\theta}_i$ ifadesinin kestirimleridir. $\tilde{p}_i$ ifadesinin varyansı:

$$Var(\tilde{p}_i) = \left[\frac{\partial g(\theta_i)}{\partial \theta} \right] \sigma^2 C_i \left[\frac{\partial g(\theta_i)}{\partial \theta} \right]^T \quad (3.5)$$

Basitleştirilirse, $\sigma^2 C_i$ notasyonu $Var(p_i)$ anlamına gelir.

$$\tilde{p}_i \sim N_r(p_i, \sigma^2 C_i) \quad (3.6)$$

C_i ; θ_i parametrelerinin varyansı yolu ile f_i 'ye, aynı zamanda θ_i parametrelerinin cevap özellikleri p_i 'ye dönüşümü yoluyla da g_i 'ye bağlıdır. C_i 'yi saptamak için iki standart yaklaşım kullanılabilir. Bunlardan ilki, maksimum olasılık kestirimlerinin varyansı için asimptotik yaklaşımdır. Diğeri, g_i fonksiyonunun Taylor serisi açılımına dayanan maksimum olasılık kestirimi fonksiyonlarının varyansları için yaklaşımdır. Eğer f_i ve g_i nonlinear fonksiyonlarsa, C_i bilinmeyen θ_i parametresine bağlıdır, bu nedenle, $\tilde{\theta}_i$ tahmini bunun yerine kullanılacaktır.

σ^2 ifadesinin küçük olduğu durumlar veya püskürtme avansı taramasındaki gözlem sayısının fazla olduğu durumlarda bu yaklaşımlar daha iyi sonuçlar vereceklerdir.

Parametrelerin kestiriminde, γ_i 'nin $\varepsilon_i^{(j)}$ 'den bağımsız olduğu varsayımı yapılır, bunların cevap özellikleri üzerinde yapmış olduğu ek cevap hatasına izin verilirse, cevap özellikleri şu şekilde bir dağılım gösterir;

$$\tilde{p}_i \sim N_r(X_i\beta, \sigma^2 C_i + D) \quad (3.7)$$

Tüm testler aynı anda gözden geçirileceği zaman yukarıda yazmış olduğumuz ifade şu kompakt formda yazılabilir;

$$\tilde{P} \sim N(Z\beta, W(\omega)) \quad (3.8)$$

$\tilde{P}$: n adet $\tilde{p}_i$ vektörünün üst üste yığılmasından elde edilen vektör,

Z : n adet X_i matrisinin üst üste yığılmasından elde edilen matris formu,

W : blok diyagonal ağırlık matrisi, diyagonalinin terimleri $\sigma^2 C_i + D$ ifadeleridir.

ω : dağılım parametrelerinin vektörüdür.

Çok değişkenli normal dağılım için negatif logaritma olasılık fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$\log l(\beta, \omega) = \log |W| + (\tilde{P} - Z\beta)' W^{-1} (\tilde{P} - Z\beta) \quad (3.9)$$

Böylece, maksimum olasılık kestirimleri β_{ML} ve ω_{ML} vektörleridir ki bu ifadeler $\log l(\beta, \omega)$ fonksiyonunu minimum yaparlar. Genellikle dağılım parametrelerinden çok daha fazla sayıda uygun parametreler vardır. β global parametrelerin boyutu dağılım parametreleri olan ω 'lardan daha büyüktür. $\log l(\beta, \omega)$ fonksiyonunun minimizasyonunun düşük sayıda parametrelerle yapılması avantajlı bir durumdur. (3.9) eşitliği negatif logaritma olasılık fonksiyonu β 'a gelince şartlı olarak lineerdir. Buradan minimizasyon sadece dağılım parametreleri cinsinden ifade edilebilir. Eğer (3.9) eşitliğinden β parametresi ayrı olarak yazılırsa şu form elde edilir:

$$\beta = (Z'W^{-1}Z)^{-1} Z'W^{-1}\tilde{P} \quad (3.10)$$

β parametrelerinin (3.9) eşitliğinden çıkarılmasından sonra olasılık sadece dağılım parametrelerinin vektörü ω 'ya bağlı olacaktır.

$$\log l(\omega) = \log |W| + \tilde{P}'(W^{-1} - W^{-1}Z(Z'W^{-1}Z)^{-1}Z'W^{-1})\tilde{P} \quad (3.11)$$

(3.11) Olasılık fonksiyonu ω_{ML} 'e göre minimum yapıldığı zaman $W(\omega_{ML})$ değeri de elde edilecektir. Buradan (3.10) denklemi kullanılarak β_{ML} elde edilebilir.

3.3 Model Seçiminde Kullanılan İstatistik Parametreler

3.3.1 Lokal Model Tipi Seçiminde Kullanılan İstatistikler

Veri seti içinde bulunan n adet adımdan, model denklemleri $n-1$ adımda uydurulurken kalan bir adım modelden tahmin almak için kullanılır. Veri seti içindeki kayıtlı veri değeri ile modelden elde edilen değer arasındaki fark öngörü artığıdır. Bu öngörü artıklarının karelerinin toplamı PRESS değerini verir. Bu değer bize modelin öngörü kalitesi hakkında bilgi verir. PRESS ifadesinin adım sayısına bölünüp kare kökünün alınması ile PRESS RMSE istatistiği elde edilir.

Veri seti içindeki n adımdan elde edilmiş model ile bu modelden alınan tahmin arasındaki farktan oluşturulan öngörü artığı ile veri setinin tamamına uydurulmuş modelden alınan tahmin ile elde edilen normal artık arasında fark bulunmaktadır.

PRESS istatistiği modelimizin öngörü gücü hakkında bilgi verir ve PRESS değerinin minimum yapılması istenir. Burada PRESS RMSE değeri ise RMSE değerinin karşılaştırılması aşma (overfitting) ile ilgili problemleri gösterecektir. RMSE değeri model her veri noktasına yaklaştığında minimum olmaya başlar. Veri noktasının takibi RMSE değerinin iyi sonuçlar vermesini sağlar. Bununla birlikte verinin takibi model ile veri noktası arasında güçlü osilasyonlara neden olabilir. Modelin veriyi takip etmesi RMSE'nin iyi değerler vermesini sağlar, fakat bu durum veriyi iyi bir şekilde temsil etmez. Bu da veri seti dışındaki noktalarda güvenilir öngörüler alınamayabilir. Bu noktada PRESS RMSE istatistiği devreye girer. PRESS RMSE istatistiği, regresyona dâhil olmayan bir nokta olsaydı, güncel modelin data seti içindeki her noktanın ne kadar iyi öngörüleceği hakkında bilgi verir. Küçük PRESS RMSE değerleri modelin herhangi bir veri noktasına karşı aşırı derece duyarlı olmadığı anlamına gelmektedir.

İki aşamalı modelin PRESS değerinin hesaplanmasında tahmin edilen değerler ilk olarak cevap özellikleri için bulunur. Tahmin edilen cevap özellikleri daha sonra test için lokal eğriyi yeniden oluşturmakta kullanılır ve bu eğri iki aşamalı tahminlerin elde edilmesi için kullanılır.

Lokal model analizinde kullanılan istatistikler [8]:

Lokal RMSE: i. test için veriye uydurulan lokal model kullanılarak bulunan hatanın karesinin ortalamasının kareköküdür. Test içindeki n gözlemden n-1 adeti modelin uydurulması için kullanılır, kalan bir veri ile modelden tahmin alınır. Modelden alınan tahmin ile veri seti değeri arasındaki farkın karesinin ortalamasının karekökü bize lokal RMSE değerini verir.

İki aşamalı RMSE: Görüntülenen test için veriye uydurulan iki-aşamalı model kullanılarak bulunan hatanın karesinin ortalamasının kareköküdür.

PRESS RMSE: Tahmin edilen hatalar için hatanın karesinin ortalamasının kareköküdür. Bölen olarak gözlem sayısı kullanılır.

İki aşamalı T^2 : T^2 tüm cevap özelliği modelleri için normalize edilmiş hataların kareleri toplamıdır. Genel ifadesi;

$$T^2 = (y_{rf} - \hat{y})^T \sum^{-1} (y_{rf} - \hat{y}) \quad (3.12)$$

Buradaki $\sum = blockdiag(C_i + D)$ şeklinde ifade edilir. C_i i. test için cevap özellikleri arasındaki lineer ilişkiyi veren lokal kovaryans matrisidir.

$$blockdiag(C_i + D) = \begin{bmatrix} C_1 + D & & & \\ & C_2 + D & & \\ & & C_3 + D & \\ & & & C_i + D \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Büyük bir T^2 değeri cevap özelliği modelleri ile ilgili bir problem olduğu anlamına gelir.

-log L: Bazı parametrelerin değerlerinin belirlendiği gözlemler kümesinin olasılığıdır. Tüm gözlemler birbirinden bağımsız olarak yapıldığında, olasılık her bağımsız gözlem için x değerleri ile belirlenmiş model ve parametrelerin

olasılıklarının geometrik toplamıdır. İhtimalin negatif sonsuza doğru olması istenir, bu iyi bir sonuçtur.

Olasılık aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$L = \prod_i^n f(x_i; \theta) \quad (3.14)$$

$$\log L = \log(\det(\Sigma)) + (y_{rf} - \hat{y})^T \Sigma^{-1} (y_{rf} - \hat{y}) \quad (3.15)$$

Bu normal bir dağılım tahminidir.

3.3.2 Global Model Tipi Seçiminde Kullanılan İstatistikler

Oluşturulan modellerin kıyaslanması için ek istatistikler gibi bilgi kriterleri bulunmaktadır. Bu bölümde global modellerin seçimi sırasında kullanılacak olan Akaike bilgi ölçütü ve düzeltilmiş R^2 kriterleri anlatılacaktır.

3.3.2.1 Küçük-Örnek Akaike Bilgi Ölçütü (AIC_c)

Akaike Bilgi Ölçütü (AIC), Kullback-Leibler bilgi tanımındaki iki model arasındaki farkı temel almaktadır [14]. Burada Akaike bilgi ölçütü $I(f; g)$, gerçek model ile önerilen modelin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. $I(f; g)$, gerçek model $f(y)$ ile önerilen model $g(y|\beta)$ arasındaki asimetrik uzaklık veya farkın bir ölçütüdür. β parametre vektörümüzdür. Akaike bilgi ölçütünün genel formu şu şekildedir;

$$AIC = -2\log(L) + 2k \quad (3.16)$$

Burada L parametrelerin tahmininde kullanılan olasılık fonksiyonu ve k ise modelde öngörülen bağımsız parametre sayısıdır. Seçilen model ile maksimum olasılığın birleştirilmesi için log olasılık fonksiyonu terimine modelin içindeki karmaşık yapıyla bağlantılı k parametre sayısı eklenir.

Akaike bilgi ölçütü iki veya daha fazla modelin seçilmesinde kullanılır. En küçük AIC değerine sahip model, gerçek parametre değerleri ile maksimum olasılık tahminlerinden elde edilen değerler yer değiştirdiğinde en az bilgi kaybı olması beklenen modeldir. Fakat AIC değeri en düşük olan modelin gerçekte doğru model

olup olmadığı bilinmediğinden AIC değeri her model için ayrı ayrı hesaplanıp modeller içinde minimum AIC değerine sahip model seçilir.

Bununla birlikte veri kümesiyle ilgili parametrelerin sayısı arttıkça AIC kötü sonuçlar vermeye başlar. Bu nedenle, parametre sayısı fazlalığını kısıtlayan terim $n/n-k-1$ ifadesi ile çarpılarak küçük örnek Akaike bilgi ölçütü oluşturulur. Genel ifadesi şu şekildedir:

$$AIC_c = -2\log(L) + 2k * (n/n-k-1) \quad (3.17)$$

Burada n veri noktası sayısı k parametre sayısından büyükse bu düzenleme ihmal edilebilir ve AIC iyi sonuçlar verir. Küçük örnek Akaike ölçütü veri noktası sayısının parametre sayısından çok büyük olmadığı durumlarda kullanılır.

3.3.2.2 Düzeltilmiş R^2

R^2 istatistiğinin değerlendirilmesi öngördüğümüz modelin uygunluğunu denetlemek için gereklidir. Bu istatistik artıkların hesaplanması ile oluşturulur.

Veri kümesindeki x noktaları kullanılarak oluşturulmuş modelden çıkışlarımızın model tarafından öngörölmüş değerleri hesaplanır. Daha sonra o nokta için ölçölmüş olunan gerçek değerden öngörölen bu değer çıkarılır. Elde edilen değer artık olarak tanımlanır. Artıkların karesinin toplamı da bize SSR (Sum of Square Residuals) değerini verir.

Veri setinde ne kadar çok nokta varsa SSR değerinin büyüklüğü de o kadar artacaktır. Bunun için uydurulan modelin veri setine ne kadar iyi uyduğunun tespiti için regresyonun standart hatası tanımı yapılabilir. Standart hatanın değeri şu şekilde hesaplanır; öngörölen parametrelerin sayısının veri noktası sayısından çıkarılması ile modelin serbestlik derecesini buluruz, buradan SSR değerini serbestlik derecesine bölüp karekökünü aldığımızda standart hata tanımlanmış olur.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}} \quad (3.18)$$

Fakat bu değer değişkenin ölçüm birimine bağılı kaldığından uygun bir seçim kriteri olarak alınmamaktadır.

Bu nedenle modelin uygunluğunu denetlemek için R^2 istatistik değerine başvurulur.

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2 - \sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{SSR}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \equiv 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (3.19)$$

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

$\bar{y}$: y'nin ortalama değeri

$\hat{y}$: öngörülen y değeri

SST: değişkenin ortalaması etrafındaki toplam değişimi

Bulunan R^2 katsayısı, bağımsız değişken değerlerindeki değişimlerin ne kadarının oluşturulan regresyon modeli ile açıklandığını gösterir. R^2 0 ile 1 arasında değişmektedir. 1'e yaklaştıkça modelin uygunluğu artmaktadır.

SSR değerinin azalması R^2 değerinin artmasına neden olacaktır. Maksimum R^2 değerine ulaşmak için ilgili olmayan birçok değişkenin regresyon modeline eklenmesi istenebilir. Buda bize gerçekçi olmayan R^2 değerleri verecektir. Bu nedenle ilave değişken eklenmesini kısıtlamak için R^2 ifadesi üzerinde bir düzenleme yapmak gerekmektedir. Eklenen bu kısıtlamayla değişken ilave edilmesi durumuyla ortaya çıkabilecek problemlerden ifade arındırılmış olur. Yeni oluşturulan düzeltilmiş R^2 ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{SSR/(n-(k+1))}{SST/(n-1)} = 1 - \frac{n-1}{n-(k+1)}(1-R^2) \quad (3.20)$$

Burada k+1 kestirilecek parametre sayısıdır.

3.4 İki Aşamalı Modellemede Kullanılan Lokal ve Global Model Tipleri

3.4.1 Radyal Tabanlı Fonksiyonlar

N boyutlu uzayda eğri uydurma için Radyal Tabanlı Fonksiyonlardan yararlanılabilir. Radyal tabanlı bir fonksiyon şu genel forma sahiptir:

$$z(x) = \Phi(\|x - \mu\|) \quad (3.21)$$

x : n boyutlu vektör,

μ : radyal tabanlı fonksiyon merkezlerinin n boyutlu vektörü,

$\|\cdot\|$: Öklit mesafesi,

Φ : pozitif giriş değerleri için tanımlanmış olan tek değişkenli fonksiyon. Profil fonksiyonu olarak ta tanımlanır.

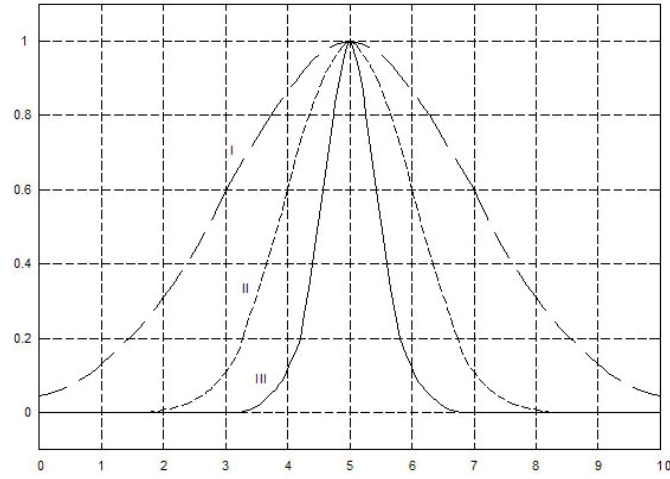
Model, N farklı merkezler ile N radyal tabanlı fonksiyonların lineer bir birleşimi gibi kurulur. Belirlenmiş bir giriş vektörü x için, RBF ağının çıkışı olan hareket vektörü $\hat{y}$ 'nin ifadesi aşağıda gösterilmiştir:

$$\hat{y}(x) = \sum_{j=1}^N \beta_j z_j(x) \quad (3.22)$$

β_j : j. RBF'un μ_j 'de merkezlenmiş ağırlık bileşeni,

$\hat{y}$: çıkışı y tarafından belirtilen değerlerin hedef setine yaklaşımını verir.

Model tabanlı kalibrasyon yönteminde çeşitli radyal tabanlı fonksiyonlar bulunmaktadır [7]. Bu fonksiyonlar Φ profil fonksiyonu ile tanımlanırlar. Her radyal tabanlı fonksiyon aynı zamanda bir genişlik parametresi olan σ ile birleştirilmiştir. Ve bu parametre fonksiyonun merkezi etrafındaki genişleme ile ilgilidir. Başlangıç noktası seçiminde σ parametresi, her merkezin en yakın veri noktasına uzaklığının ortalaması alınarak hesaplanır. Şekil 3.2 Bir radyal tabanlı fonksiyonun genişlik parametresinin farklı değerlerde seçilmesi ile elde edilen grafiği vermektedir.

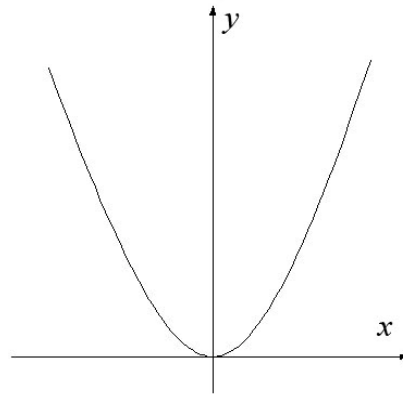


Şekil 3.2 Radyal Tabanlı Fonksiyon (($\mu_1,2,3 = 5; \sigma_1 = 2, \sigma_2 = 1, \sigma_3 = 0.5$)) [7]

Radyal tabanlı fonksiyonlarla ilişkili bir diğer parametre ise λ düzenleme parametresidir. Genellikle küçük pozitif değerler alan λ , uygun algoritmalarda kullanılır. λ parametresi büyük ağırlıkları cezalandırarak, y'nin düzgün yaklaşımlar üretmesini sağlar ve fonksiyon ağıнын aşma (overfit) eğilimini azaltır. Bu y hedef değerlerinin iyi uymasına fakat öngörü kapasitesinin zayıf olmasına neden olur.

3.4.2 Kuadratik Fonksiyonlar

$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n$ n. dereceden bir polinom ifadesidir.



Şekil 3.3 Kuadratik fonksiyon eğrisi

Şekil 3.3'de gösterildiği gibi tek dönüş noktasına sahip polinomun genel ifadesi $y = ax^2 + bx + c$ şeklinde yazılır ve kuadratik fonksiyon olarak adlandırılır. İki aşamalı modelleme sırasında lokal modellerin oluşturulması çıkışların püskürtme avansının bir fonksiyonu olarak tanımlanması için kuadratik fonksiyonlardan yararlanılmıştır.

