

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ AŞAMALI MOTOR HARİTALAMA VE
KALİBRASYON**

DOKTORA TEZİ

Yük.Mak.Müh. Mersin GÖKÇE

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAK.TASARIM VE İMALAT

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep KOZAN

Haziran 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ AŞAMALI MOTOR HARİTALAMA VE
KALİBRASYON


DOKTORA TEZİ


Yük.Mak.Müh. Mersin GÖKÇE


Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ


Enstitü Bilim Dalı : MAK. TASARIM VE İMALAT

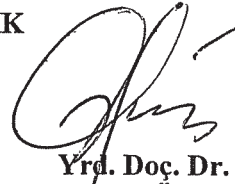
Bu tez 01 / 07 /2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof.Dr.
Recep YAMANKARADENİZ
Jüri Başkanı


Prof.Dr.
Veli ÇELİK
Üye


Prof.Dr.
Recep KOZAN
Üye


Yrd. Doç. Dr.
İmdat TAYMAZ
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Baha GÜNEY
Üye

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması aşamasında bana her türlü desteği veren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Recep KOZAN`a ve tezin ilerleyişine katkılarıyla yön veren hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. İmdat TAYMAZ ve Yrd. Doç. Dr. Baha GÜNEY'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca beni destekleyen eşim Diş Hekimi Asuman GÖKÇE ve sevgili kızım Dilge'ye de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
DİZEL MOTORLAR.....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Elektronik Dizel Yakıt Kontrol Sistemleri.....	6
2.2.1. Elektronik kontrol üniti.....	6
2.2.2. Algılayıcılar.....	7
2.2.3. Hareket ileticiler.....	8
BÖLÜM 3.	
REGRESYON ANALİZİ.....	9
3.1. Doğrudan Regresyon Modeli.....	10
3.1.1. Parametre tahmini.....	10
3.1.2. Doğrudan regresyon için matris yaklaşımı.....	13
3.2. Doğrusal Olmayan Regresyon Modelleri.....	14
3.3. Radyal Tabanlı Fonksiyon (RTF) Modelleri.....	15

3.3.1. Karma radyal tabanlı fonksiyon.....	17
BÖLÜM 4.	
OPTİMİZASYON.....	18
4.1. Kısıtlamasız Optimizasyon.....	18
4.1.1. Optimum çözümin varlığı ve tekliği.....	18
4.2. Tek Boyutlu Arama Yöntemleri.....	19
4.3. N Boyutlu Arama Yöntemleri.....	20
4.3.1. Genel optimizasyon yaklaşımı.....	20
4.3.1.1. En dik düşüm yöntemi.....	21
BÖLÜM 5.	
İKİ AŞAMALI MOTOR HARİTALAMA.....	23
5.1. Kalibrasyon İşlemi.....	26
5.1.1. Veri toplama.....	26
5.1.2. Veri eleme.....	26
5.1.3. Model uydurma.....	26
5.1.4. Kalibrasyon.....	26
5.2. İki Aşamalı Modelleme.....	26
5.3. Uygun Modelin Seçiminde Kullanılan İstatistikler.....	29
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL ÇALIŞMA.....	31
6.1. Deney Motorunun Tanıtılması.....	31
6.2. Deney Yapılan Atölyenin Tanıtılması.....	31
6.2.1. Motor test kabini.....	32
6.2.2. Test arabası	33
6.2.3. Dinamometre.....	33
6.2.4. Kumanda konsolu.....	34
6.2.5. Yağlama yağı ünitesi.....	36
6.2.6. Soğutma suyu ünitesi.....	36
6.2.7. Yakıt ünitesi.....	37
6.2.8. Hava ve egzoz sistemi.....	37

6.3. Deneyin Yapılışı.....	38
6.3.1. Kam açısının mekanik olarak değiştirilmesi.....	39
6.3.2. Özgül yakıt sarfiyatının ölçülmesi.....	42
6.3.3. Egzoz emisyonunun ölçülmesi.....	42
6.4. Deneysel Verinin Analizi.....	43
BÖLÜM 7.	
UYGULAMA.....	46
7.1. İki Aşamalı Modelleme Yaklaşımıyla Özgül Yakıt Sarfiyatının Modellenmesi.....	47
7.1.1. Özgül yakıt sarfiyatı modelinin uygunluğunun kontrol edilmesi.....	62
7.2. Tek Aşamalı Modelleme Yaklaşımıyla Özgül Yakıt Sarfiyatının Modellenmesi.....	64
7.3. Minimum Özgül Yakıt Sarfiyatı İçin Kam Açısının Kalibre Edilmesi.....	68
7.4. İki Aşamalı Modelleme Yaklaşımıyla CO Emisyonunun Modellenmesi.....	72
7.4.1. CO emisyonu modelinin uygunluğunun kontrol edilmesi.....	74
7.5. Minimum CO Emisyonu İçin Kam Açısının Kalibre Edilmesi.....	75
7.6. Yazılan Program ve MDKY İle Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	76
7.6.1. Modellemenin karşılaştırılması.....	76
7.6.2. Kalibrasyonun karşılaştırılması.....	84
7.6.3. Açık çevrimli kontrol sistemi için program yazılması.....	86
BÖLÜM 8.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR.....	95
EKLER.....	98
ÖZGEÇMİŞ.....	105

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AICc	: Akaike bilgi kriteri
BIC	: Baysan bilgi kriteri
CAGE	: Calibration generation
CO	: Karbon monoksit
ECU	: Elektronik kontrol ünit
EDYK	: Elektronik dizel yakıt kontrol
EGR	: Egzoz geri dönüş
H	: Hessian matrisi
HBSP	: Karma B-spline polinom
HC	: Hidrokarbon
HK	: Hataların karesi
GB	: Gigabyte
GCV	: Genelleştirilmiş çapraz uygunluk
K	: Kam açısı
MB	: Megabyte
MDKY	: Modele dayalı kalibrasyon yazılımı
N	: Motor devri
NO _x	: Azot oksit
Pm	: Partiküler madde
ppm	: Hacim konsantrasyonu
PRESS	: Öngörülen hataların karelerin karekökü
RMSE	
RMSE	: Hataların karelerinin ortalamasının karekökü
RTF	: Radyal tabanlı fonksiyon
T	: Motor torku
ÜÖN	: Üst ölü nokta

ϕ : Radyal tabanlı baz fonksiyonu

$\| \cdot \|$: Öklit uzaklığı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	ECU’da kullanılan algılayıcılar.....	8
Şekil 3.1.	Çoklu kuadratik RTF profili.....	16
Şekil 5.1.	Teorik ECU tablosu.....	24
Şekil 5.2.	Yanma odası kesiti ve kam açısı.....	27
Şekil 6.1.	Motor test kabini.....	32
Şekil 6.2.	Motor ve dinamometrenin irtibatı.....	34
Şekil 6.3.	Deney düzeneğinin altında bulunan yaylar.....	34
Şekil 6.4.	Kabin kumanda konsolu.....	35
Şekil 6.5.	Ana kumanda konsolu.....	35
Şekil 6.6.	Kumanda konsol ekranı.....	36
Şekil 6.7.	Motorun senteye getirilmesi.....	39
Şekil 6.8.	Kam açısının -10 dereceye ayarlanmış hali.....	40
Şekil 6.9.	Yakıt pompa elemanının sökülmesi.....	40
Şekil 6.10.	Komparatör saatinin takılması.....	41
Şekil 6.11.	Pompa kamının basma miktarının ayarlanması.....	41
Şekil 6.12.	Pompa kam milinin sabitlemesi.....	42
Şekil 6.13.	Yakıt sarfiyatı ölçüm cihazı.....	42
Şekil 6.14.	Egzoz emisyon ölçüm cihazı.....	43
Şekil 6.15.	Egzoz emisyonunun ölçülmesi.....	43
Şekil 7.1.	İki aşamalı veri düzenleyici ara yüzü.....	48
Şekil 7.2.	Modelleme yaklaşımının seçimi.....	48
Şekil 7.3.	İki aşamalı modellemenin algoritması.....	49
Şekil 7.4.	15 nolu test grubu için elde edilen lokal model eğrisi.....	51
Şekil 7.5.	Lokal model fonksiyonun ifadesi.....	51
Şekil 7.6.	Özgül yakıt sarfiyatı için öngörülen/gözlemlenen ‘ <i>Beta</i> _1’.....	52
Şekil 7.7.	Özgül yakıt sarfiyatı için öngörülen/gözlemlenen ‘ <i>Beta</i> _K’.....	53

Şekil 7.8.	Özgül yakıt sarfiyatı için öngörülen/gözlemlenen ' $Beta_K^2$ '...	53
Şekil 7.9.	Özgül yakıt sarfiyatı için öngörülen/gözlemlenen ' $Beta_K^3$ '...	54
Şekil 7.10.	Cevap özelliğinin ifadesi.....	54
Şekil 7.11.	Özgül yakıt tüketimi için 15 nolu test grubuna uydurulan eğri.....	56
Şekil 7.12.	Model seçimi için hesaplanan istatistiksel parametreler.....	59
Şekil 7.13.	Model cevap yüzeyi.....	60
Şekil 7.14.	Özgül yakıt tüketimi için model E'ye ait cevap yüzeyi.....	62
Şekil 7.15.	Motor devrine karşılık gelen özgül yakıt tüketimi.....	63
Şekil 7.16.	Dizel motorun genel özgül yakıt sarfiyat eğrisi.....	63
Şekil 7.17.	Tek aşamalı veri düzenleyici arayüzü.....	64
Şekil 7.18.	Tek aşamalı modellemenin algoritması.....	65
Şekil 7.19.	Tek aşamalı modelleme sonucunda öngörülen/gözlemlenen özgül yakıt tüketimi.....	66
Şekil 7.20.	Modelin CAGE programına yüklenilmesi için kullanılan arayüz.....	69
Şekil 7.21.	Modelin CAGE programına yüklenmiş hali.....	69
Şekil 7.22.	Kalibrasyon tablosunun yaratılması.....	70
Şekil 7.23.	Kalibrasyon tablosu.....	71
Şekil 7.24.	CO emisyonu için model E'ye ait model cevap grafiği.....	74
Şekil 7.25.	Model E için motor devrine karşılık gelen CO emisyonu.....	75
Şekil 7.26.	Birinci aşama akış diyagramı.....	77
Şekil 7.27.	İkinci aşama akış diyagramı.....	81
Şekil 7.28.	Optimizasyon akış diyagramı.....	85
Şekil 7.29.	Açık çevrimli kontrol sistemi akış diyagramı.....	87

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	İki değişken arası ilişkiler.....	9
Tablo 6.1.	Deney motorunun teknik özellikleri.....	31
Tablo 6.2.	Dinamometrenin teknik özellikleri.....	33
Tablo 6.3.	Yapılan ölçümlerin belirsizlikleri	44
Tablo 7.1.	Model parametreleri ve değerleri.....	47
Tablo 7.2.	Özgöl yakıt tüketiminin iki aşamalı modellemesine ait istatistiksel veriler.....	61
Tablo 7.3.	Özgöl yakıt tüketiminin tek aşamalı modellemesine ait istatistiksel veriler.....	68
Tablo 7.4.	Minimum özgöl yakıt tüketimi için hesaplanan kam açıları.....	72
Tablo 7.5.	CO emisyonu için iki aşamalı modellemeye ait istatistiksel veriler..	73
Tablo 7.6.	Minimum CO emisyonu için hesaplanan kam açıları.....	76
Tablo 7.7.	Kalibrasyon değerlerinin karşılaştırılması.....	86
Tablo 8.1.	Özgöl yakıt sarfiyatının mukayesesi.....	89
Tablo 8.2.	CO emisyonunun mukayesesi.....	89
Tablo 8.3.	Özgöl yakıt sarfiyatının kalibrasyonu.....	91
Tablo 8.4.	CO emisyonunun kalibrasyonu.....	92

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Motor Haritası, Dizel Motor, Tek Aşamalı Modelleme, İki Aşamalı Modelleme, Egzoz Emisyonları, Özgül Yakıt Sarfiyatı, Kalibrasyon, Optimizasyon, Elektronik Kontrol Ünite (ECU)

Dizel motorların egzoz emisyonları ve yakıt sarfiyatlarını azaltıcı çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmaların başlangıç noktasını ise motor haritaları oluşturmaktadır. Motor haritasının amacı motor parametreleri ile motorun modellenmesi ve istenen kıstaslara bağlı olarak motor parametrelerin kalibre edilmesidir.

Bu çalışmada bir dizel motorun özgül yakıt sarfiyatı ve karbon monoksit (CO) emisyonu hem tek aşamalı modelleme hem de iki aşamalı modelleme yaklaşımıyla modellenmiştir. Elde edilen motor haritaları için farklı fonksiyonlar kullanılmış olup, en iyi model istatistiksel parametreler vasıtasıyla seçilmiştir.

Seçilen motor haritası yardımıyla minimum özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu verecek şekilde kam açıları (püskürtme avansı) kalibre edilmiştir.

Çalışmanın devamında özgül yakıt sarfiyatının iki aşamalı modelleme yaklaşımıyla modellenmesi ve minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açılarının kalibrasyonu için program yazılmıştır.

TWO-STAGE ENGINE MAPPING AND CALIBRATION

SUMMARY

Key words: Engine Mapping, Diesel Engine, One-Stage Mapping, Two-Stage Mapping, Exhaust Emission, Specific Fuel Consumption, Calibration, Optimization, Electronic Control Unit (ECU)

There are continuous studies about decreasing exhaust emission and fuel consumption of diesel engines. The starting point of these studies is engine mapping. The purpose of engine mapping is constructing engine mapping as a function of engine parameters, and calibrating these parameters based on desired constraints.

The engine mappings of a diesel engine for carbon monoxide (CO) and specific fuel consumption responses are constructed by one-stage and two-stage engine modeling approaches. The different engine mappings are created by using different functions, and the best model out of these mappings is selected by the use of statistical parameters.

The cam angle (start of injection) of the diesel engine is calibrated to give minimum specific fuel consumption and CO emission with the help of best selected model.

The program is written both to model specific fuel consumption by two-stage modeling approach and to calibrate the cam angle to give minimum specific fuel consumption.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanların hayat standartlarındaki ve teknolojiadaki gelişmelere paralel olarak motorlu araçların günlük hayatımızdaki kullanım alanı büyük bir hızla artmasına rağmen dünyadaki kısıtlı kaynakların miktarı da buna bağlı olarak azalmaktadır.

Hem bu kısıtlı kaynaklar listesinin ilk sıralarında yer alan petrol kaynaklarının azalması hem de ülkelerin çevre şartlarının iyileştirilmesi ve korunması hakkındaki duyarlılıkların artması motor üreticilerinin çeşitli zorlayıcı yaptırımlara tabi kalmalarına sebep olmaktadır. Tahmin edileceği gibi bu yaptırımlar genel anlamda yakıt sarfiyatının azaltılması ve egzoz emisyonlarının belli kriterleri aşmamasıdır. Özellikle Avrupa Birliği üye ülkelerinde egzoz emisyonları hakkında uyulmakta olan Euro V kurallarının motorda yanma meydana geldikten sonraki önlemlerle sağlanması hem zor ve hem de pahalıdır. [1]

Yakıt sarfiyatının ve egzoz emisyonlarının belli güç performansı ile birlikte sağlanabilmesi için bir çok çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalar genellikle değişik geometrik formlarda turboşarjlerin dizaynı, yakıt püskürtme zamanları ve egzoz geri dönüş (EGR) valfinin konumlarının optimize edilmeleri hakkındadır.

Bu tür çalışmaların temelinde motor haritalarının çıkartılması yatmaktadır. Motor haritalaması motor davranışının ayarlanabilir parametrelerin fonksiyonu olarak modellenmesidir. Motor haritasından sonraki aşama ise bu motor haritasına bağlı olarak parametrelerin istenen hedeflere göre kalibre yani optimize edilmesi ve motorun istenen limitler dahilinde çalışmasını sağlayacak elektronik kontrol ünitesinin (ECU) hazırlanmasıdır.

Elektronik kontrol ünitesinin temeli motor hızı ve yükünden oluşan iki boyutlu tablo olup, bu tablo istenen yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyonlarını verecek kam açılarının değerleri tarafından doldurulmuştur.

Modele dayalı kalibrasyon metodolojisinin kullanımı, kalibrasyonu yapacak mühendise hem parametreler arasındaki ilişkiyi kolayca öngörme becerisi hem de ilave bir test ya da deney yapmadan motor performansına karşılık gelen egzoz emisyonundaki değişimi hesaplama imkanı verir. [2]

Motor haritasının çıkartılması için ilk önceleri Blumberg (1978) ve Mencik (1979) tarafından genellikle 4. dereceden polinoma kadar polinom regresyon yöntemi uygulanmıştır. Bilahare cevap yüzeyi yaklaşımı ile motor haritalama hakkında çalışmalar Grove ve Davis (1992) tarafından başlatılmış olup, Draper, Davis, Pozueta ve Grove (1994) tarafından devam ettirilmiştir. [3]

Fakat bu tür bir yaklaşım modelleme için yüksek dereceden polinom kullanılması ve testler arasındaki hiyerarşik hatanın dikkate alınmaması gibi bazı problemleri de beraberinde getirmiştir. Bu problemlerden dolayı motor haritalamada iki aşamalı modelleme olarak adlandırılan yaklaşım gündeme gelmiştir.

Holliday (1995) iki aşamalı modelleme hakkında doktora çalışması yapmıştır. Doktora çalışmasında kalibrasyon işleminin safhaları, halihazır motor haritalamasında uygulanan yaklaşımın dezavantajları hakkında araştırmalar yapmış ve örnek olarak karbon monoksit (CO) emisyonunun analizini iki aşamalı modelleme uygulaması ile göstermiştir. [4]

Holliday, Lawrence, ve Davis (1998) ise elektronik kontrolörlerin çalışmasını ve iki aşamalı modellemenin teorisini açıklayan bir çalışma yapmış ve yakıt ekonomisi için modelleme örneği sunmuşlardır. Bu çalışmalarında halihazırda kullanılan motor haritalama metodu için gerekli olan kam açısı yelpaze sayısının 250 ile 350 arasında değişmekte olduğunu ve bunun da haliyle çok zaman aldığını vurgulamışlardır. [3]

Cary (2003) benzinli bir motorun haritasının çıkartılması hakkındaki doktora çalışmasında fren torku, azotoksit emisyonu, yanma denge metriği ve hacimsel etkinlik için iki aşamalı modelleme çalışması yapmıştır. Bu çalışmasında modeller karma B-spline polinom (HBSP), serbest düğümlü B-spline ve radyal tabanlı fonksiyonlar (RTF) kullanılarak yapılmıştır. [5]

Guerrier ve Cawsey'in (2004) de iki aşamalı modelleme yaklaşımı ile tek ve iki aşamalı motor haritalama hakkında pratik örnekleri veren çalışmaları olmuştur. Tek aşamalı model için radyal tabanlı fonksiyon, iki aşamalı model için ise klasik doğrusal modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada tek ve iki aşamalı modellerin karşılaştırılmasında hataların karelerinin ortalamasının karekökü (RSME), öngörülen hataların karelerinin karekökü (PRESS RMSE) ve cevap yüzeylerinin (response surface) görsel kontrolü kullanılmıştır. [2]

Saunders (2004) ise simulasyonla genelleştirilmiş çapraz uygunluk (GCV), akaike bilgi kriteri (AICc) ve Baysan bilgi kriterinin (BIC) iki aşamalı model yaratılmasında etkinliğini incelemiştir. [6]

Maloney (2004) ise iki aşamalı modelleme yaklaşımıyla ECU ile torkun hesaplanmasının fizibilitesi hakkında çalışmalar yapmıştır. [7]

Motor haritalama ve iki aşamalı modelleme hakkında daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınarak, bu çalışmada fabrika ortamında kurulan bir test düzeneğinde yaklaşık 6 ay süreyle bir dizel motora ait veriler toplandı. Toplanan bu veriler kullanılarak kam açısı (püskürtme avansı), motor hızı ve tork parametrelerine bağlı olarak dizel motorun özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyon cevaplarının hem tek aşamalı hem de iki aşamalı modellemesi yapıldı. Çalışmanın bundan sonraki safhasında istatistiksel parametrelere dayanarak en iyi iki aşamalı model seçildi. Seçilen bu model kullanılarak minimum özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu verecek şekilde kam açıların kalibresi yani optimizasyonu yapıldı. Kalibre edilen bu kam açıları, eksenleri motor hızı ve torku olan kontrol tabloları (look-up table) sayesinde ECU'da kullanılabilir olacaktır.

Bu çalışmada; motorlarda kullanılan ECU'lar hakkında genel bilgiler Bölüm 2.'de verildi. Bölüm 3.'te ise doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri ve regresyon analizinde parametre tahminleri hakkında açıklamalar yapıldı. Optimizasyon ve kısıtlamasız optimizasyonda kullanılan farklı yöntemler ise Bölüm 4.'de anlatıldı. Bölüm 5.'te ise ilk olarak motor haritalama, iki aşamalı modellemenin matematik alt yapısı ve iki aşamalı modellemenin avantajları hakkında bilgiler verildi. Daha sonra ise, en iyi iki aşamalı modelin seçilmesi esnasında kullanılan istatistiksel parametreler açıklandı.

Bu çalışmada kullanılan verilerin toplanması için kullanılan test düzeneği ve fabrika imkanları Bölüm 6.'da anlatıldı. Bölüm 7.'de ise MATLAB'de mevcut olan modele dayalı kalibrasyon yazılımı versiyon 2.1 (Model-Based Calibration Toolbox version 2.1) ile dizel motorun özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu hem tek aşamalı hem de iki aşamalı modelleme yaklaşımıyla modellendi. Daha sonra ise istatistiksel parametrelerin yardımıyla en iyi iki aşamalı model seçilip, minimum özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu verecek şekilde kam açıları kalibre edildi.

Yapılan çalışmada özellikle modelleme ve kalibrasyon esnasında modele dayalı kalibrasyon yazılımı (MDKY) tarafından kullanılan matematik alt yapının detaylı bir şekilde anlaşılmasına önem verildi. Bu sebepten dolayı hem modelleme ve hem de kalibrasyon için MATLAB'de program yazıldı. Bu program kullanılarak elde edilen sonuçlar, MDKY'den elde edilen sonuçlarla Bölüm 7.'de mukayese edildi.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve daha sonra yapılmasında fayda görülen çalışmalar hakkında bilgiler ise Bölüm 9.'da verildi.

BÖLÜM 2. DİZEL MOTORLAR

2.1 Giriş

Dizel motorlar hakkındaki ilk çalışmalar, 19. yüzyılın sonlarına doğru Dr. Rudolf Diesel tarafından yapılan araştırmalara kadar dayanmasına rağmen, halihazırda dizel motorlar hakkında gelişim ve iyileştirilmelere açık konular bulunmaktadır.

1914 yılından önce, Dr. Rudolf Diesel'in Almanya'da ve Hubert Akroyd Stuart'ın İngiltere'de yapmış oldukları çalışmalara dayanan düşük süratli 4 zamanlı dizel motorların özellikle sabit tesislerde ve gemi ana tahrik sistemlerinde kullanımlarına rastlanmaktadır.

Karayolu taşımacılığında kullanılan ilk motorların benzinli motorlar olmasına rağmen 1930'lu yılların ortalarına doğru dizel motorlarındaki gelişmelere paralel olarak dizel motorlar, kamyon ve otobüslerde tercih edilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Turboşarjlerin de artan kullanımıyla birlikte dizel motorları, trenlerde kullanılan buharlı motorların da yerini almıştır.

1935- 1945 yıllarından itibaren bellibaşlı sanayi ülkeleri kendi dizel motorlarını geliştirdiler. Bu gelişmeler özellikle karayolu taşımacılığında kullanılan dizel motorlar ve değişik formlarda turboşarjlerin tasarımları hakkında olmuştur. Halihazırda çok düşük süratli 2 zamanlı gemi motorlarından, özel uygulamalar için dizayn edilmiş tek silindirli küçük dizel motorlara kadar kapsayan bir sektörde araştırmalar ve çalışmalar devam etmektedir. [8]

Dizel motorlar hakkında en son ve güncel gelişme ise ortak yakıt borusu (common rail) teknolojisidir. Ortak yakıt borusu, direk enjeksiyonlu dizel motorlara kolay

adaptasyonu ve yüksek verimlilikleri nedeniyle yüksek oranda dizel araçlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Aynı zamanda ortak yakıt borusu, enjeksiyon basıncının yüksek olması ve kontrol mekanizmasının esnekliği ile dikkatleri üzerine çekmiştir. Dizel elektronik sistemlerde kullanılan selenoid valfteki gelişmeler, enjeksiyon zamanlamasının daha hassas olmasını sağlamış ve böylece yanma verimini arttırmıştır. [9]

2.2. Elektronik Dizel Yakıt Kontrol Sistemleri

Yakıt sarfiyatının ve egzoz emisyonlarının minimize edilme arzusu, beraberinde motor parametrelerin algılanması ve ihtiyaca göre değiştirilmesini de gündeme getirmiştir. Bu amaçla elektronik dizel yakıt kontrol (EDYK) sistemleri tasarlanmıştır.

EDYK sistemi bir dizel motorlu taşıtta birçok veriyi toplayarak, püskürtülecek yakıt miktarını hesaplamaktadır. EDYK'lı bir dizel motordaki püskürtme miktarı ve zamanı, mekanik püskürtmeli bir dizel motora göre çok daha iyi bir şekilde kontrol edilmekte ve doğru biçimde gerçekleştirilmektedir. [10]

EDYK teknolojisi ile dizel motorlarından kaynaklanan azot oksit (NO_x), hidrokarbon (HC) ve partiküler madde (Pm) emisyonlarında önemli azalmalar sağlanmıştır. Ayrıca elektronik kontrol sistemi, taşıttaki vites kumandası, frenler ve diğer araç kontrol sistemleri arasında bilgi alışverişi sağlayarak, taşıtın güvenlik ve konfor düzeyini de arttırmıştır. [10]

EDYK sistemleri üç ana başlık altında toplanmakta olup, bunlar ECU, algılayıcılar ve hareket ileten mekanizmalardır.

2.2.1. Elektronik kontrol ünitesi

Yüksek basınçlı enjeksiyon teknolojisi, egzoz gaz resürkilasyonu, değişken geometrili turboşarj, partikül filtresi, katalitik konvertör, vb. gibi gelişmeler ile

emisy on oranlarının d ũş ũr ũlmesi, bunun yanında dizel motor performansının arttırılması hedeflenmektedir. Bu sistemler tam olarak ECU yazılımı ile kontrol edilmektedir. [11]

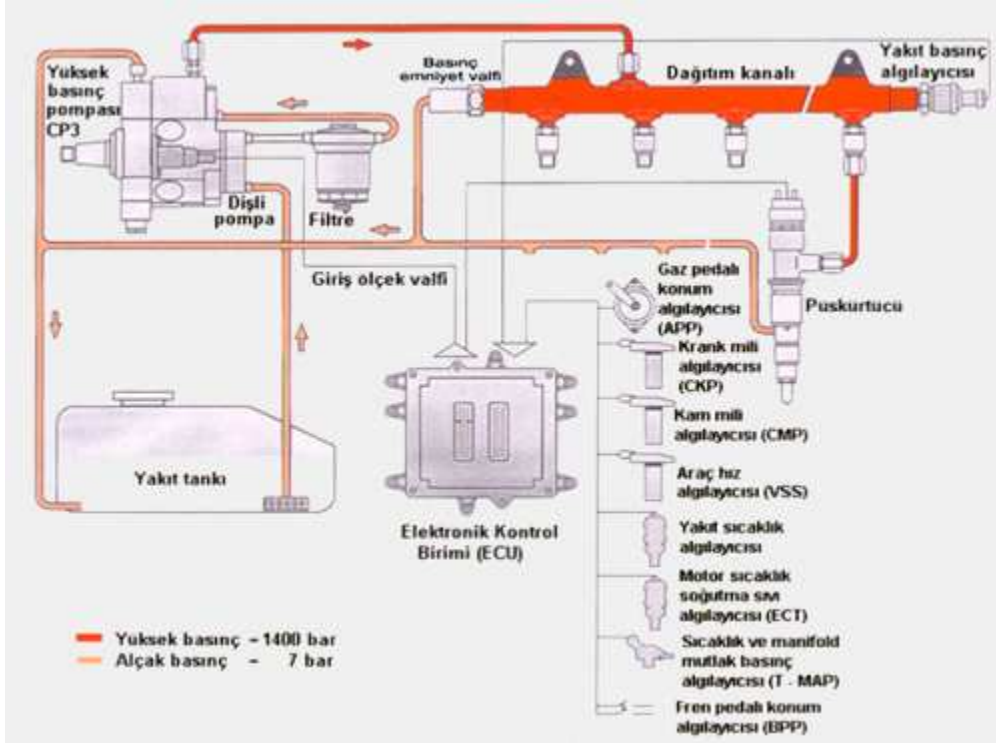
ECU genel anlamda motorun y ũnetilmesini sağlayan bir ũnitedir. Algılayıcılardan aldığı bilgileri değerlendirir, kesin formũller kullanarak hesaplamalar yapar, beklenmedik durumlarda hafızasına daha evvel y ũklenmiř kontrol tablolarındaki bilgileri kullanır ve sonuğlara g ũre kumandalar yardımı ile motorun verimli çalışarak yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyonlarının minimize edilmesine imkan verir. [12]

Modern bir ECU, 32-bit 400 Mhz işlemciye sahiptir. Evde ve iç yerlerinde kullanılan bilgisayarları dikkate alınca, bu rakamlar ilk başta kulağa pek hızlı gelmemektedir. Fakat ECU'da kullanılan kodlar ortalama 1 megabyte (MB) hafızaya ihtiyaç duyarken, bilgisayarlarda kullanılan programlar minimum 2 gigabyte (GB) yer kaplar ki, bu da ECU'da kullanılan hafızanın yaklaşık 2000 katıdır. [13]

2.2.2. Algılayıcılar

ECU giriş bilgilerini sağlayan algılayıcılar genel olarak aşağıda belirtilmiş olup bunlar Şekil 2.1'de g ũsterilmiřtir;

- a. Gaz pedalı konum algılayıcısı
- b. Krank mili algılayıcısı
- c. Kam mili algılayıcısı
- d. Araç hız algılayıcısı
- e. Yakıt sıcaklık algılayıcısı
- f. Motor soğutma suyu algılayıcısı
- g. Sıcaklık ve manifold mutlak basınç algılayıcısı
- h. Fren pedalı konum algılayıcısı



Şekil 2.1. ECU'da kullanılan algılayıcılar [12]

2.2.3. Hareket ileticiler

Püskürtme başlangıcı EDYK tarafından hesaplanan açı-zaman grafiği ile kontrol edilmektedir. Ortak yakıt borusu veya birim pompa gibi elektronik kontrollü yakıt püskürtme sistemlerinde püskürtme başlangıcı selenoid veya piezo enjektörler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Gereken selenoid anahtarı açma-kapama hızı, yüksek voltaj ve akım kullanımıyla elde edilmektedir. Pilot ve ikincil püskürtme farklı gerilimdeki yaylar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Püskürtme zamanı dışında EGR, emme basıncı tetikleyicisi ve elektrik yakıt pompasının rölesi gibi hareket ileticiler kullanılmaktadır. [10]

BÖLÜM 3. REGRESYON ANALİZİ

Aralarında bir ilişki bulunan değişkenlerden birinin bağımlı (y) ve diğerinin (x) bağımsız olması durumunda y 'nin x 'in bir fonksiyonu olarak ifade edilen ilişkiye regresyon denir. Aralarındaki ilişki ise,

$$y = f(x) \quad (3.1)$$

fonksiyonu ile gösterilir.