3.4.3 Karma Radyal Tabanlı Fonksiyonlar

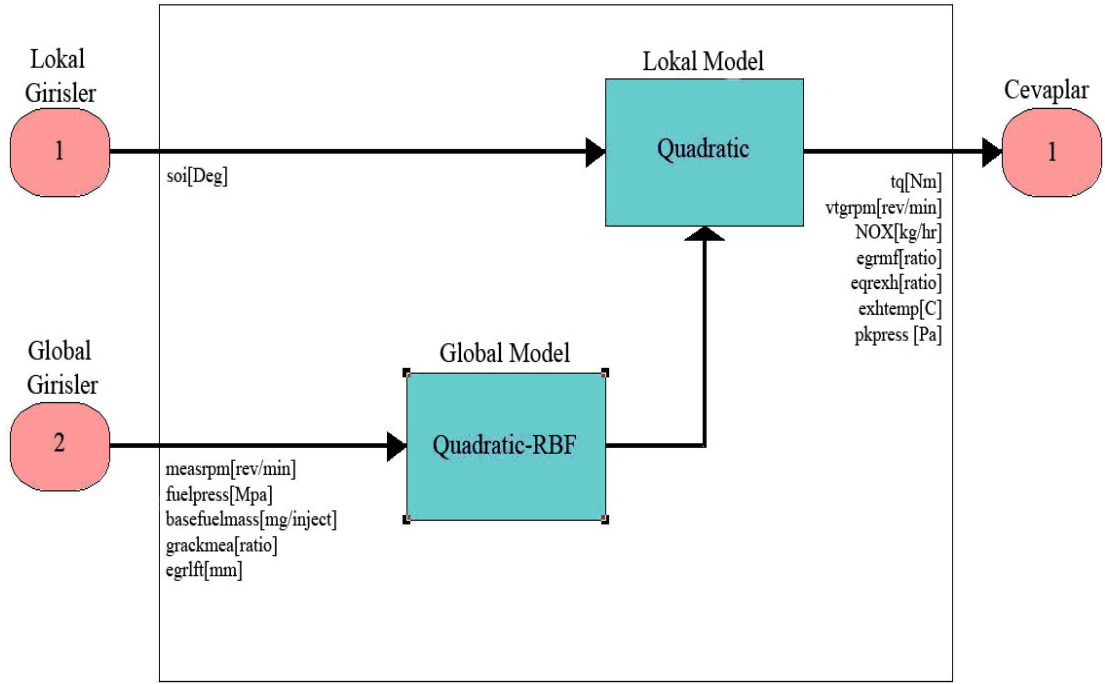
Karma RBF'lar polinom gibi standart bir model ile radyal tabanlı bir fonksiyon modelini birleştirir. Tam modeli oluşturmak için bu iki fonksiyon modeli birbirine eklenir. Bu yöntem, radyal tabanlı fonksiyonların parametrik olmayan yapısı ile değişkenlerden herhangi birinin kuadratik davranış beklentisi gibi bir ön bilgi ile birleştirilmesine olanak sağlar.

σ genişlik seçim algoritması radyal tabanlı fonksiyonlar için kullanılan algoritma ile aynı iken, λ düzenleme parametresi için kullanılan algoritma radyal tabanlı fonksiyon ve kuadratik model terimlerini birleştirerek seçer.

λ düzenleme parametresini seçmede kullanılabilecek bir algoritma, verilen model tipine göre kuadratik modeli uydurduktan sonra artıklarla bir radyal tabanlı fonksiyon oluşturur.

4. İKİ AŞAMALI MODELLEME UYGULAMASI

4.1 İki Aşamalı Modelleme Blok Diyagramı ve Açıklaması



Şekil 4.1 İki Aşamalı Model Blok Diyagramı

Bu bölümde bir motorun kalibrasyon uygulamasında önemli bir adım olan motor haritalama modelinin iki-aşamalı yaklaşım kullanılarak bir dizel motoru için uygulamasının sonuçları gösterilecektir. İki aşamalı modelleme yaklaşımının uygulandığı dizel motora ait altı giriş yedi çıkışlı sistemde 455 adet giriş çıkış verisi motor haritalama modellerinin elde edilmesi için kullanılmıştır. Sistem girişleri püskürtme avansı, motor hızı, yakıt miktarı ve basıncı, değişken geometrili türbin kanat pozisyonu ve egzost gazı geri dönüşüm oranı valf konumudur, çıkışlar ise tork, egzost sıcaklığı, azot oksid emisyonu, silindirde oluşan en yüksek basınç, egzost gazı yakıt fazlalık oranı, değişken geometrili turbo hızı ve silindir içindeki artık gaz oranıdır. Bu çalışmada dizel motorun iki aşamalı modellemesi Matlab® Model Based Calibration Toolbox (MBC) kullanılarak yapılmıştır.

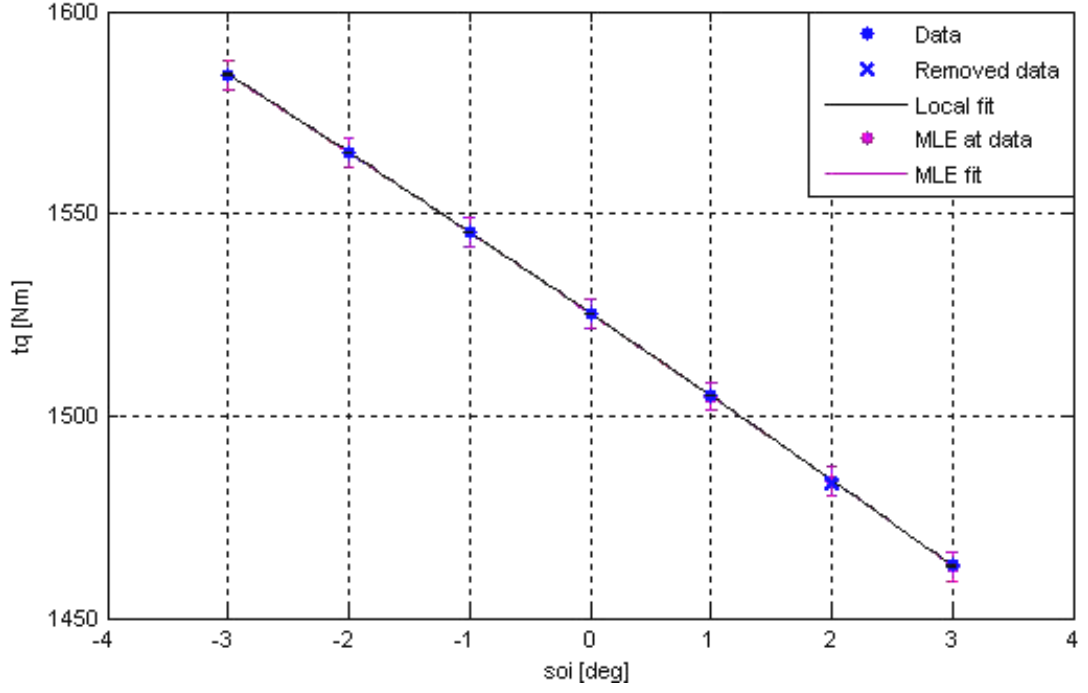
Amaç iki aşamalı modelleme yaklaşımı kullanarak dizel motorun çıkışlarını püskürtme başlangıcı, motor hızı, yakıt miktarı ve basıncı, değişken geometrili türbin kanat pozisyonu ve egzost gazı geri dönüşüm oranı valf konumunun bir fonksiyonu olarak modellemedir. İki aşamalı modelleme veri açık bir hiyerarşik yapıya sahipse daha uygundur. Kullanılan veri kümesinde iki aşamalı modelleme yaklaşımına uygun veri motor hızı, yakıt miktarı ve basıncı, değişken geometrili türbin kanat pozisyonu ve egzost gazı geri dönüşüm oranı valf konumu sabit tutulurken püskürtme başlangıcı belli değerler arasında taranıp her cevap için sonuçlar kaydedilerek toplanır. Blok diyagramında, testler içindeki değişim lokal, testler arasındaki değişim ise global olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.1 de lokal ve global model için sırasıyla kuadratik ve kuadratik-RBF model tipleri belirlenmiştir. Model tipi, test verisine uydurulacak eğrinin şeklini belirlemektedir.

Burada her test için bağımsız olarak bir lokal model uydurulacak. Ardından tüm lokal modellerden gelen sonuçlar, tüm global değişkenler ile global modeli uydurmak için kullanılacaktır. Global modeller kestirildikten sonra herhangi bir motor hızı, yakıt miktarı, yakıt basıncı, turbo şarjer hızı ve egzost gazı geri dönüşüm oranı için lokal model katsayıları öngörülebilecektir.

4.2 Tork Cevabının Modellenmesi

Tork çıkışı için lokal model seçiminde Kuadratik model ile Lineer model karşılaştırılmıştır. İstatistikî verilere bakılarak Kuadratik modelin kullanılması durumunda en iyi sonucun alındığı gözlemlenmiştir. Lokal model için Beta_1, Beta_soi ve Beta_soi² olmak üzere üç adet parametrik cevap özellikleri belirlenmiştir. Bu cevap özelliklerinin belirlenmesi için global model seçiminde Cubic, Quadratic-RBF, RBF-Gaussian, Linear-RBF model tipleri denenmiş istatistikî verilerin karşılaştırılmasıyla en iyi model tipinin Quadratic-RBF olduğuna karar verilmiştir.

Çalışmada kullanılan veri kümesi yedişer adet gözlem içeren 65 ayrı testi barındırmaktadır. buradan 65 ayrı lokal model oluşturulmuştur. İlk test için elde edilmiş tork-soi grafiği ve tork lokal modelinin matematiksel ifadesi şu şekildedir:



Şekil 4.2 Tork Cevabı 1. test Lokal Model Grafiği

1. test için uydurulan lokal modelin matematiksel ifadesi:

$$tq = \text{Beta_1} + \text{Beta_soi} * \text{soi} + \text{Beta_soi}^2 * \text{soi}^2 \text{ (genel form)} \quad (4.1)$$

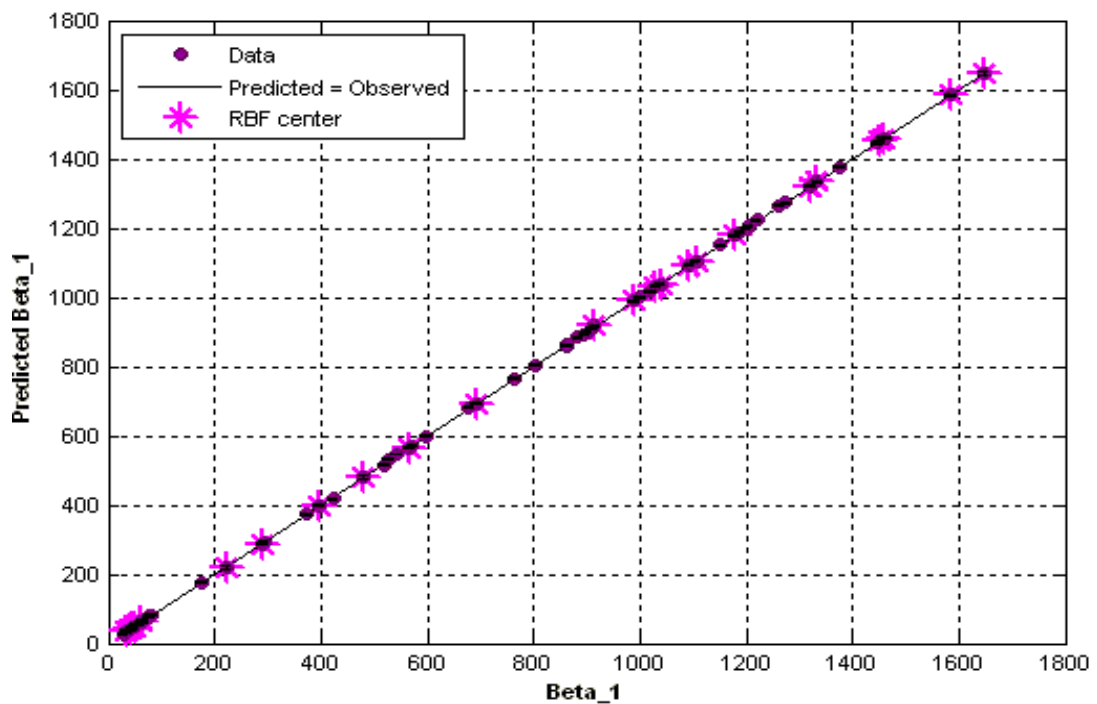
$$tq = 1584.4339 - 114.75465 * \text{soi} - 6.697097 * \text{soi}^2 \quad (4.2)$$

İki aşamalı model için, global modeller cevap özelliklerinin arasında herhangi bir korelasyon olup olmadığı hesaba katılmadan oluşturulmaktadır. Dolayısıyla cevap özellikleri arasındaki muhtemel korelasyonun iki aşamalı modellemede hesaba katılması amacıyla maksimum olasılık kestirimi kullanılmıştır. Bu durumda cevap özellikleri arasında bir korelasyon varsa, maksimum olasılık kestiriminin kullanılması iki aşamalı modeli önemli ölçüde geliştirecektir.

Tablo 4.1 Tork Cevabı Lokal Model Tipleri İçin İstatistiksel Veriler

Lokal Model	Lokal RMSE	İki-Aşamalı RMSE	İki-Aşamalı T ²	-logL
Quadratik	0,090882	1,8223	2,1665	-206,28
Linear	0,77551	2,1066	1,5856	179,47

Kuadratik lokal model tipi model uydurmanın yapılması için modelin katsayılarını tanımlamak amacı ile üç adet cevap özeliği belirlenmiştir. Beta_1, Beta_soi, Beta_soi² olarak tanımlanan cevap özellikleri sırasıyla uydurulan lokal modelin sabit katsayısı, soi teriminin katsayısı ve soi² teriminin katsayısıdır ve global parametreler cinsinden modellemek için kullanılmıştır. Bu işlem iki-aşamalı modellemenin ikinci aşamasını oluşturmaktadır. Cevap özeliği grafikleri modelleri oluşturmak için kullanılan verilere karşı aynı noktalarda uydurulan modelden elde edilen değerleri göstermektedir.



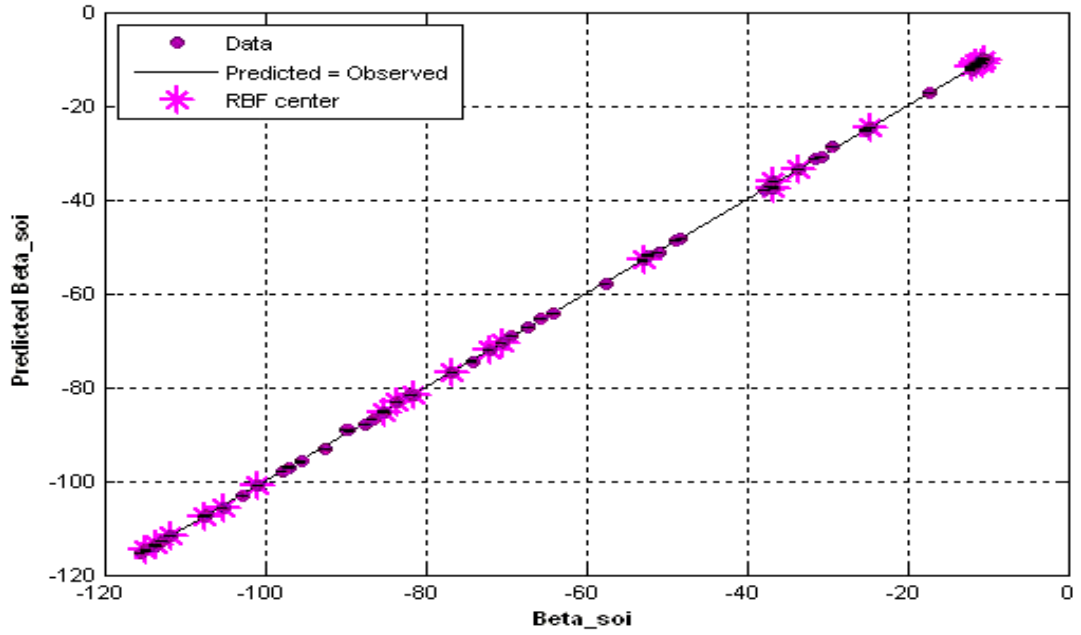
Şekil 4.3 Tork Cevabı için Beta_1 Cevap Özelliği Grafiği

Beta_1 cevap özelliği matematiksel ifadesi:

$$\begin{aligned} \text{Beta}_1 = & -558.2593 - 268.9226 * \text{measrpm} + 869.8058 * \text{basefuelmass} + 90.80852 * \text{fuelpress} \\ & - 267.9202 * \text{grackmea} + 129.9119 * \text{egrift} - 24.62252 * \text{measrpm}^2 \\ & - 111.0898 * \text{measrpm} * \text{basefuelmass} + 14.50387 * \text{measrpm} * \text{fuelpress} \\ & + 62.82241 * \text{measrpm} * \text{grackmea} - 25.01587 * \text{measrpm} * \text{egrift} \\ & - 115.8609 * \text{basefuelmass}^2 + 40.01241 * \text{basefuelmass} * \text{fuelpress} \\ & + 41.91203 * \text{basefuelmass} * \text{grackmea} + 29.37978 * \text{basefuelmass} * \text{egrift} \\ & - 109.3542 * \text{fuelpress}^2 + 25.0004 * \text{fuelpress} * \text{grackmea} + 16.89724 * \text{fuelpress} * \text{egrift} \\ & - 103.9104 * \text{grackmea}^2 - 30.26563 * \text{grackmea} * \text{egrift} - 73.64991 * \text{egrift}^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Tablo 4.2 Tork Cevabı için Beta_1 Cevap Özelliği İstatistiksel Veriler

Model	PRESS RMSE	RMSE	AIC _c	R ² adj
Cubic	171,9776	41,7926	1415,309	0,99316
Quadratik-RBF	17,4758	2,6692	406,3691	0,99997

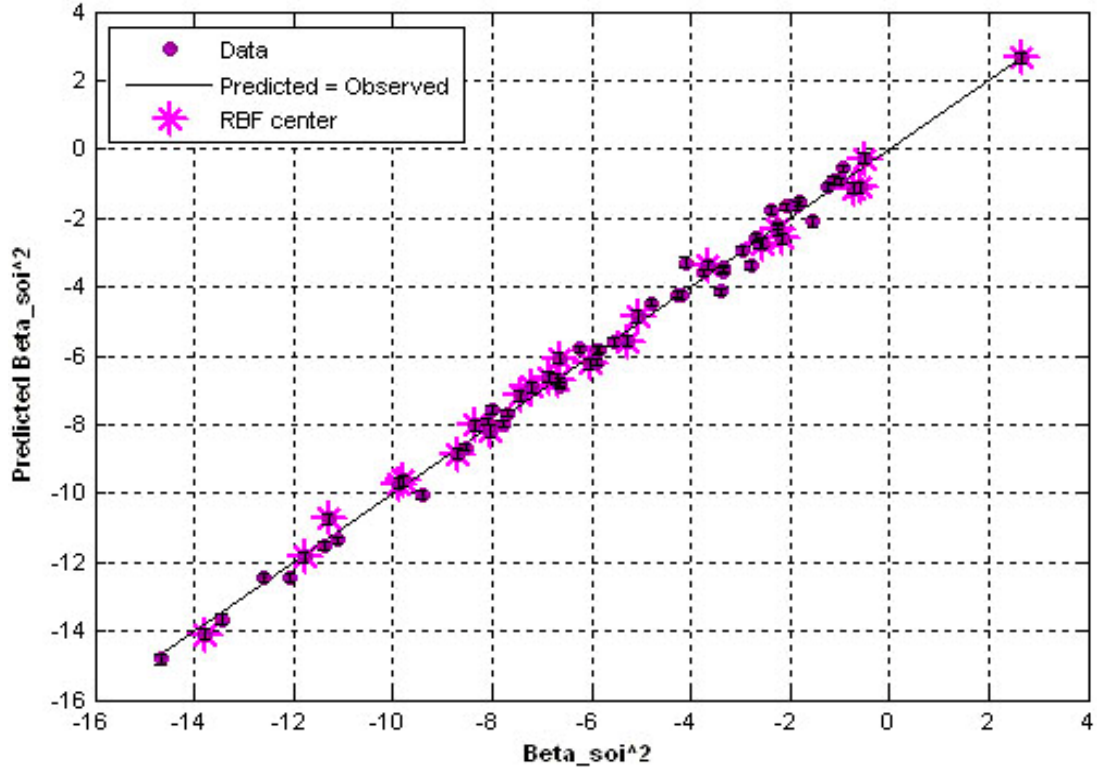
**Şekil 4.4** Tork Cevabı için Beta_soi Cevap Özelliği Grafiği

Beta_soi cevap özelliği matematiksel ifadesi:

$$\begin{aligned}
Beta_{soi} = & 50.4379 - 13.2914 * measrpm - 84.1228 * basefuelmass + 23.0613 * grackmea \\
& + 7.99913 * measrpm^2 + 1.41832 * measrpm * basefuelmass \\
& - 4.32028 * measrpm * grackmea + 1.41972 * measrpm * egrlft \\
& + 7.65155 * basefuelmass^2 + 7.99847 * basefuelmass * fuelpress \\
& + 1.04615 * basefuelmass * grackmea - 3.36025 * basefuelmass * egrlft \\
& + 8.35288 * fuelpress^2 + 1.58968 * fuelpress * grackmea - 1.96993 * fuelpress * egrlft \\
& + 8.03595 * grackmea^2 - 1.34646 * grackmea * egrlft + 7.64065 * egrlft^2
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Tablo 4.3 Tork Cevabı için Beta_soi Cevap Özelliği İstatistiksel Veriler

Model	PRESS RMSE	RMSE	AIC _c	R ² adj
Cubic	16,3851	3,8162	1104,158	0,98923
Quadratik-RBF	0,64618	0,3118	17,8324	0,9999



Şekil 4.5 Tork Cevabı için Beta_soi² Cevap Özelliği Grafiği

Beta_soi² cevap özelliği matematiksel ifadesi:

$$\begin{aligned}
 \text{Beta_soi} = & 30.9602 - 0.457089 * \text{measrpm} - 0.831727 * \text{basefuelmass} + 1.77858 * \text{fuelpress} \\
 & - 0.813583 * \text{grackmea} + 2.04557 * \text{measrpm}^2 - 2.08353 * \text{measrpm} * \text{basefuelmass} \\
 & - 1.44511 * \text{measrpm} * \text{fuelpress} - 1.01945 * \text{measrpm} * \text{egrift} \\
 & + 5.79533 * \text{basefuelmass}^2 + 3.60129 * \text{basefuelmass} * \text{fuelpress} \\
 & - 0.325655 * \text{basefuelmass} * \text{grackmea} - 0.791786 * \text{basefuelmass} * \text{egrift} \\
 & + 3.72565 * \text{fuelpress}^2 - 1.19239 * \text{fuelpress} * \text{grackmea} + 5.69234 * \text{grackmea}^2 \\
 & + 3.82271 * \text{egrift}^2
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Tablo 4.4 Tork Cevabı için Beta_soi2 Cevap Özelliği İstatistiksel Veriler

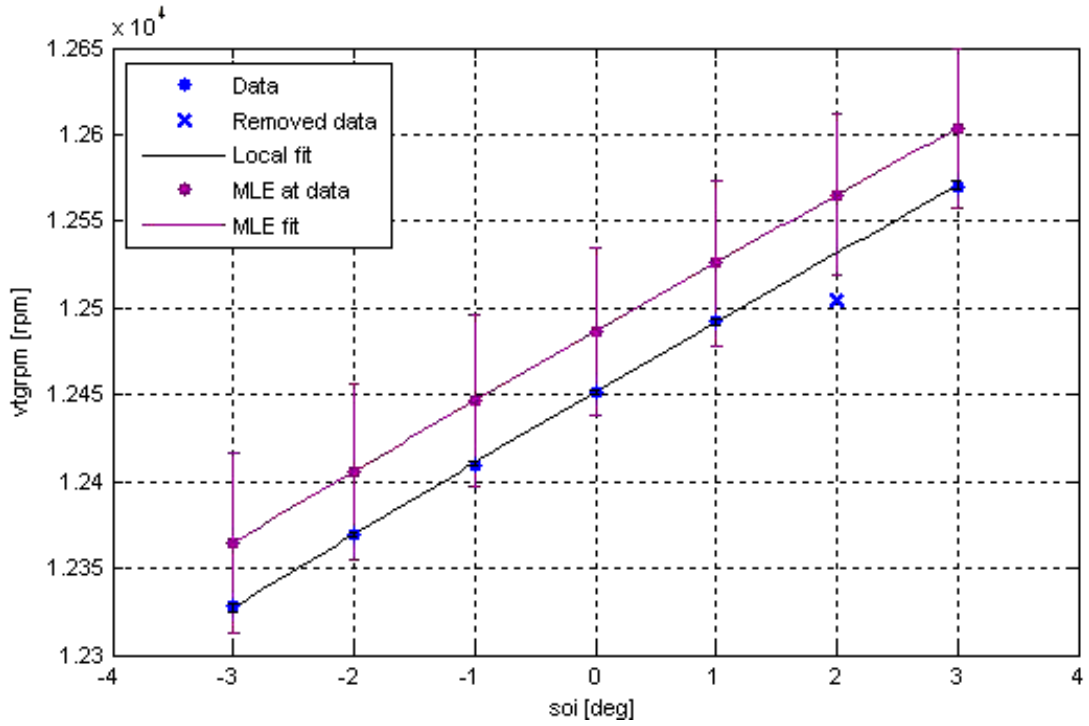
Model	PRESS RMSE	RMSE	AIC _c	R ² adj
Cubic	4,1488	0,93904	921,879	0,94056
Kuadratik-RBF	0,33022	0,17006	-50,2192	0,99805

Her üç cevap özelliği uydurulurken model tipi olarak belirlenen Kuadratik-RBF en az hataya sahiptir. Bu karma radyal tabanlı fonksiyon sınıfına girer ve radyal tabanlı bir model ile doğrusal bir modeli birleştirir. Radyal tabanlı fonksiyon modeller, seçilmiş dairesel veya eliptik bir geometrisi olan tepeliklerin esnek bir yüzeyle bire bir eşleştirilmesi olarak düşünülebilecek radyal olarak simetrik fonksiyonlardır.

İki-aşamalı modelleme her test içindeki ve testler arasındaki değişimi iki ayrı değişimin kaynağı olarak tanımlar. Bunun içinde ayrı lokal ve global modeller uydurulmaktadır. Her test için bağımsız olarak uydurulan lokal model daha sonra global modellerin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

4.3 Değişken Geometrilili Türbin Hızı Cevabının Modellenmesi

Değişken geometrilili turbo hızı cevabı için lokal model uydurulurken kuadratik ve lineer olmak üzere iki farklı model tipi karşılaştırılmıştır. Kullanılan istatistikî verilerden yola çıkarak kuadratik modelin bu cevap için en uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 4.6 Değişken Geometrilili Türbin Hızı 1.test Lokal Model Grafiği

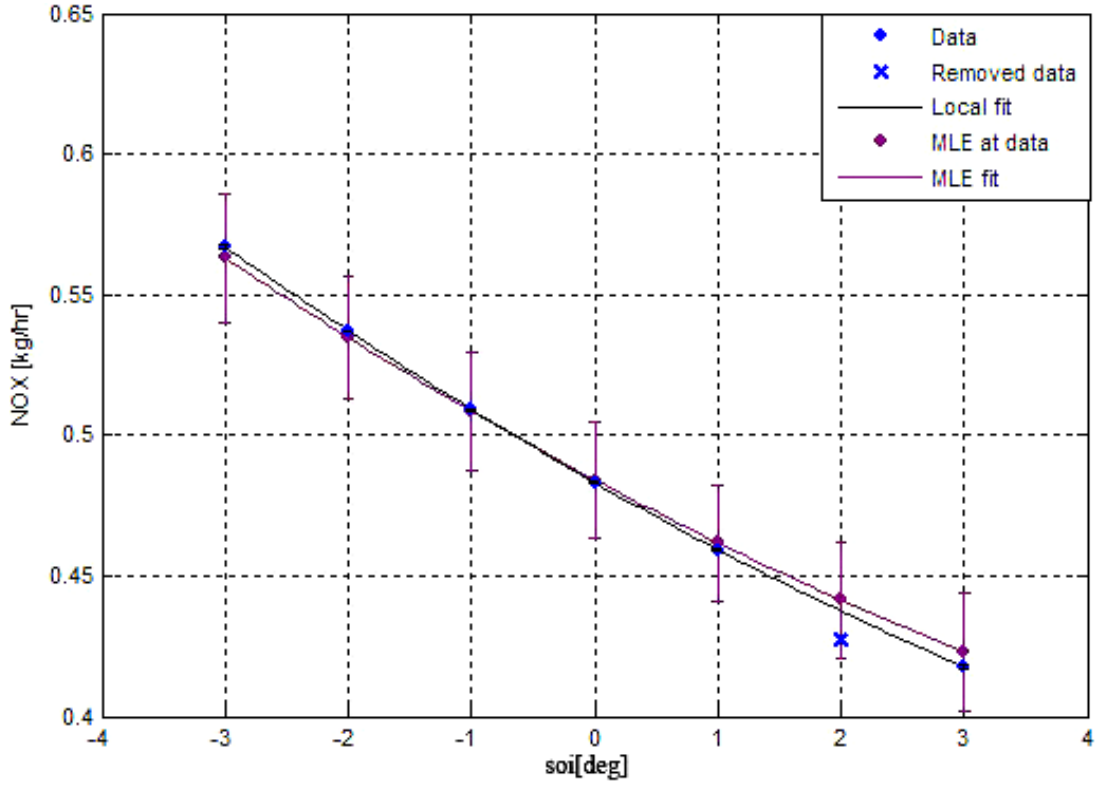
1. test için uydurulan lokal modelin matematiksel ifadesi:

$$vtgrpm = 12327.4063 + 253.473394 * soi - 10.301713 * soi^2 \quad (4.6)$$

Tablo 4.5 Değişken Geometrilili Türbin Hızı Cevabı Lokal Model Tipleri için İstatistikî Veriler

Lokal Model	Lokal RMSE	İki-Aşamalı RMSE	İki-Aşamalı T ²	-logL
Quadratik	0,47214	0,37567	0,49244	-175,49
Linear	0,99327	88,1287	1,9974	779,53

4.4 Azot Oksit Emisyonu Cevabının Modellenmesi



Şekil 4.7 Azot Oksit Emisyon Cevabı 1.test Lokal Model Grafiği

1. test için uydurulan lokal modelin matematiksel ifadesi:

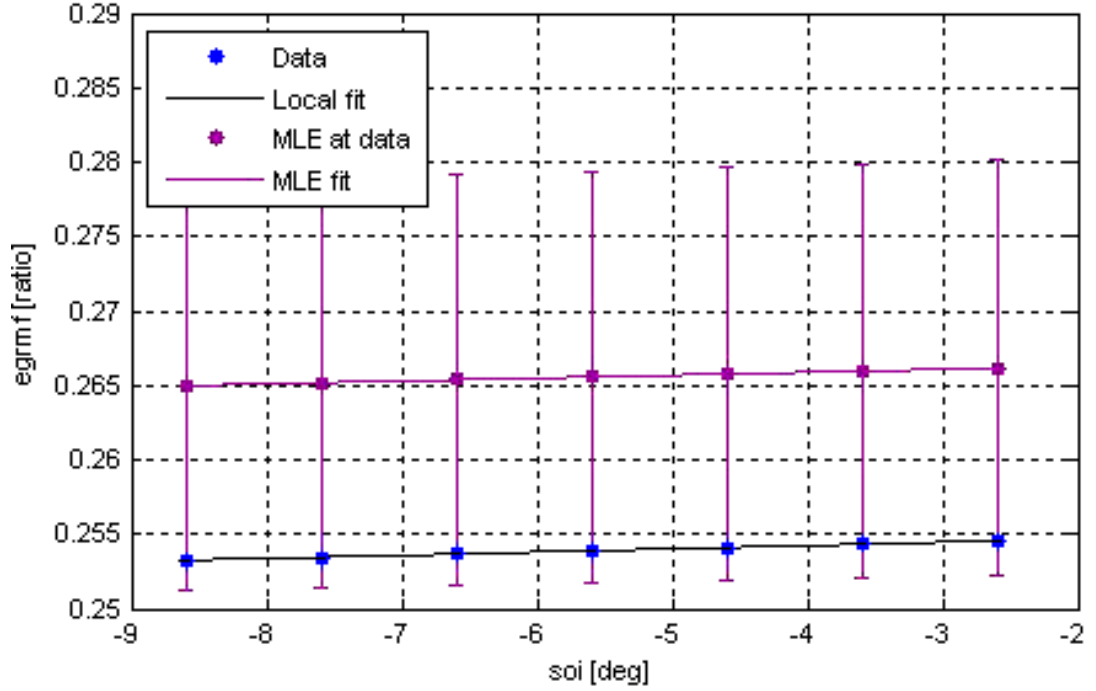
$$NOX = 0.5669 - 0.18551 * soi + 0.036195 * soi^2 \quad (4.7)$$

Tablo 4.6 Azot Oksit Emisyonu Cevabı Lokal Model İstatistikî Veriler

Lokal Model	Lokal RMSE	İki-Aşamalı RMSE	İki-Aşamalı T ²	-logL
Kuadratik	0,00041885	0,013655	2,8608	-1744,1511
Linear	0,0056719	0,022921	1,9784	-993,3282

Tablo 4.6’da gösterilen istatistiki verilerden kuadratik model tipinin azot oksit emisyon cevabı için daha iyi olduğu belirlenmiştir. Lineer ve kuadratik model tipleri karşılaştırıldığında hata değerleri en az olan seçileceğinden kuadratik lokal model tipinin en uygun olduğu görülmüştür.

4.5 Silindir İçindeki Artık Gaz Oranı Cevabının Modellenmesi



Şekil 4.8 Silindir İçindeki Artık Gaz Oranı 3. test Lokal Model Grafiği

3. test için uydurulan lokal modelin matematiksel ifadesi:

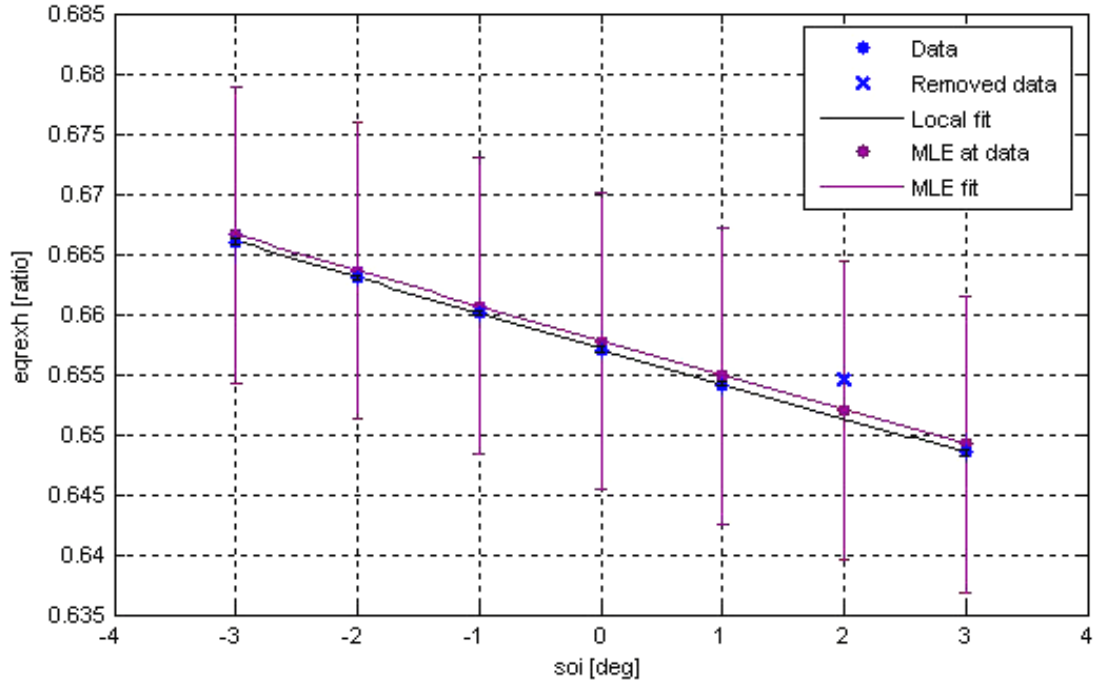
$$egrmf = -1.3686 + 0.0053866 * soi + 0.00027781 * soi^2 \quad (4.8)$$

Tablo 4.7 Silindir İçindeki Artık Gaz Oranı Cevabı Lokal Model İstatistikî Veriler

Lokal Model	Lokal RMSE	İki-Aşamalı RMSE	İki-Aşamalı T ²	-logL
Kuadratik	1.9531e-005	0.0071881	2.128	-2003.6639
Linear	2.4239e-005	0.0082815	1.9994	-1018.4697

Tablo 4.7 deki verilerden kuadratik model için elde edilen hata oranlarının daha iyi olduğu görülür. Silindir içindeki artık gaz oranının modellenmesi için kuadratik modelin en uygun olduğu belirlenmiştir.

4.6 Egzost Gazı Yakıt Fazlalık Oranı Cevabının Modellenmesi



Şekil 4.9 Egzost Gazı Yakıt Fazlalık Oranı 1. test Lokal Model Grafiği

1. test için uydurulan lokal modelin matematiksel ifadesi:

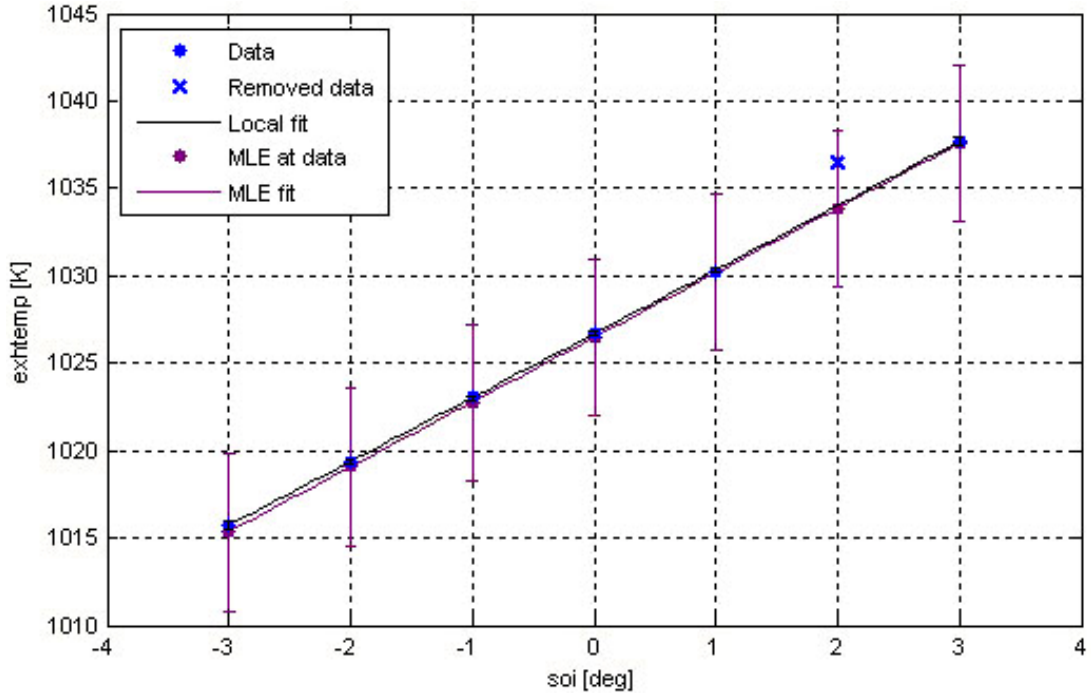
$$eqrexh = 0.65727 - 0.013882 * soi + 0.00017808 * soi^2 \quad (4.9)$$

Tablo 4.8 Egzost Gazı Yakıt Fazlalık Oranı Cevabı Lokal Model İstatistikî Veriler

Lokal Model	Lokal RMSE	İki-Aşamalı RMSE	İki-Aşamalı T ²	-logL
Kuadratik	6.4354e-005	0.0065781	2.6392	-2462.34
Linear	0.00016135	0.0066254	2.0058	-1499.1489

Tablo 4.8’de verilen iki lokal model tipinden kuadratik model tipinin istatistik değerlerinin doğrusal model tipine göre daha iyi olduğu görülmektedir. Dolayısıyla en iyi model tipi olarak kuadratik model tipi belirlenmiştir.