Uygulamada çok karşılaşılan ilişki şekilleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. [14]

Tablo 3.1. İki değişken arası ilişkiler

1	$y = a + bx$	Doğru denklemi
2	$y = a + bx + cx^2$	Parabolik ilişki
3	$y = ab^x$ veya $\log y = \log a + x \log b$	Üssel eğri
4	$y = ax^b$ veya $\log y = \log a + b \log x$	Geometrik eğri
5	$y = \frac{1}{a + bx}$ veya $\frac{1}{y} = a + bx$	Hiperbolik ilişki

Regresyon analizi ise y ve x 'in n adet değişik numunelerine göre belli bazı işlemlerle $y = f(x)$ fonksiyonunun parametrelerinin değerlerinin bulunmasıdır.

Regresyon modelleri temelde doğrusal regresyon modeli ve doğrusal olmayan regresyon modeli olarak iki alt başlığa ayrılmaktadır.

3.1. Doğrusal Regresyon Modeli

Basit doğrusal regresyon modeli,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (3.2)$$

olarak gösterilir. [15] Bu eşitlikte β_0 ve β_1 regresyon parametreleri olup,

β_0 = Doğrunun y eksenini kestiği değer olarak başlangıç değerini

β_1 = Doğrunun eğimi yani x bir birim değiştiğinde meydana gelen değişim değerini

ε = sıfır ortalama ve σ^2 varyansa sahip, normal dağılımlı hata değişim değerini gösterir.

Bir modelin doğrusal veya doğrusal olmadığı söylendiğinde, modelin parametrelerinin doğrusallığı kastedilmektedir. Diğer bir ifadeyle parametreler denkleme lineer olarak dahil olmaktadır. [16] Modelin bağımsız üssel ifadesi modelin derecesini gösterir. Örnek olarak,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon \quad (3.3)$$

eşitliğinde y ikinci dereceden (x bakımından) doğrusal (β bakımından) bir modeldir.

Bir modelin doğrusal olup olmadığı belirtilmediği takdirde model doğrusal kabul edilir ve modelin derecesi herhangi bir değer olabilir [17].

3.1.1. Parametre tahmini

Modelin parametrelerinin bulunmasında en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır. Yani hataların karelerinin toplamını minimize edecek şekilde β_0 ve β_1 değerleri bulunur.

(3.2) nolu eşitlik kullanılarak,

$$\varepsilon = y - \beta_0 - \beta_1 x \quad (3.4)$$

bulunur. n adet numune için hataların kareleri (HK) toplamı ise

$$HK = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (3.5)$$

olarak bulunur.

β_0 ve β_1 parametrelerin değerlerini bulmak için ayrı ayrı HK 'nın toplamının β_0 ve β_1 'e göre türevlerini alıp sıfıra eşitlemek gerekir. Böylelikle,

$$\frac{\partial HK}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial HK}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) \quad (3.7)$$

olur. (3.6) ve (3.7) nolu eşitlikleri sıfıra eşitlenirse,

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0 \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0 \quad (3.9)$$

elde edilir. (3.8) ve (3.9) nolu denklemlerle

$$\beta_0 n + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.10)$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.11)$$

normal denklemleri elde edilir. β_1 değerini bulmak için, (3.10) nolu eşitlik kullanılarak β_0 parametresi β_1 cinsinden yazılarak,

$$\beta_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i - \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i \right)}{n} \quad (3.12)$$

bulunur. (3.12) nolu denklem, (3.11) nolu eşitlikte yerine konularak,

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i - \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i \right)}{n} \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.13)$$

bulunur ve bu denklem β_1 için çözüldüğü takdirde,

$$\sum_{i=1}^n \frac{(x_i y_i)}{n} - \beta_1 \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{n} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.14)$$

$$\beta_1 \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{n} \right) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n \frac{(x_i y_i)}{n} \quad (3.15)$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (3.16)$$

elde edilir. Eğer,

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n} = \sum \frac{x_i}{n} \quad (3.17)$$

ve

$$\bar{y} = \frac{(y_1 + y_2 + \dots + y_n)}{n} = \sum \frac{y_i}{n}$$

olarak tarif edilirse

$$\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum x_i y_i - \bar{x} \sum y_i - \bar{y} \sum x_i + n\bar{x}\bar{y} \quad (3.18)$$

$$\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum x_i y_i - n\bar{x}\bar{y} \quad (3.19)$$

$$\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n} \quad (3.20)$$

bulunur ve bu eşitliğin (3.16) nolu denklemin payı ile aynı olduğu görülür. Eğer (3.16) nolu denklem (3.20) nolu eşitlikte bulunan ifadeyle yeniden düzenlenirse,

$$\beta_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.21)$$

olarak elde edilir. β_0 ise (3.12) nolu denklem kullanılarak,

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (3.22)$$

olarak bulunur.

Uydurulan modelin denklemi ise (3.2) nolu denklemde (3.21) ve (3.22) nolu eşitlikler kullanılarak

$$\hat{y} = \bar{y} - \left(\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right) \bar{x} + \left(\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right) x \quad (3.23)$$

elde edilir.

3.1.2. Doğrusal regresyon için matris yaklaşımı

İki parametrelili bir doğrusal regresyon için β_0 ve β_1 değerlerinin hataların kareleri yöntemi ile hesaplanabileceği bir önceki bölümde anlatılmıştır. Aşağıda verilmiş örnekteki gibi çok parametrelili bir doğrusal modelin oluşturulması esnasında bu yöntemin kullanılması için karışık matematiksel işlemlerin yapılması gerekmektedir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m + \varepsilon \quad (3.24)$$

ifadesinde

y = bağımlı değişkeni

$x_j, j = 1, 2, \dots, m$, 'm' adet bağımsız değişkeni

β_0 = bağımsız değişkenlerin sıfır olması halinde bağımlı değişken değerini

$\beta_j, j = 1, 2, \dots, m$, regresyon katsayısını

ε = hatayı

temsil eder.

Matematiksel işlem yoğunluğunu ve karışıklığını alt etmenin en güzel yolu matris yaklaşımını kullanmaktır. Eğer (3.24) nolu eşitlik matris olarak ifade edilirse,

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (3.25)$$

elde edilir. Burada,

$Y = (n \times 1)$ gözlem vektörünü

$X = (n \times p)$ bilinmeyen matrisi

$\beta = (p \times 1)$ parametre vektörü

$\varepsilon = (n \times 1)$ hata vektörünü

gösterir. (25) nolu eşitlikten,

$$\varepsilon = (Y - X\beta) \quad (3.26)$$

bulunur. Hataların kareleri alındığı takdirde,

$$\varepsilon' \varepsilon = (Y - X\beta)' (Y - X\beta) \quad (3.27)$$

$$\varepsilon' \varepsilon = Y'Y - \beta'X'Y - Y'X\beta + \beta'X'X\beta \quad (3.28)$$

$\beta'X'Y$ (1×1) boyutunda bir matris veya skaler olduğu için, transpozu yani

$(\beta'X'Y)' = Y'X\beta$ aynı değere sahip olmalıdır. [17, 18]

$$\varepsilon'\varepsilon = Y'Y - 2\beta'X'Y + \beta'X'X\beta \quad (3.29)$$

elde edilir. (3.29) nolu hataların kareleri (*HK*) eşitliğini minimize edecek β matrisini bulmak için (3.29) nolu eşitliğin β 'ya göre türevini alıp sıfıra eşitlemek gerekiyor. Böylelikle,

$$\frac{\partial \varepsilon'\varepsilon}{\partial \beta} = -2X'Y + 2\beta X'X \quad (3.30)$$

$$2\beta X'X - 2X'Y = 0 \quad (3.31)$$

(3.31) nolu denklemleri kullanarak,

$$\beta = (X'X)^{-1} X'Y \quad (3.32)$$

elde edilir ve regresyon modelinin parametreler matrisi bulunmuş olur.

3.2. Doğrusal Olmayan Regresyon Modelleri

Parametreler bakımından doğrusal olmayan modellere doğrusal olmayan modeller denmekte olup, bu tür modellere örnekler aşağıda verilmiştir,

$$y = \exp(\theta_1 + \theta_2 t^2 + \varepsilon) \quad (3.33)$$

$$y = \frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta_2} [e^{-\theta_2 t} - e^{-\theta_1 t}] + \varepsilon \quad (3.34)$$

Bir çok doğrusal olmayan model uygun dönüşümlerle doğrusal hale gelebilir. Bu tür modellere doğrusal forma indirgenebilen modeller denmekte olup, (3.33) nolu eşitlik buna örnek gösterilebilir.

(3.33) nolu eşitliğin çözümü için eşitliğin logaritması alınarak,

$$\ln y = \theta_1 + \theta_2 t^2 + \varepsilon \quad (3.35)$$

parametreleri bakımından doğrusal forma dönüştürülür, ve çözümü için bir önceki bölümde kullanılan yöntemler kullanılır.

$$y = f(x_1, \dots, x_m, \beta_1, \dots, \beta_p) + \varepsilon \quad (3.36)$$

şeklinde ifade edilen modelde f fonksiyonu x bağımsız değişkenlerin ve β katsayıların fonksiyonudur. Herhangi bir f fonksiyonun çözümü, fonksiyonun hataların karelerinin minimize edilmesiyle çözülebilir,

$$HK = \sum [y - f(x_1, \dots, x_m, \beta_1, \dots, \beta_p)]^2 \quad (3.37)$$

Bu tür çözümde sorun katsayıların sayısının, bağımsız değişkenlerden fazla olduğu $(p > m)$ veya fonksiyonun minimize edilmesinin doğrusal denklemlerle sağlanamadığı zamanlarda ortaya çıkar. Böyle durumlarda çözüm iterasyonlu arama işlemi ile elde edilir. [15]

İterasyonlu arama işleminde ilk adım parametrelerin ön değerini belirlemektir. Bu ilk değerlerle hataların kareleri hesaplanır ve bu değerde kabul edilebilir bir değişiklik olmayana kadar parametrelerin değeri değiştirilir.

3.3.Radyal Tabanlı Fonksiyon (RTF) Modelleri

Radyal tabanlı fonksiyonlar, 1980'li yılların sonlarına doğru yapay sinir ağlarında kullanımıyla ortaya çıkmıştır. [19] Özellikle birden fazla boyutta dağılmış data'lara sahip çok değişkenli modellerin yaklaşımında radyal tabanlı fonksiyon yaygın olarak kullanılmaktadır. [20]

Radyal tabanlı fonksiyonun gösterimi,

$$z(x) = \phi(\|x - \mu\|) \quad (3.38)$$

şeklinde olup, bu ifade de,

$x = n$ boyutlu vektörü

$\mu = n$ boyutlu radyal tabanlı fonksiyonun merkez vektörü

$\| \|$ = öklit uzaklığını

ϕ = radyal tabanlı baz fonksiyonu

ifade eder.

Model n adet merkeze sahip, n adet radial tabanlı fonksiyonun doğrusal birleşimi olarak yaratılır. Girişi x vektörü olan bir radyal tabanlı fonksiyonun çıkışı,

$$y(x) = \sum_{j=1}^n \beta_j z_j(x) \quad (3.39)$$

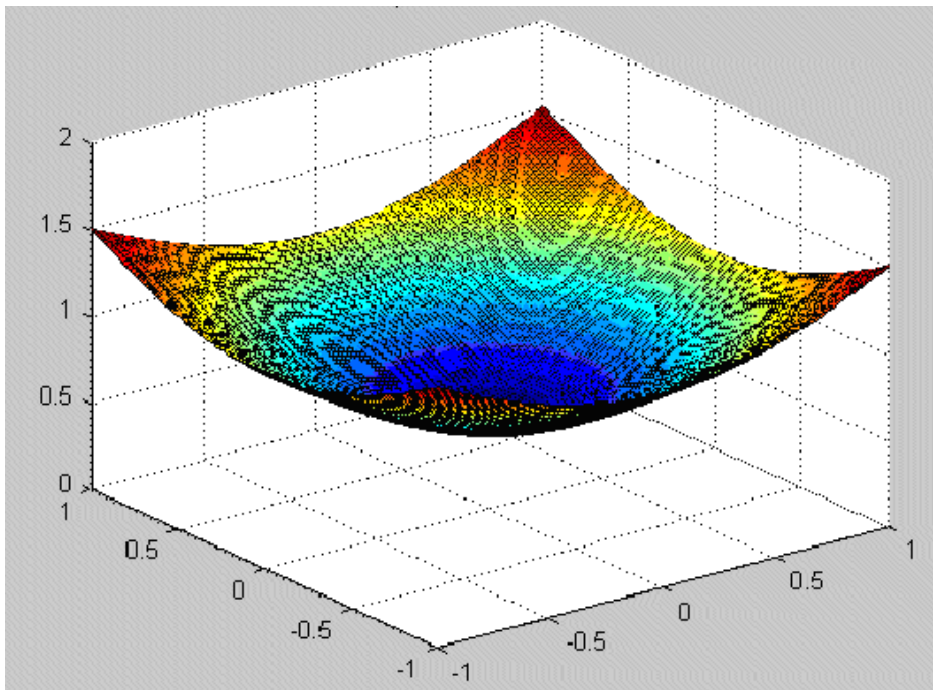
olarak bulunur.

Burada β_j , merkezi μ_j olan j 'inci radyal tabanlı fonksiyonun ağırlığını ve $z_j = \phi(\|x - \mu_j\|)$ göstermektedir. Radyal tabanlı fonksiyonun genel ifadesi olarak gösterilen ϕ için çeşitli fonksiyonlar bulunmaktadır. Bu tür fonksiyonlar için verinin μ merkezi etrafında dağılımını belirtilen σ genişlik parametresi ve modelin uyum aşımı (overfit) olmasını önlemek için büyük ağırlıkların kullanımını engelleyen λ regülasyon parametresi kullanılmaktadır. [21]

Radyal tabanlı baz fonksiyonlara örnek olarak aşağıdakiler gösterilebilir;

- a. Gauss merkezci RTF
- b. İnce tabakalı oluk RTF
- c. Lojistik baz RTF
- d. Çoklu kuadratik RTF
- e. Karşılıklı çoklu kuadratik RTF

Bu tez çalışmasında yukarıda isimleri belirtilen radyal tabanlı fonksiyonlardan çoklu kuadratik RTF seçilmiştir. Bunun sebebi ise bu fonksiyonun dağınık datanın modellenmesinde en yaygın olarak kullanılmasıdır. [21]



Şekil 3.1. Çoklu kuadratik RTF profili [21]

Çoklu kuadratik RTF'in yüzey profili Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

3.3.1. Karma radyal tabanlı fonksiyon

Karma radyal tabanlı fonksiyonlar, polinom gibi standart doğrusal fonksiyon ile radyal tabanlı fonksiyonun aynı anda kullanımına imkan sağlarlar. Böylelikle modelin, örnek olarak kübik olma ihtimali gibi bir ön bilgisi ile RTF'nin parametrik olmayan yapısını birarada kullanılma imkanı ortaya çıkar. [21]

Modelleme esnasında ilk adım olarak, mevcut veri önce karma fonksiyonun doğrusal kısmına uydurulur. İkinci adımda ise, uydurulan eğrinin dışında kalan artık veriler radyal tabanlı fonksiyona uydurulur. [21]

BÖLÜM 4. OPTİMİZASYON

Mühendislik uygulamalarında amaç eldeki imkanlarla amaca uygun en iyi dizaynı gerçekleştirmektir. Dizayn esnasında kullanılan bazı parametrelerin minimum veya maksimumunu bulmak gerekebilir. Bir tasarımın kabul edilebilmesi için aynı anda bazı kısıtlamaları da sağlaması gerekmektedir. Dizayn esnasında kısıtlamaları da sağlayan çözüme optimum denmekte olup, bu optimum çözümünün bulunma işlemine de optimizasyon denir. [22]

4.1. Kısıtlamasız Optimizasyon

Kısıtlamasız optimizasyon genel olarak x dizayn değişkenlerine sahip $f(x)$ amaç fonksiyonunun minimize edilmesidir.

Aynı zamanda amaç fonksiyonunun maksimumunun bulunmasını gerektiren optimizasyon problemleri de mevcut olup, bu tür problemler $f(x)$ fonksiyonunun negatifinin ($-f(x)$) minimize edilmesi olarak ele alınabilirler. [23]

4.1.1. Optimum çözümün varlığı ve tekliği

Kısıtlamasız optimizasyon için kullanılan $f(x)$ fonksiyonunun minimum olması için fonksiyonun gradientinin sıfır olması gerekmektedir.

$f(x)$ fonksiyonunun gradienti ise,

$$\nabla f(x) = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \\ \frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \\ \dots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} f(x) \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

yukarıda gösterilmiştir. Fakat bu şart gerek şart olup, optimum çözüm için yeterli değildir.

Tek değişkenli bir fonksiyonun minimum olması için, fonksiyonun o değişkene bağlı ikinci dereceden türevinin de pozitif değer olması gerekmektedir. [22]

Çok değişkenli bir fonksiyonda ise bu tanım Hessian matrisinin pozitif tanımlı olmasına karşılık gelir. Hessian matris dizayn değişkenlerine göre fonksiyonun ikinci dereceden kısmi türevleri olup aşağıda gösterilmiştir;

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Pozitif tanımlı ifadesiyle bir matrisin pozitif özdeğerlere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Eğer gradient sıfır ve Hessian matrisi pozitif tanımlı ise bu, dizaynın en azından göreceli minimum olmasını garanti eder. Global minimumun sağlanması için dizayn değişkeni x 'in tüm değerleri için Hessian matrisin pozitif tanımlı olması gerekmekte olup, pratik uygulamalarda bu husus çok nadir olarak gösterilebilir.

4.2. Tek Boyutlu Arama Yöntemleri

Bir fonksiyonun minimum değeri, o fonksiyonun x bağımsız değişkene göre türevinin yani uydurulan eğrinin eğiminin sıfır olduğu yerdir.

Optimizasyonda yapılacak kabullerden ilki fonksiyonun unimodal olmasıdır, yani arama yapılan bölgede fonksiyona ait sadece bir minimum noktasının olmasıdır. Yapılacak ikinci kabul ise fonksiyonun sürekli olup, aynı zamanda birinci ve ikinci dereceden türevlerinin de sürekli olduğudur. [22]

Tek boyutlu veya bağımsız değişkenli arama yöntemlerinde belli bir $[x_i, x_s]$ aralığında arama yapılmakta olup, bu yöntemler şunlardır;

- a. Bölge eleme (golden section) yöntemi
- b. Newton's yöntemi
- c. Secant yöntemi

4.3. N Boyutlu Arama Yöntemleri

Birçok mühendislik uygulamasında n adet x bağımsız değişkene sahip $f(x)$ fonksiyonun minimumun bulunması gerekmektedir. Bir önceki bölümde ifade edildiği üzere, bir fonksiyonun minimumunun elde edilmesi için,

$$\nabla f(x) = 0 \quad (4.3)$$

olmalıdır. Fakat pratikte (4.3) nolu eşitliğin çözümü her zaman için kolay olmadığından, $f(x)$ fonksiyonunun minimumu sayısal arama metodlarıyla yapılmaktadır.

4.3.1. Genel optimizasyon yaklaşımı

Genel optimizasyon algoritması,

$$x^q = x^{q-1} + \alpha_q^* s_q \quad (4.4)$$

olarak gösterilmekte ve

q = iterasyon sayısı

x = dizayn değişkenlerin vektörü

s^q = arama yönü

α_q^* = x yönündeki değişimi gösteren skaler çarpımı

ifade etmektedir.

(4.4) nolu eşitlikte temel olarak iki aşama vardır. Birincisi s^q arama yönünün belirlenmesi, ikincisi ise s^q yönünde $f(x)$ fonksiyonun mümkün olduğunca minimize edecek α_q^* bulunmasıdır. s^q bir kere bulunduktan sonra, optimizasyon problemi tek değişkenli (α) bir boyutlu hale gelir. Bunun için bu bölümde s^q 'nın seçimi üzerinde durulacak olup, bu seçimde kullanılan yöntemlerden biri olan ve bu çalışmada kullanılan en dik düşüm (steepest descent) yöntemi incelenecektir.

4.3.1.1. En dik düşüm yöntemi

$f(x)$ fonksiyonunun x noktasındaki gradienti eğer sıfır vektör değilse, eğriden geçen teğet vektöre diktir. Bundan dolayı bu noktada $f(x)$ fonksiyonun değişim oranı maksimumdur. Diğer bir ifadeyle, $f(x)$ fonksiyonu gradient yönünde diğer yönler göre daha çabuk yükselir. [23]

$-\nabla f(x)$ ise $f(x)$ fonksiyonun maksimum düşüş yaşadığı yönü göstermekte olup, bu özelliğinden dolayı en dik düşüm adını alır.

Bu yöntemde, arama yönü olarak negatif gradient kullanıldığı için, (4.4) nolu denklemden,

$$x^q = x^{q-1} + \alpha_q^* (-\nabla f(x)) \quad (4.5)$$

yani,

$$x^q = x^{q-1} - \alpha_q^* \nabla f(x) \quad (4.6)$$

elde edilir.

Burada görüldüğü üzere, her iterasyonda dik adımlar atılmakta olup, aramanın durdurulması için önceden belirlenen ε toleransıya ya

$$|f(x^q) - f(x^{q-1})| < \varepsilon \quad (4.7)$$

ya da

$$|x^q - x^{q-1}| < \varepsilon \tag{4.8.}$$

kriteri kullanılabilir.

BÖLÜM 5. İKİ AŞAMALI MOTOR HARİTALAMA

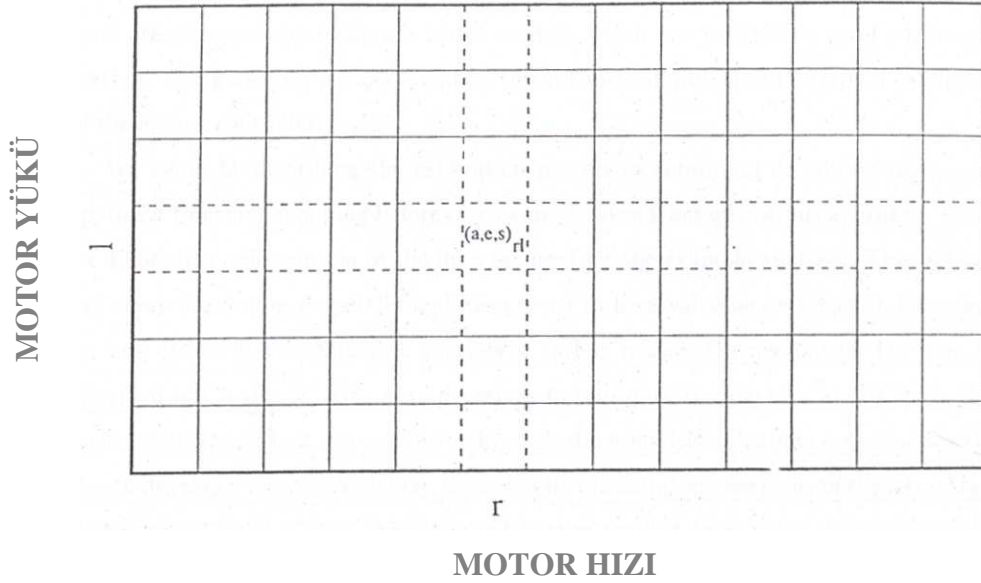
Motor haritalama motor davranışının ayarlanabilir parametrelerin fonksiyonu olarak modellenmesidir ve amacı değişen herhangi bir motor parametresine karşılık diğer motor parametrelerin alacağı değerlerin bulunmasıdır. Örneğin motorun artan tork ve devrine karşılık gelen yakıt sarfiyatındaki veya karbon monoksit emisyonundaki değişimin bulunmasıdır.

Motor performans parametreleri cinsinden elde edilen üç boyutlu motor haritaları, motor hakkında doğruluğu yüksek bir çok bilgi verirler. [24]

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. [25] Motor haritalamanın temel kullanım yeri, motorun bu tür belli limitler ve kıstaslar dahilinde çalışmasını sağlayacak elektronik kontrol ünitesinin kullanacağı motor parametrelerinden oluşan tablonun hazırlanması ve kalibre edilmesidir. Bu tür motor kontrolü hafızaya dayalı kontrol yaklaşımı olup, buna alternatif ise adaptif geri beslemeli kontrol sistemidir.

Hafızaya dayalı ve adaptif geri beslemeli kontrol sistemleri mukayese edildiğinde, hafızaya dayalı kontrol sisteminin temel avantajının motor çalıştığı anda motor çıkış parametrelerin ölçülme ihtiyacının olmamasıdır. Fakat motorun imalatı esnasındaki olabilecek farklılıkları ve motorun yaşlanmasıyla birlikte kontrol sisteminin güncellenmemesi de hafızaya dayalı kontrol sisteminin dezavantajlarıdır. [4]

Elektronik kontrol ünitesinin temeli motor hızı ve yükü ile indekslenmiş iki boyutlu bir dizidir. Burada yük ile ifade edilen husus motora giren hava miktarıdır. ECU'da kullanılan tablonun hücreleri üç kalibrasyon parametresinin değerlerini içermekte zamanıdır. Bu parametrelerin değerleri ECU tarafından Şekil 5.1'de gösterildiği gibi her motor hızı ve yükü için ayarlanır.



Şekil 5.1. Teorik ECU tablosu [25]

ECU'nun kalibrasyonu, bu tablonun ayrıntılı olarak doldurulmasıdır. Optimizasyon problemi bazı kriter ve kısıtları gözeterek en iyi kalibrasyonu bulmaktır. Motor haritalama modellerine bu kriterlere göre kalibrasyonu değerlendirme aşamasında ihtiyaç duyulur.

Modele dayalı kalibrasyonun başlıca avantajları ilave test yapmadan motorun bir parametresinin değişiminin diğer parametrelere etkisinin gözlenebilmesi ve kalibrasyonu yapan mühendis tarafından bu etkileşimin çok boyutlu uzayda görsel olarak izlenebilmesidir. [5] Burada unutulmaması gereken husus, kalibrasyonu yapan mühendisin hem emisyon kriterlerini sağlayacak hem de yakıt sarfiyatını minimize edecek yüzlerce değeri hesaplama esnasında yaşayacağı zorluktur. [26]

Motor haritalamada kullanılan klasik yaklaşım beraberinde bazı problemler getirmektedir. Bunların başlıcaları modelleme için yüksek dereceden polinomların kullanılmasının uydurulan modelin yorumlanmasında zorluklara neden olması [4] ve de yaratılan modellerin hem her bir test içinde mevcut olan değişimlerin ve hem de testler arasındaki değişimlerin doğal sonucu olan hiyerarşik hatayı dikkate almamasıdır. [3]

Bir başka problem ise testin, zaman ve fiyatını artıracak şekilde parametre sayılarının fazla olmasıyla birlikte ilave parametrelerin nasıl dahil edileceğini öngörmek zor olduğu için modelin genişletilmesinin kolay olmamasıdır. [3] Bir diğer sıkıntı ise klasik yaklaşımda mühendislik öngörüsünün ve girdisinin çok az olmasıdır. [26, 27]

Yukarıda bahsedilen zorluklar motor haritalamada verilerin toplanmasındaki yapıdan dolayı iki aşamalı modelleme adlandırılan yaklaşımı başlatmıştır. İki aşamalı modellemenin ilk aşaması çıkışlar ve kam açısı (püskürtme avansı) arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için her testte eğrilerin uydurulmasını içerirken, ikinci aşama bu eğrilerin motor parametrelerinin fonksiyonu olarak değişiminin modellenmesini içerir.

Bu yeni yaklaşım modelin hassasiyetini arttırmakta, verideki değişimi dikkate almakta ve modele uymayan noktaların hemen belirlenmesine olanak sağlamaktadır. [28, 29]

Verilerin toplanması sırasında her bir kam açısı yelpazesindeki deneysel belirsizlik temel olarak değişik kam açısı yelpazesindeki farklı çalışma noktalarındaki belirsizlikten farklıdır. İki aşamalı modelleme bu farkı dikkate almakta ve daha hassas ve doğru modellerin bulunmasını sağlamaktadır. [30]

İki aşamalı modellemenin avantajlarından bir tanesi de modelin uygunluğunun basit grafiklerle kontrol edilebilmesi ve iki aşamalı modellemenin gereği olarak modelin uygunluğunun her iki aşamada da test edilebilmesidir. [3]

5.1. Kalibrasyon İşlemi

Kalibrasyon işlemi veri toplama, veri eleme, model uydurma ve kalibrasyon olmak üzere dört basamaktan meydana gelir. Bu basamaklar kısaca aşağıda tarif edilmiştir.

5.1.1. Veri toplama

Veriler bir mühendisin denetimi altında dinamometreden toplanır. Operatör, her gözlem kaydedilmeden önce motorun dengeli bir şekilde çalışmasına izin verir ve eğer motor kararlı bir şekilde çalışıyor ise veri noktalarını kaydeder.

5.1.2. Veri eleme

Veriler toplandıktan sonra, modelleme esnasında kullanılmasında sakınca olan verilerin tespit edilerek, bu verilerin test kümesinden çıkartılmasıdır.

5.1.3. Model uydurma

Veri toplandıktan sonra veriye polinom regresyon modelleri uydurulur. Bu modeller ECU'nun kalibrasyonunu belirlemek için optimizasyon işleminde kullanılırlar. Bu regresyon metodolojisi Blumberg ve Mencik tarafından ortaya konmuştur. [25]

5.1.4. Kalibrasyon

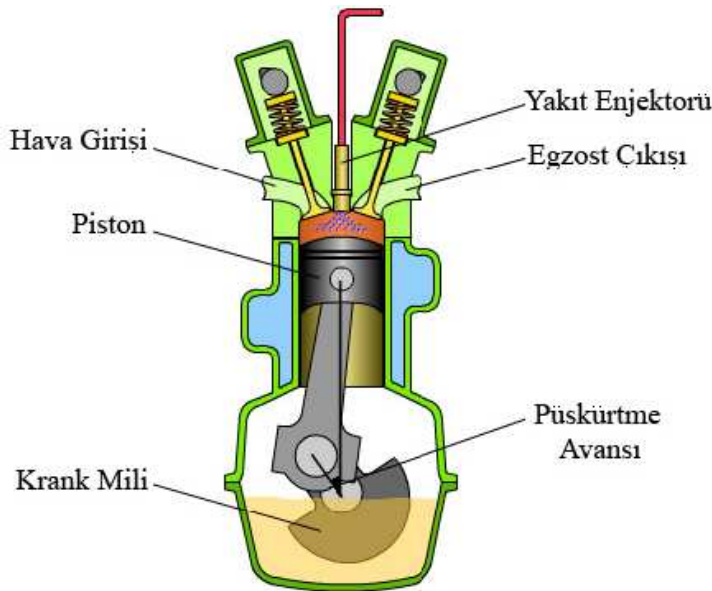
Elde edilen modelin kullanılmasıyla motor parametrelerinin bazı kıstaslara göre optimize edilmesidir. Örnek olarak minimum yakıt sarfiyatını veren kam açısı değerlerinin bulunması verilebilir.

5.2. İki Aşamalı Modelleme

İki aşamalı modellemede kullanılacak verilerin toplanması esnasında yapılan işlem, motorun belli tork ve devirde sabit tutularak kam açısının minimum değerden maksimum değere kadar değiştirilmesi ve bu değişiklikler sırasında da istenen

parametrelerin kaydedilmesidir. Daha sonra bu işlemin değişik motor tork ve devir değerlerinin kombinasyonları için yapılması gerekmektedir.

Burada kam açısı ile pistonun silindir içinde üst ölü noktaya olan mesafesi ifade edilmekte olup, yanma odası kesiti ve kam açısı (püskürtme avansı) Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Kam açısı pozitif veya negatif değerler alabilmektedir. Kam açısının pozitif değer olması silindir içine yakıtın pistonun üst ölü noktadan alt ölü noktaya hareket ettiğinde püskürtüldüğünü, kam açısının negatif değerde olması ise yakıt püskürtmenin pistonun alt ölü noktadan üst ölü noktaya hareketi esnasında olduğunu göstermektedir. Kam yelpazesi ifadesi ile de kam açısının minimum değerden maksimum değere kadar olan değişimin tümü kastedilmektedir.



Şekil 5.2. Yanma odası kesiti ve kam açısı [31]

Bu tür veri toplanması esnasında iki çeşit değişim söz konusudur. Birinci değişim sabit tork ve devirde yani her bir test içindeki kam açısının değişimidir ve bu değişim lokal olarak adlandırılmaktadır. İkinci değişim ise testler arasındaki yani tork ve devrin değişiminden kaynaklanan değişim olup buna da global denmektedir. Modelleme esnasında kullanılacak verilerin bu tür kaydedilmesinden dolayı, bu yaklaşıma iki aşamalı modelleme denilmektedir.

İki aşamalı modelleme esnasında birinci aşamada her bir test için lokal model ayrı ayrı bulunmakta ve bu lokal modellerin kullanımıyla bir adet iki aşamalı global model elde edilmektedir. Global modelin elde edilmesinden sonra motorun değişen parametrelerine karşılık çıkış parametreleri hesaplanabilmektedir. [21]

İki aşamalı modellemenin matematiksel olarak ifadesinde birinci aşama;

$$y_i^{(j)} = f_i(s_i^{(j)}; \theta_i) + \varepsilon_i^{(j)} \quad (5.1)$$

olup, burada

i : her bir bağımsız test

j : her bir i test içindeki veridir. 1'den m_i 'ye kadar değişmekte olup, (m_i) i 'inci kam yelpazesindeki gözlem sayısıdır.

$s_i^{(j)}$: kam açısının minimumdan maksimuma kadar olan değişimidir

θ_i : her bir test içindeki parametreler

$\varepsilon_i^{(j)}$: hata matrisi

Modelin hatasının sıfır ortalamalı normal dağılıma ve σ^2 varyansa sahip olduğu kabul edilmiş olup, aşağıda gösterildiği şekilde ifade edilmiştir

$$\varepsilon_i \sim N_{m_i}(0, \sigma_i^2) \quad (5.2)$$

Her bir lokal modele ayrı ayrı eğri uydurulduktan sonra, mühendislik açısından daha öğretici olduğu için cevap özelliklerini incelemek gerekmektedir. Global modelin yaratılmasında kullanılan cevap özellikleri matris formunda aşağıda belirtilmiştir;

$$p_i = X_i \alpha + \gamma_i \quad (5.3)$$

Bu ifadede,

p_i : cevap özelliği vektörü

X_i : i 'inci kam yelpazesi için motor parametrelerin değeri

α : global parametrelerin katsayıların vektörü

γ_i : varyans matrisi Γ_i ve sıfır ortalamalı hata vektörü olup, hata vektörü (5.4) nolu eşitlikte gösterildiği gibi kabul edilmektedir.

$$\gamma_i \sim N_r(0, \Gamma_i) \quad (5.4)$$

Burada görüldüğü üzere ε_i ve γ_i olmak üzere iki farklı değişim kaynağı vardır. ε_i her gözlem toplanırken oluşan hatayı temsil eder ve ölçüm hatası ile sistemdeki küçük karışıklıkları yansıtır. Aynı iki kam açısı yelpazesi taraması eğer farklı günlerde toplanmışsa sıcaklık, nem ve basınç gibi şartların farklılıklarından dolayı cevap özellikleri de farklı olur. Sıcaklık, nem ve basınç gibi şartların bir kam açısı yelpazesi taramasının toplanmasında geçen kısa sürede sabit kalması beklenirken, motor haritalamanın tamamının toplanması için geçen sürede değişen büyüklüklerdir. Bu nedenle, bu kopyalama hatası olarak düşünülebilecek olup, veri içindeki ikinci tip bir değişimi ifade eder. [25]

Bu tür lokal ve global modellerin katsayılarının hesaplanmasında kullanılan yöntem en az kareler yöntemidir. Bu metotta hataların karelerinin toplamalarının minimize edileceği şekilde ' α ' değerleri seçilir. (5.3) nolu denklemin çözümü için kullanılacak en az kareler yöntemi Bölüm.3'de açıklanmıştır.

5.3. Uygun Modelin Seçiminde Kullanılan İstatistikler

Modelleme çalışmasının en önemli aşaması test verilerine en uygun modelin seçilmesidir. Bunun yapılabilmesi için değişik model tiplerinin denenmesi ve bu çalışmada kullanılan MDKY tarafından her bir model tipi için ayrı ayrı verilen parametrelerin değerlendirilmesi gerekmektedir. MDKY tarafından hesaplanan ve kullanılan parametreler lokal hataların karelerin ortalamasının karekökü (RMSE), iki aşamalı RMSE, ve öngürülen hataların karelerin karekökü (PRESS RMSE)'dür.

Elde edilen bir modelin RMSE değeri aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanır;

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{v}} \quad (5.5)$$

Bu eşitlikte,

y_i : test esnasında gözlemlenen değer

\hat{y}_i : modelleme sonucunda öngörülen değer

v : gözlem sayısının parametre sayısından farkıdır.

n adet veri kullanılan bir modelde, model $n - 1$ adet veri kullanılarak elde edilir ve kullanılmayan verinin değeri bu modelleme ile hesaplanır. Elde edilen bu değerle gerçek değer arasındaki farka öngörü hatası denir. Bu hataların karelerin toplamı PRESS olarak adlandırılır. PRESS değerinin n sayısına bölümü de PRESS RMSE değerini verir.

RMSE modelin ne kadar uydurulduğunu değerlendirilmesinde kullanılan temel parametredir. RMSE sifıra yaklaştıkça modelin uygunluğu da artar. Diğer bir yandan sadece RMSE parametrenin değerlendirilmesi uyum aşımı (overfit) olma problemini göz ardı etmek demektir. Onun için modeli değerlendirirken aynı zamanda PRESS RMSE parametresi de dikkate alınması gerekmektedir. Eğer PRESS RMSE değeri RMSE değerinden çok büyükse, ortada bir uyum aşımı problemi var demektir. [21]

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. Deney Motorunun Tanıtılması

Deney esnasında MTU firması tarafından 1973 yılında üretilen MB 838 CaM 500 model 4 zamanlı dizel motor kullanılmış olup bu motora ait teknik özellikler Tablo 6.1’de sunulmuştur.

Tablo 6.1. Deney motorunun teknik özellikleri

Deney Motorunun Teknik Özellikleri	
Motor Boyutları	1562 x 1409 x 1102 mm
Motor Gücü (tam yükte)	2200 dev./dak. , 610 KW (830 HP)
Maksimum Tork	1800 dev./dak. , 2750 Nm
Silindir Adedi	10
Silindir İç Çapı	165 mm.
Strok	175 mm.
Toplam Silindir Hacmi	37.4 dm^3
Transmisyon olmadan fan gücü çıkartılmış rölanti devri	850 dev./dak. \pm %2.5
Maksimum Tam Yüklü Devir	2200 dev./ dak.
Maksimum Tam Yüksüz Devir	2400 dev./ dak.
Ateşleme Sırası	1-9-4-8-3-7-2-10-5-6

6.2. Deney Yapılan Atölyenin Tanıtılması

Bu çalışmada kullanılan verilerin elde edilmesi esnasında yapılan tüm testler motor-transmisyon atölyesindeki test kabininde gerçekleştirilmiştir.

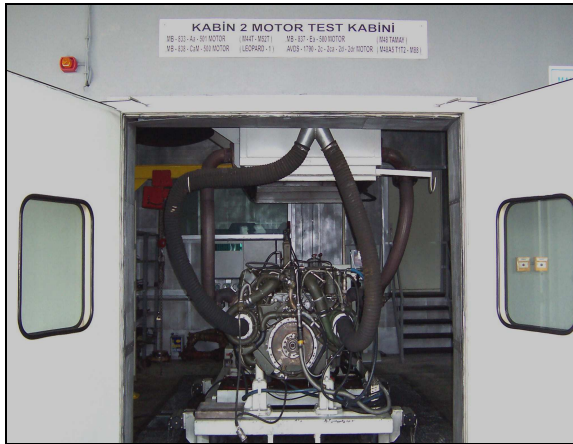
Motor-transmisyon atölyesi bu tür testlerin yapılabilmesi için aşağıda belirtilen alt ünite ve sistemlerle donatılmıştır;

- a. Motor test kabini
- b. Test arabası
- c. Dinamometre
- d. Kumanda konsolu
- e. Yağlama yağı sistemi
- f. Soğutma suyu sistemi
- g. Yakıt sistemi
- h. Havalandırma ve egzost sistemi

6.2.1. Motor test kabini

Motor test kabini, motora 28 adet farklı test uygulama kapasitesine sahip olup, her testte motorun çalıştırılacağı devir, motora uygulanacak tork ve dolayısıyla motordan alınacak güç programlanabilmektedir. Bu esnada motorun özgül yakıt tüketimi ise otomatik olarak ölçülür

Test sırasında operator motora ait devir, güç, tork gibi ölçümlerin yanında, motor ve test düzeneği üzerinde çeşitli sıcaklık ve basınç değerlerini de tek bir ekrandan rahatça izleyebilmektedir.



Şekil 6.1.Motor test kabini

Motorun test edilmesi esnasında ölçüm değerlerinin programlanan değerleri aşması halinde operatör paneli üzerindeki renkli uyarılar vasıtasıyla operatör ikaz edilir. Bu değerlerin motora zarar vereceği değerlendirildiğinde operatör tarafından ya motor durdurulur ya da teste ara verilerek motor rölanti devrine çekilir.

6.2.2. Test arabası

Motorun test kabini içine alınması ve dinamometreye bağlanması test arabası vasıtasıyla yapılmaktadır. Teste başlamadan önce test konsolu pnömatik frenlerle sabitlenir ve motora yakıt, tatlı su ve yağ sağlayan kaplin irtibatlanır.

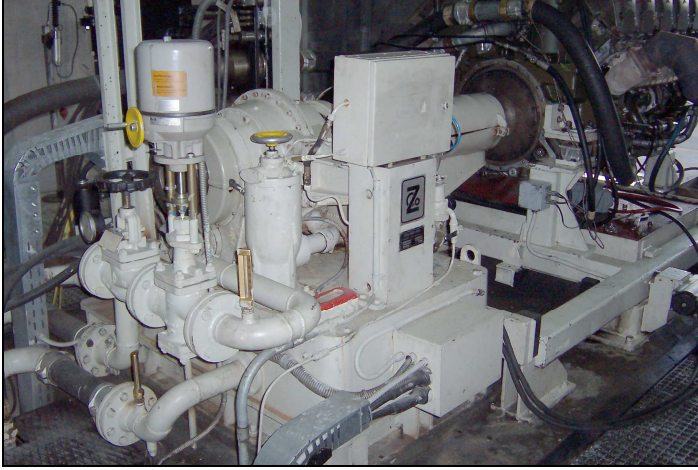
6.2.3. Dinamometre

Dinamometre, motorun üzerine yük bindirildiğindeki performansını ölçmek amacıyla kullanılan bir su türbünü olup teknik özellikleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Dinamometrenin teknik özellikleri

Markası-İmalat Yılı	ZÖLLNER KIEL-1987 (Almanya)
Maksimum Gücü	$P_{max}=880 \text{ kW}$ (1180 BG)
Maksimum Devri	$N_{max}= 4000 \text{ dev/dak}$
Maksimum Momenti	$T_{max}=3819,6 \text{ Nm}$
Maksimum Güçte Su Debisi (40°C de)	$Q=18.4 \text{ m}^3/\text{h}$

Test yapılacak motor ile dinamometre Şekil 6.2’de gösterildiği üzere birbirlerine mekanik olarak bir şaft vasıtasıyla bağlanmaktadır. Test esnasında meydana gelen titreşimlerden motor ve dinamometrenin etkilenmesini azaltmak için Şekil 6.3’de görüldüğü gibi motor ve dinamometrenin üzerinde bulunduğu beton kısım çelik yaylar üzerine konulmuştur.



Şekil 6.2. Motor ve dinamometrenin irtibatı



Şekil 6.3. Deney düzeneğinin altında bulunan çelik yaylar

6.2.4. Kumanda konsolu

Kumanda konsolu, kabin içindeki personelin teste müdahale etmesine izin veren kabin kumanda konsolu ve ana kumanda konsolu olmak üzere iki kısımdan oluşur. Kabin kumanda konsolu ve ana kumanda konsolu sırasıyla Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de gösterilmiştir.

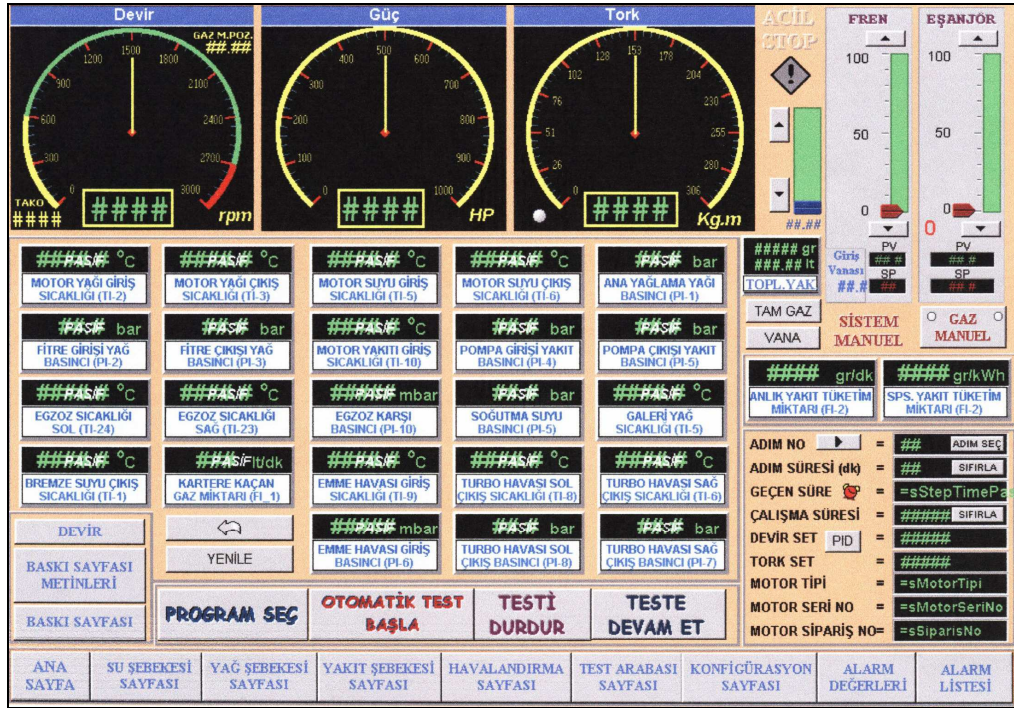


Şekil 6.4. Kabin kumanda konsolu



Şekil 6.5. Ana kumanda konsolu

Kumanda konsolunda, Windows 98 işletim sistemi ile kullanılan endüstriyel otomasyon yazılımı “CITECT 5[©]” kullanılmakta olup, ekran üzerinden ve klavyeden veri girişine imkan verir. Gelişmiş grafikleme özelliklerine sahip bu sistem, test sonucunda elde edilen raporlar için word ve excel programlarından yararlanmaya imkan sağlamaktadır. Kumanda konsolunda test esnasında görülen kumanda ve kontrol ekranı Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Kumanda konsol ekranı

6.2.5. Yağlama yağı ünitesi

Yağlama yağı ünitesinin kapasitesi yaklaşık 3800 litre olup, bu ünite testlerde kullanılan motor yağının depolanmasını ve yağlama işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Yağlama yağı ünitesi temiz yağ deposu, kirli yağ deposu, ön yağlama deposu, yağ seviye göstergeleri, basınç göstergeleri ve yağ pompaları gibi alt ünitelerden meydana gelmektedir.

Testi yapılan motor için kullanılan motor yağı SAE 15W/40'dır. SAE 15W/40 özelliğindeki bir yağın 100°C'deki kalınlığı SAE 40 özelliğindeki bir yağ ile aynıdır. Ancak bu yağ, SAE 40 özelliğindeki bir yağın aşırı derecede kalınlaştığı -15°C'deki akışkanlığını koruyabilmektedir.

6.2.6. Soğutma suyu ünitesi

Tatlı su ünitesinin kapasitesi yaklaşık 20 ton olup, bu üniteden hem motorun soğutma suyu ihtiyacı hem de dinamometrenin su ihtiyacı karşılanmaktadır.

Motor soğutma suyunun içerisine hem %50 oranında antifiriz konmakta hem de sudaki kireçlenmeyi ve yosunlanmayı önleyici kimyasal madde ilave edilmektedir. Motorun soğutulması esnasında ısınan tatlı su, akış hızı bir vana yardımıyla kontrol edilebilen soğutma suyu kuleri vasıtasıyla soğutulur.

6.2.7. Yakıt ünitesi

Yakıt ünitesi, 3800 litre kapasitesinde servis tankı ve 10000 litre kapasitesindeki ana yakıt tankından meydana gelmekte olup, bahsekonu iki tank bir hat ile birbirine iştiraklidir.

Yakıt servis tankındaki yakıtın sıcaklığı, yakıt soğutma tankında uygun sıcaklığa soğutularak test kabini içinde bulunan motora gönderilir.

6.2.8. Hava ve egzoz sistemi

Test esnasında gerekli olan temiz hava kabin içinde bulunan havalandırma borularından elde edilir. Bu boruların bir ucu test yapılan motorun turbosarjerlerine, diğer ucu ise havanın içindeki partiküllerini tutmak için kullanılan filtrelelere bağlanır.

Egzoz sistemi ise, motor testinde meydana çıkan egzoz gazlarının dışarı atılması için kullanılan sistem olup, temel olarak motor susturucusu, egzoz gaz kanalı ve klepeden oluşmaktadır. Egzoz gaz kanalı üzerinde duman oranı ve emisyon ölçümü yapılması için kullanılan delikler mevcuttur.

Test sırasında kumanda konsolundan motor hava emiş hattı basınç ve sıcaklık değerleri ile birlikte sağ ve sol egzoz hattının sıcaklıkları ve basınç değerleri de görüntülenmektedir.

6.3. Deneyin Yapılışı

Bu çalışmanın amacı test esnasında kullanılan dizel motora ait minimum özgül yakıt sarfiyatını ve minimum CO emisyonunu veren kam açılarının bulunması ve bunun modellenmesi olması nedeniyle, farklı motor devir ve tork kombinasyonunda kam açıları değiştirilerek özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu ölçülmüştür.

Bu çalışmanın özelliği modelleme esnasında kullanılan verilerin Advisor ve Wave gibi simülasyon programlarından değil, gerçek anlamda test düzeneğine bağlı bir dizel motordan elde edilmiş olmasıdır.

Modellemede kullanılacak girişler lokal ve global olarak ikiye ayrılmakta olup, lokal giriş kam açısı ve global girişler ise motor devri ile torktur. Modelin iki çıkışı olacak olup, bunlarda özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonudur.

Modelleme esnasında kullanılacak giriş ve çıkışlar belli olduğu için verilerin alınacağı test düzeneği de ona göre ayarlanmıştır. Aslında bu seçimler arasından global girişlerin motor devri ve torku olarak tespit edilmesi bir nevi mecburiyet olmuştur. Çünkü testin yapıldığı fabrikanın sahip olduğu imkanlar sonucunda sadece bu iki parametreyi kam yelpazesi boyunca değiştirme ve sabit tutabilme imkanı olmuştur.

Testler boyunca tespit edilen bir diğer husus ise kam yelpazesi boyunca global girişlerin tüm ölçümler boyunca aynı değerlerde sabit tutulamadığı ve bu değerlerin küçük farklılıklara sahip olduğudur.

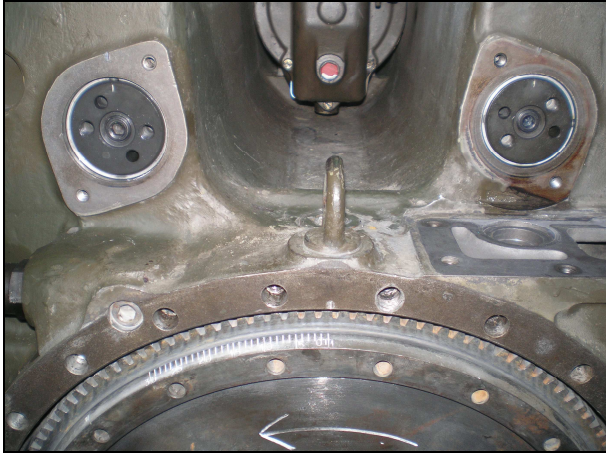
Lokal giriş olan kam açısı -10 ile 8 arasında 2 derecelik farklarla arttırılarak -10, -8, -6, -4, -2, 2, 4, 6, 8 kam açılarına sahip değişik 9 değerden oluşan bir kam yelpazesi olarak tespit edilmiştir. Bu kam yelpazesinin içine 0 ve 10 kam açılarını ilave edilemedi, çünkü motorun bu kam açılarında kararsız ve çok titreşimli çalıştığı tespit edilmiştir.

Bir kam yelpazesi için global girişler olan tork değeri 200 Nm'den 2000Nm'ye 200'er Nm artırılarak ve motor devri 850 rpm'den 1000 rpm'e ve devamında 2400 rpm'e 200'er rpm artırılarak elde edilmiştir.

Verilerin ölçülmesi esnasında dikkat edilen bir husus ise ölçümlerin başlamasından önce motorun kararlı çalışmaya başlamasının beklenmesidir. [32]

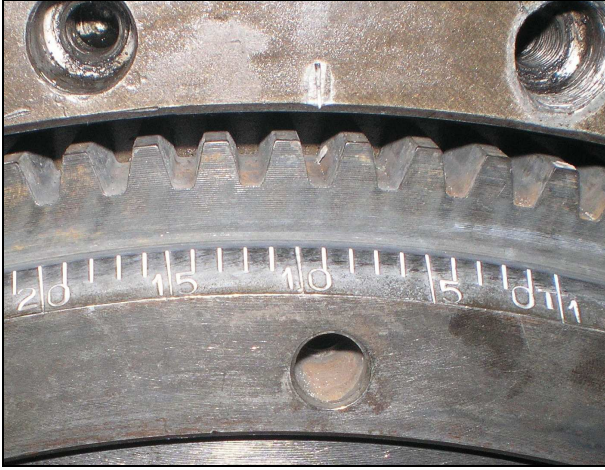
6.3.1. Kam açısının mekanik olarak değiştirilmesi

İlk olarak bir numaralı silindir üst ölü noktaya (ÜÖN) getirilir. Bu işlem motorun senteye getirilmesi şeklinde adlandırılmaktadır. Birinci silindir ÜÖN'da iken volan üzerindeki göstergenin 1 çizgisi, gövde üzerindeki çizgiye çakıştırılır. Aynı zamanda sağ ve sol kam millerin de senteye gelmesi gerekmekte olup, bu her iki kam milinin sente ayarı üzerlerindeki çizginin gövde üzerindeki çizgiye çakıştırılmasıyla sağlanır. Bu durum Şekil 6.7'de gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Motorun senteye getirilmesi

Motor senteye getirildikten sonra kam açısı volan üzerindeki ibreden istenilen değere ayarlanarak gövde üzerindeki ibreye çakıştırılır. Teste kullanılan motora ait fabrika çıkış değerlerinde kam açısı -10° olup, bu ayar Şekil 6.8'de görülmektedir.



Şekil 6.8. Kam açısının -10 dereceye ayarlanmış hali

Bir sonraki adım yakıt pompasının püskürtme anının ayarlanan kam açısına intibak ettirilmesidir. Bunun için Şekil 6.9'da görüldüğü üzere ilk olarak yakıt pompa elemanı sökülür.



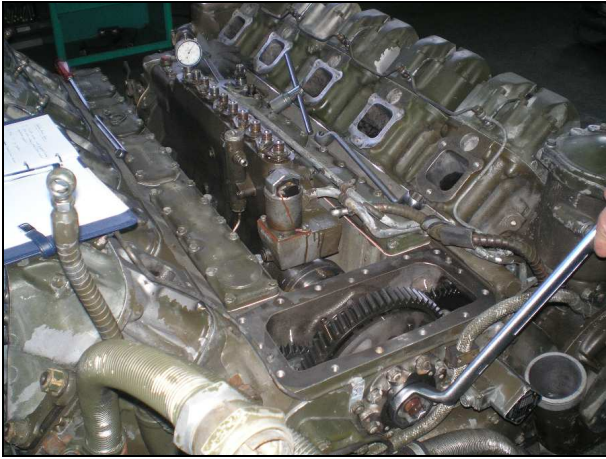
Şekil 6.9. Yakıt pompa elemanının sökülmesi

Daha sonra sökülen pompa elemanının yerine komparatör saati Şekil 6.10'daki gibi takılarak komparatör saati başlangıçta sıfır olacak şekilde ayarlanır.

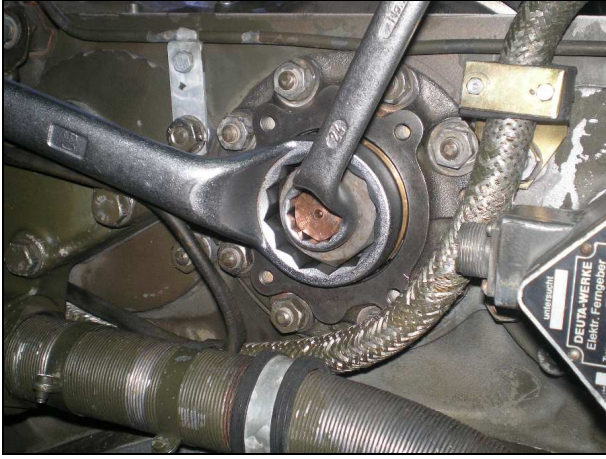


Şekil 6-10. Komparatör saatinin takılması

Şekil 6.11’de görüldüğü gibi, dişliye bağlı olan mil uygun bir anahtar yardımı ile saat yönünde çevrilerek pompa kam mili döndürülerek, komparatör saati yardımıyla pompa kamının pompa elemanına basma miktarı daha önce elde edilen tecrübelerle istinaden 2.08 mm olacak şekilde ayarlanır ve bu değer Şekil 6.12’de gösterilen civatanın sıkılmasıyla sabitlenerek kam açısı ayarı bitirilmiş olur.