4.7 Egzost Sıcaklığı Cevabının Modellenmesi



Şekil 4.10 Egzost Sıcaklığı Cevabı 1. test Lokal Model Grafiği

1. test için uydurulan lokal modelin matematiksel ifadesi:

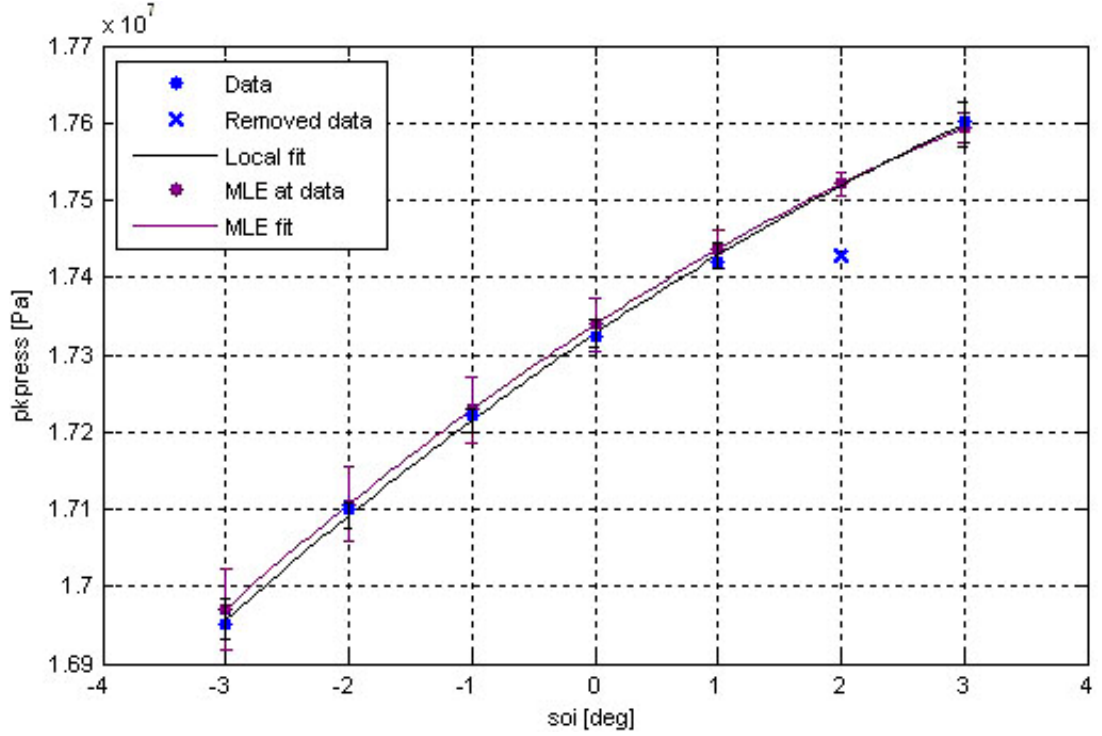
$$exhtemp = 1015.7249 + 21.863972 * soi + 0.09048714 * soi^2 \quad (4.10)$$

Tablo 4.9 Egzost Sıcaklığı Cevabı Lokal Model İstatistikî Veriler

Lokal Model	Lokal RMSE	İki-Aşamalı RMSE	İki-Aşamalı T ²	-logL
Quadratik	0.059075	2.3123	2.2167	-58.4705
Linear	0.10334	4.3677	1.9958	191.2824

Egzost sıcaklığı çıkışı için lokal model olarak kuadratik model tipi dışında doğrusal model tipi kullanılarak da modelleme yapılmış, fakat lokal modelin kuadratik olması durumunda en iyi sonucun elde edildiği görülmüştür. Belirlenen Bete₁, Beta_{soi}, Beta_{soi}² cevap özellikleri için global modele uyabilecek en iyi model tipinin belirlenmesi amacıyla her üç global model içinde kübik, kuadratik-radyal tabanlı fonksiyon(Quadratik-RBF), doğrusal-radyal tabanlı fonksiyon(Linear-RBF) model tipleri denenmiş ve ‘beta_{soi}’, ‘beta_{soi}²’ cevap özellikleri için uygun model tipinin Quadratic-RBF ‘beta₁’ cevap özelliği için ise uygun model tipinin Linear-RBF olduğuna karar verilmiştir.

4.8 Silindir İçindeki En Yüksek Basınç Cevabının Modellenmesi



Şekil 4.11 Silindir İçindeki En Yüksek Basınç Cevabı 1. test Lokal Model Grafiği

1. test için uydurulan lokal modelin matematiksel ifadesi:

$$pkpress = 16957080.0058 + 839938.15076 * soi - 199184.772036 * soi^2 \quad (4.11)$$

Tablo 4.10 Silindir İçindeki En Yüksek Basınç Cevabı Lokal Model İstatistikî Veriler

Lokal Model	Lokal RMSE	İki-Aşamalı RMSE	İki-Aşamalı T ²	-logL
Quadratik	9477.4033	25552.5615	1.8385	3911.3281
Linear	69611.6623	87949.1381	1.167	2901.991

Daha önceki sistem cevaplarında olduğu gibi silindir içindeki en yüksek basıncın modellenmesinde de kuadratik ve lokal model karşılaştırılarak uygun modelin hangisi olduğuna karar verilmiştir. Yalnız bu iki modelin seçilmesindeki nedenimiz bu iki modelin kubik veya başka bir model tipine göre daha iyi sonuçlar vermesidir. Bu nedenle bu iki model karşılaştırılması gösterilerek en uygun modelin hangisi olduğuna karar verilmiştir.

5. KALİBRASYON PROSESİ

Günümüz motor teknolojisinde motor parametreleri arasında en iyi sonucu elde etmek için optimizasyon uygulamasının gerekliliği kaçınılmaz bir hale gelmiştir. Bununla birlikte otomotiv sektöründe de sürekli gelişimi sağlamak amacı ile parametreler arasında bir optimizasyon uygulaması yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmada bir dizel motorun minimum yakıt sarfiyatını sağlamak için motor haritalarının çıkarılıp elde edilen modellerden yola çıkarak kalibrasyonunun yapılması amaçlanmıştır [15].

Kalibrasyonun safhalarına bakıldığında dört başlık altında toplandığını görebiliriz. Bunlar giriş bölümünde ifade edildiği üzere veri toplama, veri eleme, regresyon analizi (model uydurma) ve optimizasyon olarak sıralanırlar. Bundan önceki bölümlerde motor haritalama modellerinin nasıl elde edildiği ve bu modellerin neler olduğu verilmiştir.

Bu bölümde dizel motorun motor haritalama modellerinin çıkartıldıktan sonraki adım olan optimizasyon problemimizin ne olduğu bu problemi çözmek için hangi algoritmanın kullanılmış olduğu ve motora optimizasyonun uygulanması sonucu elde edilmiş olan look-up tabloları olarak adlandırılan ve motor elektronik kontrol ünitelerinin kalibre edilmesinde kullanılan tablolarının nasıl elde edildiği anlatılacaktır.

Motor yakıt verimini optimize eden motor elektronik kontrol ünitelerinin kalibrasyonu motor modellenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Motor çalışma koşulları ve çeşitli elemanlara gelebilecek zararlar açısından bazı değerlerin belli limitler içinde tutulması çok önemlidir. Örneğin silindir içindeki en yüksek basınç miktarının silindir gövdesine ve pistonu zarar vermemesi için belli bir değerin altında kalması gerekmektedir.

Motor optimizasyonu problemi, motor kontrolörünün çeşitli çalışma durumları için parametrelerinin kriterler ve kısıtlar gözetilip en iyi kalibrasyonu bulmaktır. Motor haritalama modellerine bu kriterlere göre kalibrasyonu değerlendirme aşamasında ihtiyaç duyulur. Tüm kalibrasyonların denenmesi mümkün olmadığından en iyi olanın belirlenmesi için optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır.

5.1 Optimizasyon İçin Kullanılan Program

Kompleks motorların endüstride hızla gelişmesi ve motor kontrolör tablolarının kalibrasyonunun giderek zorlaşması bu kalibrasyonun gerçekleştirilmesi için paket bilgisayar programlarının kullanılması gerekliliğini beraberinde getirmiştir. Bu çalışmada optimizasyonda kullanılan bilgisayar programı Mathworks firmasının geliştirdiği MATLAB® programının bir alt programı olan CAGE (CALibration GEneration) dir [16].

CAGE motor elektronik kontrol ünitesi için look-up tablolarını kalibre etmede kullanılan grafik ara yüzü bir programdır. Tabloların kalibrasyonu için analitik metotlar sağlar. Motor kontrolör alt sistemlerini kullanarak tabloların kalibrasyonunu gerçekleştirir. CAGE programında iki aşamalı modelleme yaklaşımı kullanılarak elde edilmiş olan motor çıkışları için bulunan modellerden yararlanılarak bu modellere motordan gelen kısıtlar ve ek kısıtlarda eklenerek elektronik kontrol ünitesi tabloları doldurularak optimizasyon yapılır.

CAGE tablolarla deney sonuçlarını direkt karşılaştırarak kolaylık sağlar. Programdan elde etmiş olduğumuz tablolarla ECU(Electronic Control Unit)'nun kalibrasyonu yapılır. CAGE programında iki tür kalibrasyon kullanılır:

- Feature Calibration
- Tradeoff Calibration

Feature kalibrasyon, tahmin edilen bir sinyalin modelini ECU'nun içinde olan look-up tablosunda bulunan tahmin edilmiş aynı sinyal ile karşılaştırır. Tablo ile modeli karşılaştırma esnasında look-up tablolarını doldurmak için feature kalibrasyon kullanılır.

Tradeoff kalibrasyon look-up tablolarını farklı motor karakteristiklerinin modellerini ana çalışma noktalarında karşılaştırarak doldurur.

Çalışmamızda tek amaçlı nonlinear kısıtlamalı optimizasyon problemi CAGE programı kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Kısıtlamaların bir kısmı motorun yapısından gelmekte bir kısmı ise bizim motorun davranışı üzerinde yapmış olduğumuz varsayımlardan gelmektedir.

5.2 Optimizasyon Algoritması

Bir optimizasyon problemi bağımsız değişkenler veya parametrelerin bir kümesi olarak başlar, ve genellikle bazı koşullar veya sınırlandırmalar içerir ki kabul edilebilir değişkenleri tanımlar. Bu gibi sınırlamalar optimizasyon probleminde kısıtlamalar olarak yer alırlar. Bir optimizasyon probleminin esas bileşeni değişkenlere bir şekilde bağlı olan amaç fonksiyonudur. Optimizasyon probleminin çözümü amaç fonksiyonunu kabul edilen değişken değerleri içinde optimal değerine getirmektir.

Optimizasyon problemi nonlinear eşitlikler tarafından ifade edilen matematik modellerle tanımlandığında nonlinear programlama problemi olarak adlandırılır. Mühendislik tasarım problemlerinin çoğu nonlineerdir. Nonlinear programlamanın genel tanımı aşağıdaki şekilde yapılır:

$$\text{minimum} \quad f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.1)$$

$$\text{kısıtlamalar} \quad h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (5.2)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5.3)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.4)$$

Yukarıdaki ifadede $f(x_n)$ amaç fonksiyonumuzu, $h_k(x_n)$ amaç fonksiyonu üzerinde geçerli olan eşitlik kısıtlamamızı, $g_j(x_n)$ eşitsizlik kısıtlamamızı göstermektedir. Kısıtlamalı optimizasyon probleminde, genel amaç problemi daha basit alt problemlere dönüştürülür ki bu daha sonra çözülerek iteratif işlemin temelinde kullanılır. Eski metotların büyük bölümünün yapısında, kısıtlamalı problem kısıtlama sınırlarının yakınında veya uzağında kısıtlamalar için bir penaltı fonksiyonu tarafından basit kısıtlamasız probleme çevrilir. Bu yolla kısıtlamalı optimizasyon problemi kısıtlamasız problemin parametrelerinin ardı ardına

dizilmesini kullanarak limitlere yakınsayıp çözülür. Bu metotların şimdi oldukça verimsiz olduğu bilinmelidir. Bu nedenle Kuhn-Tucker eşitliklerinin çözümüne odaklanılmıştır. Kuhn-Tucker eşitlikleri kısıtlamalı optimizasyonun uygunluğu için gerekli koşullardır [17]. Kuhn-Tucker koşulları, kısıtlamaların lineer kombinasyonu ve amaç fonksiyonumuzun toplanması olarak tanımlanan Lagrange fonksiyonunu (5.5) minimum yapma temeline dayanır. Koşullar şu şekilde tanımlanır;

$$F(x_1...x_n, \lambda_1...\lambda_l, \beta_1...\beta_m) = f(x_1...x_n) + \lambda_1 h_1 + ... + \lambda_l h_l + \beta_1 g_1 + ... + \beta_m g_m \quad (5.5)$$

Problemimizi çözmek için $n+l+m$ adet denkleme ihtiyacımız vardır. Bu denklemler Kuhn-Tucker koşulları veya birinci dereceden türevler (FOC) tarafından sağlanır.

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial x_i} + + \lambda_l \frac{\partial h_l}{\partial x_i} + \beta_1 \frac{\partial g_1}{\partial x_i} + + \beta_m \frac{\partial g_m}{\partial x_i} = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, ..., n \quad (5.6)$$

$$h_k(x_1, x_2, ..., x_n) = 0 \quad k = 1, 2, ..., l \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \beta_j g_j = 0 \quad \rightarrow \quad \beta_j = 0 \quad \text{iken} \quad g_j < 0 \\ g_j = 0 \quad \text{iken} \quad \beta_j > 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

Kuhn-Tucker eşitliklerinin çözümü birçok nonlinear programlama algoritmasının temelini oluşturmaktadır [19]. Bu algoritmalar Lagrange çarpanlarının direkt hesaplanmasında kullanılır. Kısıtlamalı quasi-Newton metodu, quasi-Newton güncelleştirme yöntemini kullanan KT eşitliklerini göz önüne alıp ikinci derece bilgileri toplayarak doğrusal yaklaşımı garanti eder. Kuadratik programlama alt problemi her ana adımda çözüldüğünden dolayı, bu metot genellikle dizisel kuadratik programlama (SQP) metodu olarak adlandırılır.

Çalışmamız da dizisel kuadratik programlama algoritması (Sequential Quadratic Programming, SQP) kullanılarak nonlinear kısıtlamalı optimizasyon probleminin çözümüne çalışılmıştır [20].

5.2.1 Dizisel Kuadratik Programlama (SQP)

SQP metodu kısıtlamalı nonlinear programlama problemlerinin çözümünde kullanılan en iyi yöntemlerden biridir. Programlama metodu amaç fonksiyonunun kuadratik bir modelini ve kısıtlamaların lineer modellerini oluşturur ve bunları her

iterasyon adımıyla çözer. Bu yolla yaklaşılan problemler kuadratik programlama alt problemi olarak adlandırılır.

Kuadratik programlama optimizasyon problemi, kuadratik bir amaç fonksiyonu ve lineer kısıtlamalardan oluşurken, SQP metodunda amaç fonksiyonu kuadratik olarak açılırken nonlinear kısıtlamalar bulunmaktadır. Her ana adımda, bir quasi-Newton güncelleme metodu kullanan Lagrange fonksiyonunun Hessian'ının bir yaklaşımı yapılır. Bu daha sonra QP alt probleminin üretilmesinde kullanılacaktır. SQP'nin genel ifadesi şu şekildedir:

$$\underset{d}{\text{minimum}} \quad f(X_i) + \nabla f(X_i)^T d + \frac{1}{2} d^T \nabla^2 f(X_i) d \quad (5.9)$$

$$h_k(X_i) + \nabla h_k^T(X_i) d = 0; \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (5.10)$$

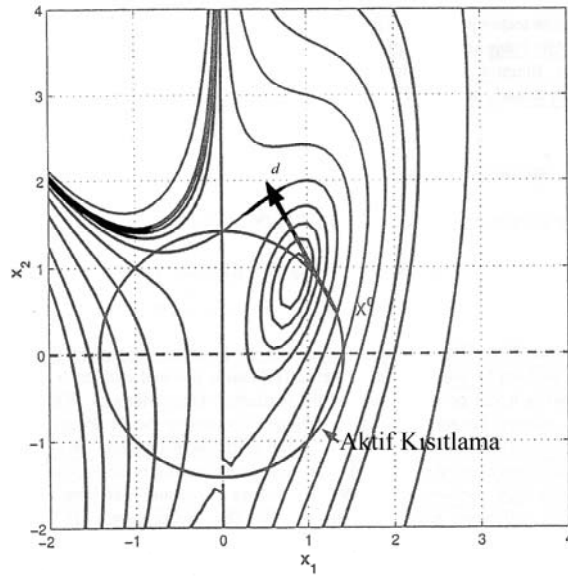
$$g_j(X_i) + \nabla g_j(X_i)^T d \leq 0; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5.11)$$

QP alt probleminin çözümü bize araştırma yönü olan d 'yi verecektir. QP alt probleminin çözümü için bir Lagrange fonksiyonu (5.5) eşitliğindeki gibi oluşturularak Kuhn-Tucker koşullarını sağlayan λ_l ve β_m çarpanları bulunur. Oluşturulan bu Lagrange fonksiyonunun Hessianı QP alt probleminin minimum değerinin bulunması için kullanılır. Bu çözüm bir sonraki yeni adımın oluşturulmasında kullanılır. Şekil 5.1 etkin kısıtlama üzerindeki bir noktaya doğru lineer olarak hareket etmenin etkisini göstermektedir.

$$x_{i+1} = x_i + \alpha.d \quad (5.12)$$

α bir sonraki uygun adımın tayininde adım büyüklüğü parametresidir ve oluşturulan bir değer fonksiyonunun (penaltı fonksiyonu) minimum yapılması ile bulunur.

(5.9) eşitliğindeki $\nabla^2 f(X_i)$ ifadesi Hessian matristir ve pozitif tanımlıdır. Lagrange fonksiyonunun Hessian'ını kullanmak yerine, Hessian'ın BFGS (Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno) metodu yaklaşımını kullanılır. Hessian'ı BFGS metodu ile güncelleştirmek SQP metodu için en verimli uygulamayı sağlar.



Şekil 5.1 Etkin Kısıtlama Üzerindeki Bir Noktanın Lineer Hareketi [20]

Şekil üzerindeki X^0 etkin kısıtlama üzerindeki mevcut dizayndır. Eğer araştırma yönü d , X^0 da lineerleştirilmiş fonksiyonu takip ederse, araştırma yönündeki herhangi bir adım büyüklüğünde (ne kadar küçük olursa olsun) kısıtlamanın geçersiz olmasına neden olacaktır. Kısıtlamayı hala geçerli kılacak komşu noktanın bulunması için tanjanttan biraz daha küçük bir araştırma yönü kullanılmıştır. Tanjanttan sapmalar kişisel deneyimin ve pratiğin bir sonucu olduğu için tutarlılığın kaybı demektir.

Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan SQP'nin koda dönüştürülmesi çok basit değildir ve bu metod genellikle ticari yazılımların temelini oluşturmaktadır. SQP MATLAB®'de kısıtlamalı optimizasyon için uyguladığından en uygun algoritmadır. Optimizasyon araç kutusuna erişim, nonlinear programlamanın SQP kullanılarak çözülmesini sağlamaktadır.

5.2.1.1 Adım Büyüklüğü Hesaplanması

Kuadratik programlama alt probleminin çözümü olan araştırma yönü saptandıktan sonra, adım büyüklüğünün hesaplanması gereklidir. Adım büyüklüğü α değerinin hesaplanması sırasında kullanılan metodlar çok büyük hesap adımlarına sahiptirler. Bu nedenle amaç fonksiyonu minimum yapılırken bu azalmaya bağlı olarak kısıtlamaların sağlanması gerekmektedir. Bu amacın gerçekleştirilmesi için uygun bir fonksiyon geliştirilmeli ve adım büyüklüğü tanımlaması bu kısıtlamasız fonksiyonu minimize etme temeline dayanmalıdır.