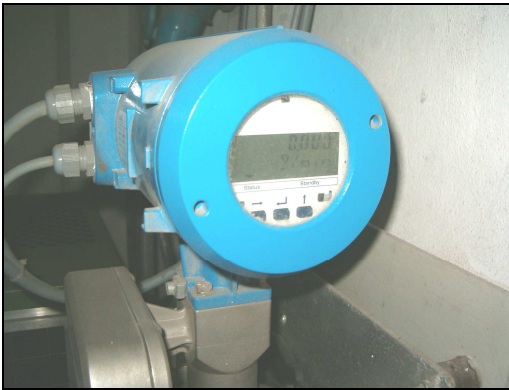
Şekil 6.11. Pompa kamının basma miktarının ayarlanması



Şekil 6.12. Pompa kam milinin sabitlemesi

6.3.2. Özgül yakıt sarfiyatının ölçülmesi

Yakıt sarfiyatı ölçüm cihazının markası Krohne, modeli ise MFS 7100 K 045 olup, ölçme hassasiyeti binde bir ve ölçme kapasitesi 3.0 kg/dk.'dır. Yakıt sarfiyatı ölçme cihazı Şekil 6.14'de gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Yakıt sarfiyatı ölçüm cihazı

6.3.3. Egzoz emisyonunun ölçülmesi

Şekil 6.14'te görülen egzoz emisyon ölçüm cihazının markası Madur, modeli GA-21 Plus olup ölçüm hassasiyeti %1'dir. Bu cihaz, ölçümde elektro-kimyasal algılayıcılar kullanılan çok fonksiyonlu bir gaz analiz cihazıdır. Testlerde CO algılayıcılar

vasıtasıyla ölçülmüş olup, ölçüm sonuçları ve değerleri hacim konsantrasyonu (*ppm*) olarak elde edilir.



Şekil 6.14. Egzoz emisyon ölçüm cihazı

Egzoz emisyon ölçümü, Şekil 6.15’de görüldüğü gibi motor egzoz borusundaki özel ölçüm deliğinden, gaz probunun sokulması ve yaklaşık 30 sn süre ile beklenmesi suretiyle yapılmıştır. Ölçüm sonunda cihaz ekranında ölçüm değerleri görülebilmekte olup, bu sonuçların aynı zamanda çıktıları da alınabilmektedir.



Şekil 6.15. Egzoz emisyonunun ölçülmesi

6.4.Deneysel Verinin Analizi

Deneysel veri elde edildikten sonra mutlaka analizi yapılmalıdır. Bu analiz kısa sözel bir ifade olabileceği gibi karışık istatistiksel işlemleri içeren bir analiz de olabilir.

Deney esnasında herhangi bir deneysel hata olup olmadığının kontrol edilmesi gereklidir. Yapılması gerekli olan bir diğer kontrol ise deney esnasında kullanılan ölçüm aletlerin hassaslıklarından kaynaklanabilecek belirsizliğin analizidir

Deneysel hatanın analizi sırasında kullanılabilecek yöntemlerden bir tanesi deney verilerin trendine uymayan verinin yani outliersın deney kümesinden ayıklanmasıdır. Bu işlem yapılırken çok dikkatli olunmalıdır. Çünkü ayıklanan veri belki de ölçüme ait özel bir karakteristiği temsil etmektedir. Bunun için deneysel bir hata olup olmadığından emin olmadıkça bu ayıklama işlemi yapılmamalıdır. [33] Bunun için bu çalışmada kullanılan veriler hakkında bu yönde bir analiz yapılmamıştır.

Deneysel veriler hakkında yapılabilecek bir diğer analiz ise varyans analizi gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak yapılabilen analizlerdir. Fakat bu çalışmada kullanılan bu veriler bu tür bir analize uygun değildir. Çünkü tüm ölçümler farklı motor devri, farklı tork ve farklı kam açılarında yapılmıştır.

Deneysel veriler hakkında yapılabilecek bir diğer analiz ise belirsizlik analizidir. Bu yöntem ölçüm aletlerine ait ölçüm hassasiyetlerinin hesaba katılması olup, bu çalışmada kullanılan ölçümlerin belirsizlikleri Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3. Yapılan ölçümlerin belirsizlikleri

Ölçümler	Birim	Belirsizlik
Motor devri	rpm	$\pm 1 \%$
Motor torku	Nm	$\pm 0.1 \%$
CO emisyonu	ppm	$\pm 1 \%$
Özgül yakıt tüketimi	g/kWh	$\pm 0.1 \%$

Belirsizlik analizinde eğer ölçümlerden bir tanesinin belirsizliği, diğerlerinden yaklaşık 5 kat daha büyükse, nihai ölçümün belirsizliğini belirleyen bu büyük değerdir. Bunun için diğer belirsizlikler ihmal edilebilir. [34]

Bir deney sırasında yapılan ölçümlerin belirsizlikleri biliniyorsa, bu belirsizliklerin nihai ölçüm sonucuna etkisi aşağıdaki eşitlikten bulunur. [34]

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte

$$R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (6.2)$$

$w_n = x_n$ için ölçüm sonucunun ölçüm belirsizliğiyle çarpımıdır.

Yapılan bu çalışmada ise ölçümlerle elde edilen modelin katsayıları motor devri ve torkun fonksiyonudur. Motor devri ölçüm belirsizliği motor torku ölçüm belirsizliğinin 10 katı olduğu için motor devri ölçüm belirsizliği hesaba katılmayacaktır.

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen çeşitli modeller motor devrinin minimum 1. dereceden ve maksimum 6. dereceden fonksiyonudur. (6.1) nolu denklem kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda motor devri ölçüm belirsizliğindeki %1'lik bir değerin, model katsayısının belirsizliğini minimum % 1 ve maksimum % 6 etkiler.

BÖLÜM 7. UYGULAMA

Bu çalışmada ilk olarak bir dizel motorun özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu cevapları MATLAB’de mevcut modele dayalı kalibrasyon yazılımı (MDKY) kullanılarak iki aşamalı ve tek aşamalı modelleme yaklaşımı ile modellenmiştir. Daha sonra ise istatikesl parametreler yardımıyla uygun olduğu değerlendirilen model kullanılarak minimum özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu verecek şekilde kam açısı (püskürtme avansı) kalibre edilmiştir.

Çalışmanın devamında ise MDKY yardımıyla yapılan işlemler için MATLAB’de hem modelleme hem de kalibrasyon aşamaları için kod yazılmıştır. Böylelikle MDKY tarafından kullanılan algoritma ve çalışma prensibi detaylı olarak incelenmiştir. Yazılan kodun doğru neticeler verdiği ise yazılan kod ile MDKY tarafından elde edilen değerlerin mukayesesi ile karar verilmiştir.

Çalışmada kullanılan MDKY iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama, modelleme kısmı (Model Browser), ikincisi ise kalibrasyonun kısmı (Calibration Generation (CAGE))’dır.

Yapılan test çalışmalarında kullanılan parametreler ve bu parametrelerin birimleri ile test sonucunda elde edilen minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 7.1’de gösterilmiştir. Modelleme esnasında bu parametreler kullanılmakta olup, modelleme sırasında kolaylık olması sebebiyle kam açısı, devir ve tork değerleri -1 ile 1 arasında normalize edilmektedir.

Tablo7.1. Model parametreleri ve değerleri

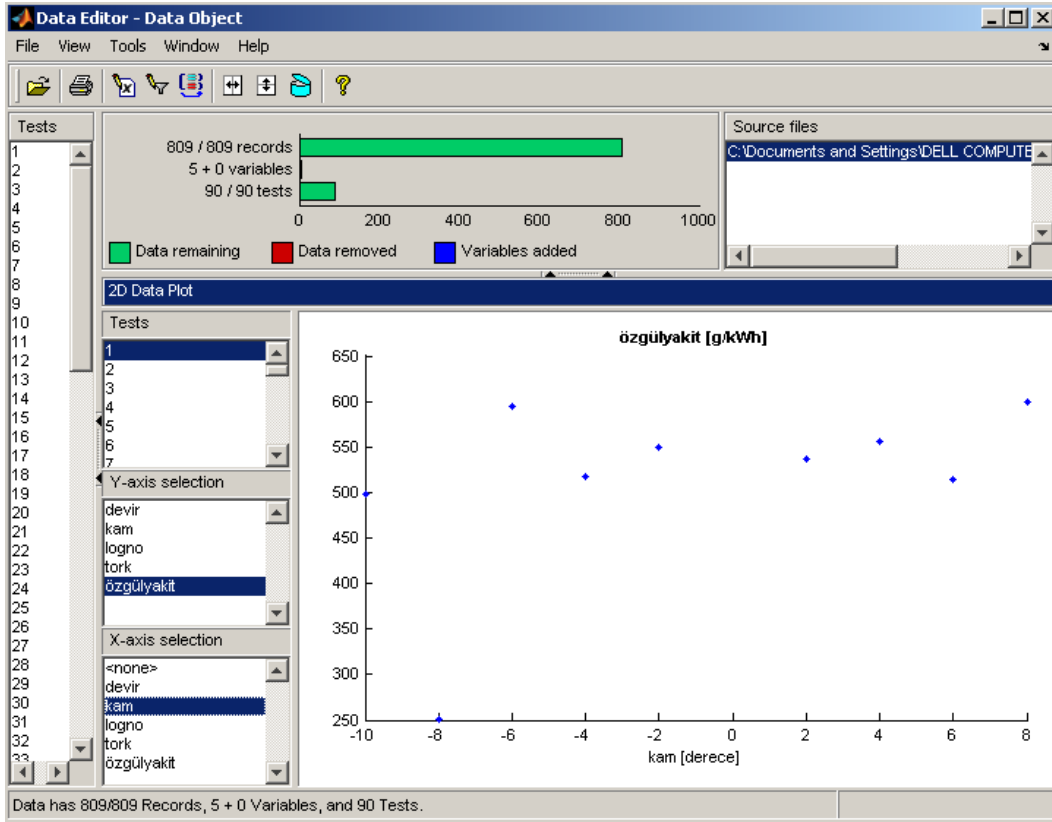
Parametre	Birim	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Kam açısı	derece	-10	8	-1.12	6.05
Devir	rpm	843	2419	1610	508
Tork	Nm	185.5	2036.4	1100	571
Özgöl yakıt tüketimi	g/kWh	124.2	1180.9	338	172
CO emisyonu	ppm	1	405	80.7	62.5

7.1. İki Aşamalı Model Yaklaşımıyla Özgöl Yakıt Sarfiyatının Modellenmesi

Modellemede kullanılacak verilerin toplanmasından sonra yapılması gereken bu verilerin MDKY’da kullanılabilmesi için excel dosyasına dönüştürülmesidir. Kullanılan dosyanın boyutlarına kumanda eden unsurlar tamamen modelin giriş ve çıkış parametreleriyle birlikte, yapılan test veya ölçüm adedidir. Bu çalışmada kullanılacak olan dosya 809 x 4 boyutunda olup, buradaki 4 sayısı motor torku, motor devri, CO emisyonu ve özgül yakıt sarfiyatı parametrelerine karşılık gelirken, 809 sayısı ise kam açıları değiştirilerek yapılan ölçüm sayısını ifade etmektedir.

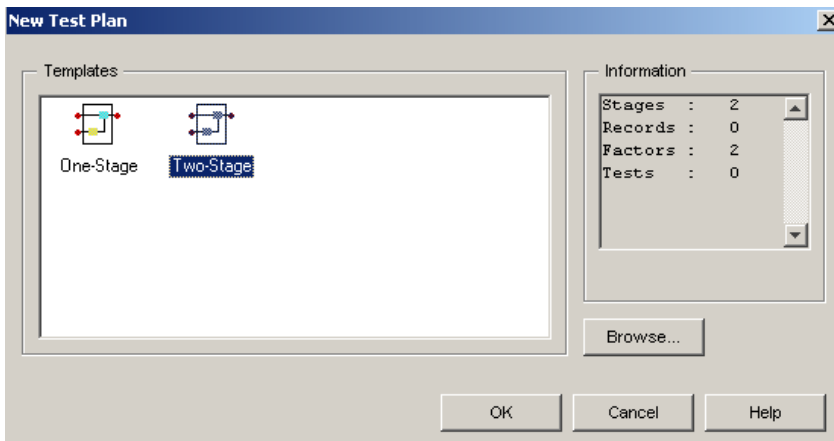
Modelleme için kullanılan dosyada 90 adet kam açısı yelpazesinin olması iki aşamalı modelleme esnasında 90 adet test grubunun veya lokal modelin olacağını belirtmektedir. Elde edilecek nihai veya global model de bu 90 adet lokal modelin katsayıların kullanımıyla elde edilecektir.

Modelleme için ilk yapılması gereken, kullanılacak verinin MDKY’a aktarımı olup, bu işlem veri düzenleyicisi (data editor) ile yapılmaktadır. Şekil 7.1’de iki aşamalı veri düzenleyicisinin ara yüzü gösterilmektedir. Bu şekilde 1 nolu kam açısı yelpazesini için x eksenindeki kam açılarına karşılık ölçülen özgül yakıt sarfiyatları y ekseninde mavi noktalar şeklinde görülmektedir.



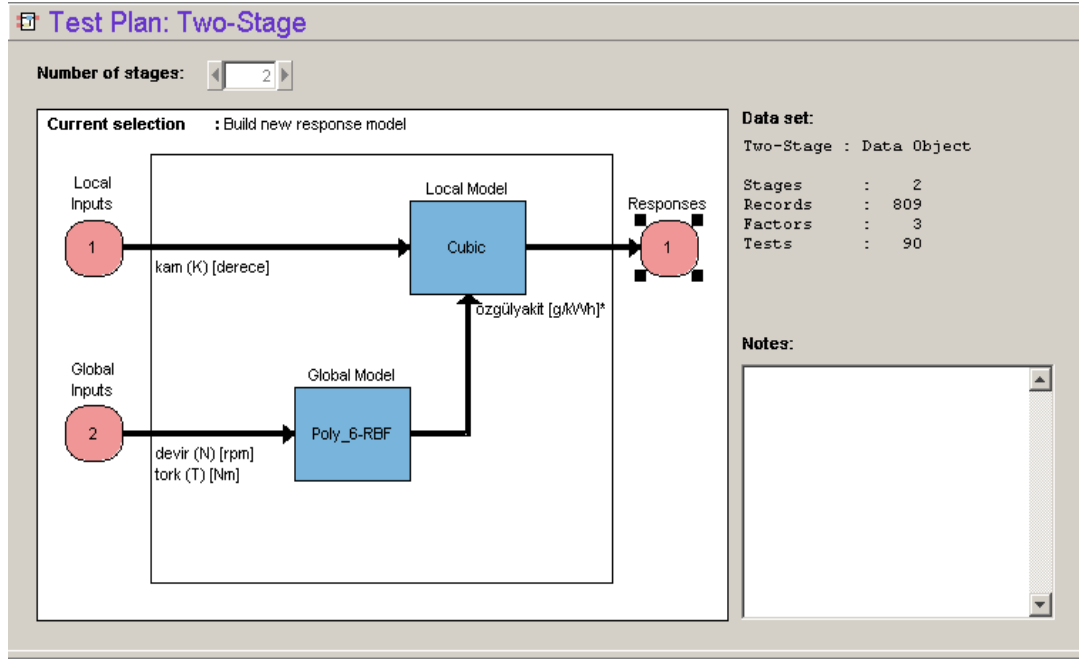
Şekil 7.1. İki aşamalı veri düzenleyici ara yüzü

Verilerin aktarımından sonra modelleme yaklaşımının iki veya tek aşamalı olarak seçilmesi gerekmektedir. Modelleme yaklaşımının seçimi sırasında kullanılan arayüz Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Modelleme yaklaşımının seçimi

İki aşamalı modelleme için MDKY'nin kullandığı ve modelleme parametrelerin girildiği algoritma Şekil 7.3'de gösterilmiştir.



Şekil 7.3. İki aşamalı modellemenin algoritması

Bu arayüz kullanılarak lokal giriş için kam açısı, global girişler için devir ve tork, cevap olarak da özgül yakıt sarfiyatı seçilir. Burada seçilen lokal ve global girişler, deney yapılan fabrika ortamının getirdiği bir zorunluluktur. Burada kullanılan algoritmaya göre 90 adet test grubunun her biri için genel olarak

$$\text{özülyakit} = f(\text{kam}) \quad (7.1)$$

olacak şekilde eğri edilir. Bu eğrinin uydurulmasında kullanılacak çeşitli fonksiyon tipleri bulunmaktadır. Hangi fonksiyonun seçileceği Şekil 7.3'de gösterilen lokal model kutucuğu yardımıyla belirlenmektedir. Bu işlem iki aşamalı modelleme yaklaşımının birinci aşamasını oluşturmakta olup, Şekil 7.3'de gösterilen örnekte lokal model olarak kübik fonksiyon seçilmiştir.

Genel olarak (7.1) nolu eşitlikte gösterilen lokal modelin kübik olarak seçilmesi sebebiyle her bir lokal model için elde edilecek eşitliğin genel ifadesi aşağıda gösterilmiştir.

$$\text{özgülyakit} = \text{Beta}_{-1} + \text{Beta}_{-K} \times K + \text{Beta}_{-K^2} \times K^2 + \text{Beta}_{-K^3} \times K^3 \quad (7.2)$$

Bu eşitlikte gösterilen modele ait 4 adet cevap özelliği (response feature) bulunmakta olup, bunlar MDKY tarafından standart olarak ' Beta_{-1} ', ' Beta_{-K} ', ' Beta_{-K^2} ' ve ' Beta_{-K^3} ' olarak adlandırılmaktadır. (7.2) nolu eşitlikte K ise kam açısını ifade etmektedir.

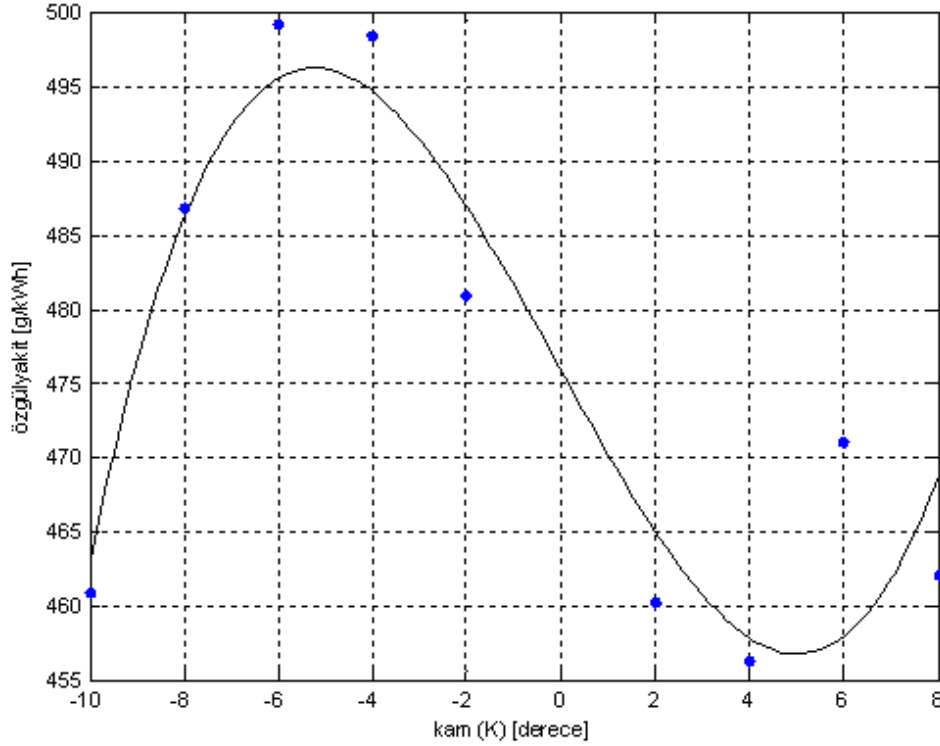
İki aşamalı modellemenin son aşamasında ise nihai modelin katsayıları global giriş parametrelerin fonksiyonu olarak modellenir ve bu modelleme esnasında 90 adet lokal modele ait fonksiyonun katsayıları kullanılır. (7.2) nolu eşitlikte gösterilen katsayıların global girişlerinin fonksiyonu olarak modellenmesinde kullanılan eğrinin fonksiyonu ise Şekil 7.3'de görülen global model kutucuğu yardımıyla seçilir.

Bu çalışmada hem özgül yakıt sarfiyatı hem de CO emisyon cevaplarının modellenmesinde lokal modelin fonksiyonu olarak çeşitli dereceden polinom fonksiyonlar ve global modelin fonksiyonu olarak da yine çeşitli dereceden polinomlar ve hibrid radyal fonksiyonlar denenmiştir.

Özgül yakıt sarfiyatının iki aşamalı modellemesinin anlatılmasında matematiksel olarak basit ve sade olması itibarıyla kullanılacak lokal ve global modeller olarak kübik fonksiyon seçilmiştir.

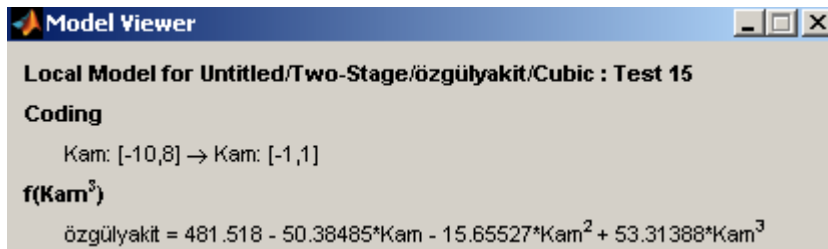
Şekil 7.4'de 90 lokal testten rastgele seçilen 15 nolu test grubu için mevcut verilere uydurulan eğri gösterilmektedir. Bu şekilde x eksenini kam açısı yelpazesi ve y eksenini ise özgül yakıt sarfiyatıdır. Şekilde görülen mavi noktalar her bir kam açısında ölçülen özgül yakıt sarfiyatlarını göstermekte, eğri ise bu noktalara uydurulan kübik fonksiyon eğrisini ifade etmektedir. Bu şekilde elde edilen eğri iki aşamalı

modellemenin birinci aşamasını oluşturmaktadır. Benzer eğriler diğer test grupları için de gösterilebilir.



Şekil 7.4. 15 nolu test grubu için elde edilen lokal model eğrisi

Herbir test grubu için özgül yakıt sarfiyatının fonksiyonu MDKY tarafından Şekil 7.5’de gösterildiği gibi verilmekte olup, 15 nolu test grubunun fonksiyonu (7.3) nolu eşitlikte gösterilmiştir;



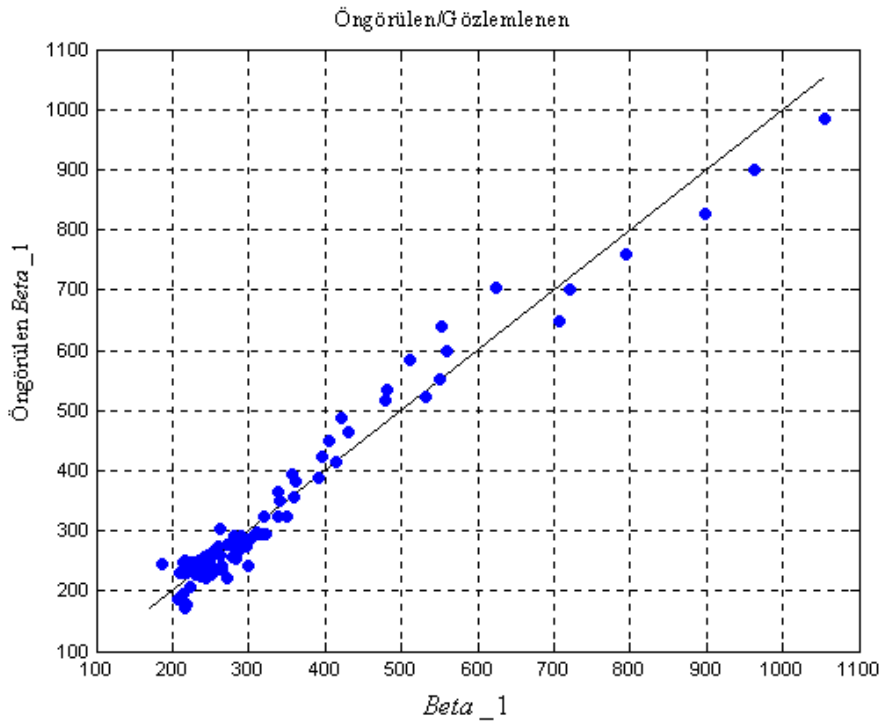
Şekil 7.5. Lokal model fonksiyonunun ifadesi

$$\text{özgül yakıt} = 481.518 - 50.38485 \times K - 15.65527 \times K^2 + 53.31388 \times K^3 \quad (7.3)$$

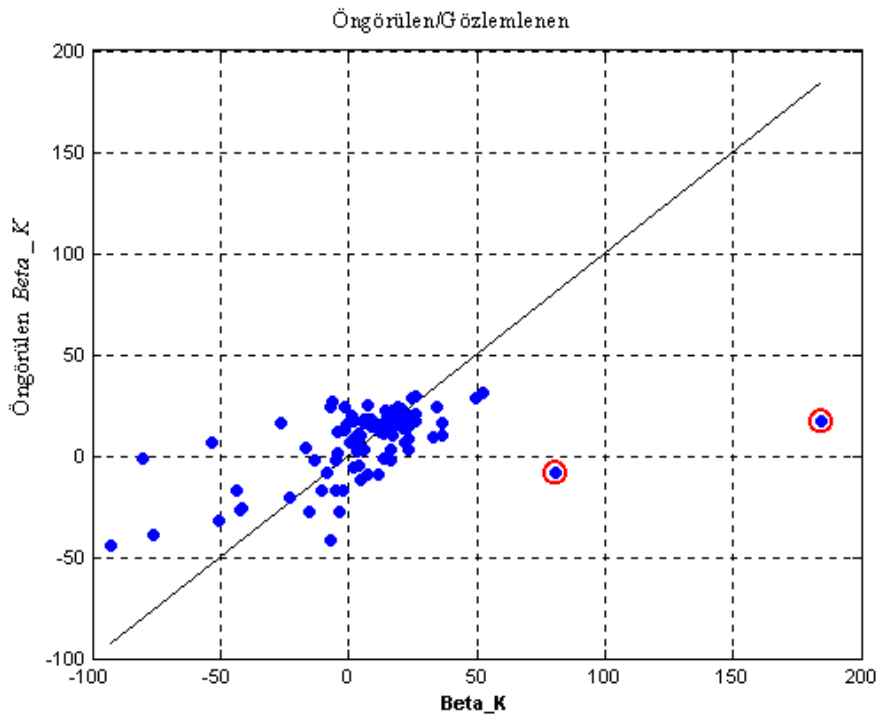
90 adet lokal modelin elde edilmesiyle birlikte iki aşamalı modelleme birinci aşaması bitirilmiştir. Bundan sonra yapılacak olan işlem bu 90 adet lokal modelin katsayılarının kullanımıyla global modelin cevap özelliklerini elde etmek yani modellemenin ikinci aşamasını gerçekleştirmektir.

Özgül yakıt sarfiyatı modeli için öngörülenle (predicted) ile gözlemlenen (observed) ' $Beta_1$ ', ' $Beta_K$ ', ' $Beta_K^2$ ' ve ' $Beta_K^3$ ' değerlerini mukayese eden grafikler sırasıyla Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Bu şekillerde x eksenini gözlemlenen katsayıları, y eksenini ise öngörülen katsayıları göstermekte olup, mutlak artık (absolute residual) değeri 3'den büyük olan değerler kırmızı daire içine alınmıştır.

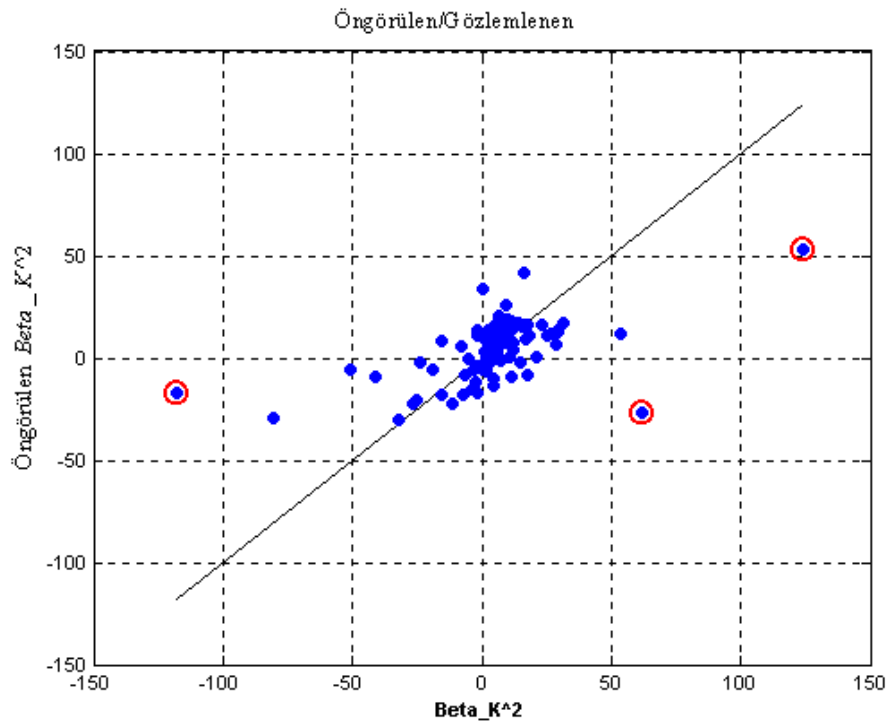
Çok iyi bir model elde edilmiş olsaydı tüm mavi noktaların $y = x$ eksenini üzerinde yer alması gerekiyordu. Her bir lokal modele ait mavi noktaların bu eğriye olan uzaklığı elde edilen modelin verilere olan uyumunu göstermektedir.



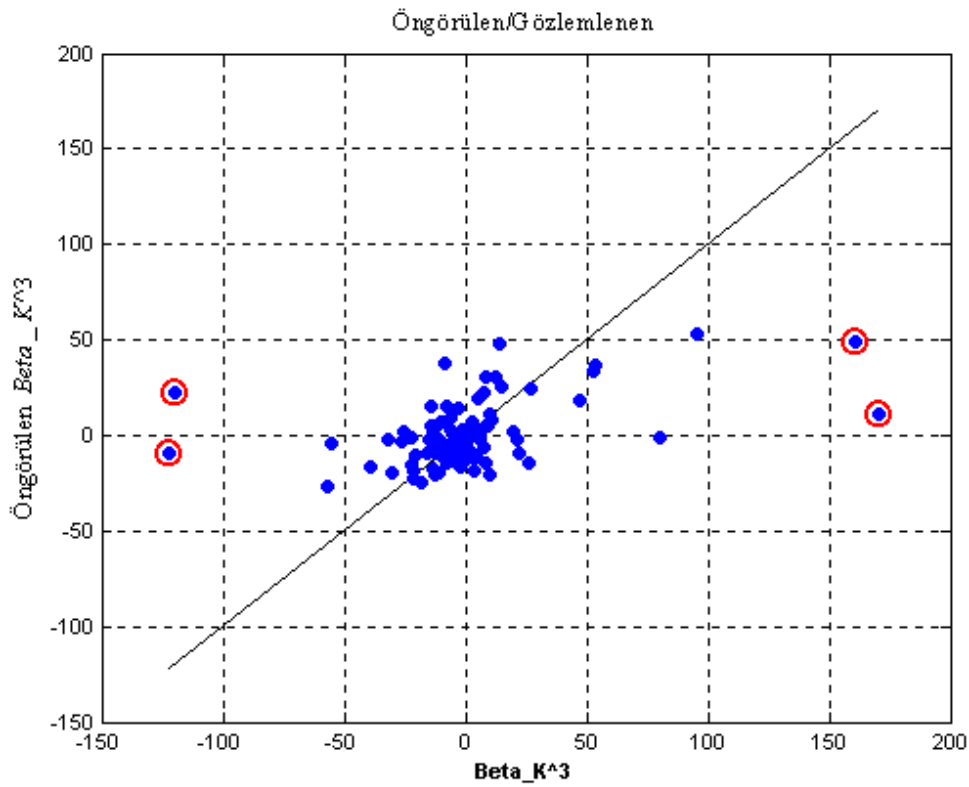
Şekil 7.6. Özgül yakıt tüketimi için öngörülen/ gözlemlenen ' $Beta_1$ '



Şekil 7.7. Özgül yakıt tüketimi için öngörülen/ gözlemlenen ' $Beta_K$ '

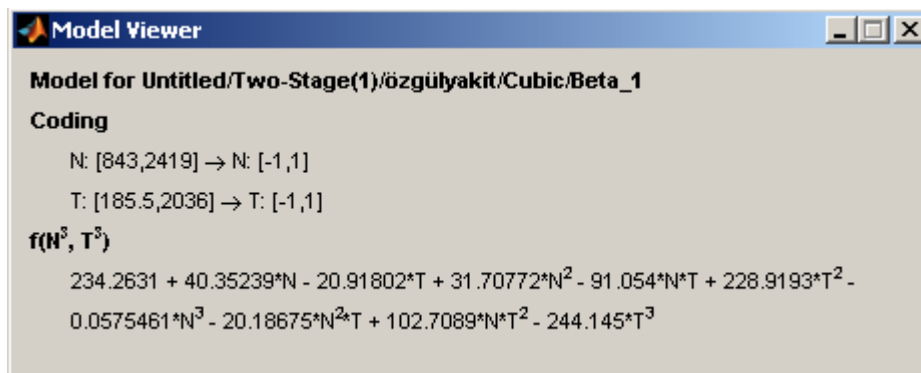


Şekil 7.8. Özgül yakıt tüketimi için öngörülen/ gözlemlenen ' $Beta_K^2$ '



Şekil 7.9. Özgül yakıt tüketimi için öngörülen/gözlemlenen ' $Beta_K^3$ '

Global girişler olan motor devri N ve motor torku T açısından elde edilen her bir cevap özelliğinin fonksiyonu MDKY tarafından Şekil 7.10'da gösterildiği gibi verilmektedir.



Şekil 7.10. Cevap özelliğinin ifadesi

Global model olarak seçilen kübik fonksiyona ait her bir cevap özelliğinin eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

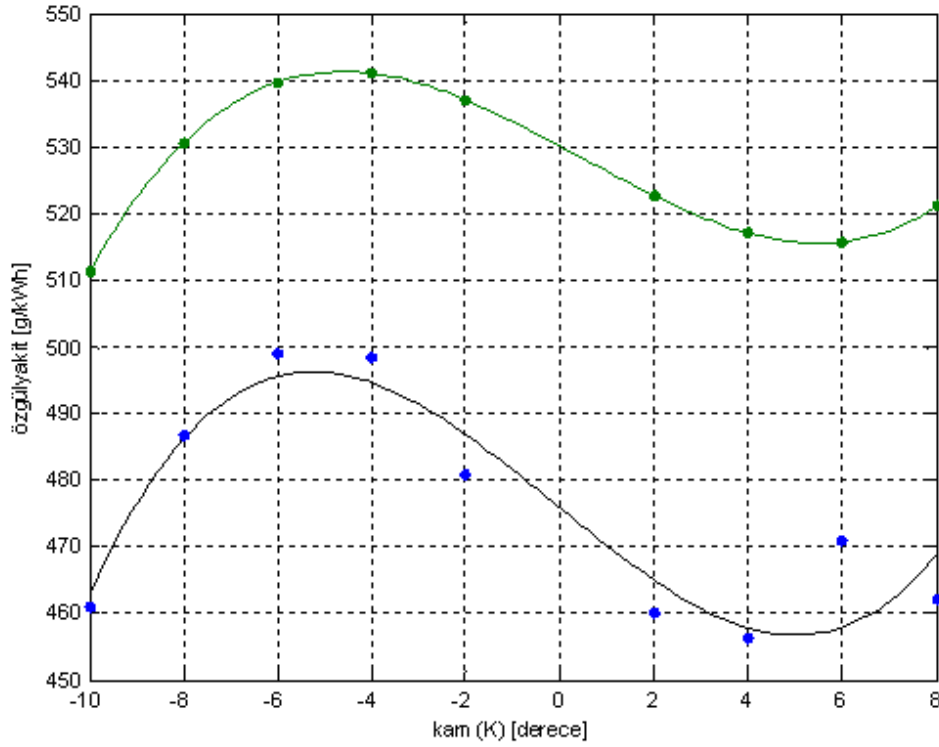
$$\begin{aligned}
Beta_1 = & 234.2631 + 40.35239 \times N - 20.91802 \times T + 31.70772 \times N^2 \\
& - 91.054 \times N \times T + 228.9193 \times T^2 - 0.0575461 \times N^3 - 20.18675 \times N^2 \times T \\
& + 102.7089 \times N \times T^2 - 244.145 \times T^3
\end{aligned} \tag{7.4}$$

$$\begin{aligned}
Beta_K = & 0.694203 - 13.3789 \times N + 27.8977 \times T + 22.3211 \times N^2 \\
& + 6.4017 \times N \times T - 9.09466 \times T^2 + 17.125 \times N^3 - 35.5732 \times N^2 \times T \\
& - 14.0596 \times N \times T^2 + 5.16329 \times T^3
\end{aligned} \tag{7.5}$$

$$\begin{aligned}
Beta_K^2 = & -3.63596 - 8.02245 \times N + 22.8198 \times T + 22.4681 \times N^2 \\
& - 11.012 \times N \times T - 1.87728 \times T^2 + 10.1723 \times N^3 - 30.0797 \times N^2 \times T \\
& + 20.0873 \times N \times T^2 + 0.438599 \times T^3
\end{aligned} \tag{7.6}$$

$$\begin{aligned}
Beta_K^3 = & 4.79379 + 13.1184 \times N - 22.6824 \times T - 20.904 \times N^2 \\
& + 2.51159 \times N \times T + 11.3052 \times T^2 - 18.6683 \times N^3 + 38.2675 \times N^2 \times T \\
& + 15.52 \times N \times T^2 - 12.9193 \times T^3
\end{aligned} \tag{7.7}$$

Özgül yakıt tüketimi için ‘*Beta_1*’, ‘*Beta_K*’, ‘*Beta_K^2*’ ve ‘*Beta_K^3*’ cevap özelliklerin kullanımıyla 15 nolu test grubuna uydurulan iki aşamalı model eğrisi Şekil 7.11’de sunulmuştur.



Şekil 7.11. Özgül yakıt tüketimi için 15 nolu test grubuna uydurulan eğri

Şekil 7.11'deki siyah eğri değişik kam açılarında ölçülen özgül yakıt sarfiyatına uydurulan yerel model eğrisini, yeşil eğri ise iki aşamalı modelleme sonucunda 15 nolu test grubuna uydurulan eğriyi göstermektedir. Yeşil eğrinin elde edilmesinde iki aşamalı modellemenin birinci basamağı olan yerel modelleme sırasında elde edilen 90 adet yerel eğri kullanılmıştır.

Şekil 7.11'de elde edilen iki aşamalı modelin daha iyi anlaşılması bakımından bir örnek verilecektir. Örnek olarak seçilen -10 derecedeki kam açısına karşılık gelen özgül yakıt sarfiyatının hesaplanması için aşağıda gösterilen işlemlerin yapılması gerekir;

1. Test esnasında 15 nolu test grubunun ölçüldüğü devir ve tork değerlerin bulunması gerekir. 15 nolu test grubu için $N = 1800$ rpm ve $T = 400$ Nm'dir. Devir, tork ve kam açısı değerleri MDKY tarafından normalize edildiği için, $N = 0.216$, $T = -0.767$ ve $K = -1$ değerlerini alır.

2. 15 nolu test grubu için (7.8), (7.9), (7.10) ve (7.11) nolu eşitlikler vasıtasıyla ' $Beta_1$ ', ' $Beta_K$ ', ' $Beta_K^2$ ' ve ' $Beta_K^3$ ' değerleri hesaplanır.

$$\begin{aligned} Beta_1 = & 234.2631 + 40.35239 \times 0.216 - 20.91802 \times (-0.767) + 31.70772 \times 0.216^2 \\ & - 91.054 \times 0.216 \times (-0.767) + 228.9193 \times (-0.767^2) - 0.0575461 \times 0.216^3 \\ & - 20.18675 \times 0.216^2 \times (-0.767) + 102.7089 \times 0.216 \times (-0.767^2) - 244.145 \times (-0.767)^3 \end{aligned} \quad (7.8)$$

$$\begin{aligned} Beta_K = & 0.694203 - 13.3789 \times 0.216 + 27.8977 \times (-0.767) + 22.3211 \times 0.216^2 \\ & + 6.4017 \times 0.216 \times (-0.767) - 9.09466 \times (-0.767^2) + 17.125 \times 0.216^3 \\ & - 35.5732 \times 0.216^2 \times (-0.767) - 14.0596 \times 0.216 \times (-0.767)^2 + 5.16329 \times (-0.767)^3 \end{aligned} \quad (7.9)$$

$$\begin{aligned} Beta_K^2 = & -3.63596 - 8.02245 \times 0.216 + 22.8198 \times (-0.767) + 22.4681 \times 0.216^2 \\ & - 11.012 \times 0.216 \times (-0.767) - 1.87728 \times (-0.767^2) + 10.1723 \times 0.216^3 \\ & - 30.0797 \times 0.216^2 \times (-0.767) + 20.0873 \times 0.216 \times (-0.767)^2 + 0.438599 \times (-0.767)^3 \end{aligned} \quad (7.10)$$

$$\begin{aligned} Beta_K^3 = & 4.79379 + 13.1184 \times 0.216 - 22.6824 \times (-0.767) - 20.904 \times 0.216^2 \\ & + 2.51159 \times 0.216 \times (-0.767) + 11.3052 \times (-0.767)^2 - 18.6683 \times 0.216^3 \\ & + 38.2675 \times 0.216^2 \times (-0.767) + 15.52 \times 0.216 \times (-0.767)^2 - 12.9193 \times (-0.767)^3 \end{aligned} \quad (7.11)$$

(7.8), (7.9), (7.10), ve (7.11) nolu eşitlikler kullanılarak sırasıyla,

$$Beta_1 = 534.1941031 \quad (7.12)$$

$$Beta_K = -31.63338866 \quad (7.13)$$

$$Beta_K^2 = -17.56980914 \quad (7.14)$$

$$Beta_K^3 = 36.52810042 \quad (7.15)$$

bulunur.

Lokal model fonksiyon kübik olduğu için, (7.2) nolu eşitlikte gösterildiği üzere

$$özgülyakit = Beta_1 + Beta_K \times K + Beta_K^2 \times K^2 + Beta_K^3 \times K^3 \quad (7.16)$$

şeklinde ifade edilmekte olup, -10 derece kam açısındaki özgül yakıt tüketimi hesaplanacağı ve değerler normalize edildiği için,

$$K = -1 \quad (7.17)$$

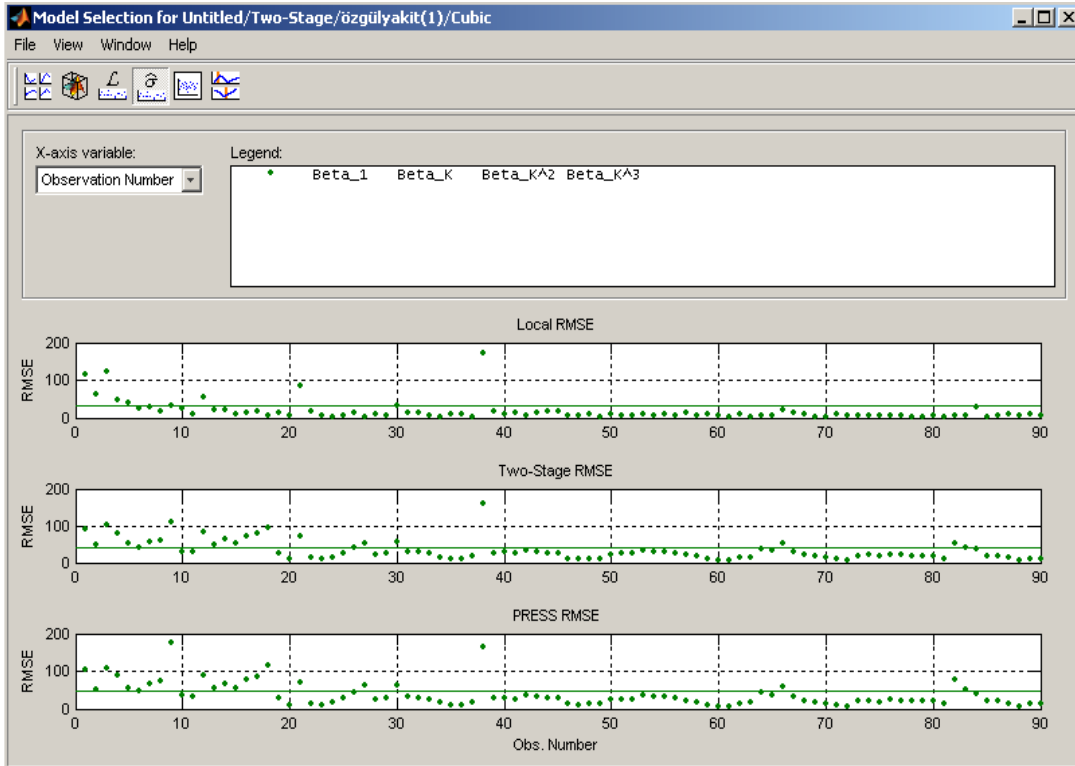
değeri kullanılması gerekir.

(7.16) nolu eşitlikte (7.12), (7.13), (7.14), ve (7.15) nolu eşitlikteki değerler kullanılarak

$$\text{özgülyakit} = 534.19 - 31.63 \times (-1) - 17.56 \times (-1)^2 + 36.52 \times (-1)^3 \quad (7.18)$$

eşitliğinden $\text{özgülyakit} = 511.74$ g/kWh olarak bulunur ki, bu değerle Şekil 7.11’de -10 derece kam açısına karşılık gelen özgül yakıt tüketimin aynı olduğu net olarak görülmektedir.

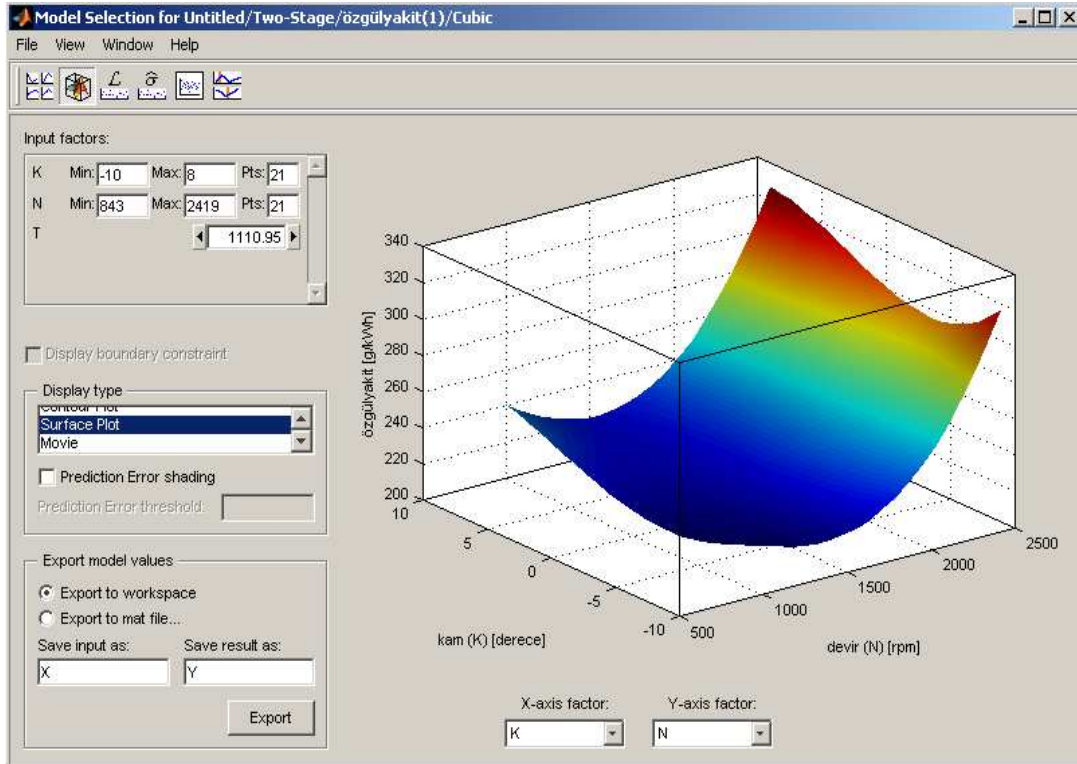
Modelin yaratılmasından sonraki aşama, modele ait MDKY tarafından hesaplanan istatistiksel parametrelerin değerlendirilmesidir. MDKY tarafından model için hesaplanan istatistiksel parametreler Şekil 7.12’de gösterilmiştir. Bu istatistiksel parametreler lokal RMSE, iki aşamalı RMSE ve PRESS RMSE değerler olup, bu değerler yaratılan modeller arasından en iyi modele karar verilmesi aşamasında kullanılır.



Şekil 7.12. Model seçimi için hesaplanan istatistiksel parametreler

Şekil 7.12’de görülen noktalar, her bir lokal modele ait bireysel değeri gösterirken, yeşil devamlı çizgi ise elde edilen 90 adet lokal modele ait değerlerin aritmetiksel ortalamasıdır. MDKY tarafından modele ait nihai olarak verilen istatistiksel parametrelerin değeri bu ortalamalardır.

Şekil 7.13’de ise modelin cevap yüzeyi (response surface) görülmekte olup, bu şekilde kam açısı ve devire karşılık gelen özgül yakıt tüketimi görülmekle birlikte, bu cevap yüzeyi sadece görsel olarak kullanıcıya genel bilgi vermektedir. Diğer bir ifadeyle herhangi bir kam açısı ve motor devrine karşılık gelen özgül yakıt sarfiyatının değeri bu grafikten net olarak bulunamaz.



Şekil 7.13. Model cevap yüzeyi

Modellemenin son aşamasında yapılması gereken, MDKY tarafından hesaplanan istatistiksel parametreleri kullanarak en iyi modelin hangisi olduğuna karar vermek ve bu modeli daha sonra kalibrasyon işleminde kullanmak üzere hazırlamaktır.

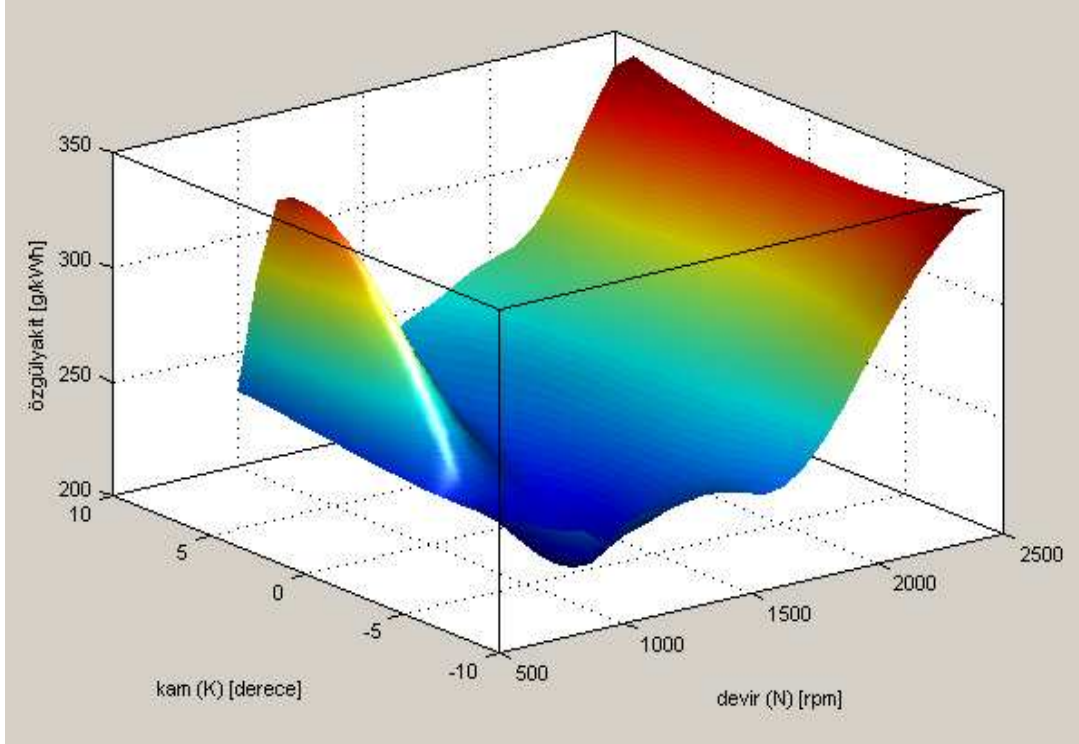
Özgül yakıt tüketiminin iki aşamalı modellenme yaklaşımıyla modellenmesi esnasında kullanılan lokal ve global model fonksiyonları ve bunlara ait istatistiksel parametreler Tablo 7.2’de verilmiştir. Bu tablodaki her bir farklı modelin adlandırılmasında A’dan M’ye kadar harfler kullanıldı. Örnek olarak A modeli ele alınırsa, bu iki aşamalı modelin lokal modeli kübik, global modeli ise yine kübik fonksiyondur.

Tablo 7.2. Özgül yakıt tüketiminin iki aşamalı modellenmesine ait istatistiksel veriler

Model	Lokal Model	Global Model	Lokal RMSE	İki aşamalı RMSE	PRESS RMSE
A	Kübik	Kübik	31.232	42.203	48.378
B	Kübik	Kübik-RBF	31.232	24.249	26.269
C	Kübik	Poly_4-RBF	31.232	24.209	26.205
D	Kübik	Poly_5-RBF	31.232	24.113	26.074
E	Kübik	Poly_6-RBF	31.2324	23.958	25.481
F	Kuadratik	Poly_5-RBF	29.990	24.997	26.543
G	Poly_4	Kübik-RBF	31.151	24.920	32.052
H	Poly_4	Poly_5-RBF	31.151	25.326	31.465
İ	Poly_4	Poly_7-RBF	31.151	25.087	32.626
J	Poly_5	Poly_4-RBF	27.187	33.279	60.692
K	Poly_5	Poly_5-RBF	27.187	35.557	62.365
L	Poly_5	Poly_6-RBF	27.187	41.799	85.135
M	Poly_6	Poly_5	22.468	31.354	38.967

Tablo 7.2 incelendiğinde, en küçük istatistiksel parametrelere sahip modelin E olduğu anlaşılmakta olup, bu modele ait cevap yüzeyi Şekil 7.14'de gösterilmektedir.

Kuadratik modeller genelde hem ateşleme zamanı verilerine uygun olmalarına hem de basit optimizasyona da izin vermelerine rağmen yeteri kadar gerçek davranışları temsil etmezler. Bunun için daha yüksek dereceden modellere ihtiyaç duyulur. Bir çok veri seti için 5. dereceden polinomlar en iyi uyumu gösterirken, bazı durumlarda da 6. dereceden polinomlara ihtiyaç duyulmaktadır. [35]



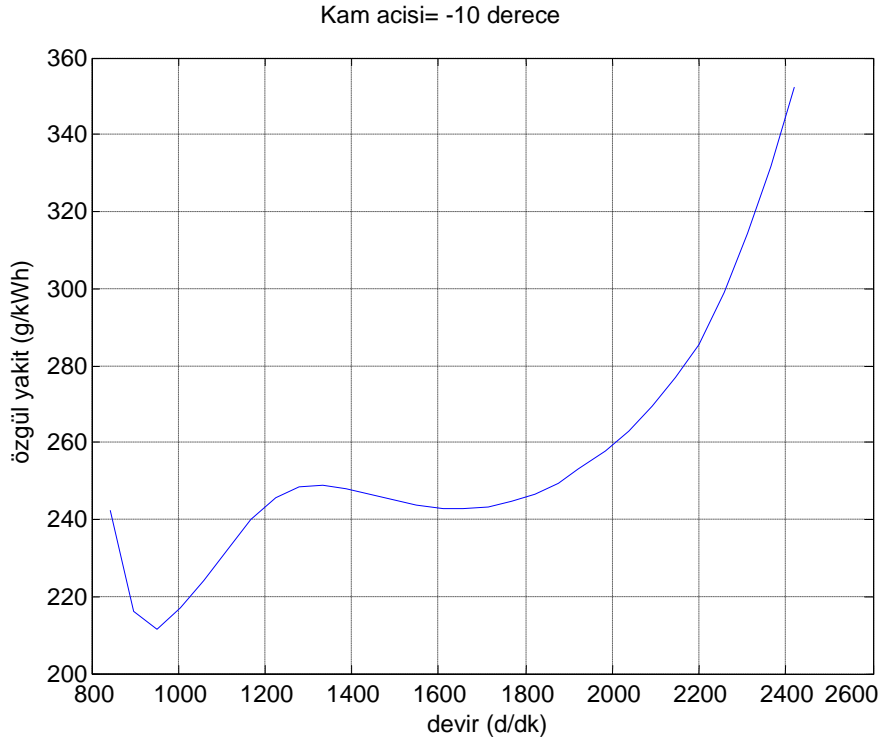
Şekil 7.14. Özülyakıt tüketimi için model E'ye ait cevap yüzeyi

7.1.1. Özülyakıt sarfiyatı modelin uygunluğunun kontrol edilmesi

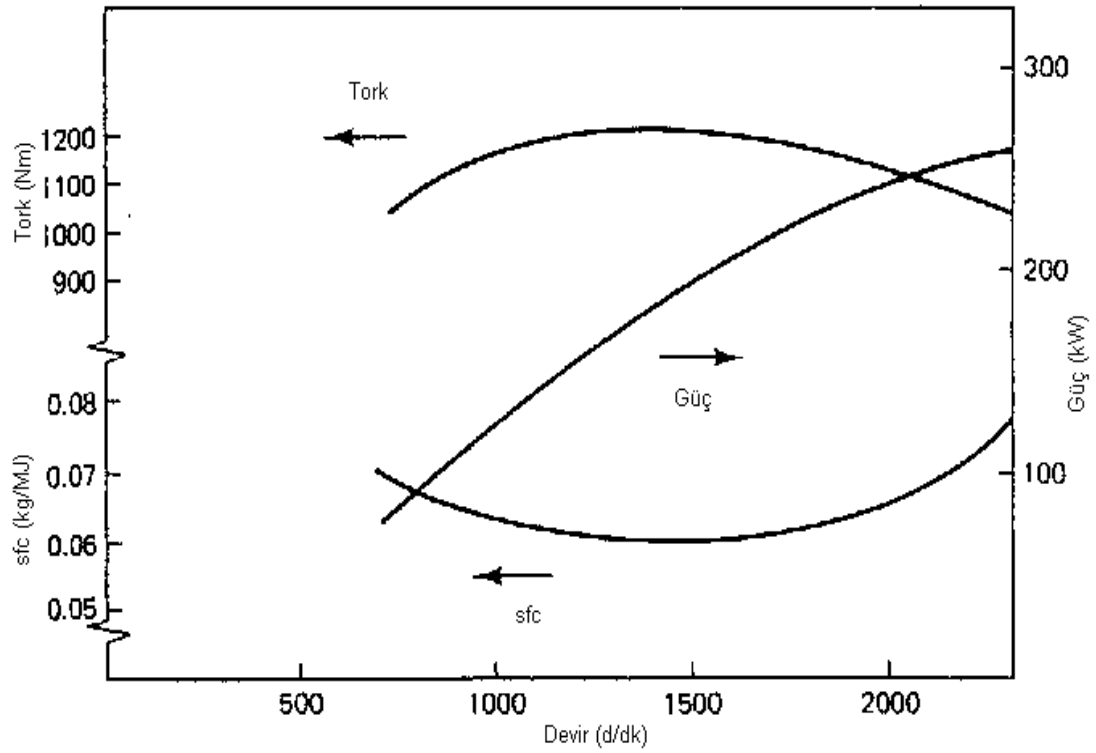
İki aşamalı modelleme yaklaşımı ile yaratılan ve istatistiksel parametrelerin yardımıyla en iyi model olarak seçilen model E'nin grafiksel olarak da kontrol edilmesine gerek duyulmaktadır.

Bu amaçla kam açısı -10 derece iken motor devrine karşılık özülyakıt tüketimini gösteren eğri model E kullanılarak elde edilmiş olup, bu eğri Şekil 7.15'de sunulmuştur.