Bu fonksiyon Lagrange fonksiyonu olarak ifade edilebilir ki bu durumda Lagrange çarpanlarının hesaplanması gerekmektedir. Diğer bir yol ise kısıtlamaları bir ceza çarpanı ile birlikte ele alıp ve fonksiyon için EPF (exterior penalty function) formunu uyarlamaktır. İki fonksiyon formu aşağıda verilmiştir:

$$X^i = X^{i-1} + \alpha.d \quad (5.13)$$

$$\phi(X^i) = f(X^i) + r \sum_{k=1}^l h_k(X^i)^2 + r \sum_{j=1}^m \max[g_j(X^i), 0]^2 \quad (5.14)$$

$$\phi(X^i) = f(X^i) + \sum_{k=1}^l |\lambda_k h_k(X^i)| + \sum_{j=1}^m \beta_j \max[g_j(X^i), 0] \quad (5.15)$$

5.14 eşitliği ceza çarpanı r olan EPF formunu, 5.15 eşitliği ise λ_k ve β_j lagrange çarpanları olan Lagrange fonksiyonunu göstermektedir. α adım büyüklüğünde g değerini bulmak için kullanılabilirler. Eşitlik 5.15'te hesaplanan α değerleri aynı zamanda Kuhn-Tucker koşullarını da sağlamalıdır. Bu gerekli koşulların neler olduğu önceki bölümlerde anlatılmıştır. α 'nın her değeri için Lagrange çarpanları hesaplanması için basit bir yöntem, önceki iterasyon değerinde çarpanları sabit tutarak iterasyon sonunda değiştirmektir.

5.2.1.2 Çarpanların Hesaplanması

SQP metodunun popüleritesi problemdeki oluşturulan Lagrange fonksiyonuna dayanarak Hessian'ı güncellemeye çalışmasından gelir. Çarpanların hesaplanması için Kuhn-Tucker koşullarının çözüm noktasında geçerli olduğunun sağlanması gerekmektedir. Dizayn vektörünün geçerli değeri için çarpanların hesaplanması, eşitlik 5.15'teki Lagrange fonksiyonunun kurulması ve Hessian'ın güncelleştirilmesi gibi ek işlemler için gereklidir. Hesaplama Lagrange'a dayandırılmış birinci dereceden türevleri (FOC) kullanır. Birçok fonksiyonun gradyan değerleri geçerli dizaynda hesaplanır. Bundan sonra, bir takım lineer eşitliklerin çözümü olarak çarpanlar bulunur. QP ve SQP problemlerinin çözümü genellikle aktif kısıtlama setinin avantajını kullanırlar. Bu, tüm eşitlik kısıtlamalarıyla birlikte sadece etkin olan eşitsizlik kısıtlamalarını kapsamaktadır. Bu da SQP iterasyonunun uygun bir noktadan başlaması anlamına gelmektedir. Etkin olmayan kısıtlamalara karşılık

gelen çarpanlar sıfır olarak ayarlanırlar. Kalan çarpanlar 5.6 eşitliğinden yola çıkarak uygun sayıda lineer bağımsız eşitliklerin dikkate alınmasıyla belirlenebilir:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial x_i} + \dots + \lambda_l \frac{\partial h_l}{\partial x_i} + \beta_1 \frac{\partial g_1}{\partial x_i} + \dots + \beta_m \frac{\partial g_m}{\partial x_i} = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.6)$$

5.2.1.3 Hessian Matrisini Güncel BFGS ile Değiştirme

Hessian'ın hesaplanması güncel uygulamalarda hiç tavsiye edilmez. BFGS metodunun Hessian'a yakınsamasından dolayı, BFGS Hessian matrisi yerine mükemmel olarak kullanılabilir. BFGS methodu bir quasi-Newton methodudur. Kuadratik yakınsamanın özelliğinden yararlanır ve bir önceki iterasyondan bir sonraki bilgileri taşıyarak sağlamlığa sahiptir.

$$p = \nabla f(X^{q+1}) + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla h_k(X^{q+1}) + \sum_{j=1 \forall j \in J}^m \beta_j \nabla g_j(X^{q+1}) \\ - \nabla f(X^q) + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla h_k(X^q) + \sum_{j=1 \forall j \in J}^m \beta_j \nabla g_j(X^q)$$

$$y = X^{q+1} - X^q$$

$$[H^{q+1}] = [H^q] + \frac{pp^T}{p^T y} - \frac{[H^q]^T [H^q]}{y^T [H^q] y} \quad (5.16)$$

$j \in J$ etkin eşitsizlik kısıtlamalarını göstermektedir. Metrik, çözümde pozitif belirli olmayacağı bilinse bile mümkün olabildiği kadar pozitif belirli tutulmalıdır. Bunu garanti etmenin bir yolu her iterasyon için $p^T y > 0$ eşitsizliğini sağlamaktır.

5.2.2 SQP (Dizisel Kuadratik Programlama) Algoritması

- Adım 1 X^1 'i seç, N_s (iterasyonların sayısı)
 ε_i (yakınsama ve durdurma)
 $q = 1$ (iterasyon sayacı)
- Adım 2 QP Optimizasyon için çağrılır. (5.9)-(5.11) denklemleri ($X_i = X^q$)
Çıkış: d
 α^* hesaplaması için kısıtlamaları kullan
 $\Delta X = \alpha^* d$
 $X^{q+1} = X^q + \Delta X$
- Adım 3 SQP için yakınsama
Eğer $h_k = 0$, $k = 1, 2, \dots, l$ için;
Eğer $g_j \leq 0$, $j = 1, 2, \dots, m$ için;
Eğer KT koşulları sağlanıyorsa
Yakınsamıştır. DUR.
Durdurma Kriteri;
 $\Delta X = X^{q+1} - X^q$
Eğer $\Delta X^T \Delta X \leq \varepsilon_1$: DUR (Dizayn değişmiyor)
Eğer $q = N_s$: DUR (Maksimum iterasyona ulaşıldı)
Devam
Hessian'ı BFGS ile güncelleştir
 $q \leftarrow q + 1$
Adım 2 ye git.

Algoritmanın ilk adımında, belirli güncel adım x_k ve güncel Hessian yaklaşımı, araştırma yönü d 'nin tanımlanması için kuadratik programlama probleminin çözümünde kullanılır. Bu kuadratik programlama alt probleminin çözümü çarpanların λ_l ve β_m 'nin tahminini sağlar.

İkinci adımda, oluşturulan d araştırma yönü ve kurulan değer fonksiyonumuzu minimum yapan α adım büyüklüğünün hesaplanması sonraki adım olan x_{i+1} bulunmasında kullanılır.

Üçüncü adımda, SQP algoritmasındaki kısıtlamaların sağlanıp, hesaplanan Lagrange çarpanları ile birlikte Kuhn-Tucker koşulları sağlanıyorsa algoritma durdurulur. Yakınsama kriteri yukarıda verilmiştir.

Eğer tüm kriterler sağlanıyor ama $\Delta X^T \Delta X$ belirli bir değerden küçükse iterasyon maksimum sayıya eriştiğinden algoritma durdurulur. Eğer büyükse Hessian matrisi BFGS metodu kullanılarak güncelleştirilir ve bir sonraki adıma x_{i+1} değerini kullanarak başlanır.

Çalışmada minimum yakıt kriterine göre dizel motorun kalibrasyonu yapılırken optimizasyon sırasında kullanılan programda SQP yardımı ile çözüme ulaşılmıştır. Çözölmeye çalışılan optimizasyon probleminin amaç fonksiyonun ne olduğu motor koşullarından gelen kısıtların neler olduğu ve bu kısıtların yanında kullanılan ek kısıtlar ve fonksiyonların tanımları sonraki bölümlerde verilmiştir. Nonlinear kısıtlamalı optimizasyon problemimizi çözmede MATLAB® programından faydalandığından SQP algoritması açıklanmıştır.

5.3 Amaç Fonksiyonu

Çalışmanın temelinde nonlinear kısıtlamalı optimizasyon problemi bulunmaktadır. Çok girişli çok çıkışlı bir nonlinear sistemde sisteme ait parametrelerin değişiminin gözlenmesi ve değiştirilmesi sonucu sistemin performans bakımından azami bir değerde olması amaçlanmıştır. Çalışmamızda kullanılan dizel motorun verileri altı giriş ve yedi çıkıştan oluşmaktadır. Dizel motorun optimizasyonunda amacımız minimum yakıt tüketiminin sağlarken motorun belirli motor hızlarında istenilen torku vermesidir. Bu amacımızı göz önüne alarak tanımlamış olduğumuz amaç fonksiyonumuz temel özgül yakıt tüketimi (bsfc) şu şekilde ifade edilir:

$$bsfc = \frac{5400 \times \text{basefuelmass}}{tq \times \pi} \quad (5.17)$$

Temel özgül yakıt sarfiyatının genel tanımı motorun çalışması sırasında 1 kwh efektif iş için kg veya gr cinsinden harcanan yakıt miktarı olarak tanımlanır [9]. Motorun yakıt sarfiyatı ve motor milinden alınan efektif güç(tork) P_e (kW) olarak gösterilirse özgül yakıt sarfiyatı $bsfc = 3600 \times \dot{M}_y / P_e$ (kg/kWh) olarak ifade edilir.

Amaç fonksiyonumuzda basefuelmass mg/inj cinsinden, tq'da Nm cinsinden ifade edilmektedir.

Tek amaçlı optimizasyon problemimiz temel özgül yakıt sarfıyatı olarak ifade edilen bsfc nin minimum yapılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda optimizasyon algoritması olarak daha önce açıklanan sequential quadratic programming kullanılmıştır.

Çözmeye çalıştığımız optimizasyon probleminin tanımını şu şekilde yapabiliriz: belirtilen motor hızında istenen tork değerini elde edip bu tork değerinde minimum yakıt sarfıyatını sağlamak için en iyi püskürtme avansını, en iyi yakıt miktarını, en iyi yakıt basıncını, en iyi değişken geometrilili türbin kanat pozisyonunu ve en iyi egzost gaz oranı valf konumunu elde edip bu değerlerle birlikte tabloyu doldurmak.

5.4 Kısıtlamalar

5.4.1 Motor Modelinden Gelen Kısıtlar

Optimizasyon işleminin yapılması ve kalibrasyonun gerçekleşmesi için bazı kısıtların tanımlanması gerekmektedir. Bu kısıtlardan bir kısmı motor haritalanması sırasında veri toplanırken elde edilmiş sınırlamalardır. Burada motorun giriş parametreleri üzerinde oluşan minimum ve maksimum sınır değerleri motor modelinden gelen kısıtları oluşturur. Motor girişleri üzerinde oluşan sınırlar şu şekilde sıralanır:

Püskürtme Avansı:	$-9 < \text{soi} < 3$	orta nokta: -3
Motor Hızı:	$1600 < \text{measrpm} < 2200$	orta nokta: 1900
Temel Miktarı	$20 < \text{basefuelmass} < 200$	orta nokta: 110
Yakıt Basıncı	$90 < \text{fuelpress} < 160$	orta nokta: 125
Değişken Geometrilili	$0.2 < \text{grackmea} < 0.9$	orta nokta: 0.55
Türbin Kanat Pozisyonu		
Egzost Gaz Oranı	$0.5 < \text{egrift} < 5$	orta nokta: 2.75
Valf Konumu		

Bu kısıtlar iki aşamalı modelleme yaklaşımı kısmında motorun çalışma sınırlarını belirlemek için daha önceden programa girilir. Sınır değerlerine göre deney planlaması yapıp motor çıkışları elde edilir.

5.4.2 Ek Kısıtların Tanımlanması

Optimizasyon problemimize baktığımızda minimum yapmak istediğimiz temel özgül yakıt tüketimini (bsfc) sağlamak için bazı ek kısıtların tanımlanması gerekmektedir. Temel özgül yakıt tüketimini minimum yapmak istememize rağmen bu bir model çıkışı değildir. Belirtilen motor hızında istenen torku elde edip bununla tabloların doldurulması gerekmektedir, fakat tork değeri de model için bir giriş değildir. Bu nedenle çeşitli fonksiyon modellerinin yaratılıp kalibrasyona eklenmesi gerekmektedir. Bu fonksiyonlardan sonra tork kısıtlamasını ve temel özgül yakıt tüketimi(bsfc) amaç fonksiyonumuzu optimizasyonda kullanabiliriz.

Tork kısıtlamasının optimizasyona dâhil edilmesi istenen tork değeri için yeni bir değişkenin tanımlanmasını gerektirmektedir. Bu değişken istenen tork olarak adlandırılır ve programa $tq_desired$ olarak girilir. Bu kısıtlama için sınırlar şu şekilde belirtilir:

$$\text{İstenen Tork} \quad 0 < tq_desired < 1500 \quad \text{orta nokta: 600 Nm} \quad (5.18)$$

Gerçek tork değerinin istenen değere yaklaştığını kontrol etmek amacı ile bir hata fonksiyonu tanımlanmaktadır. Bu tq_err olarak ifade edilir ve şu şekilde gösterilir:

$$tq_err = tq - tq_desired \quad (5.19)$$

Bu tork hatasının ölçülmesinde kullanılan fonksiyon değerinin 0 (sıfır)'a yakınsaması istenmektedir.

Tork hatasının yanında giriş değerleri üzerinde bulunan kısıtların tanımlanması gerekmektedir. Bu motor giriş değerleri üzerinde belirtilen kısıtlamalar motor hızının bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Motor girişleri üzerinde tanımlanan ek kısıtlamalar ve bu kısıtlara göre tanımlanan fonksiyonlar şu şekilde ifade edilir:

5.4.2.1 Yakıt Miktarı: (basefuelmass)

1600 rpm 200 mg/inj ;

2200 rpm 175 mg/inj bu değerlerden tanımlanacak fonksiyon:

$$basefuelmass_max = 200 + (measrpm - 1600) / 600 * (-25) \quad (5.20)$$

5.4.2.2 Yakıt Basıncı: (fuelpress)

1600 rpm 90 MPa – 110 Mpa ;

2200 rpm 120 Mpa – 160 Mpa bu motor hızlarından elde edilecek minimum ve maksimum yakıt basıncı için tanımlanan fonksiyonlar:

$$\text{fuelpress_min} = 90 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * 30 \quad (5.21)$$

$$\text{fuelpress_max} = 110 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * 50 \quad (5.22)$$

5.4.2.3 Değişken Geometrilili Türbin Kanat Pozisyonu: (grackmea)

1600 rpm 0.2 – 0.6 [%] ;

2200 rpm 0.4 – 0.9 [%] tanımlanan bu aralıklardan minimum ve maksimum değişken geometrilili türbin kanat pozisyonu için fonksiyonlar:

$$\text{grackmea_min} = 0.2 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * 0.2 \quad (5.23)$$

$$\text{grackmea_max} = 0.6 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * 0.3 \quad (5.24)$$

5.4.2.4 Püskürtme Avansı: (soi)

1600 rpm -3 deg – 3 deg ;

2200 rpm -9 deg – -3 deg bu değerlerden püskürtme avansının minimum ve maksimum fonksiyonları şu şekilde tanımlanır:

$$\text{soi_min} = -3 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * (-6) \quad (5.25)$$

$$\text{soi_max} = 3 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * (-6) \quad (5.26)$$

Yukarda oluşturulan yedi adet fonksiyonun yanında optimizasyonda tanımlanması gereken ve kullanılacak olan minimum ve maksimum modeller bulunmaktadır.

Bu fonksiyonlar şu şekilde tanımlanırlar:

$$\text{basefuelmass_over} = \text{basefuelmass} - \text{basefuelmass_max} \quad (5.27)$$

$$\text{fuelpress_over} = \text{fuelpress} - \text{fuelpress_max} \quad (5.28)$$

$$\text{fuelpress_under} = \text{fuelpress_min} - \text{fuelpress} \quad (5.29)$$

$$\text{grackmea_over} = \text{grackmea} - \text{grackmea_max} \quad (5.30)$$

$$\text{grackmea_under} = \text{grackmea_min} - \text{grackmea} \quad (5.31)$$

$$\text{soi_over} = \text{soi} - \text{soi_max} \quad (5.32)$$

$$\text{soi_under} = \text{soi_min} - \text{soi} \quad (5.33)$$

Tüm bu tanımlanan fonksiyonlarla birlikte tanımlamamız gereken ek kısıtlar şu şekilde belirtilecektir:

$$\text{Kısıt 1 : } \quad \text{tq_err} \leq 0 \quad (5.34)$$

$$\text{Kısıt 2 : } \quad \text{tq_err} \geq 0 \quad (5.35)$$

$$\text{Kısıt 3 : } \quad \text{basefuelmass_over} \leq 0 \quad (5.36)$$

$$\text{Kısıt 4 : } \quad \text{fuelpress_over} \leq 0 \quad (5.37)$$

$$\text{Kısıt 5 : } \quad \text{fuelpress_under} \leq 0 \quad (5.38)$$

$$\text{Kısıt 6 : } \quad \text{grackmea_over} \leq 0 \quad (5.39)$$

$$\text{Kısıt 7 : } \quad \text{grackmea_under} \leq 0 \quad (5.40)$$

$$\text{Kısıt 8 : } \quad \text{soi_over} \leq 0 \quad (5.41)$$

$$\text{Kısıt 9 : } \quad \text{soi_under} \leq 0 \quad (5.42)$$

Tanımlanmış olan tüm bu kısıtlar ve fonksiyonlar tek amaçlı optimizasyon problemimiz olan temel özgül yakıt tüketiminin minimum yapılması sırasında programda kullanılıp optimizasyon yapılacaktır. Bu kısıtların yanında optimizasyonda giriş olarak belirlenmiş olan bağımsız değişkenlerimiz dizel motorun beş adet girişi olan püskürtme avansı (soi), yakıt miktarı (basefuelmass), yakıt basıncı (fuelpress), değişken geometrili türbin kanat pozisyonu (grackmea), egzost gaz oranı valf konumu (egrift) belirlenmektedir. Burada motor hızının belirtilmemesinin nedeni optimizasyon da belirlenen devir de istenilen torkun sağlanması için daha önceden programda tanımlanacak olmasıdır.

6. OPTİMİZASYON UYGULAMASI

Bu bölümde kalibrasyon prosesinin son aşaması olan optimizasyon uygulamasının sisteme nasıl uygulandığı açıklanacaktır. Optimizasyon uygulaması için MATLAB® programındaki CAGE ara yüzünden yararlanılmıştır. Amacımız belli motor hızlarında istenilen tork değerini elde ederken temel özgül yakıt tüketimini minimum yapmaktır.

Optimizasyon adımlarımızı sıralamak istersek:

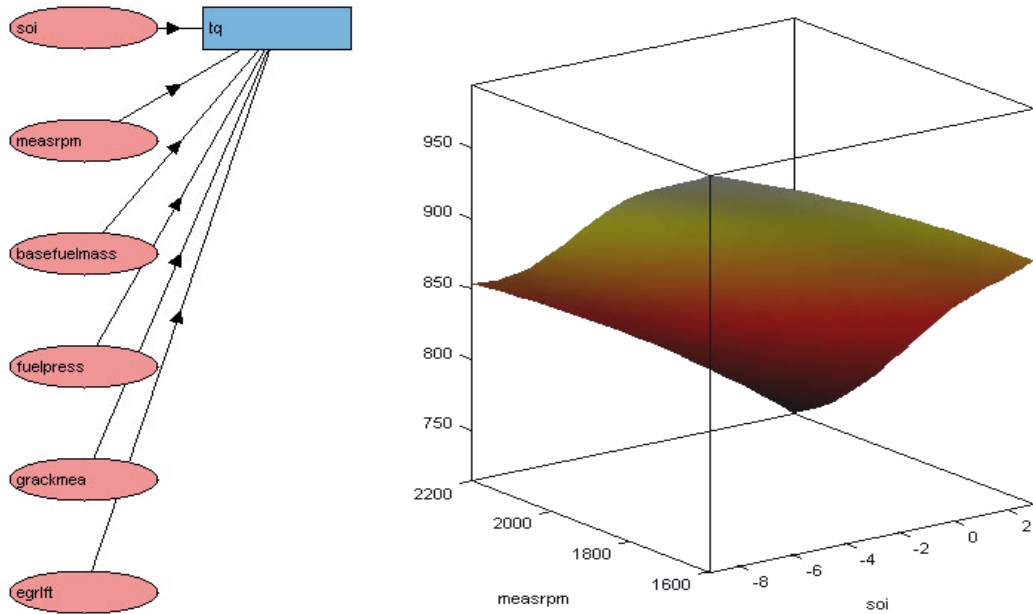
1. İki aşamalı modelleme yaklaşımı ile elde edilmiş olan motor cevapları yüklenir,
2. İki aşamalı modelleme yaklaşımından elde edilen modellerin yanında kullanacağımız ek modellerin tanımlaması yapılır. Tek amaçlı optimizasyon problemimizde minimum yapmak istediğimiz amaç fonksiyonelimiz tanımlanır,
3. Kalibrasyon için kullanılacak olan en iyi püskürtme avansı, en iyi yakıt miktarı, en iyi yakıt basıncı, en iyi değişken geometrilili türbin kanat pozisyonu ve en iyi egzost gaz oranı valf konumu adı altında daha sonra kalibre edilebilecek tablolar hazırlanır,
4. Optimizasyon stratejisine karar verilir. CAGE programı esnek bir optimizasyon çevresine sahiptir. Hazırlanan tabloların motor hızı ve istenen tork değerlerinden yararlanılarak doldurulması istenmektedir. Fakat tork bizim modelimiz için bir giriş değeri olmadığından bu amaca ulaşmak için bir tork kısıtlaması optimizasyonda kullanılır,
5. Daha önce açıklanmış olan optimizasyon kısıtları tanımlanır,
6. Belirlenmiş motor hızlarında istenen tork değerlerini gösteren veri tablosu optimizasyona dâhil edilir,

7. Optimizasyon algoritması girilen bu tablolar ve veri kümeleri ile birlikte çalıştırılır,
8. Optimizasyonun çalıştırılması ile elde edilmiş olan değerlerle tablolar doldurulur.

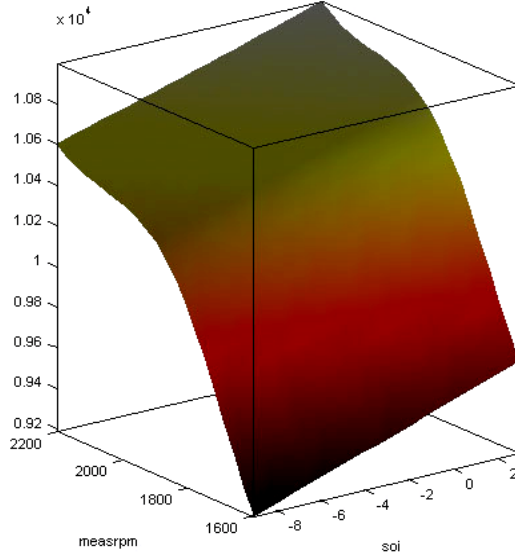
Böylece bir kalibrasyon işlemi tamamlanacaktır.

6.1 Motor Cevaplarının Yüklenmesi

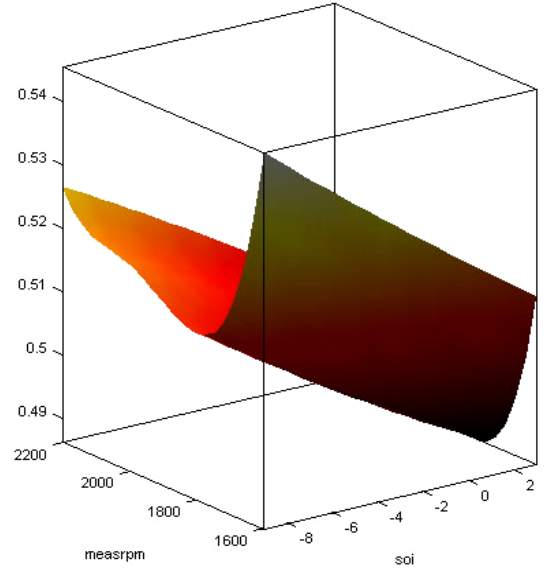
Optimizasyonun ilk kısmını oluşturan bu bölümde iki aşamalı modelleme sonucu elde edilmiş olan motor harita modelleri programa yüklenir. Bu motor cevapları tork, değişken geometrili turbo hızı, silindir içinde oluşan en yüksek basınç, egzost sıcaklığı, azot oksit emisyonu, egzost gazı yakıt fazlalık oranı ve silindir içindeki artık gaz oranıdır. Aşağıda motor cevabı modellerinin motor hızı püskürtme avansına göre model grafikleri verilmiştir.



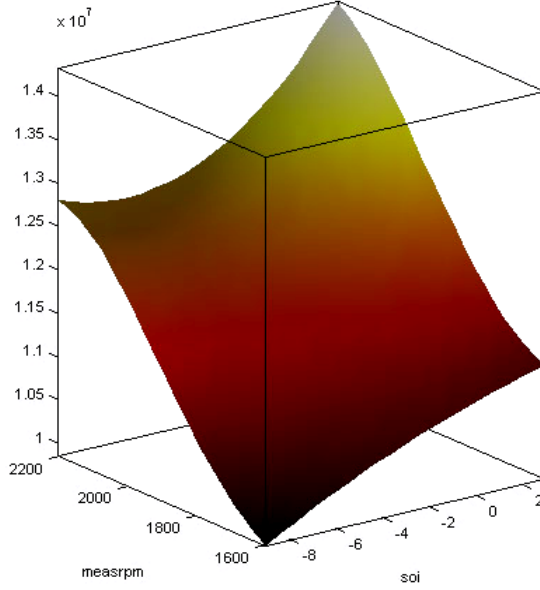
Şekil 6.1 Tork Motor Cevap Modeli



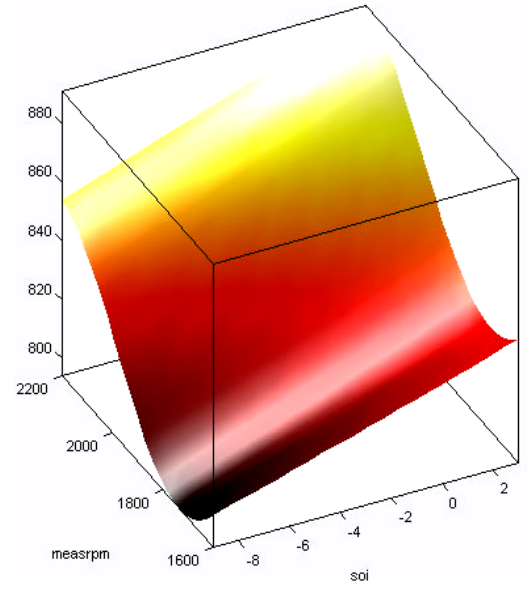
Şekil 6.2 Değişken Geometrilili Türbin Hızı Motor Cevap Modeli



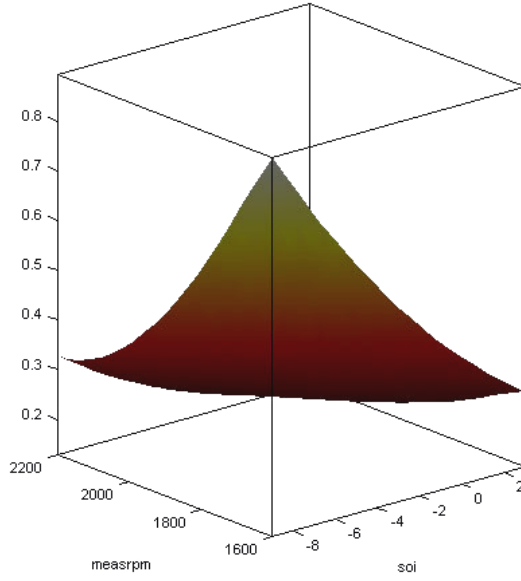
Şekil 6.3 Egzost Gazı Yakıt Fazlalık Oranı Motor Cevap Modeli



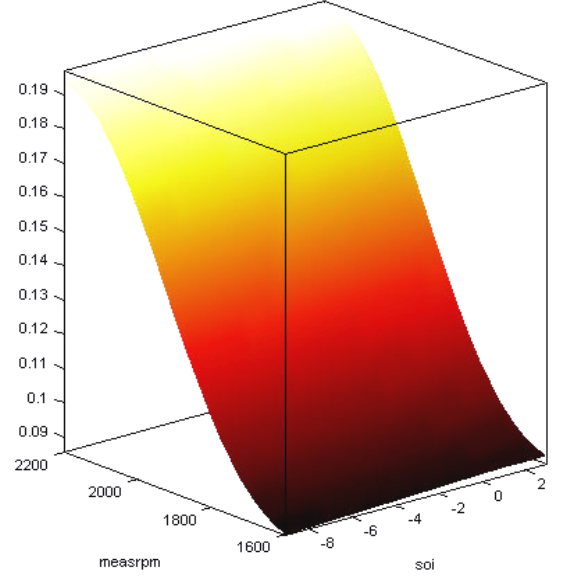
Şekil 6.4 Silindir İçindeki En Yüksek Basınç Motor Cevap Modeli



Şekil 6.5 Egzost Sıcaklığı Motor Cevap Modeli



Şekil 6.6 NOX Motor Cevap Modeli

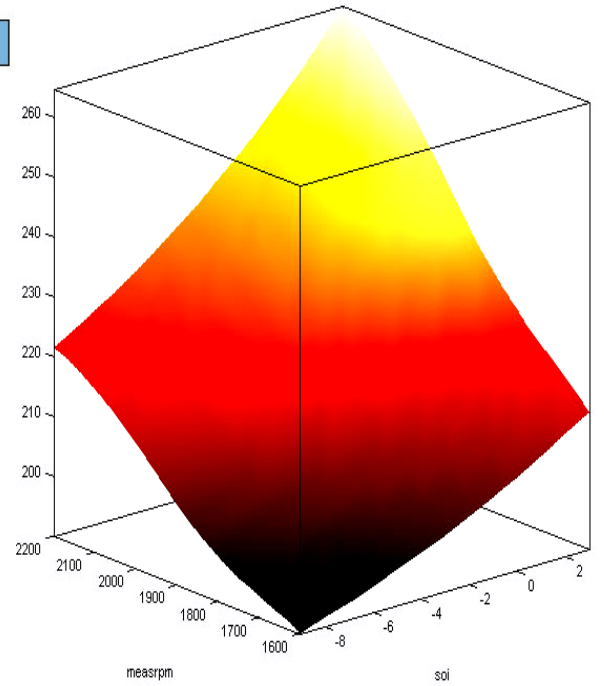
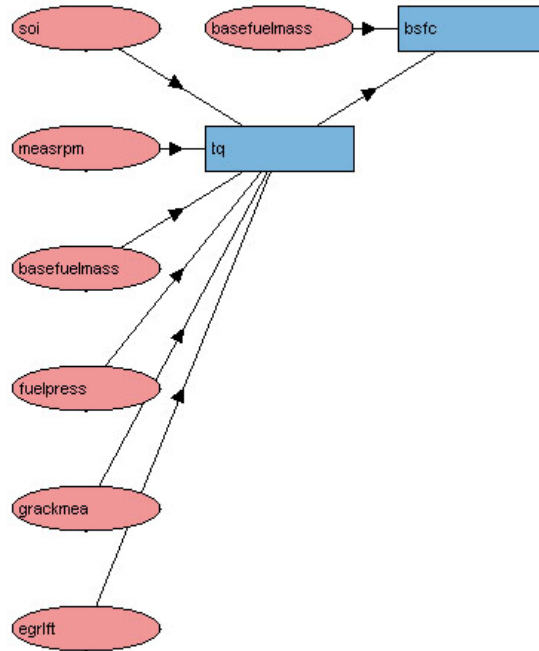


Şekil 6.7 Silindir İçindeki Artık Gaz Oranı Motor Cevap Modeli

6.2 Ek Modellerin Yüklenmesi

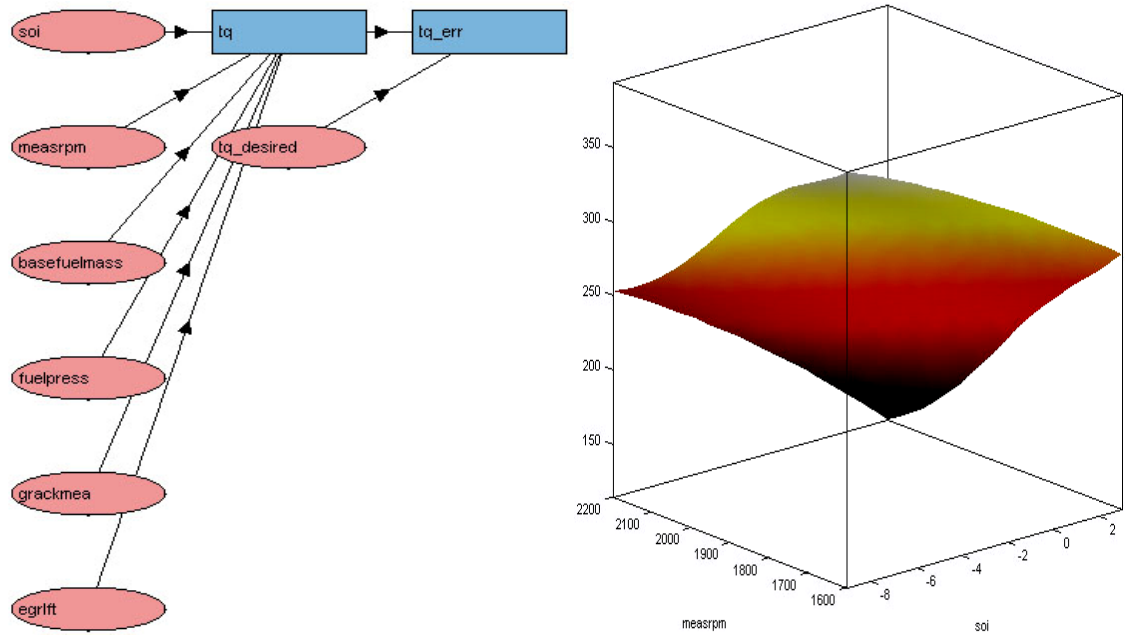
İki aşamalı modelleme yaklaşımından elde edilen modellerin yanında kullanacağımız ek modellerin tanımlaması yapılır.

Amaç Fonksiyoneli; BSFC



Şekil 6.8 Temel Özgü Yakıt Tüketimi Model Grafiği

Tork hatası fonksiyonu: $tq_err = tq - tq_desired$



Şekil 6.9 Tork Hatası Model Bağlantıları ve Grafiği

Amaç fonksiyonelimiz ve tork hatası fonksiyonumuzu girdikten sonra önceki bölümde açıklanmış olan ek fonksiyon modellerinin girilmesi yapılacaktır. Bu fonksiyon modellerinin matematiksel ifadeleri önceki bölümde gösterilmiştir. Bu ifadelerin grafik olarak gösterimleri EK-A’de verilmiştir.

6.3 Optimizasyon Bağımsız Değişkenleri

Bu aşamada programa optimizasyonda giriş olarak kullanacağımız programın ilk bölümünde sınırlarla birlikte girmiş olduğumuz bağımsız değişkenleri girilir. Bu değişkenler optimizasyon sırasında kısıtlar dahilinde minimum yakıt tüketimini elde etmek için optimizasyon algoritması tarafından değiştirilir. Bağımsız değişkenler:

1. soi: Püskürtme Avansı
2. basefuelmass: Yakıt Miktarı
3. fuelpress: Yakıt Basıncı
4. grackmea: Değişken Geometrilili Türbin Kanat Pozisyonu
5. egrlft: Egzost Gazı Geri Dönüşüm Oranı Valf Konumu

Dikkat edileceği üzere bu değişkenler motor hızı dışında motorumuzun girişlerini oluşturmaktadır. Motor hızının bu bağımsız değişkenlerin arasına girmemesinin nedeni istenen tork değerlerinde hangi motor hızında olmamızın istendiğinin daha önceden programa girilmiş olmasıdır.

6.4 Optimizasyon Çalışma Noktaları Kümesinin Tanımlanması

Belirlenen motor koşullarında kısıtlamalarımıza bağlı olarak optimizasyonun çalıştırılması için belirlenen motor hızlarında istenen tork değerlerinden oluşturulan çalışma noktalarını barındıran tablonun programda girilmesi gerekmektedir. Optimizasyon algoritması bu noktalara göre algoritmasını çalıştırarak kısıtlamalarla birlikte tabloda belirtilen tork değerlerini o motor hızında elde etmek için motor giriş değerlerini yakıt tüketimini minimum tutacak seviyede ayarlar. Bu optimizasyon tablosu bize o motor hızında istediğimiz torku kısıtlarımıza bağlı olarak elde etmek için motor girişlerimizin hangi değerleri alacağı konusunda bilgi verecektir. Ayrıca bu tablo bsfc amaç fonksiyonumuzun çalışma noktalarındaki değerleri hakkındaki bilgiyi de barındırır.

Belirli motor hızında istenen tork değerimizin ne olduğunu gösteren çalışma noktaları kümesi aşağıda verilmiştir:

Tablo 6.1 Optimizasyon Çalışma Noktaları Kümesi

Motor Hızı	İstenen Tork
Measrpm(rpm)	tq_desired(Nm)
1600	550
1600	770
1600	1150
1600	1500
2200	150
2200	630
2200	950
2200	1250

Matlab[®] programında çalışma kümesi tanımlandıktan sonra tork hatası ve motor giriş değerlerinin alt ve üst sınırlarından oluşturulan kısıtlar tanımlanıp minimum yapılmak istenen amaç fonksiyonu bfsc seçilerek algoritma çalıştırılır.

6.5 Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Tablo

Önceki kısımlarda anlatılan iki aşamalı modelleme yaklaşımından elde edilen motor cevap modelleri, torkun hatasını ölçmek için kullanılan fonksiyon, minimize etmek istediğimiz yakıt tüketimi fonksiyonu, tüm bu fonksiyon ve modellere yardımcı olmak amacı ile programa girilen fonksiyonlar ve kısıtlarla birlikte minimum yakıtın hangi değerler altında sağlanmasını istediğimiz veri kümesi tanımlandıktan sonra optimizasyon çalıştırılır. Optimizasyonun çalıştırılması sonucu elde edilen bağımsız değişkenlerin ve kısıtların değerlerinin bulunduğu tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.2 Optimizasyon Sonucu Bağımsız Değişkenlerin Değerleri

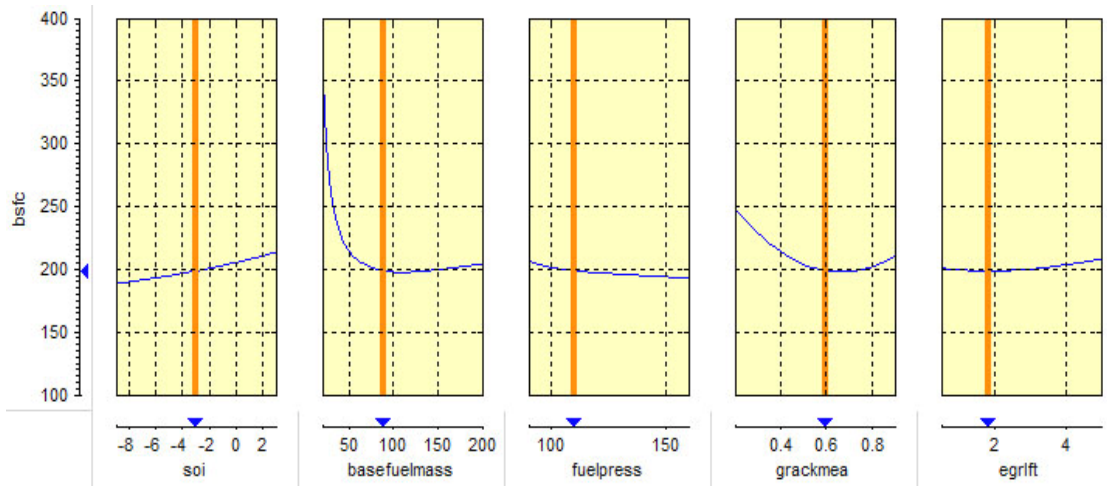
	measrpm	tq_desired	soi	basefulemass	fuelpress	grackmea	egrift
1	1600	550	-3	65,42	110	0,6	2,173
2	1600	770	-3	89,03	110	0,6	1,849
3	1600	1150	-3	132,656	110	0,6	1,277
4	1600	1500	-3	175,793	110	0,6	0,743
5	2200	150	-9	27,243	151,846	0,737	2,996
6	2200	630	-9	77,968	160	0,766	5
7	2200	950	-9	113,281	160	0,815	5
8	2200	1250	-9	147,549	160	0.862	5

Tablo 6.3 Optimizasyon Sonucu Amaç Fonksiyonu ve Kısıtların Değerleri 1

	bsfc	tq_err≤0	tq_err≥0	fuelpress over≤0	fuelpress under≤0
1	240,453	-6,058E-7	6,058E-7	0	-20
2	198,743	-7,84E-10	7,84E-10	0	-20
3	198,277	-6,61E-10	6,61E-10	0	-20
4	201,444	-1,755E-8	1,755E-8	0	-20
5	312,176	-2,925E-8	2,925E-8	-8,154	-31,846
6	212,725	-6,821E-13	6,821E-13	0	-40
7	204,964	-3,194E-9	3,194E-9	0	-40
8	202,895	-3,804E-10	3,804E-10	0	-40

Tablo 6.4 Optimizasyon Sonucu Kısıtların Değerleri 2

	grackmea over ≤ 0	grackmea under ≤ 0	soi_over ≤ 0	soi_under ≤ 0	basefuelmass over ≤ 0
1	0	-0,4	-6	0	-134,58
2	0	-0,4	-6	0	-110,97
3	0	-0,4	-6	0	-67,344
4	0	-0,4	-6	0	-24,207
5	-0,163	-0,337	-6	0	-147,757
6	-0,134	-0,366	-6	0	-97,032
7	-0,085	-0,415	-6	0	-61,719
8	-0,038	-0,462	-6	0	-27,719

**Şekil 6.10** Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Bağımsız Değişkenlerin Grafiği

Yukarda verilen veri kümesi için çalıştırılan optimizasyon algoritması sonucu istenen tork değerini elde etmek için girilmesi gereken bağımsız değişkenlerin değerleri tablo 6.2’de verilmiştir. Bu noktalar için çalıştırılan algoritma sonucu temel özgül yakıt tüketimimizin ne olduğunu tablolardan görebiliriz. Tablo 6.2’nin ikinci satırında bulunan bağımsız değişkenlerin amaç fonksiyonu ile olan grafiği şekil 6.10’te verilmiştir.