Bir dizel motorun, motor devrine karşılık gelen özülyakıt sarfiyatı (sfc) Şekil 7.16'da gösterilmektedir. Şekil 7.15'de gösterilen eğrinin 900 ile 1600 rpm arasında salınım yapmasına rağmen Şekil 7.16'daki eğriyle benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 7.15. Motor devrine karşılık gelen özügöl yakıt tüketimi

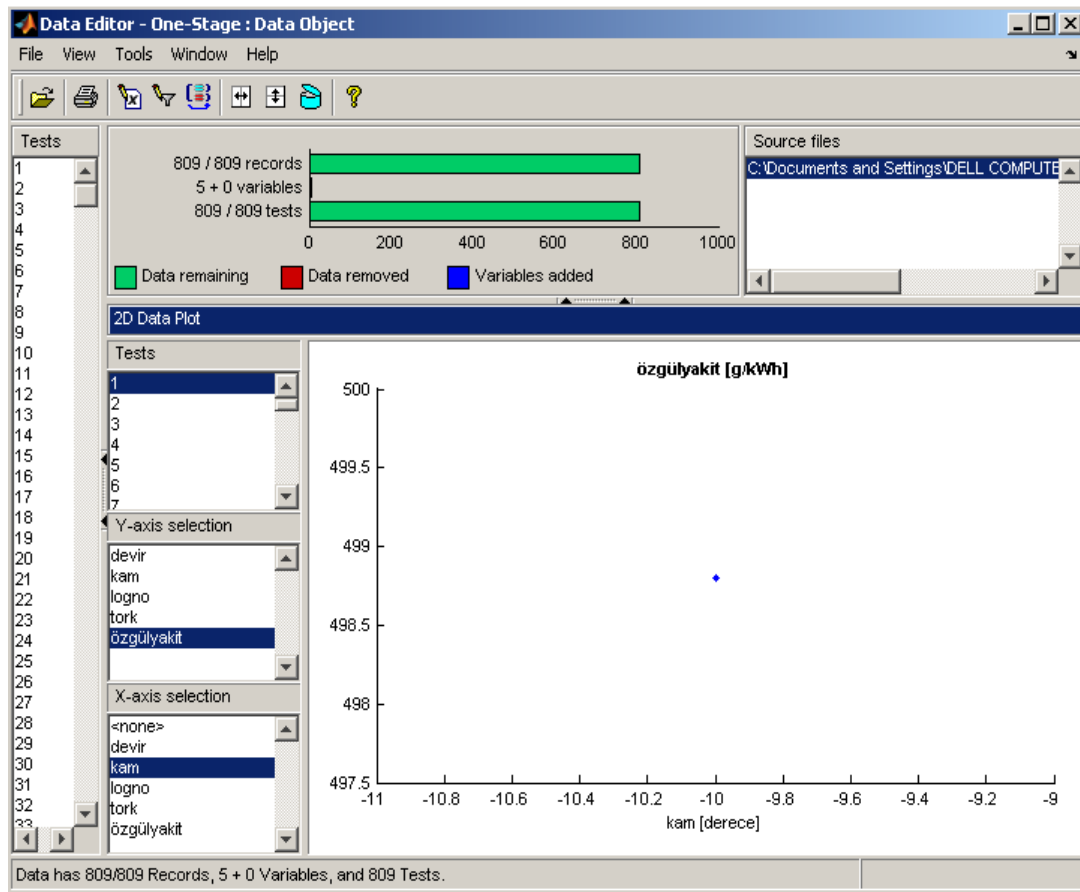


Şekil 7.16. Dizel motorun genel özügöl yakıt sarfiyat eğrisi [36]

7.2. Tek Aşamalı Modelleme Yaklaşımıyla Özgül Yakıt Sarfiyatının Modellenmesi

MDKY iki aşamalı modelleme yaklaşımının yanında tek aşamalı modelleme imkanı da sağlamaktadır. Tek aşamalı modellemenin anlatılmasında da yine özgül yakıt sarfiyatının tüketimi kam açısı, devir ve torkun fonksiyonu olarak modellenecektir.

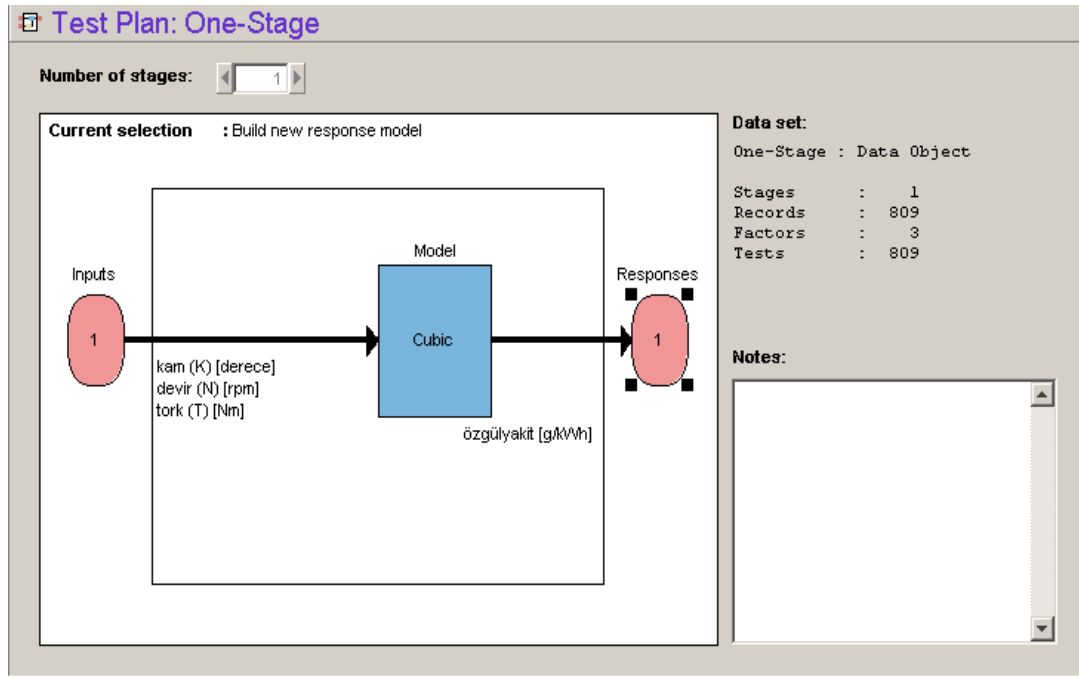
Tek aşamalı modellemede lokal model kullanımı olmayacağı için, motor testi sonucunda elde edilen verilerin programa test grupları halinde değil, tek grup olarak yüklenmesi gerekecektir. Bu verilerin yüklenmesi için kullanılan tek aşamalı veri düzenleyici arayüzü Şekil 7.17’de gösterilmiştir.



Şekil 7.17. Tek aşamalı veri düzenleyici arayüzü

Şekil 7.1'deki iki aşamalı veri düzenleyici arayüzü ile Şekil 7.17'deki tek aşamalı veri düzenleyici arayüzü karşılaştırıldığında, iki aşamalı modelleme için 809 adet teste karşılık gelen 90 adet test grubu varken, tek aşamalı modellemede ise 809 adet teste karşılık 809 test grubu olduğu görülmektedir. Bu da 809 adet test değerlerinin modelleme esnasında aynı anda kullanılacağını göstermektedir.

Modelleme için tek aşamalı model yaklaşımın seçimi yine Şekil 7.2.de gösterilen arayüz kullanılarak yapılmaktadır. Tek aşamalı modelleme için kullanılan algoritma Şekil 7.18'de gösterilmektedir. Burada yine tek aşamalı modellenmenin açıklanması esnasında matematiksel olarak sadelik olması sebebiyle model tipi olarak kübik fonksiyon kullanılmıştır.



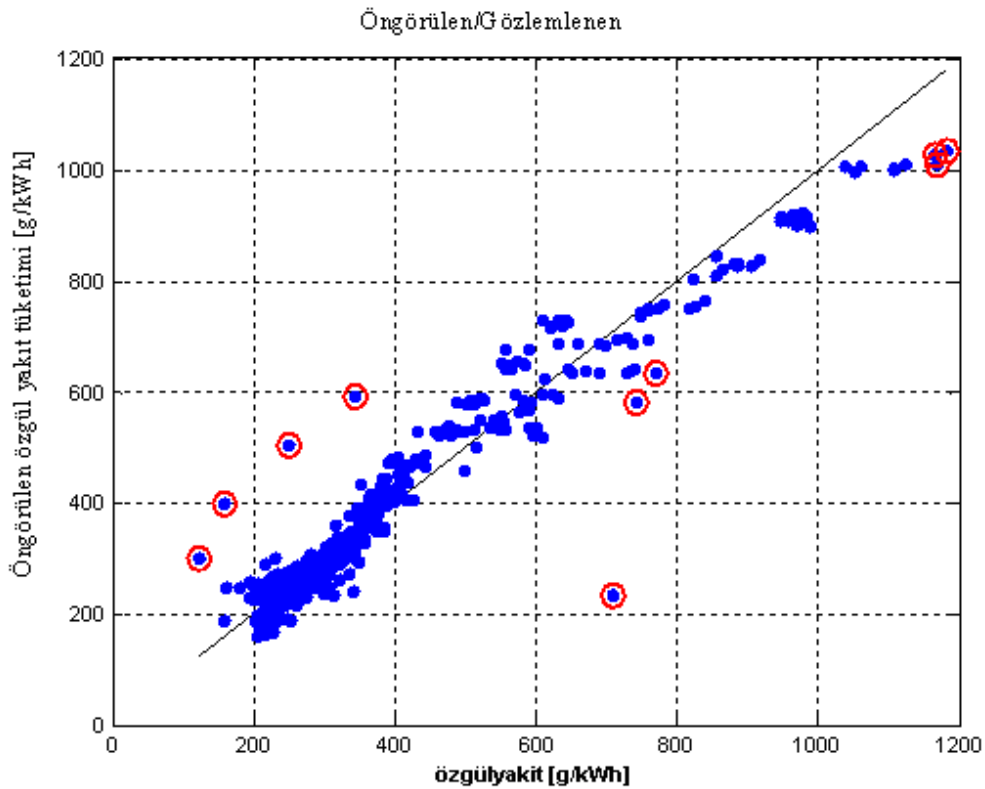
Şekil 7.18. Tek aşamalı modellemenin algoritması

Tek aşamalı modelleme sonucunda bulunan özgül yakıt tüketiminin eşitliği (7.19) nolu eşitlikte belirtilmiş olup, testler sonucunda gözlemlenen ve MDKY tarafından hesaplanan özgül yakıt tüketiminin mukayesesi Şekil 7.19'da gösterilmiştir. Eğer gözlemlenen ve hesaplanan özgül yakıt sarfiyatı birbirlerinin aynı olsaydı tüm test noktalarının $y = x$ eğrisi üzerinde yer alacaktı. Şekilde kırmızı daire içine alınan noktalar, mutlak artık (absolute residual) değeri 3'den büyük olan testlerdir.

$$\begin{aligned}
\text{özgülyakit} = & 230.6056 + 3.157136 \times K + 34.117 \times N - 18.0489 \times T + \\
& 4.307497 \times K^2 - 1.194378 \times K \times N + 3.917274 \times K \times T + 41.39487 \times N^2 - \\
& 95.63678 \times N \times T + 228.8947 \times T^2 + 0.8061364 \times K^3 + 5.549241 \times K^2 \times N + \\
& 14.34927 \times K^2 \times T + 9.531506 \times K \times N^2 + 6.972475 \times K \times N \times T - 1.477317 \times K \times T^2 + \\
& 5.277539 \times N^3 - 32.67051 \times N^2 \times T + 111.553 \times N \times T^2 - 243.0069 \times T^3
\end{aligned} \quad (7.19)$$

Tek aşamalı modelleme sonucunda özgül yakıt sarfiyatı için elde edilen eşitlik ile iki aşamalı modelleme sonucunda elde edilen özgül yakıt sarfiyatı ifadesi karşılaştırıldığında aşağıda belirtilen hususla dikkat çekmektedir;

1. Tek aşamalı modelleme sonucunda elde edilen özgül yakıt sarfiyatı ifadesi iki aşamalı modellemeye nazaran çok daha kompleks ve karışıktır.
2. Tek aşamalı modelleme sonucunda elde edilen özgül yakıt sarfiyatının kompleks yapısından dolayı elde edilen ifade herhangi bir mühendislik öngörüsüyle mukayese edilememektedir.



Şekil 7.19. Tek aşamalı modelleme sonucunda öngörülen/gözlemlenen özgül yakıt tüketimi

Tek aşamalı modelleme sonucunda öngörülen/gözlemlenen özgül yakıt sarfiyatının grafiksel mukayesesi dışında, rakamsal olarak da görülmesi için rastgele seçilen 1 nolu test grubuna karşılık gelen gözlemlenen ve öngörülen özgül yakıt tüketimleri karşılaştırılabilir.

1 nolu test grubu için $K = -10$ derece, $N = 847$ rpm, $T = 250.6$ Nm olup, bu şartlarda gözlemlenen özgül yakıt tüketimi 498.8 g/kWh'dir. Öngörülen özgül yakıt sarfiyatını bulmak için yapılması gereken ise -1 ile 1 arasında normalize edilen K , N ve T değerlerini (7.19) nolu eşitlikte kullanmaktır. MDKY tarafından normalize edilmiş olarak $K = -1$, $N = -0.995$ ve $T = -0.930$ bulunur. Bu değerlerin kullanılmasıyla,

$$\begin{aligned}
\text{özgülyakıt} = & 2306056 + 3.157136 \times (-1) + 34.117 \times (-0.995) - 18.0489 \times (-0.930) + \\
& 4.307497 \times (-1)^2 - 1.194378 \times (-1) \times (-0.995) + 3.917274 \times (-1) \times (-0.930) + \\
& 41.39487 \times (-0.995)^2 - 95.63678 \times (-0.995) \times (-0.930) + 2288947 \times (-0.930)^2 + \\
& 0.8061364 \times (-1)^3 + 5.54924 \times (-1)^2 \times (-0.995) + 14.34927 \times (-1)^2 \times (-0.930) + \quad (7.20) \\
& 9.531506 \times (-1) \times (-0.995)^2 + 6.972475 \times (-1) \times (-0.995) \times (-0.930) - \\
& 1.477317 \times (-1) \times (-0.930)^2 + 5.277539 \times (-0.995)^3 - 32.6705 \times (-0.995)^2 \times (-0.930) + \\
& 111.553 \times (-0.995) \times (-0.930)^2 - 2430069 \times (-0.930)^3
\end{aligned}$$

ve (7.20) nolu eşitliğin hesaplanmasıyla 1 nolu test grubu için gözlemlenen özgül yakıt tüketiminin 498.8 g/kWh olmasına rağmen öngörülen tüketimin 457.5683 g/kWh olduğu bulunur.

Tek aşamalı modelleme yaklaşımıyla denenen model tipleri ve bunlara ait istatistiksel parametreler Tablo 7.3'de gösterilmekte olup, bu parametrelerin yardımıyla en küçük RMSE ve PRESS RMSE değerine sahip model J en uygun model olarak seçilmiştir.

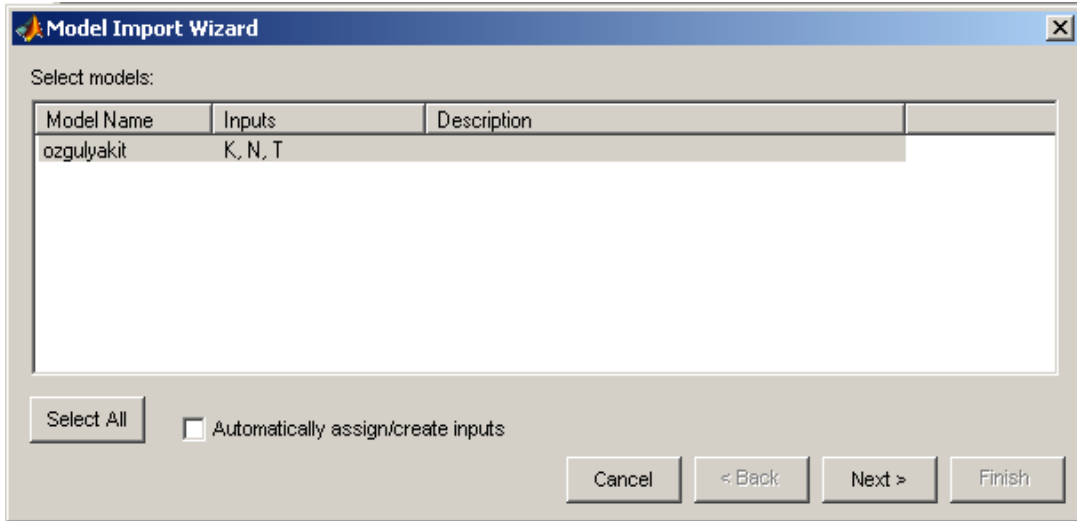
Tablo 7.3. Özgül yakıt tüketiminin tek aşamalı modellemesine ait istatistiksel veriler

Model	Model Tipi	RMSE	PRESS RMSE
A	Kübik	49.709	50.384
B	Poly_4	43.616	44.349
C	Poly_5	42.059	42.865
D	Poly_6	41.792	42.667
E	Poly_7	41.732	42.655
F	Poly_8	41.661	42.678
G	Kübik-RBF	33.645	35.069
H	Poly_4-RBF	32.079	33.538
İ	Poly_5-RBF	30.505	31.824
J	Poly_6-RBF	30.383	31.752
K	Poly_7-RBF	30.645	32.128
L	Poly_8-RBF	30.590	31.967

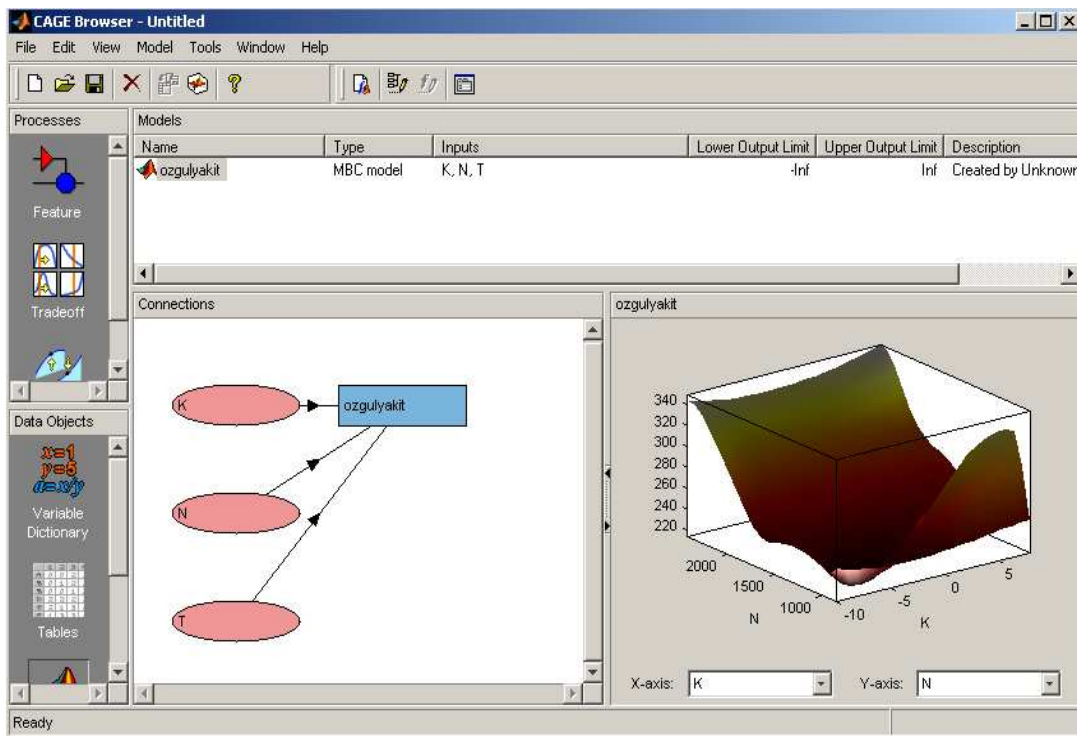
7.3. Minimum Özgül Yakıt Sarfıyatı İçin Kam Açısının Kalibre Edilmesi

Modelleme yapıldıktan sonraki aşama, kalibre edilecek modelin modele dayalı kalibrasyon yazılımının ikinci kısmı olan CAGE bölümüne aktarılmasıdır. Modelin yüklenilmesi için CAGE tarafından kullanılan arayüz Şekil 7.20’de, ve yüklenmiş modele ait bilgilerin gösterildiği arayüz ise Şekil 7.21’de sunulmuştur.

Şekil 7.21 incelendiğinde, modelin kam açısı, motor devri ve torkun fonksiyonu olduğu açıkça görülmektedir. Modelin yüzey cevap grafiği de yine aynı şekilde verilmektedir.



Şekil 7.20. Modelin CAGE programına yüklenilmesi için kullanılan arayüz



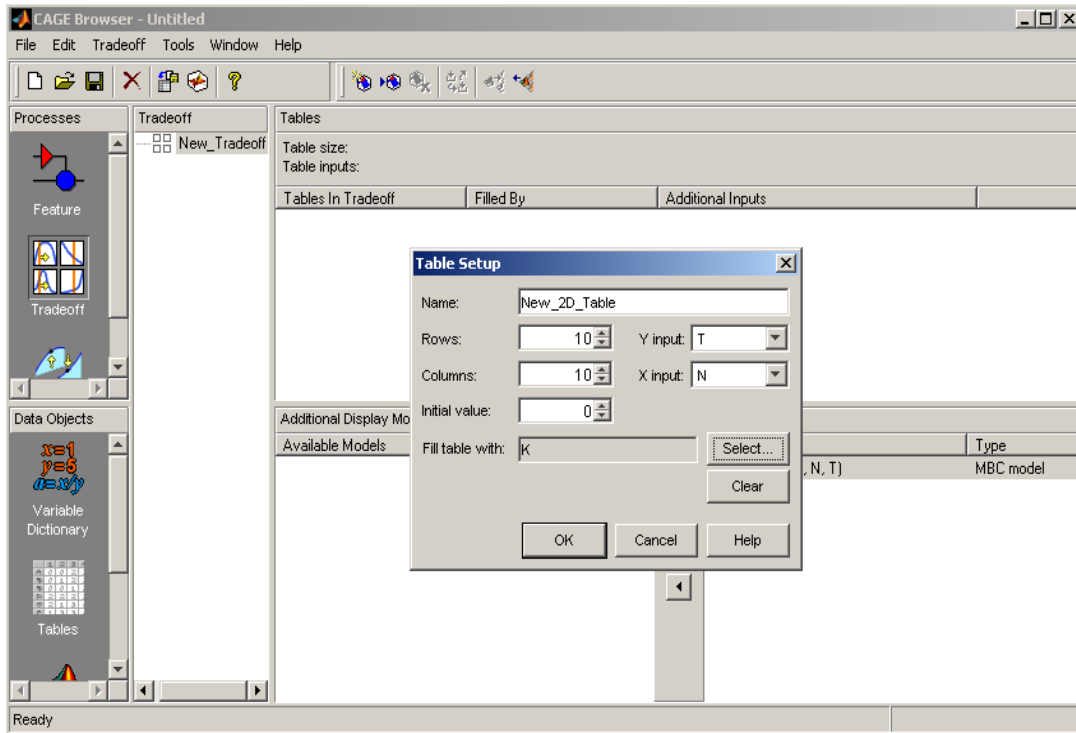
Şekil 7.21. Modelin CAGE programına yüklenmiş hali

Modelin kalibre edilmesinde amaç, değişik devir ve tork değerlerinde minimum özgül yakıt tüketimini verecek kam açılarının bulunmasıdır. Bunun için CAGE programının altında mukayese (trade-off) ve optimizasyon (optimization) seçenekleri bulunmaktadır. Optimizasyon seçeneği mukayese seçeneğine nazaran kullanımı daha

çabuk ve hızlı olmasına rağmen, elde edilen sonuçlar kullanıcı tarafında belirlenen optimizasyon başlangıç noktasına göre değişmekte olduğu için, bu çalışmada kullanımı daha zor fakat sonuçları daha doğru olan mukayese seçeneği kullanılmıştır.

Burada yapılan temel çalışma x ve y eksenleri devir ve tork olacak şekilde ve hücre sayısı tamamıyla kullanıcı tarafından belirlenen bir tablo oluşturup, bu tablonun içini minimum özgül yakıt sarfiyatını verecek kam açısı değerleriyle doldurulmasıdır.

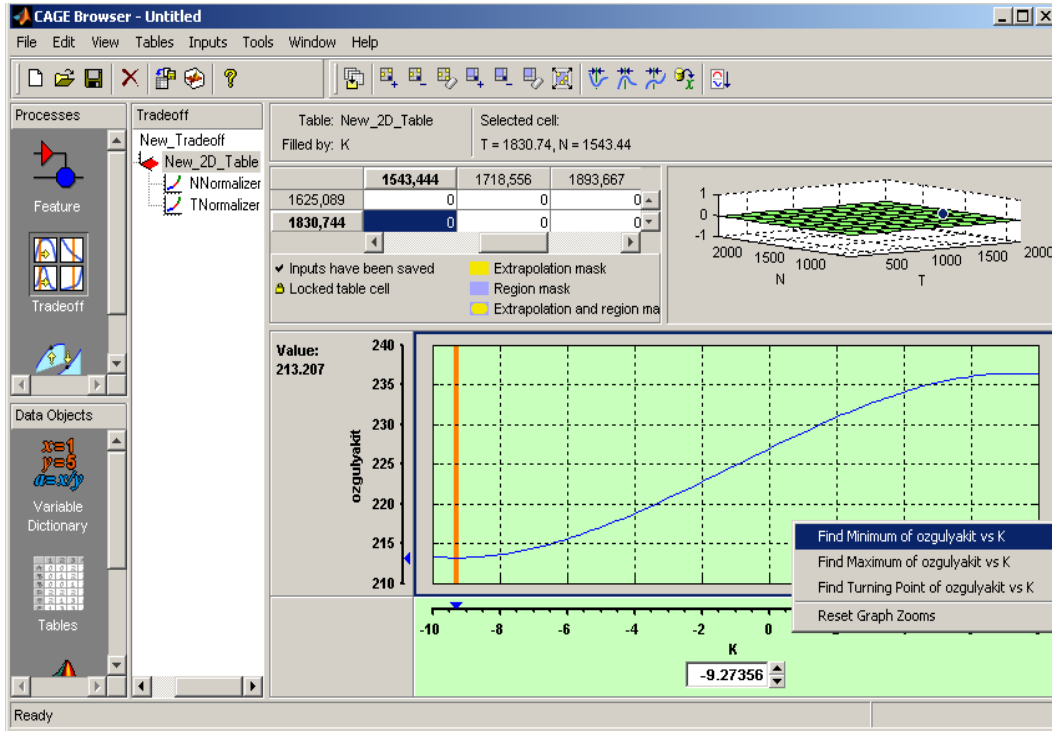
Şekil 7.22'de x ve y eksenleri sırasıyla devir ile tork olan ve boyutları tamamen rastgele 10×10 boyutlarında seçilen bir tablonun yaratılması ve bu tablonun içinin kam açısı değerleriyle doldurulacağına karar verilmesi esnasında kullanılan arayüz gösterilmektedir.



Şekil 7.22. Kalibrasyon tablosunun yaratılması

Kalibrasyon tablosunun 10×10 boyutlarında olması demek, x ve y eksenlerin yani devir ve tork değeri aralığının 10 eşit parçaya bölünmesi demektir. Programın bundan

sonra yaptığı, her bir devir ve tork aralığının kombinasyonunda kam açısı değerlerine karşılık gelen özgül yakıt tüketimini bulmak ve bunu Şekil 7.23’de gösterildiği gibi grafik haline dönüştürmektir.



Şekil 7.23. Kalibrasyon tablosu

Şekil 7.23’de rastgele seçilen $N = 1543.44$ ve $T = 1830.74$ değerleri için -10 ile 8 derece arasındaki kam açıları için hesaplanan özgül yakıt tüketimi gösterilmektedir. Bu motor devri ve torku için global minimumu bul komutu sayesinde minimum özgül yakıt tüketimi için kam açısının -9.27 derece olması gerektiği bulunmuştur. Benzer işlem tüm diğer devir ve tork değerleri için de tekrarlanıp kalibrasyon tablosu doldurulur. Bunun alternatifi olarak tablo içinden rastgele seçilen minimum 4 veya 5 devir ve tork kombinasyonu için minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açısı bulunup, interpolasyon yardımıyla tablonun tamamı doldurulabilir. Fakat interpolasyon yardımıyla tablo doldurulduğu takdirde, hatalı değerlerin bulunma ihtimali olduğu için, bunu önlemek maksadıyla interpolasyondan sonra tablodaki değerlerin kontrol edilmesi gerekmektedir. [21]

Kalibrasyon sonucu MDKY tarafından tespit edilen değişik devir ve tork kombinasyonları için minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açısı değerleri Tablo 7.4’de gösterilmiştir.

Tablo 7.4 incelendiğinde, MDKY tarafından kalibrasyon işlemi sonucunda bulunan kam açısı değerlerin noktadan sonra iki hane olarak bulunduğu görülmektedir. Dikkati çeken bir diğer unsur ise -4.17 ve -7.93 gibi değerlerin olduğudur. Bulunan bu değerlerin pratikte uygulanması halihazırda mümkün değildir. Çünkü piyasada bulunan sensörlerin hassasiyeti 0.5 derecedir. Diğer bir ifade ile bu değerlerin ECU’ya yüklenmesinden evvel değerler 0.5 seviyesinde yuvarlatılmalıdır. Bundan sonra yapılması gereken bu yuvarlatılmış değerlerin, kontrol tablosu olarak ECU’ya yüklenmesidir.

Tablo 7.4. Minimum özgül yakıt tüketimi için hesaplanan kam açıları

Devir	843	1018	1193	1368	1543	1718	1893	2068	2243	2419
Tork										
185	-10.0	-7.99	-4.17	8.0	-10.0	-10.0	8.0	8.0	1.14	-0.23
391	-5.60	-1.45	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	5.02	3.80	0.82	-3.24
596	8.0	8.0	-7.93	-10.0	-10.0	4.06	4.50	4.67	-3.61	-7.33
802	0.96	-9.20	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-2.56	-3.52	-5.62	-8.0
1008	-4.90	-6.49	8.0	-6.50	-10.0	-10.0	-6.12	-2.91	-2.41	-0.50
1213	-3.78	-5.94	-8.20	-2.06	2.51	-10.0	-1.32	-2.19	-2.96	-4.93
1419	-3.67	-10.0	2.05	0.44	-6.45	-8.25	-1.41	-2.38	-5.30	-10.0
1625	-4.85	-5.29	-1.78	-5.67	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-7.57	-5.46
1830	-5.04	-5.35	-4.67	-6.0	-9.27	-10.0	-10.0	-10.0	-5.11	-4.15
2036	-0.12	-6.30	-4.39	-3.88	-4.10	-4.84	-5.01	-3.68	-2.61	-3.27

7.4. İki Aşamalı Modelleme Yaklaşımıyla CO Emisyonunun Modellenmesi

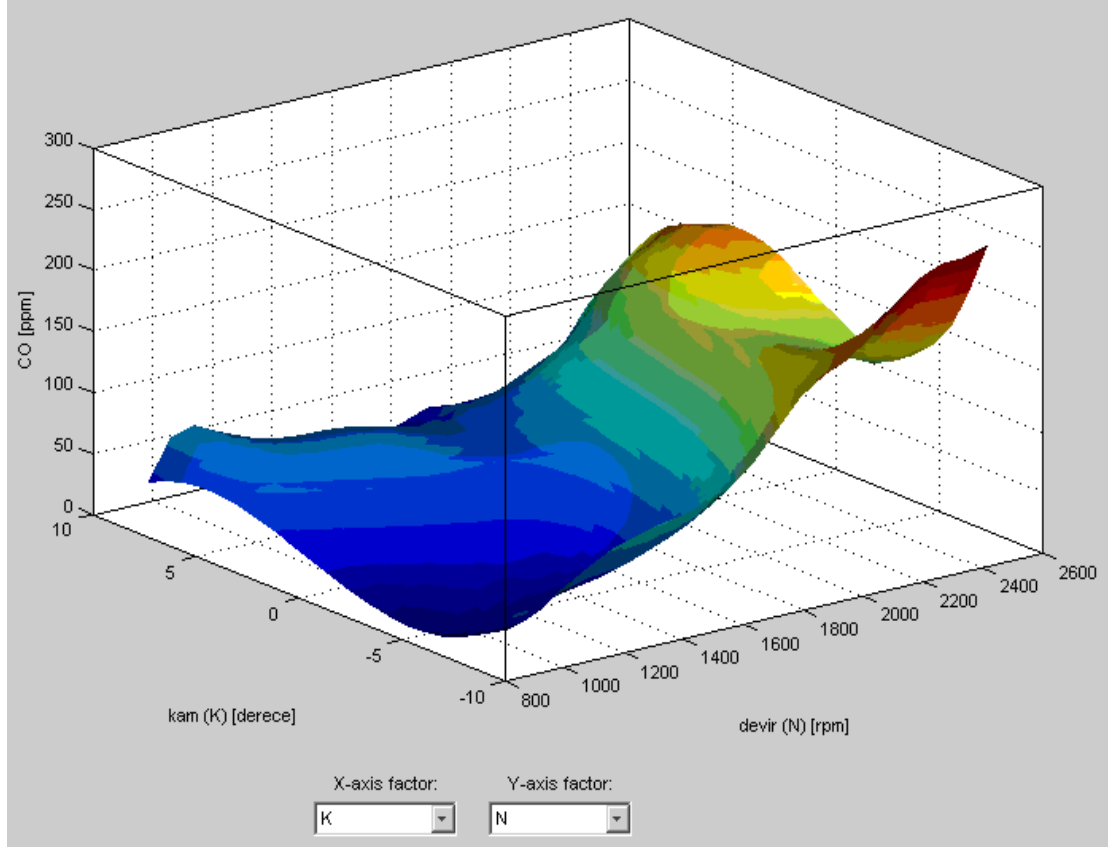
Bölüm 7.1.’de anlatılan benzer işlem basamakları bu kez CO emisyonunun modellenmesi için tekrarlandığında, CO emisyonu için denenen model fonksiyonları ve bunlara ait istatistiksel parametrelerin değerleri Tablo 7.5’de gösterilmiştir.

Tablo 7.5. CO emisyonu için iki aşamalı modellemeye ait istatistiksel veriler

Model	Lokal Model	Global Model	Lokal RMSE	İki aşamalı RMSE	PRESS RMSE
A	Kübik	Kübik	39.311	33.092	34.497
B	Kübik	Kübik-RBF	39.311	30.420	31.759
C	Kübik	Poly_4-RBF	39.311	30.436	32.440
D	Kübik	Poly_5-RBF	39.311	30.463	33.106
E	Kübik	Poly_6-RBF	39.311	30.152	31.533
F	Kübik	Poly_7-RBF	39.311	30.218	32.097
G	Kuadratik	Poly_5-RBF	43.632	35.977	36.992
H	Poly_4	Kübik-RBF	39.053	33.310	41.997
İ	Poly_4	Poly_7-RBF	39.053	33.468	41.714
J	Poly_5	Poly_4-RBF	32.192	40.856	63.288
K	Poly_5	Poly_5-RBF	32.192	45.609	71.934
L	Poly_5	Poly_6-RBF	32.192	37.064	63.614
M	Poly_6	Poly_5	30.044	37.772	46.038

Tablo 7.5 incelendiğinde, en küçük iki aşamalı RMSE ve PRESS RMSE değeri model E'ye ait olduğu için bu en iyi model olarak seçilmiş olup, bu modele ait yüzey cevap grafiği Şekil 7.24'de gösterilmiştir.

Şekil 7.24'de gösterilen cevap yüzeyi CO emisyonu ile motor devri ve kam açısı arasındaki ilişkiyi genel olarak göstermekte olup, bu grafik yardımıyla rastgele seçilen motor devri ve kam açısına karşılık gelen CO emisyonunun miktarı net bir sayısal değer olarak bulunamaz.



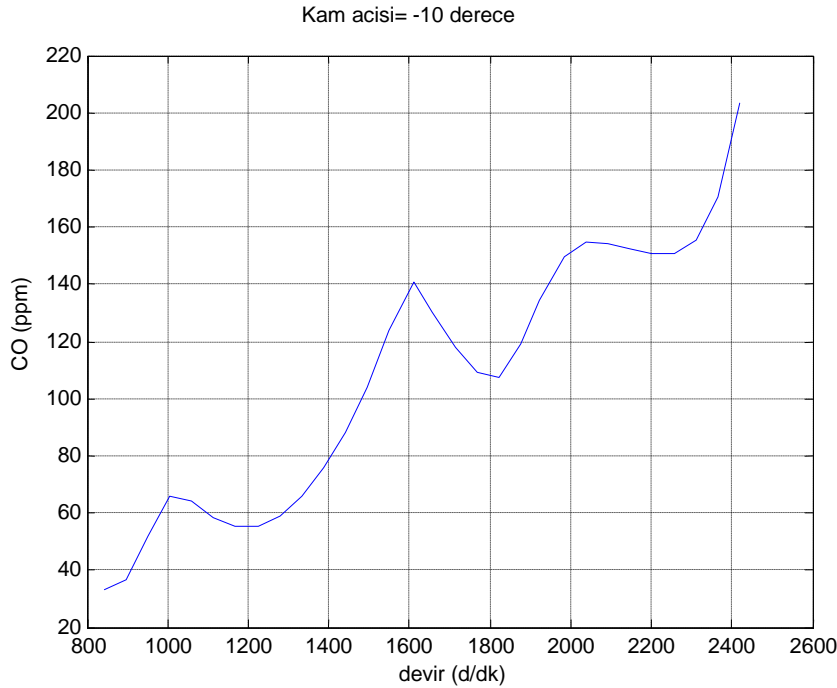
Şekil 7.24. CO emisyonu için model E'ye ait model cevap grafiği

7.4.1. CO emisyonu modelin uygunluğunun kontrol edilmesi

İki aşamalı modelleme yaklaşımı ile yaratılan ve istatistiksel parametrelerin yardımıyla en iyi model olarak seçilen model E'nin grafiksel olarak da kontrol edilmesine gerek duyulmaktadır.

Bu amaçla kam açısı -10 derece iken motor devrine karşılık CO emisyonunu gösteren eğri model E kullanılarak elde edilmiş olup, bu eğri Şekil 7.25'de sunulmuştur.

Şekil 7.25 incelendiğinde, motor devri artarken CO emisyonunun hızla yükseldiği görülmektedir. Bu artış beklenen bir davranıştır. Çünkü motor devri hızlanırken, gerektiğinden daha fazla yakıt silindire püskürtülür. Bu da tam yanmanın olmamasına, dolayısıyla CO emisyonunun artmasına neden olur. [37]



Şekil 7.25. Model E için motor devrine karşılık gelen CO emisyonu

7.5. Minimum CO Emisyonu İçin Kam Açısının Kalibre Edilmesi

Bölüm 7.4.'te en iyi model olduğuna karar verilen model kalibre için CAGE'e yüklediğinde ve Bölüm 7.3.'te anlatılan işlemler bu sefer CO emisyonunun minimize edilmesi için tekrarlandığında, MDKY tarafından tespit edilen değişik devir ve tork kombinasyonları için minimum CO emisyonunu veren kam açıların değerleri Tablo 7.6'da gösterilmiştir.

Tablo 7.6 incelendiğinde, özgül yakıt sarfiyatının kalibrasyonunda olduğu gibi CO emisyonunun kalibrasyonu için MDKY tarafından yine kam açısı değerlerinin noktadan sonra iki hane olarak bulunduğu görülmektedir. Dikkati çeken bir diğer unsur ise, Tablo 7.4.'te olduğu gibi, yine -4.69 ve -3.72 gibi değerlerin olduğudur. Bunun için bu değerlerin ECU'ya yüklenmesinden evvel değerlerin 0.5 seviyesinde yuvarlatılması gereklidir.

Tablo 7.6. Minimum CO emisyonu için hesaplanan kam açıları

Devir Tork	843	1018	1193	1368	1543	1718	1893	2068	2243	2419
185	-5.81	-6.09	-5.50	-4.38	-4.92	-1.15	8.0	8.0	8.0	8.0
391	-5.09	-5.77	-5.34	-4.88	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
596	-4.90	-5.22	-4.92	-4.87	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
802	-4.91	-4.91	-4.68	-4.68	-4.19	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
1008	-4.91	-4.56	-4.60	-4.46	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
1213	-4.48	-4.96	-4.81	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
1419	8.0	-5.30	-4.91	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
1625	8.0	-4.91	-4.41	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
1830	-4.99	8.0	8.0	8.0	4.99	6.26	7.64	8.0	8.0	8.0
2036	-3.72	8.0	8.0	3.25	3.92	4.79	6.36	8.0	8.0	-6.01

7.6. Yazılan Program ve MDKY İle Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Modele dayalı kalibrasyon yazılımı kullanılarak bir motorun iki aşamalı motor haritalama yaklaşımı ile nasıl modelleneceği ve kalibre edileceği çalışmanın bu aşamasına kadar detaylı bir şekilde anlatılmış ve seçilen kübik fonksiyon ile de örneklendirilmiştir.

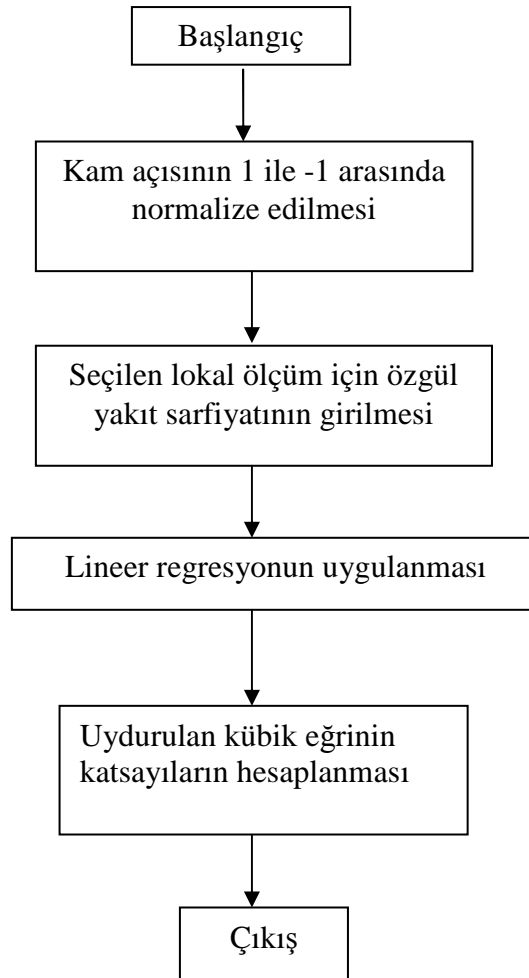
Bu bölümde ise hem modelleme hem de kalibrasyon işlemleri için MDKY tarafından elde edilen değerlerin nasıl elde edildiği ve bu işlemlerin matematik alt yapısı detaylı olarak anlatılmıştır. Çalışmanın devamında ise MATLAB’de kod yazılarak hem MDKY tarafından hem de yazılan kodla elde edilen değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

7.6.1. Modellemenin karşılaştırılması

Özgül yakıt sarfiyatının lokal ve global modellemesi için gerekli veri girişi, hesaplamalar ve açıklamaları içeren bir kod yazılmıştır. Burada yapılacak olan işlem MDKY ve yazılan kodla elde edilen değerlerin karşılaştırılması olacağı için, lokal

modelin karşılaştırılmasında daha evvel örnek olarak verilen 15 nolu test grubu kullanılacaktır. Karşılaştırılma esnasında hem birinci aşama modelleme hem de ikinci aşama modelleme için kullanılacak fonksiyon kübiktir.

Modellemenin birinci aşaması için yazılan kodun akış diyagramı Şekil 7.26'da gösterilmiştir.



Şekil 7.26. Birinci aşama akış diyagramı

Modellemenin birinci ve ikinci aşamalarında lineer regresyon uygulanmakta olup, lineer regresyonun genel matris çözümü aşağıda gösterilmiştir;

$$A = X' * X \quad (7.21)$$

$$B = X' * Y \quad (7.22)$$

$$C = A^{-1} * B \quad (7.23)$$

(7.21) nolu eşitlikte X kam açısını, (7.22) nolu eşitlikte ise Y her bir kam açısında ölçülen özgül yakıt sarfiyatını göstermektedir. (7.23) nolu eşitlikte görülen C ise birinci modelleme aşamasında elde edilen eğrinin katsayılarını vermektedir.

Şekil 7.25'te gösterilen algoritma için yapılması gereken ilk husus ölçümlerin yapıldığı -10, -8, -6, -4, -2, 2, 4, 6 ve 8 derecelik kam açılarının matematiksel kolaylık sağlamasından dolayı -1 ile 1 değerleri arasında normalize edilmesi gerekmektedir.

Modelleme işlemi esnasında kullanılacak fonksiyonun kübik olması sebebiyle normalize işleminden sonra elde edilen X matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -0.75 & 0.5625 & -0.4219 \\ 1 & -0.50 & 0.25 & -0.125 \\ 1 & -0.25 & 0.0625 & -0.0156 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.25 & 0.0625 & 0.0156 \\ 1 & 0.50 & 0.25 & 0.125 \\ 1 & 0.75 & 0.5625 & 0.4219 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

Algoritmanın ikinci basamağı ise kam açılarında ölçülen özgül yakıt sarfiyatı değerlerinin girilmesiyle Y vektörünün oluşturulmasıdır. Ölçülen özgül yakıt sarfiyatı aşağıda belirtilmiştir.

$$Y = \begin{bmatrix} 460.9 \\ 486.8 \\ 499.1 \\ 498.3 \\ 480.9 \\ 460.2 \\ 456.3 \\ 471.0 \\ 462.1 \end{bmatrix} \quad (7.25)$$

Bundan sonra yapılması gereken sırasıyla (7.21) ve (7.22) nolu eşitliklerin kullanılmasıyla A ve B 'nin hesaplanmasında sonra (7.23) nolu eşitlik yardımıyla C 'nin yani kübik fonksiyonun katsayıların bulunmasıdır. Bahsedilen işlemlerin yapılmasından sonra elde edilen katsayılar (7.26) nolu eşitlikte gösterilmiştir.

$$C = \begin{bmatrix} 482.3329 \\ -51.8781 \\ -17.4390 \\ 55.3104 \end{bmatrix} \quad (7.26)$$

Değişik kam açılarında ölçülen özgül yakıt sarfiyatının modellenmesi sonucunda elde edilen fonksiyonun ifadesi (7.26) nolu eşitlik sayesinde aşağıda gösterildiği şekilde elde edilmiş olur.

$$\text{özgülyakit} = 482.3329 - 51.8781 \times K - 17.4390 \times K^2 + 55.3104 \times K^3 \quad (7.27)$$

İki aşamalı modelleme yaklaşımının birinci aşamasında 15 nolu test grubu için yazılan kodla elde edilen özgül yakıt sarfiyatının eşitliği (7.27) nolu eşitlikte gösterildiği gibi elde edilir. MDKY ile elde edilen değer karşılaştırılması için yapılması gereken (7.3) nolu eşitlikle (7.26) nolu eşitliğin mukayese edilmesidir. Bu mukayesenin daha net görülebilmesi için (7.3) nolu eşitliğin katsayılarının matris olarak yazılması ve bu matris ile (7.26) nolu matris arasındaki değişimin yüzde olarak ifade edilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

(7.3) nolu eşitliğin katsayıların matrisi aşağıda gösterilmiştir;

$$C1 = \begin{bmatrix} 481.518 \\ -50.38485 \\ -15.65527 \\ 53.31388 \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

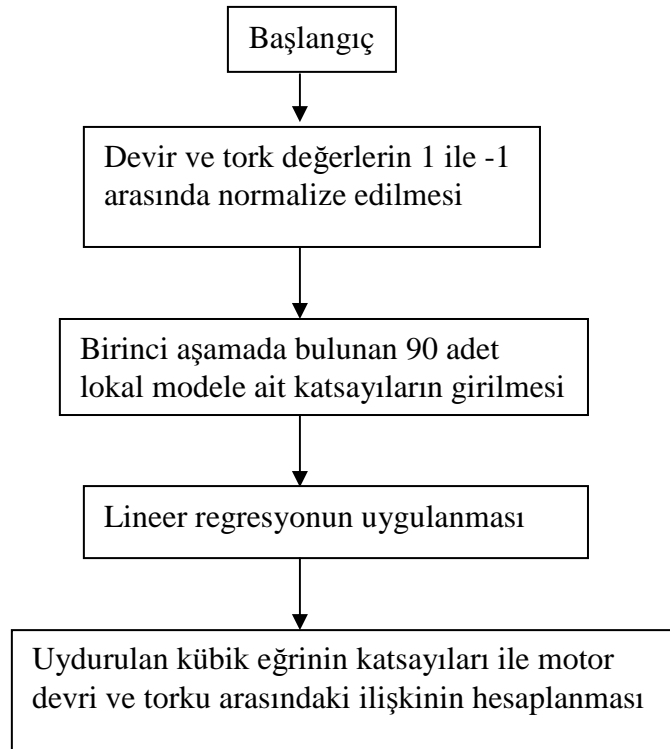
(7.26) ve (7.28) nolu eşitlikler arasındaki fark yüzde olarak (7.29) nolu eşitlikte verilmiştir.

$$Fark = \begin{bmatrix} 0.16 \\ 0.30 \\ 0.36 \\ 0.41 \end{bmatrix} \quad (7.29)$$

(7.29) nolu eşitlik incelendiğinde yazılan kodla MDKY tarafından bulunan katsayılar arasında çok az bir fark olduğu görülmektedir. Değerler arasındaki farkın –10 ile 8 derece arasında değişen kam açısının normalize edilmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Çünkü yazılan kodda –10 ile 8 derece kam açısı arasının normalize edilmesi esnasında, MATLAB’de mevcut olan ‘linspace’ komutu ile bu aralık 9 eşit aralığa bölünmüştür. Bunun sonucunda yazılan kodla, örnek olarak normalize edilen –8 derece kam açısı –0.75 bulunmuş iken, bu değer MDKY tarafından –0.7778 olarak bulunmuştur. Bu iki değer arasındaki bu farkta doğal olarak (7.29) nolu eşitlikte görülen farklara neden olmaktadır.

Modellemenin birinci aşaması tüm lokal modeller için yukarıda anlatıldığı gibi gerçekleştirildikten sonra, her bir lokal model için (7.27) nolu eşitlikteki gibi ifade elde edilecektir. Elde edilen 90 adet lokal modelin katsayıları da doğal olarak birbirinden farklı olacaktır. Bu işlemlerden sonra yapılması gereken modellemenin ikinci aşamasını gerçekleştirmektir.

Modellemenin ikinci aşamasında yapılması gereken (7.2) nolu eşitlikteki genel kübik ifadede ki $Beta_1$, $Beta_K$, $Beta_K^2$, ve $Beta_K^3$ katsayıları ile modelin global girişleri olan motor devri ve torku arasındaki ilişkiyi hesaplamaktır. Bu hesaplamamanın algoritması Şekil 7.27’de gösterilmektedir.



Şekil 7.27. İkinci aşama akış diyagramı

Modellemenin bu safhasında yapılması gereken motor devri ve torkunun normalize edilmesiyle $X1$ matrisinin oluşturulmasıdır. $X1$ matrisinin yapısı aşağıda verilmiştir;

$$X1 = \begin{bmatrix} 1 & N & T & N^2 & N \times T & T^2 & N^3 & N^2 \times T & N \times T^2 & T^3 \end{bmatrix} \quad (7.30)$$

Bir sonraki adım ise birinci aşamada modellemesi yapılan 90 adet lokal modelin katsayıları ile $Y1$, $Y2$, $Y3$ ve $Y4$ vektörlerini elde etmektir. Modelleme esnasında kübik fonksiyon kullanıldığı için 4 adet katsayı vektörü bulunmaktadır. Bundan sonra yapılacak işlem lineer regresyonun uygulanmasıyla $Beta_1$, $Beta_K$, $Beta_K^2$, ve $Beta_K^3$ katsayılarını motor devri ve torkun fonksiyonu olarak elde etmektir. Bu işlem için yapılacak hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir.

$$Beta_1 = ((X1' * X1)^{-1}) * (X1' * Y1) \quad (7.31)$$

$$Beta_K = ((X1' * X1)^{-1}) * (X1' * Y2) \quad (7.32)$$

$$Beta_K^2 = ((X1' * X1)^{-1}) * (X1' * Y3) \quad (7.33)$$

$$Beta_K^3 = ((X1' * X1)^{-1}) * (X1' * Y4) \quad (7.34)$$

MDKY tarafından bulunan ' $Beta_1$ ', ' $Beta_K$ ', ' $Beta_K^2$ ' ve ' $Beta_K^3$ ' ile motor devri ve arasındaki ilişki sırasıyla (7.8), (7.9), (7.10) ve (7.11) nolu eşitliklerde belirtilmiştir. Yazılan kod sayesinde (7.31), (7.32), (7.33) ve (7.34) nolu eşitliklerle bulunan ilişki ise her bir katsayı için aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} Beta_1 = & 234.2825 + 40.3321 \times N - 20.9217 \times T + 31.6760 \times N^2 \\ & - 91.032 \times N \times T + 228.8831 \times T^2 - 0.0310 \times N^3 - 20.1126 \times N^2 \times T \\ & + 102.7191 \times N \times T^2 - 244.171 \times T^3 \end{aligned} \quad (7.35)$$

$$\begin{aligned} Beta_K = & 0.696203 - 13.3991 \times N + 27.9004 \times T + 22.3186 \times N^2 \\ & + 6.3966 \times N \times T - 9.0986 \times T^2 + 17.151 \times N^3 - 35.5889 \times N^2 \times T \\ & - 14.0572 \times N \times T^2 + 5.1648 \times T^3 \end{aligned} \quad (7.36)$$

$$\begin{aligned} Beta_K^2 = & -3.6312 - 8.0206 \times N + 22.8096 \times T + 22.460 \times N^2 \\ & - 11.013 \times N \times T - 1.8824 \times T^2 + 10.1859 \times N^3 - 30.0848 \times N^2 \times T \\ & + 20.0564 \times N \times T^2 + 0.4544 \times T^3 \end{aligned} \quad (7.37)$$

$$\begin{aligned} Beta_K^3 = & 4.7923 + 13.1170 \times N - 22.6943 \times T - 20.901 \times N^2 \\ & + 2.5204 \times N \times T + 11.3060 \times T^2 - 18.6757 \times N^3 + 38.2890 \times N^2 \times T \\ & + 15.5403 \times N \times T^2 - 12.9098 \times T^3 \end{aligned} \quad (7.38)$$

MDKY ve yazılan kodla hesaplanan $Beta_1$, $Beta_K$, $Beta_K^2$, ve $Beta_K^3$ değerleri arasındaki fark hesaplandığında yüzde olarak sırasıyla aşağıda gösterilmiştir.

$Beta_1$ için fark,

$$Fark_1 = \begin{bmatrix} 0.0194 \\ -0.0203 \\ -0.0037 \\ -0.0317 \\ 0.0218 \\ -0.0362 \\ -0.0885 \\ 0.0741 \\ 0.0102 \\ -0.0262 \end{bmatrix} \quad (7.39)$$

Beta_K için fark,

$$Fark_K = \begin{bmatrix} 0.0020 \\ -0.0202 \\ 0.0027 \\ -0.0025 \\ -0.0051 \\ -0.0039 \\ 0.0267 \\ -0.0157 \\ 0.0024 \\ 0.0015 \end{bmatrix} \quad (7.40)$$

Beta_K^2 için fark,

$$Fark_K^2 = \begin{bmatrix} 0.0048 \\ 0.0018 \\ -0.0102 \\ -0.0081 \\ -0.0010 \\ -0.0051 \\ 0.0136 \\ -0.0051 \\ -0.0309 \\ 0.0158 \end{bmatrix} \quad (7.41)$$

Beta_K^3 için fark

$$Fark_K^3 = \begin{bmatrix} -0.0015 \\ -0.0014 \\ -0.0119 \\ 0.0029 \\ 0.0088 \\ 0.0008 \\ -0.0074 \\ 0.0215 \\ 0.0203 \\ 0.005 \end{bmatrix} \quad (7.42)$$

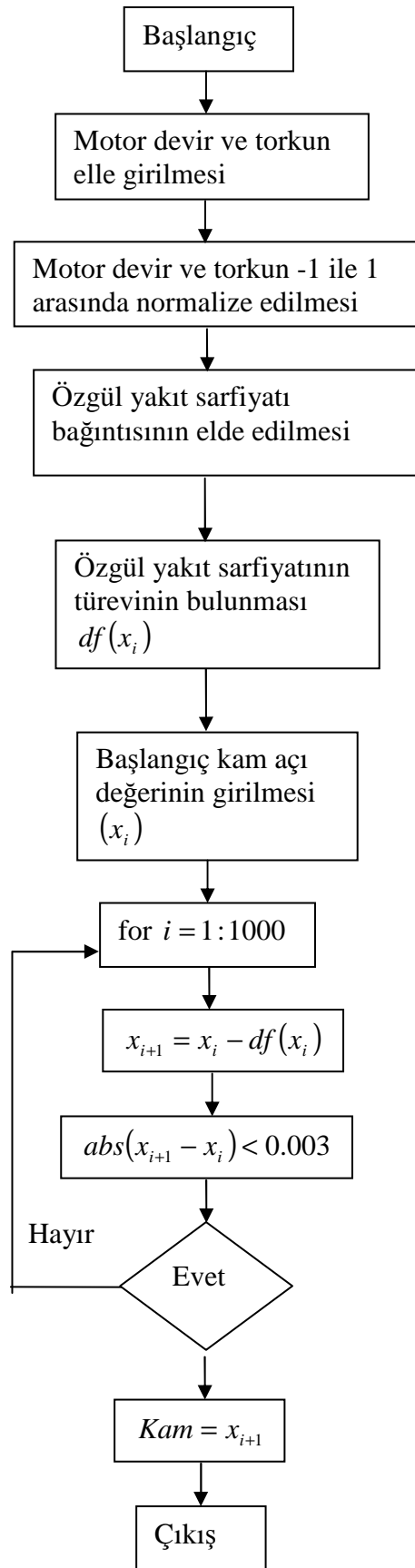
(7.39), (7.40), (7.41) ve (7.42) nolu eşitliklerle verilen farklar karşılaştırıldığında çok küçük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların, modellemenin birinci aşamasında belirtildiği gibi yine normalizasyon işleminden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

7.6.2. Kalibrasyonun karşılaştırılması

Kalibrasyon işlemi için program yazıldı. MDKY ile elde edilen değerler ile yazılan programla elde edilen değerler karşılaştırıldı. Kullanılan MDKY'daki yöntemle aynı olması için [38] yazılan programda optimizasyon yöntemi olarak arama yöntemlerinden biri olan en dik düşüm ve modelin fonksiyonu olarak da kübik fonksiyon kullanılmıştır.

Dizel motorda yanmanın her ne kadar kabul edilebilir doğruluk seviyesinde modellenebilmesine rağmen, motor parametrelerin matematiksel optimizasyon yöntemi ile optimize edilmesi mümkün değildir. Bundan dolayı dizel motor parametrelerin optimize edilebilmesi için arama yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır.[39]

Bu programla, istenilen motor devri ve torku elle girilmekte ve sonucunda minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açısı değeri bulunmaktadır. Yazılan programın akış diyagramı Şekil 7.28'de verilmiştir.



Şekil 7.28. Optimizasyon akış diyagramı

MDKY ile elde edilen değerlerin karşılaştırılması için denenen motor torku ve motor hızına karşılık özgül yakıt sarfiyatını minimize edecek kam açısı değerleri ve bu değerlerdeki özgül yakıt sarfiyatları Tablo 7.7’de gösterilmiştir.