Hesaplanan bu veriler aracılığı ile motorun elektronik kontrol ünitesinin kalibrasyonun da kullanılan look-up tabloları oluşturulacaktır. Bu tabloların oluşturulması interpolasyon yardımıyla olmaktadır.

6.6 Kalibrasyonda Kullanılacak Tabloların Hazırlanması

Kalibrasyon için kullanılacak olan en iyi püskürtme avansı, en iyi yakıt miktarı, en iyi yakıt basıncı, en iyi değişken geometrili türbin kanat pozisyonu ve en iyi egzost gaz oranı valf konumu adı altında daha sonra kalibre edilebilecek tablolar programda hazırlanır. Optimizasyon algoritmasının çalıştırılması sonucu elde edilen püskürtme avansı, yakıt basıncı, değişken geometrili türbin kanat pozisyonu ve egzost gaz oranı valf konumu için elde edilen tablolar şu şekildedir:

6.6.1 Püskürtme Avansı Tablosu

Tablo 6.5 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Püskürtme Avansı Tablosu

	tq desired (Nm)										
	0	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
measrpm (rpm)	1600	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
	1660	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6
	1720	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
	1780	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8
	1840	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4
	1900	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
	1960	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6	-6.6
	2020	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2
	2080	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8
	2140	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4
	2200	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-9

Tablo 6.5’de gösterilen değerler optimizasyon algoritması çalıştırıldıktan sonra interpolasyonla oluşturulan püskürtme avansı değerleridir. Bu değerlerin grafiği EK-B’de verilmiştir. Tablonun değerlerinde kalibrasyonu daha sonra istenilen şekilde geliştirmek için değişiklikler yapılabilir.

6.6.2 Yakıt Miktarı Tablosu

Tablo 6.6’da optimizasyonun çalıştırılması sonucunda interpolasyonla doldurulmuş olan yakıt miktarı tablosu verilmiştir.

Tablo 6.6 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Yakıt Miktarı Tablosu

measrpm (rpm)												
tq_desired(Nm)												
	0	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	
1600	5.59	21.947	38.291	54.605	70.765	86.85	103.555	120.82	138.731	157.266	175.793	
1660	5.958	22.271	38.562	54.811	70.97	87.193	103.878	121.129	138.985	157.321	175.672	
1720	6.358	22.624	38.863	55.078	71.3	87.672	104.409	121.63	139.34	157.399	175.522	
1780	6.804	23.03	39.234	55.444	71.724	88.185	104.961	122.131	139.686	157.516	175.44	
1840	7.305	23.499	39.676	55.882	72.189	88.688	105.469	122.579	140.004	157.658	175.423	
1900	7.863	24.029	40.176	56.36	72.66	89.156	105.917	122.969	140.291	157.817	175.458	
1960	8.475	24.614	40.719	56.856	73.114	89.579	106.306	123.308	140.558	157.992	175.54	
2020	9.133	24.246	41.293	57.354	73.541	89.954	106.644	123.613	140.817	158.191	175.667	
2080	9.821	24.917	41.891	57.847	73.938	90.29	106.952	123.907	141.092	158.426	175.846	
2140	10.503	24.607	42.501	57.337	74.317	90.62	107.267	124.225	141.412	158.715	176.08	
2200	11.096	27.243	43.075	58.844	74.759	91.039	107.669	124.62	141.798	159.058	176.364	

6.6.3 Yakıt Basıncı Tablosu

Tablo 6.7 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Yakıt Basıncı Tablosu

measrpm (rpm)	tq_desired(Nm)											
		0	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
	1600	107.031	108.078	108.991	109.701	110.05	110.009	110.004	110.01	109.99	109.962	110
	1660	111.608	112.718	113.689	114.44	114.857	114.969	115.004	115.02	115.009	114.994	115.044
	1720	116.087	117.259	118.289	119.101	119.633	119.911	120.039	120.091	120.102	120.11	120.168
	1780	120.487	121.735	122.853	123.769	124.435	124.856	125.087	124.194	125.234	125.259	125.317
	1840	124.823	126.171	127.414	128.471	129.283	129.831	130.152	130.308	130.372	130.406	130.46
	1900	129.102	130.578	131.985	133.22	134.191	134.855	135.24	135.422	135.491	135.524	135.572
	1960	133.323	134.951	136.566	138.024	139.175	139.938	140.347	140.515	140.566	140.589	140.633
	2020	137.477	139.27	141.144	142.89	144.252	145.085	145.454	145.556	145.568	145.58	145.629
	2080	141.566	143.508	145.692	147.811	149.433	150.283	150.512	150.495	150.464	150.482	150.553
	2140	145.636	147.656	150.17	152.731	154.683	155.464	155.425	144.276	155.248	155.304	155.416
	2200	149.871	151.846	154.606	157.443	159.707	160.363	160.109	159.941	159.973	160.081	160.237

6.6.4 Değişken Geometrilı Türbin Kanat Pozisyonu Tablosu

Tablo 6.8 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Değişken Geometrilı Türbin Kanat Pozisyonu Tablosu

measrpm (rpm)	tq_desired(Nm)										
	0	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
	1600	0.574	0.583	0.591	0.597	0.600	0.600	0.600	0.600	0.599	0.600
	1660	0.592	0.600	0.608	0.615	0.619	0.620	0.622	0.623	0.624	0.627
	1720	0.608	0.616	0.624	0.631	0.636	0.640	0.643	0.645	0.648	0.655
	1780	0.623	0.631	0.639	0.646	0.653	0.658	0.663	0.668	0.673	0.684
	1840	0.637	0.645	0.653	0.661	0.669	0.676	0.684	0.691	0.699	0.713
	1900	0.651	0.659	0.667	0.675	0.684	0.694	0.704	0.714	0.724	0.743
	1960	0.665	0.673	0.681	0.690	0.700	0.712	0.724	0.738	0.750	0.773
	2020	0.680	0.687	0.695	0.704	0.715	0.729	0.745	0.761	0.777	0.802
	2080	0.695	0.702	0.709	0.718	0.730	0.746	0.765	0.785	0.803	0.832
	2140	0.712	0.718	0.725	0.734	0.746	0.763	0.786	0.809	0.830	0.860
	2200	0.730	0.737	0.743	0.751	0.763	0.783	0.807	0.832	0.856	0.886

6.6.5 Egzost Gazı Geri Dönüşüm Oranı Valf Konumu Tablosu

Tablo 6.9 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Egzost Gazı Geri Dönüşüm Oranı Valf Konumu Tablosu

measrpm (rpm)	tq_desired(Nm)										
	0	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
	1600	1.857	2.029	2.154	2.206	2.119	1.882	1.656	1.433	1.196	0.952
	1660	2.034	2.225	2.369	2.434	2.375	2.201	1.998	1.788	1.565	1.340
	1720	2.168	2.377	2.537	2.622	2.608	2.503	2.345	2.162	1.964	1.767
	1780	2.268	2.497	2.684	2.804	2.842	2.798	2.692	2.547	2.380	2.209
	1840	2.343	2.600	2.824	2.992	3.085	3.099	3.043	2.937	2.801	2.655
	1900	2.397	2.690	2.964	3.191	3.344	3.411	3.400	3.328	3.219	3.094
	1960	2.435	2.770	3.106	3.404	3.623	3.740	3.762	3.715	3.627	3.520
	2020	2.457	2.838	3.249	3.635	3.927	4.085	4.124	4.088	4.016	3.926
	2080	2.468	2.890	3.388	3.884	4.260	4.445	4.472	4.434	4.378	4.307
	2140	2.486	2.928	3.520	4.142	4.617	4.800	4.780	4.734	4.705	4.659
	2200	2.565	2.996	3.660	4.362	4.927	5.090	5.026	4.993	5.002	4.978

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, iki aşamalı modelleme yaklaşımı kullanılarak oluşturulan motor çıkış modellerinden yararlanılıp bir optimizasyon problemi olan minimum yakıt kriterine göre dizel motorun kalibrasyonunun yapılmasına çalışılmıştır. Bu amaç çerçevesinde elimizde bulunan veri kümesi kullanılıp iki aşamalı modelleme yaklaşımıyla en uygun motor modelini bulmak için çeşitli istatistik değerleri kullanılarak modeller oluşturulmuş ve motor haritaları elde edilmiştir. Motor davranışını ayarlanabilir motor parametrelerinin fonksiyonu olarak modelleme işlemi motor haritalamadır ve çalışmamızın ilk bölümünü oluşturmuştur.

Yapılan uygulamada dizel motorun çıkışları olarak tork, egzost sıcaklığı, azot oksit emisyonu, değişken geometrilili turbo hızı, silindir içindeki en yüksek basınç, egzost gazı yakıt fazlalık oranı ve silindir içindeki artık gaz oranı alınmış ve bu çıkışlar modellenmiştir. İki aşamalı modelleme yaklaşımının kullanılmasının nedeni bu yaklaşım sonucunda elde edilen modellerin daha kolay analizinin yapılması ve mevcut klasik yaklaşımdaki modellerdeki gibi uzun polinom modelleri ile karşılaşılmamasıdır. Böylece modellerin yorumlanması daha kolay hale gelmektedir.

İki aşamalı modelleme yaklaşımının ilk aşamasında motor çıkışları ve püskürtme avansı değerinin kuadratik bir fonksiyonu cinsinden veri kümesindeki 65 test için ayrı lokal modeller oluşturulmuştur. Uydurulan modelin kuadratik olması istatistik değerlerinin incelenmesi sonucu alınan bir karardır.

Modellemenin ikinci aşamasında ise uydurulmuş olan lokal modellerin katsayıları her püskürtme avansı taramasında sabit tutulan motor girişleri cinsinden modellenmesi yapılmıştır. Bu modelleme için en uygun modelin seçilmesi aşamasında gene bir takım istatistik verilerden yararlanılarak sistem bilgisinin az olduğu durumlarda kullanılan karma radyal tabanlı fonksiyon olan kuadratik RBF ile modelleme yapılmıştır.

İki aşamalı modelleme yaklaşımından elde edilen grafiklerden bu modellemenin birçok cevap için yaklaşımının iyi olduğu görülmüştür. Böylece motor modellerinin yorumlanması kolaylaşmış ve motorun geliştirilmesini sağlayacak modeller hazırlanmıştır. Bu yaklaşım sonucu elde edilen motor modelleri çalışmanın ikinci bölümünde uygulanacak olan ve çalışmanın temelini oluşturan dizel motorun minimum yakıt kriterine göre kalibrasyonunda kullanılmıştır.

Kalibrasyon uygulamasına geçildiğinde amacımız minimum yakıt tüketimini sağlarken motor elektronik kontrol ünitesinin programlanmasında kullanılan look-up tablolarının oluşturulmasıdır. Yapılan çalışmada yakıt tüketimini ifade eden bir amaç fonksiyonu tanımlanıp bu fonksiyonun minimum yapılması sağlanmıştır. Amaç fonksiyonumuzun minimum yapılmasına çalışılırken bu motor çalışma koşullarından gelen ve bizim belirlemiş olduğumuz bir takım kısıtlar çerçevesinde yapılacaktır. Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere kalibrasyon prosesinde çözmemiz gereken kısıtlamalı optimizasyon problemi olmuştur.

Bu çalışmada, tek amaçlı nonlinear kısıtlamalı optimizasyon problemi çözülmüştür. Amaç fonksiyonumuz olarak minimum yapmak istediğimiz temel özgül yakıt tüketimidir. Nonlinear kısıtlamalı optimizasyon probleminin çözümünde güncel bir algoritma olan dizel kuadratik programlama (SQP) algoritması kullanılmıştır. SQP nonlinear programlamada en son tekniklerden biridir. Dizisel kuadratik programlama amaç fonksiyonumuzun kuadratik bir modelini ve kısıtlamalarımızın lineer modellerini oluşturarak her adımda bunları çözer. SQP'nin en önemli özelliklerinden biri kısıtlamalarında nonlinear olabilmesidir. Amaç fonksiyonu Newton metodundaki gibi kuadratik olarak açılmıştır. Buradaki kuadratik programlama alt probleminin çözümü bize daha sonraki adım için araştırma vektörümüzü verecektir. Ayrıca oluşturulan bir Lagrange fonksiyonu ile kısıtlamalarımızı da ele alarak optimizasyon için gerekli koşulların sağlanıp sağlanmadığına bakılır. Lagrange fonksiyonunu gerekli koşullar altında minimum yapan değerimiz adım büyüklüğümüzü verir. Bu noktadan sonra SQP'nin en önemli noktalarından biri olan Hessian BFGS metodu kullanılarak güncelleştirilir. Tüm bu adımların sonunda geline nokta bir yakınsama sağlanmışsa SQP problemimiz çözülmüş olur.

Optimizasyon için kullanılan paket programda, problemimizin çözümü için bağımsız değişkenler püskürtme avansı, yakıt miktarı, yakıt basıncı, değişken

geometrilili türbin kanat pozisyonu, egzost gazı geri dönüşüm oranı valf konumu olarak belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin girişi yapıldıktan sonra optimizasyonu çalıştıracağımız veri noktalarının belirtilmesi gerekmektedir. Veri noktaları seçilen motor hızı değerlerinde motorun hangi tork değerinde olmasını istediğimizi göstermektedir. Bu şartlar sağlanırken amaç fonksiyonumuz minimum yapılması için optimizasyon algoritmamız çalıştırılmıştır.

Kullanılan kalibrasyon programında sisteme yeni kısıtlar ekleyerek kalibrasyon parametrelerini geliştirmek mümkündür. Optimizasyon işlemimizin sonunda elde edilen veriler bir tablo halinde verilip amaç fonksiyonumuz girilen değişkenlere bağlı olarak minimum olması sağlanmıştır.

Son yıllarda uygulanan sıkı emisyon normlarına uyulması yönünden kalibrasyon daha da önemli hale gelmiştir. Motorun, bu sıkı emisyon şartlarını yerine getirirken hem veriminin yüksek olması hem de minimum yakıt tüketiminin sağlanması istenmektedir. Buda kalibrasyonun önemini açıkça gösteren bir durumdur. Motorun kalibrasyonunun yapıldığı elektronik kontrol ünitesi motora giren hava miktarı ve motor hızı ile çalışır. Çalışmada motor hızı üzerinden kalibrasyon yapılmıştır. Bunun yanına hava yakıt karışımını optimizasyona katarak yakıt tüketiminin hangi değerlerde olduğu gözlemlenebilir.

Kalibrasyonun amacı verilmiş kısıtlara bağlı olarak belli motor devirlerin de istenen tork değerlerine en iyi yakıt ekonomisini sağlayarak elektronik kontrol ünitesinin programlanmasında kullanılan tabloları oluşturmaktır. Kalibrasyona farklı parametreler katılarak kalibrasyon geliştirilebilir. Unutulmaması gereken bir diğer nokta ise motor çalıştığı sürece çevre koşullarından etkilenecek silindirlerin içinde yanmadan dolayı kurum oluşacak, bazı parçaları yaşlanmanın da vermiş olduğu etki ile tam verimli çalışmayacaklardır. Kalibrasyonun belirli aralıklarla tekrarlanması hem bu etkileri azaltırken hem de kalibrasyonun değişimi hakkında bilgi verecektir.

KAYNAKLAR

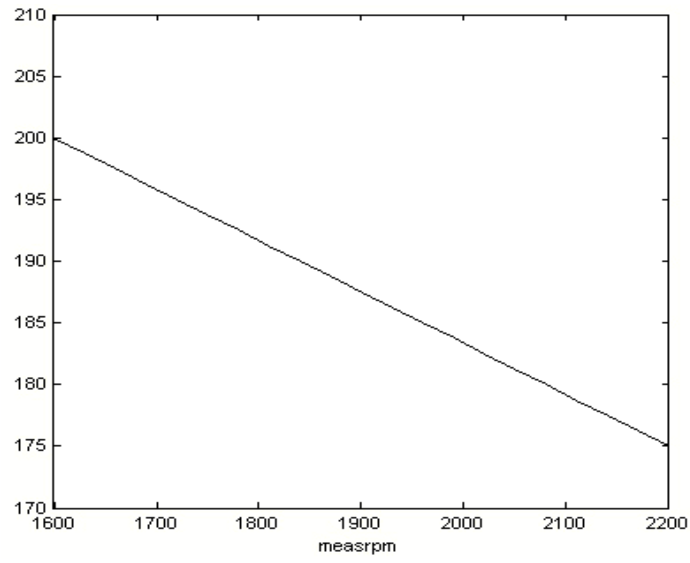
- [1] **Holliday, T., Lawrence, A. J., Davis, T. P.,** 1998. Engine Mapping Experiments: A Two-Stage Approach, *Technometrics*, **40**, 120-126.
- [2] **Barker, T. D.,** 1982. Engine Mapping Techniques, *International Journal of Vehicle Design.*, **3**, 142-152.
- [3] **Esentürk, E.,** 2004. Bir Dizel Motorun Performans Testi İçin İki Aşamalı İstatistiksel Motor Haritalama Modellerinin Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Casidy, J. F.,** 1977. A Computerized on-line Approach to Calculating Optimum Engine Calibrations, *Society of Automotive Engineers*, Tech. Paper series 770078.
- [5] **Beale, E. M. L.,** 1998. Introduction to Optimization, New York Wiley, New York.
- [6] **Maloney, P.,** 2003. Overview of Empirical and Analytical Calibration Processes, The Mathworks Inc.
- [7] **Mathworks,** 2006. Matlab Model Based Calibration Toolbox, Model Browser User's Guide version 3.0, The Mathworks Inc., Natick.
- [8] **Mathworks,** 2006. Matlab Statistics Toolbox, User's Guide version 5.0, The Mathworks Inc., Natick.
- [9] **Freund, J. E.,** 1992. Mathematical Statistics, Prentice Hall, USA.
- [10] **Hill, T. and Lewicki, P.,** 2006. Statistics: methods and applications, StatSoft Press, USA.
- [11] **Hoel, P. G.,** 1962. Introduction to Mathematical Statistics, John Wiley and Sons Press, New York.
- [12] **Snedecor, G. W. and Cochran, W. G.,** 1967. Statistical Methods, The Iowa State University Press, Iowa.