Tablo 7.7. Kalibrasyon değerlerinin karşılaştırılması

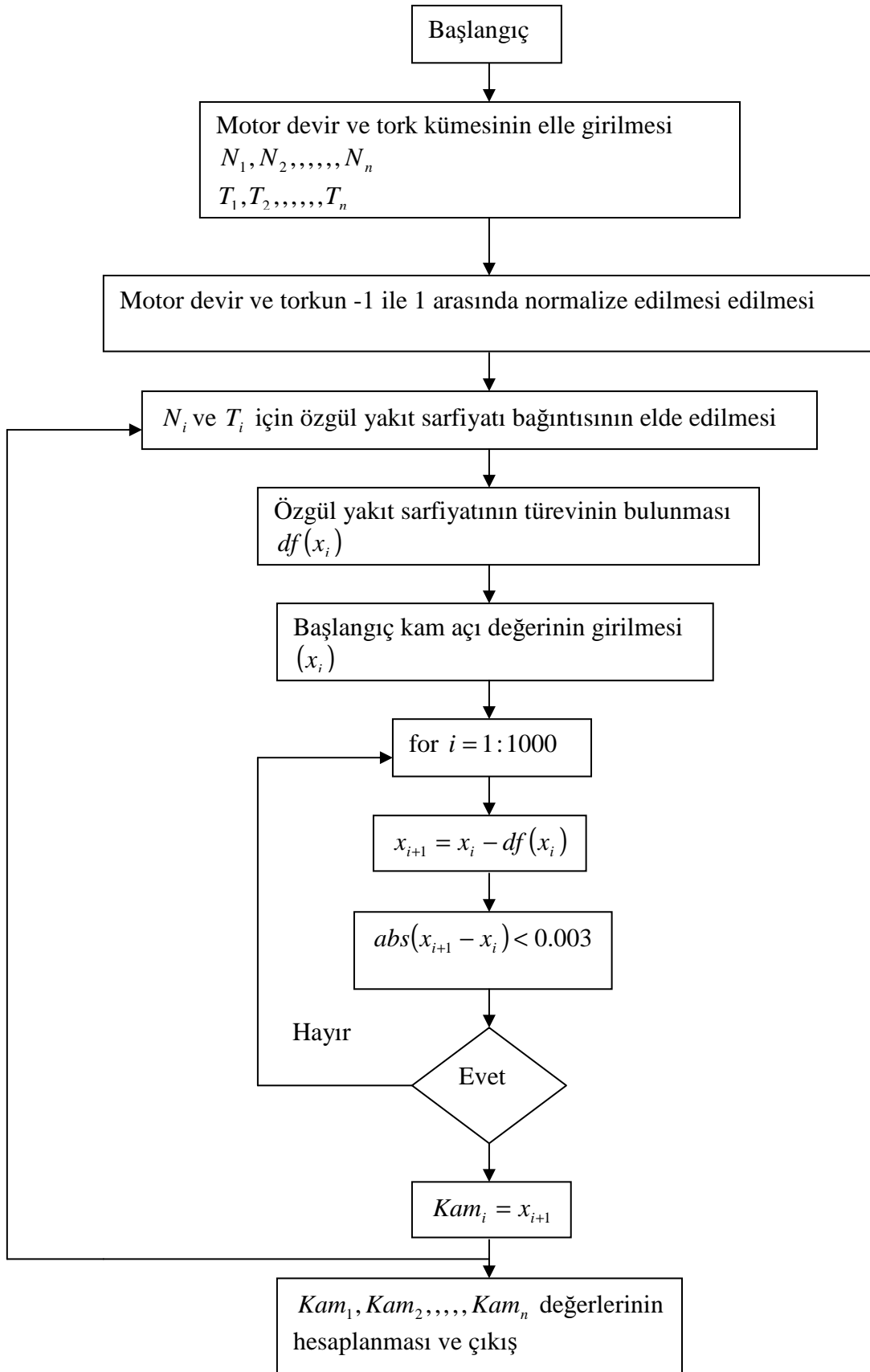
Motor Devri (rpm)	Motor Torku (Nm)	MDKY kam açısı (derece)	Yazılan kod kam açısı (derece)	MDKY özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	Yazılan kod özgül yakıt sarfiyatı (g/kWh)
843	391	-7.905	-8.556	362.35	362.011
843	596	-6.42	-6.746	268.771	268.541
1018	1830	-5.142	-5.184	220.984	221.658
1193	2036	-5.084	-4.895	166.334	164.817
1543	1830	-5.037	-4.951	232.885	233.405
1718	1625	-6.020	-6.446	250.131	250.239
2068	1625	-8.204	-8.624	265.902	266.472
2243	802	-2.998	-3.064	362.157	362.741
2419	596	-2.999	-2.460	521.629	523.038

Tablo 7.7’de MDKY ve yazılan programla elde edilen kam açıları karşılaştırıldığında aralarında maksimum %7.6 ve minimum %0.8 fark olduğu görülmektedir.

7.6.3. Açık çevrimli kontrol sistemi için programın yazılması

Bu aşamada yapılan çalışma bir veri kümesi halinde girilen devir ve tork değerleri için minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açısının bulunmasıdır. Bunun için yine MATLAB’de program yazılmış olup, bu programın akış diyagramı Şekil 7.29’da verilmiştir. Yazılan bu programın kodu EK-A’da, kodun çalıştırılmasında sonra elde edilen sonuçlar ise EK-B’de gösterilmiştir

Yazılan bu program sayesinde açık çevrimli bir kontrol sisteminde girilen herhangi bir motor devri ve torkuna karşılık minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açısı bulunabilecektir.



Şekil 7.29. Açık çevrimli kontrol sistemi akış diyagramı

BÖLÜM 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, temel olarak dört farklı çalışma yapılmıştır. İlk olarak dizel motora ait özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu cevapları iki aşamalı modelleme yaklaşımıyla modellenmiştir. İkinci çalışma olarak özgül yakıt sarfiyatı cevabı tek aşamalı modelleme yaklaşımıyla da modellenerek, iki ve tek aşamalı modelleme yaklaşımı mukayese edilmiştir. Üçüncü çalışma olarak iki aşamalı modelleme yaklaşımıyla modellenen özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyon cevapları kalibre edilerek minimum özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu verecek şekilde kam açıları (püskürtme avansı) kalibre edilmiştir. Son olarak da hem modelleme hem de kalibrasyon için kod yazılmış ve bahse konu kodla elde edilen değerlerle MDKY tarafından elde edilen değerler mukayese edilmiştir.

İki aşamalı modelleme sonucunda en iyi model olduğuna karar verilen modelle elde edilen özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonu cevaplarının dizel motorun kam açısı orijinal değerindeyken (-10 derece) yapılan ölçümlerle mukayesesi farklı test grupları için yapılmış ve sonuçları sırasıyla Tablo 8.1 ve Tablo 8.2’de gösterilmiştir.

Tablo 8.1 ve 8.2’deki test grupları rastgele seçilmiştir. Tablo 8.1 incelendiğinde test esnasında ölçülen özgül yakıt sarfiyatı ile modelleme sonucunda elde edilen değerler arasında maksimum %8.1 ve minimum %0.75 fark olduğu görülmektedir.

CO emisyonu için Tablo 8.2 incelendiğinde ise ölçülen değerlerle modelleme sonucunda elde edilen değerler arasında maksimum %37.5 ve minimum %7.6 fark olduğu görülmektedir.

Tablo 8.1. Özgül yakıt sarfiyatının mukayesesi

Test Grubu	Devir (rpm)	Tork (Nm)	Güç (kW)	Ölçüm Değeri (g/kWh)	Model Değeri (g/kWh)	% Hata
10	851	401.9	35.8	386.3	355	8.1
20	1000	607	63.6	280.6	291	3.7
30	1200	799.9	100.6	232.3	245	5.4
40	1397	1005	147	257	247	3.9
50	1594	1199.3	200	258.9	247	4.5
60	1824	1424.9	272.1	242.9	247	1.6
70	2005	1593.6	334.8	249.4	254	1.8
80	2200	1793.6	413.5	253.1	255	0.75
90	2399	1647.4	414.2	287.6	291	1.2

Tablo 8.2. CO emisyonunun mukayesesi

Test Grubu	Devir (rpm)	Tork (Nm)	Güç (kW)	Ölçüm Değeri (ppm)	Model Değeri (ppm)	% Hata
10	851	401.9	35.8	79	68	14
20	1000	607	63.6	69	64	7.2
30	1200	799.9	100.6	95	84	11.5
40	1397	1005	147	88	121	37.5
50	1594	1199.3	200	94	117	24.4
60	1824	1424.9	272.1	131	165	26
70	2005	1593.6	334.8	156	204	30.7
80	2200	1793.6	413.5	150	167	11.3
90	2399	1647.4	414.2	138	152	10.1

Özgül yakıt sarfiyatı için en iyi olduğuna karar verilen modelin iki aşamalı RMSE ve PRESS RMSE değerleri sırasıyla 23.958 ve 25.481 iken CO emisyonu için en iyi olduğuna karar verilen modelin iki aşamalı RMSE ve PRESS RMSE değerleri ise sırasıyla 30.152 ve 31.533'dür. Bunun için Tablo 8.1'deki maksimum % hata değerinin Tablo 8.2'deki maksimum % hata değerinden küçük olması beklenen

sonuçdur. Fakat modelin istatistiksel parametreleri ile elde edilen % hata arasında herhangi bir öngörü yapılamayacağı için modelleme sonucunda elde edilen modelin güvenilirliği için Tablo 8.1 ve 8.2'deki karşılaştırmanın yapılması gerekmektedir.

Motor haritasının çıkartılmasında kullanılan iki aşamalı modelleme yaklaşımının klasik tek aşamalı modelleme yaklaşımıyla mukayesesi için özgül yakıt sarfiyatı iki aşamalı modellemenin haricinde tek aşamalı modelleme yaklaşımıyla da modellenmiştir.

İki aşamalı ve tek aşamalı modelleme yaklaşımı mukayese edildiğinde, iki aşamalı modelleme ile mevcut verilere daha uygun modellerin elde edildiği görülmüştür. Bu sonuca her iki modelleme yaklaşımıyla elde edilen standart istatistiksel parametrelerin bulunduğu Tablo 7.2 ve Tablo 7.3'nin karşılaştırılmasıyla varılmıştır. Tablo 7.2'de özgül yakıt sarfiyatı modellemesinde kullanılan Poly_6-RTF'nin iki aşamalı RMSE ve PRESS RMSE değerleri sırasıyla 23.958 ve 25.481 iken Tablo 7.3'deki tek aşamalı modellemede kullanılan Poly_6-RTF'nin RMSE ve PRESS RMSE değerleri sırasıyla 30.383 ve 31.752'dir.

Tek aşamalı modelleme sonucunda elde edilen özgül yakıt sarfiyatının ifadesi iki aşamalı modellemeye nazaran çok daha kompleks ve karışıktır. Bundan dolayı burada elde edilen ifade herhangi bir mühendislik öngörüsüyle mukayese edilememektedir.

İki aşamalı modellemenin kullanılmasında elde edilen bir diğer tecrübe ise, aynı fonksiyonunun kullanımıyla elde edilecek modelin iki aşamalı modellemeyle, tek aşamalı modellemeye nazaran daha kısa sürede elde edilmesidir.

İki aşamalı modelleme yaklaşımının en önemli avantajı ise, modellemenin her iki aşamasında da farklı fonksiyon tipinin seçilebilmesidir. Bu da elde edilen nihai modelin daha düşük RMSE değerine sahip olmasına, yani mevcut verilere daha uygun bir model elde edilmesine neden olmaktadır.

İki ve tek aşamalı modellemenin ortak avantajı ise, modelleme sonucunda öngörülen değerle gözlemlenen değer arasındaki farkları Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.19'daki gibi göstermesidir. Bu değerler arasındaki fark eşik değerden fazla olduğu takdirde kırmızı daire içine alınmaktadır. Bu kırmızı dairelerle gösterilen test grubu veya noktalarının, modelin herhangi bir özel karakterini yansıtmadığına karar verilirse, istendiği takdirde modellemede kullanılmayarak daha iyi bir model yaratılmasına yardımcı olur.

Modellemeden sonra minimum özgül yakıt sarfiyatı ve CO emisyonunu sağlayacak şekilde kam açısının kalibrasyonu yapılmıştır. Tablo 8.3'de kam açısı -10 derece iken rastgele seçilen test grupları için, ölçülen özgül yakıt sarfiyatı ve kalibrasyon sonucu aynı test grupları için minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açıları ile bu kam açılarında elde edilecek özgül yakıt sarfiyatları gösterilmiştir.

Tablo 8.3. Özgül yakıt sarfiyatının kalibrasyonu

Test Grubu	Devir (rpm)	Tork (Nm)	Güç (kW)	Ölçüm Değeri (g/kWh)	Minimumu veren kam açısı (derece)	Özgül yakıt sarfiyatı (g/kWh)
10	851	401.9	35.8	386.3	-5.12	333.89
20	1000	607	63.6	280.6	8	281.2
30	1200	799.9	100.6	232.3	-10	245
40	1397	1005	147	257	-8.2	246.06
50	1594	1199.3	200	258.9	3.43	242.01
60	1824	1424.9	272.1	242.9	-10	247
70	2005	1593.6	334.8	249.4	-10	254
80	2200	1793.6	413.5	253.1	-6.50	253.3
90	2399	1647.4	414.2	287.6	-5.50	282.40

Bu çalışmada kullanılan dizel motorun, fabrika ayarlarında özgül yakıt sarfiyatı 2216 rpm ve 2549.9 Nm'de 254-266 g/kWh arasında yer almaktadır. Fakat bu devir ve

tork değerlerinde ölçüm yapılmadığı için kalibrasyon işleminin değerlendirilmesi için Tablo 8.3'deki test grupları kullanılmıştır.

Tablo 8.3 incelendiğinde kam açısının kalibre edilmesiyle özgül yakıt sarfiyatında tasarruf sağlanabildiği görülmektedir.

Tablo 8.3'deki çalışmanın benzeri CO emisyonu için de yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 8.4'de sunulmuştur.

Tablo 8.4. CO emisyonunun kalibrasyonu

Test Grubu	Devir (rpm)	Tork (Nm)	Güç (kW)	Ölçüm Değeri (ppm)	Minimumu veren kam açısı (derece)	CO emisyonu (ppm)
10	851	401.9	35.8	79	-5.21	13.12
20	1000	607	63.6	69	-5.21	0.91
30	1200	799.9	100.6	95	-4.95	11.35
40	1397	1005	147	88	-4.21	29.16
50	1594	1199.3	200	94	8	28.71
60	1824	1424.9	272.1	131	8	23.88
70	2005	1593.6	334.8	156	8	47.71
80	2200	1793.6	413.5	150	8	44.22
90	2399	1647.4	414.2	138	8	53

Tablo 8.4'deki değerler incelendiğinde, kam açısının kalibrasyonu sonucunda CO emisyonunda da azalma olduğu görülmektedir.

Bu çalışmanın devamında hem modelleme hem de kalibrasyon işlemleri için kod yazılarak MDKY tarafından kullanılan matematik alt yapı detaylı olarak incelenmiştir. Yazılan kodun doğruluğunun ispatı için gerek modelleme ve gerekse kalibrasyon sonucunda elde edilen değerler mukayese edilmiştir.

Modellemenin birinci aşaması mukayese edildiğinde, kod ve MDKY ile bulunan modelin katsayıları arasında maksimum %0.41 (7.29 nolu eşitlik) fark olduğu, ikinci aşama için ise bu farkın maksimum %0.0885 (7.39 nolu eşitlik) olduğu görülmektedir..

Kalibrasyon işleminin mukayesesi için Tablo 7.7 incelendiğinde, rastgele seçilen motor devir ve torkuna karşılık minimum özgül yakıt sarfiyatını verecek kam açısının kod ve toolbox'la bulunan değerleri arasında maksimum %7.6 fark bulunmaktadır. Bu fark modellemeye nazaran büyük olmakla birlikte bu farkın özgül yakıt sarfiyatına etkisi %0.093'dür.

Modelleme ve kalibrasyon için yazılan kod ve MDKY ile elde edilen değerler arasındaki farklar dikkate alındığında, yazılan kodla elde edilen değerlerin MDKY tarafından elde edilen değerlere çok yakın olduğu açıktır. Ortaya çıkan küçük farklılıkların da kam açısının normalize edilmesi sırasındaki farklılıktan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Yapılan bu çalışmanın sonucunda elde edilen en önemli sonuç, bir motora ait model haritasının çıkartılması sırasında iki aşamalı modelleme yaklaşımının seçilmesinin hem modelleme hem de kalibrasyon sırasında avantajlar sağladığının ispat edilmesidir.

Diğer bir sonuç ise, doğru modelleme ve kalibrasyonla bir dizel motorun hem özgül yakıt sarfiyatının hem de CO emisyonunun kam açılarının değiştirilmesiyle azaltılabilesidir.

Bu çalışmanın iki aşamalı modellemeyle ilgilenlere en büyük katkısı, iki aşamalı modelleme yaklaşımının matematiksel alt yapısının detaylı ve basite indirgenmiş bir şekilde anlatılmış olmasıdır.

Çalışmanın diğer bir katkısı ise, modele dayalı kalibrasyon yazılımının nasıl kullanılacağına detaylı olarak anlatılmış olması ve hatta iki aşamalı modelleme ile

kalibrasyon için program yazılmak istendiği takdirde kullanılması gereken akış diyagramlarının gösterilmiş olmasıdır.

Bu çalışmanın devamında bir elektronik kontrol ünitesinin dizayn çalışmalarının yapılabileceği değerlendirilmektedir. Burada unutulmaması gereken husus, bu çalışmada yapılan modelleme ve kalibrasyon işlemlerinde motorun zamana bağlı olarak değişecek parametreleri dikkate alınmamaktadır. Bu tür değişikliklerin dikkate alınması için modelleme ve kalibrasyon işleminin bazı zaman aralıklarında yinelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] SHAYLER P.J., BROOKS T.D., PUGH G.J., GAMBRILL R., The Influence of Pilot And Split-Main Injection Parameters On Diesel Emissions and Fuel Consumption, SAE Technical Paper Series, 2005-01-037
- [2] GUERRIER M., CAWSEY P., The Development of Model Based Methodologies for Gasoline IC Engine Calibration, SAE Technical Paper Series, 2004-01-1446.
- [3] HOLLIDAY T., LAWRENCE A.J., DAVIS T.P., Engine-Mapping Experiments: A Two-Stage Regression Approach, Technometrics, 40, Sayfa 120-126, May 1998.
- [4] HOLLIDAY T., The Design And Analysis of Engine Mapping Experiments: A Two-Stage Approach, PhD Thesis, University of Birmingham, December 1995.
- [5] CARY M., A Model Based Engine Calibration Methodology For A Port Fuel Injection Spark-Ignition Engine, PhD Thesis, University of Bradford, 2003
- [6] SAUNDER R., Investigation Into A Validation Methodology For Non-Parametric Models For Engine Mapping, MSc Thesis, University of Bradford, 2004
- [7] MALONEY P.J., Embedded Torque Estimator for Diesel Engine Control Application, SAE Technical Paper Series, 2004-01-1371.
- [8] CHALLEN B., BARANESCU R., Diesel Engine Reference Book, Second Edition, Replika Press Pvt. Ltd, 1999
- [9] ÇANAKÇI M., ÖZSEVEN A.N., Dizel Motorları Yakıt Enjeksiyon Sistemlerindeki Gelişmeler, Mühendis ve Makina, Cilt 45, Sayı 531, Sayfa 36
- [10] ÖZSEVEN A.N., ÇANAKÇI M., 'Dizel Motorlarında Elektronik Yakıt Kontrol Teknolojisi', Mühendis ve Makina, Cilt:47, Sayı:561, Sayfa 39
- [11] ÇANAKÇI M., ÖZSEVEN A.N., Dizel Motorları Yardımcı Ekipmanlarındaki Gelişmeler, Mühendis ve Makine, Cilt 45, Sayı 530,

Sayfa 38

- [12] www.otokoc.com.tr/showroom/ticari_araclar/cargo/performans.jsp
- [13] www.gtsconcepts.net/compsys.htm
- [14] YILDIZ N., AKBULUT Ö., BİRCAN H., İstatîğe Giriş, Uygulamalı Temel Bilgiler Çözümlü ve Cevaplı Sorular, Aktif Yayınevi, 2002, Sayfa 247
- [15] FREUND R.J., WILSON W.J., Regression Analysis, Statistical Modeling of a Response Variable, Academic Press, 1998
- [16] EDWARDS S.P., GROVE D.M., WYNN H.P., Statistics for Engine Optimization, Professional Engineering Publishing Limited, 2000
- [17] DRAPER N.R., SMITH H., Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1966
- [18] MONTGOMERY D.C., Design and Analysis of Experiments, Fourth Edition, 1996
- [19] BORS A.G., Introduction of the Radial Basis Function (RBF) Networks, University of York, UK, Sayfa 1
- [20] BUHMANN M.D., Radial Basis Functions: Theory and Implementation, Cambridge University Press, 2003
- [21] The Mathworks, Model-Based Calibration Toolbox Model Browser User's Guide, Version 2.1, 2004
- [22] VANDERPLAATS G. N., Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, Vanderplaats Research & Development, Inc., 1999
- [23] CHANG E. K. P., ZAK S. H., An Introduction to Optimization, John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [24] DARDA M., SABLE A., SASTRY G.V.J., CHANDRA H., Detailed Engine Mapping Using E-DACS for Thorough Performance Analysis, SAE Technical Paper Series, 950012
- [25] ESENTURK E., Bir Dizel Motorun Performans Testi İçin İki Aşamalı İstatiksel Motor Haritalama Modellerin Geliştirilmesi, Y.L. Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Nisan 2004
- [26] HAINES N.M., DICKEN C.S., GALLACHER A.M., The Application of An Automatic Calibration Optimization Tool To Direct-Injection Diesels, Statistics for Engine Optimization, Professional Engineering Publishing Ltd, 2000, Sayfa 109
- [27] DAVIS T.P., LAWRENCE A.J., Engine Mapping:A Two-Stage Regression Approach Based On Spark Sweeps, Statistics for Engine Optimization, Professional Engineering Publishing Ltd, 2000, Sayfa 101

- [28] SAMEER M.P., MALONEY P., Overview Of Empirical And Analytic Calibration Processes, The Mathworks, August 2003
- [29] Dr.MORTON T.M., Model-Based Optimal Calibration Of A Dual Independent Variable Valve-Timing Engine, The Mathworks, 2004
- [30] SHERIDAN L.A.D., GOYDER R., CHERRIE J.B., MORTON T.M., Defining A Model-Based Calibration Process For A Twin-Independent Valve Timing Engine, Proceedings of The 2004 IEEE, International Conference On Control Applications, Taipei, Taiwan, September 2-4, 2004, Sayfa 1434
- [31] BENLIGIRAYOĞLU H.B., Minimum Yakıt Kriterine Göre Bir Dizel Motorun Kalibrasyonu, Y.L. Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Aralık 2006
- [32] WARD M.C., BRACE C.J., VAUGHAN N.D., CEEN R., HALE T., KENNEDY G., Investigation of Sweep Mapping Approach on Engine Testbed, SAE Technical Papers, 2002-01-0615, Sayfa 1
- [33] ZHAO H., LADOMMATOS N., Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics, Society of Automotive Engineers, Inc., 2001, Sayfa 707
- [34] HOLMAN J.P., GAJDA W.J., Experimental Methods for Engineers, 5th Edition, McGraw-Hill Book Company, 1989, Sayfa 42
- [35] EDWARDS S.P., CLARKE D.P., PILLEY A.D., ANDERSON P.G.E., HOPKINS M., The Role of Statistics In The Engine Development Process, Statistics for Engine Optimization, Professional Engineering Publishing Ltd, 2000, Sayfa 42
- [36] STONE R., Introduction to Internal Combustion Engines, Third Edition, SAE, Inc., 1985, Sayfa 269
- [37] <http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/tra/20000101-tra-036.pdf>
- [38] SAMPSON D.J.M., SHERIDIAN L.A.D., Engine Calibration:A Model-Based Approach, The Mathworks
- [39] MONTGOMERY D.T., REITZ R.D., Applying Design of Experiments to The Optimization of Heavy-Duty Diesel Engine Operating Parameters, Statistics for Engine Optimization, Professional Engineering Publishing Ltd, 2000, Sayfa 86
- [40] ELMAS Ç. ‘Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama), Seçkin Yayıncılık San. Ve Tic. A.Ş., Nisan 2003, Sayfa 23-27
- [41] MATLAB, ‘Neural Network Toolbox’, Version 2.1, 2004

EKLER

Ek A

clear

%İki-aşamalı modelleme sonucunda elde edilen modelin, CAGE programında minimum yakıt sarfiyatı verecek şekilde yazılan kodla 'En Dik Düşüm (Steepest Descent)' yöntemiyle bulunması için bu program yazılmıştır.

%%
%%%%%%%%

%Burada kullanılacak olan motor devir (N1) ve tork (T1) değerleri bir veri kümesinden seçilecektir. Devir kümesinin adı GN olup, tork kümesinin adı GT olup, bu devir kümesi rastgele seçilmiştir.

GN=[1543 843 843 2419 2243 1368 1718 2068 1018 1193];

GT=[1830 391 596 596 802 1419 1625 1625 1830 2036];

for m=1:10

N1=GN(m)

T1=GT(m)

%N ve T değerlerin -1 ve 1 arasında normalize edilmesi aşağıda gösterilmiştir.

% N aralığı -1 ile 1 arasında bölünüyor.

n1=linspace(-1,1,(2421-843));

% T aralığını -1 ile 1 arasında bölünüyor.

t1=linspace(-1,1,(2041-186));

n2=N1-842;

$$t2=T1-185;$$

$$N=n1(n2);$$

$$T=t1(t2);$$

%Özgül yakıt sarfiyatı denkleminin katsayıların (beta_1, beta_K, beta_K2, beta_K3) bulunması değerlerin bulunması

$$\begin{aligned} \text{beta_1} = & 234.2631 + 40.35239*N - 20.91802*T + 31.7072*(N^2) - \\ & 91.054*N*T + 228.9193*(T^2) - 0.0575461*(N^3) - \\ & 20.18675*(N^2)*T + 102.7089*N*(T^2) - 244.145*(T^3); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{beta_K} = & 0.694203 - 13.3789*N + 27.8977*T + 22.3211*(N^2) + 6.4017*N*T - \\ & 9.09466*(T^2) + 17.125*(N^3) - 35.5732*(N^2)*T - \\ & 14.0596*N*(T^2) + 5.16329*(T^3); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{beta_K2} = & -3.63596 - 8.02245*N + 22.8198*T + 22.4681*(N^2) - 11.012*N*T - \\ & 1.87728*(T^2) + 10.1723*(N^3) - \\ & 30.0797*(N^2)*T + 20.0873*N*(T^2) + 0.438599*(T^3); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{beta_K3} = & 4.79379 + 11.1184*N - 22.6824*T - \\ & 20.904*(N^2) + 2.51159*N*T + 1.3052*(T^2) - \\ & 18.6683*(N^3) + 38.2675*(N^2)*T + 15.52*N*(T^2) - 12.9193*(T^3); \end{aligned}$$

%K[-10,8]=[-1,1] kodlaması kullanıldığı için, kam açılına (K) denk gelen sayılar %şunlardır: -10=-1, -8=-0.75, -6=-0.5, -4=-0.25, -2=0, 2=0.25, 4=0.5, 6=0.75 ve 8=1

%Özgül yakıt sarfiyatının formülünün genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\% \text{spesifikyakit} = \text{beta_1} + \text{beta_K} * K + \text{beta_K2} * K^2 + \text{beta_K3} * K^3$$

%Özgül yakıt sarfiyatının gradienti, yani "spesifikyakıt" eşitliğinin "K" parametresine göre türevi aşağıda 'df' olarak gösterilmiştir.

$$\% \text{df} = \text{beta_K} + 2 * \text{beta_K2} * K + 3 * \text{beta_K3} * K^2$$

%Minimum özgül yakıt sarfiyatının bulunması aşağıda gösterilmiştir.

$$i=1;$$

$$x(i)=-1;$$

$$\text{alfa}=0.0001; \quad \% \text{ilerleme miktarı}$$

$$\text{for } i=1:1000;$$

$$\text{dfx}(i) = \text{beta_K} + (2 * \text{beta_K2} * (x(i))) + (3 * \text{beta_K3} * ((x(i)).^2));$$


```
x(i+1)=x(i)-(dfx(i)*alfa);  
if abs((x(i+1)-x(i)))<=0.0003  
break  
end  
end  
Kam=x(i+1)*10  
end
```

%Bu program sayesinde istenilen bir devir (N1) ve tork (T1) kombinasyonuna ait minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açısının değeri bir döngü halinde bulunmaktadır.

Ek B

% EK-A'da verilen kodun çalıştırılması sonucunda her bir motor devri (N1) ve torkuna (T1) karşılık, minimum özgül yakıt sarfiyatını veren kam açısı (Kam) bulunmaktadır.

N1 =

1543

T1 =

1830

Kam =

-4.9507

N1 =

843

T1 =

391

Kam =

-8.5559

N1 =

843

T1 =

596

Kam =

-6.7462

N1 =

2419

T1 =

596

Kam =

-2.4601

N1 =

2243

T1 =

802

Kam =

-3.0644

N1 =

1368

T1 =

1419

Kam =

-6.0434

N1 =

1718

T1 =

1625

Kam =

-6.4646

N1 =

2068

T1 =

1625

Kam =

-8.6243

N1 =

1018

T1 =

1830

Kam =

-5.1838

N1 =

1193

T1 =

2036

Kam =

-4.8953

ÖZGEÇMİŞ

Mersin GÖKÇE, 31.01.1974 de Karamürsel’de doğdu. İlk ve orta okul eğitimini Kütahya’da tamamladı. Kütahya Anadolu Lisesinin mezun olduktan sonra 1989 yılında Deniz Lisesine girdi. 1992 yılında Deniz Lisesinden ve 1996 senesinde Deniz Harp Okulundan mezun oldu. 2000-2002 yılları arasında Naval Postgraduate School/A.B.D.’de Makine Mühendisliği yüksek lisans eğitimini tamamladı. Halihazırda Gölcük Tersanesi Komutanlığı’nda görev yapmaktadır.