- [13] **Yıldırım, F.**, 1998. En çok Olabilirlik Tahmin Tekniği ile ilgili son gelişmeler ve değişmeler: düzensiz durumlar, İstatistik Günleri Sempozyumu, Mayıs 25-26.
- [14] **Akaike, H.**, 1974. A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. Automat. Contr., **19**, 716-723.
- [15] **Yavaşlıol, İ.**, 1984. Motorlu Taşıtlarda Yakıt Tasarrufu, Doğan Matbaası, İstanbul.
- [16] **Mathworks**, 2006. Matlab Model Based Calibration Toolbox CAGE User's Guide version 3.0, The Mathworks Inc., Natick.
- [17] **Himmelblau, D. M.**, 1972. Applied Nonlinear Programming, McGraw Hill Press, USA.
- [18] **Beltrami, E. J.**, 1970. An Algorithmic Approach to Nonlinear Analysis and Optimization, Academic Press, New York.
- [19] **Gill, P. E., Murray, W. and Wright, M. H.**, 1981. Practical Optimization, Academic Press, New York.
- [20] **Venkatarman, P.**, 2002. Applied Optimization with Matlab Programming, New York Wiley, New York.
- [21] **Padula, A.**, 2002, Introduction to Sequential Quadratic Programming, Control and Software Engineering Seminar, Sept.
- [22] **Sima, V.**, 1996. Algorithms fo Linear Quadratic Optimization, M. Dekker, New York.
- [23] **Çetin, A. E.**, 2003. Matlab 6.5, Alfa Yayınları, Bursa.

EKLER

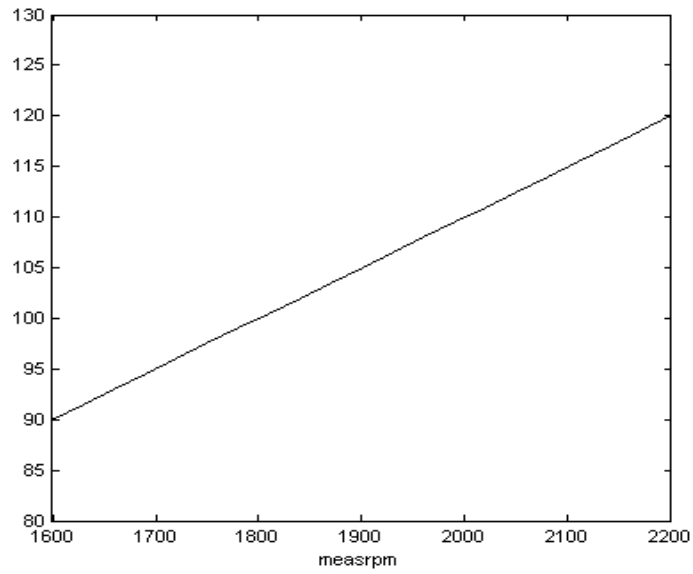
EK-A Optimizasyon Ek Kısıtlarının Grafikleri

$$\text{basefuelmass_max} = 200 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * (-25) \quad (\text{A.1})$$



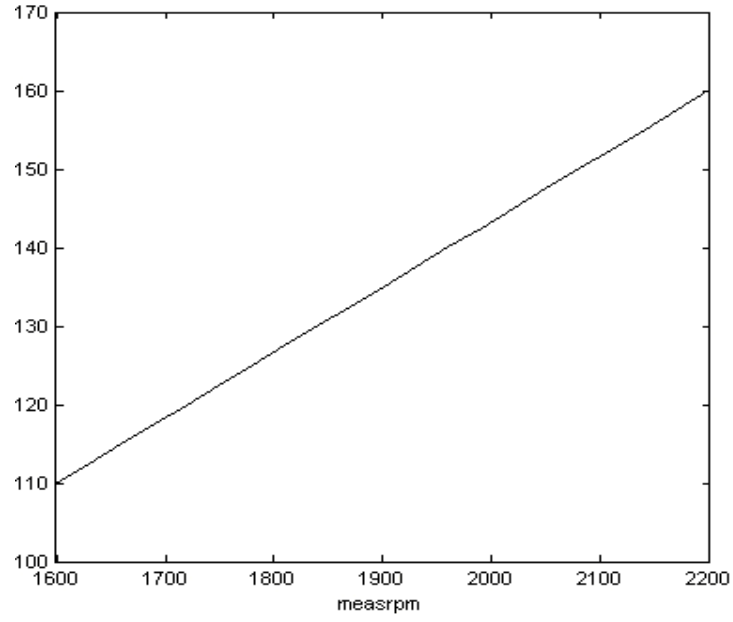
Şekil A.1 Maksimum Yakıt Miktarı Ek Kısıt Grafiği

$$\text{fuelpress_min} = 90 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * 30 \quad (\text{A.2})$$



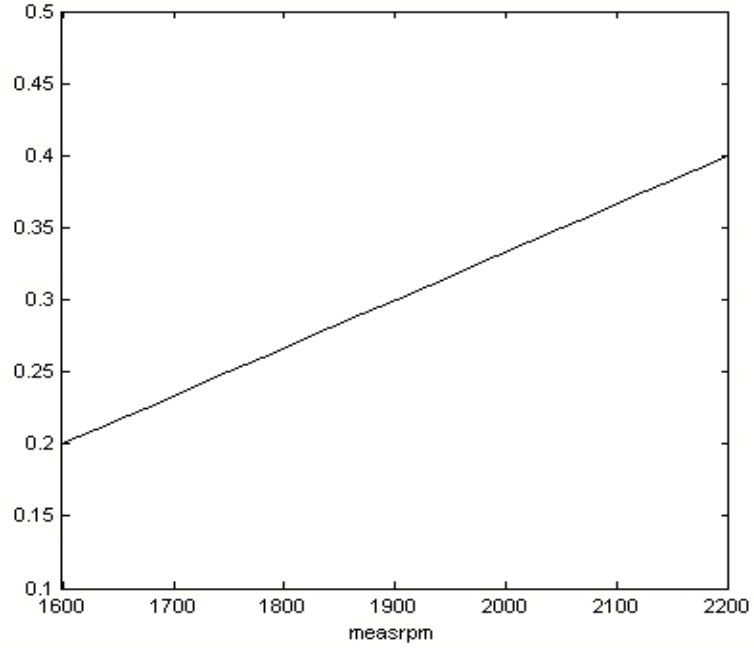
Şekil A.2 Minimum Yakıt Basıncı Ek Kısıt Grafiği

$$\text{fuelpress_max} = 110 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * 50 \quad (\text{A.3})$$



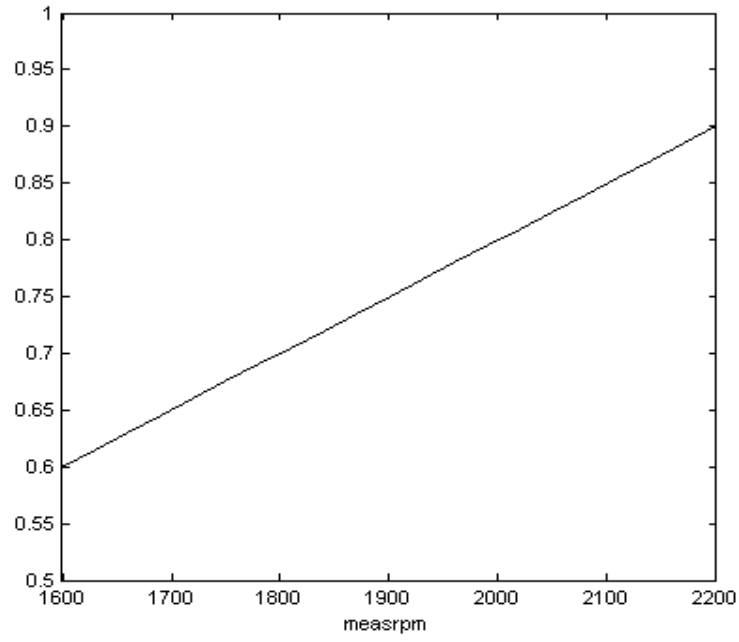
Şekil A.3 Maksimum Yakıt Basıncı Ek Kısıt Grafiği

$$\text{grackmea_min} = 0.2 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * 0.2 \quad (\text{A.4})$$



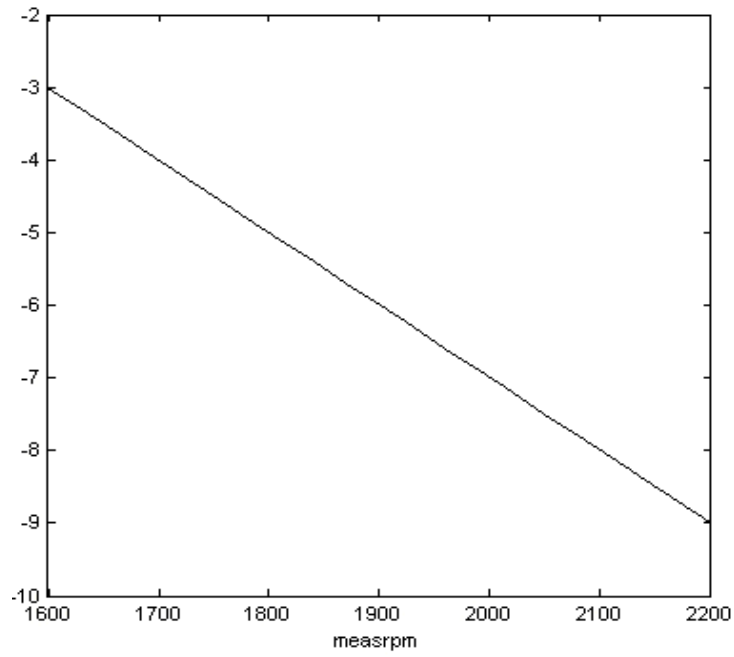
Şekil A.4 Minimum Değişken Geometrilı Türbin Kanat Pozisyonu Ek Kısıt Grafiği

$$\text{grackmea_max} = 0.6 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * 0.3 \quad (\text{A.5})$$



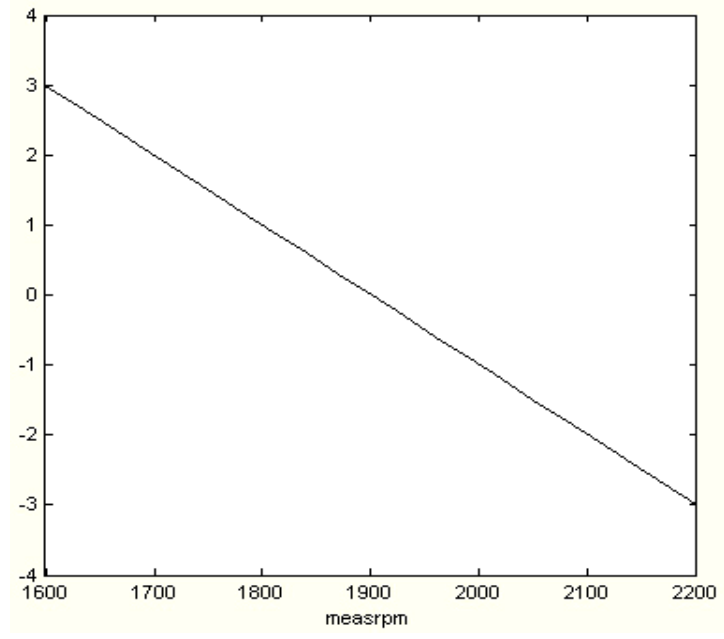
Şekil A.5 Maksimum Değişken Geometrilili Türbin Kanat Pozisyonu Ek Kısıt Grafiği

$$\text{soi_min} = -3 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * (-6) \quad (\text{A.6})$$



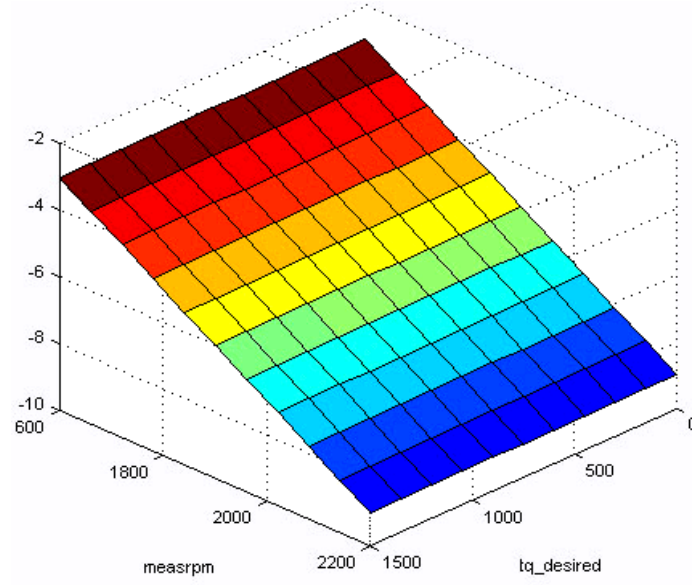
Şekil A.6 Minimum Püskürtme Avansı Ek Kısıtı

$$\text{soi_max} = 3 + (\text{measrpm} - 1600) / 600 * (-6) \quad (\text{A.7})$$

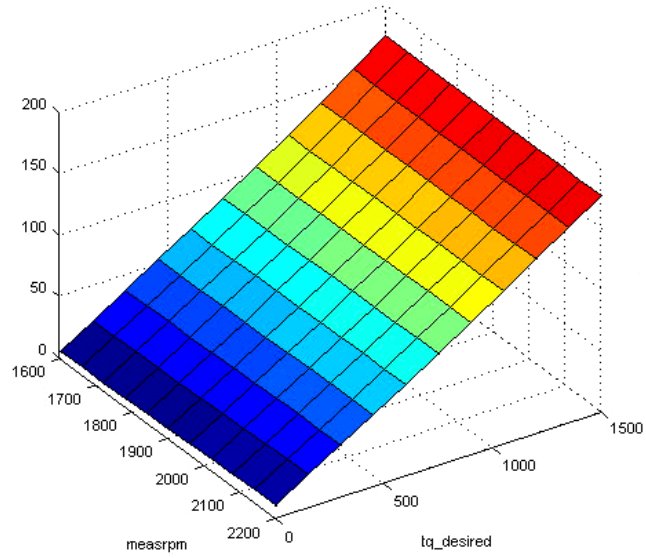


Şekil A.7 Maksimum Püskürtme Avansı Ek Kısıtı

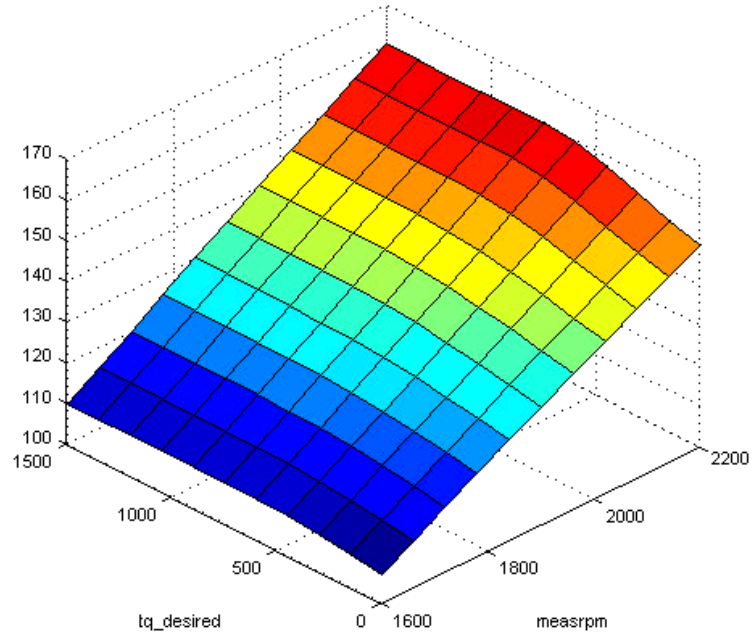
EK-B Optimizasyon Sonucu Oluşturulan Tabloların Grafikleri



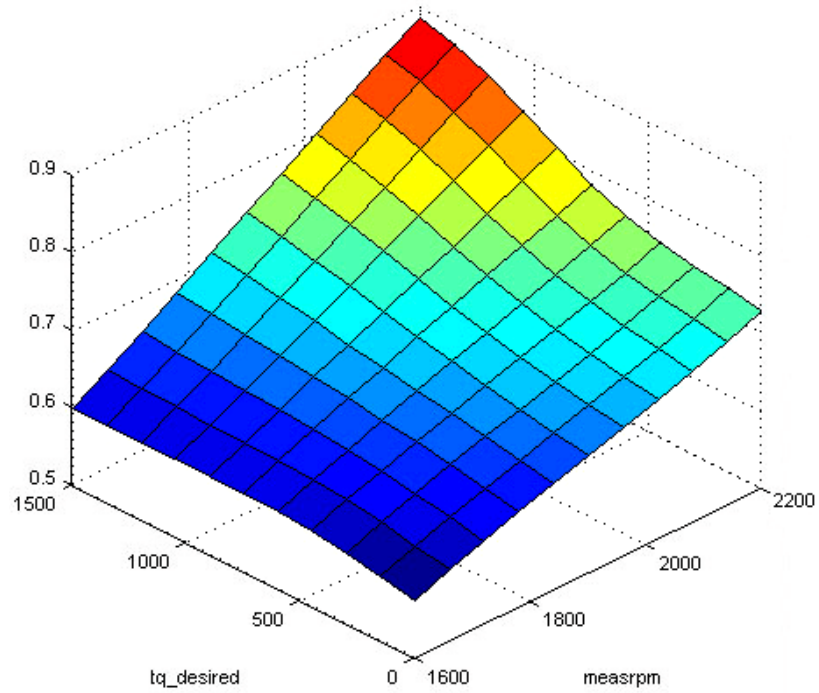
Şekil B.1 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Püskürtme Avansı Grafiği



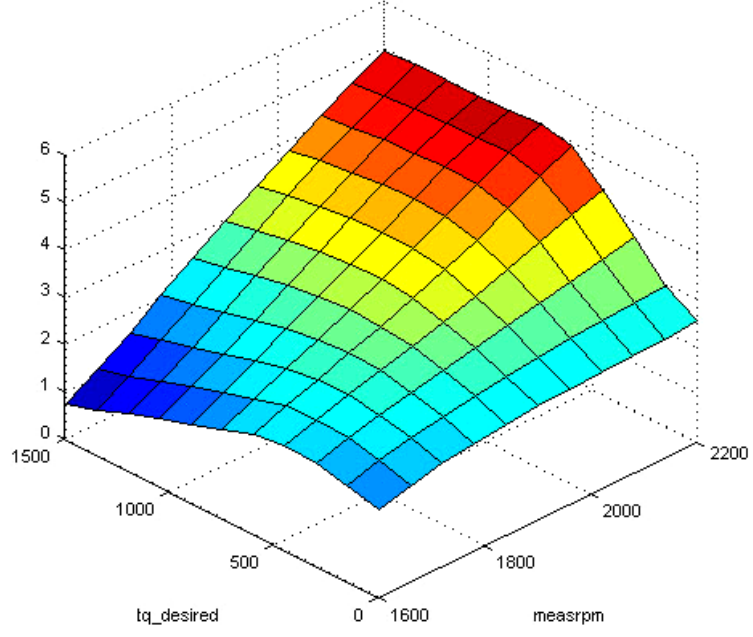
Şekil B.2 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Yakıt Miktarı Grafiği



Şekil B.3 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Yakıt Basıncı Grafiği



Şekil B.4 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Değişken Geometrilı Türbin Kanat Pozisyonu Grafiği



Şekil B.5 Motor Hızı-İstenen Tork Değerlerine göre Egzost Gazı Geri Dönüşüm Oranı Valf Konumu Grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Hakan Barış BENLİGİRAYOĞLU, 1979 yılında İstanbul'da doğdu. Ortaokul eğitimini Vedide Baha Pars Ortaokulu'nda, lise eğitimini Pertevniyal Süper Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'ne başladı. İ.T.Ü. Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden "Lisans" derecesini Haziran 2003'te alan Benligirayoğlu, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.