

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA TOPLAM YANMA SÜRESİNDEKİ
DEĞİŞİMİN TERMODİNAMİK BİR MODEL İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah KAYA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

EKİM 2023

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA TOPLAM YANMA SÜRESİNDEKİ
DEĞİŞİMİN TERMODİNAMİK BİR MODEL İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdullah KAYA
(200891201)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman DEMİRCİ

EKİM 2023

TEZ ONAYI

Abdullah KAYA tarafından hazırlanan “Buji Ateşlemeli Bir Motorda Toplam Yanma Süresindeki Değişimin Termodinamik Bir Model ile İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:

Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman DEMİRCİ

Jüri Üyeleri

İmza:

Prof. Dr. Metin GÜMÜŞ

Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman DEMİRCİ

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Emre DOĞAN

Tez Savunma Tarihi: 31/10/2023

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doç. Dr. Murat MAYDA
Enstitü Müdürü



BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Abdullah KAYA







Babama,



ÖNSÖZ

Bilim insanları içten yanmalı motorlar konusunda yakıt maliyeti, performans ve emisyon benzeri farklı alanlarda çalışmalar yapmaktadır. Söz konusu çalışmalar ile ilgili araştırmalar hem deneysel hem de matematiksel modellemeler ile yapılmaktadır. Deneysel çalışma maliyetlerin yüksek olmasından dolayı alternatif olarak matematiksel modellemeler geliştirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, buji ateşlemeli bir motor için sanki boyutlu termodinamik model geliştirilmiş ve bu modelde kullanılan Vibe fonksiyonun en önemli değişkenlerinden biri olan toplam yanma süresindeki değişim belirlenerek deneysel çalışmalara paralel optimum değerler elde edilmeye çalışılmıştır.

Tez çalışmamda birçok kişi katkı sağlamıştır. Tez konusunun belirlenmesinden tez süreci boyunca desteğini ve emeğini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman DEMİRCİ'ye, tez konusunda her yardıma ihtiyaç duyduğumuzda başvurduğumuz Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Emre DOĞAN'a, programlama konusunda kendisinden birçok şeyler öğrendiğim Öğr. Gör. Mehmet Celalettin ERGENE'ye, tez sürecinde yardımlarını esirgemeyen meslektaşım Tuba HÜRGÜL'e, tez süreci boyunca beni sürekli motive eden ve yoğun çalışmalarımın dolayısı bana karşı göstermiş oldukları sabır ve fedakârlıklarından dolayı eşim Hacer KAYA ile kızlarım Zeynep Ada KAYA ve Esma Asel KAYA'ya çok teşekkür ederim.

Yardım ve desteklerini esirgemeyen annem Esmehan KAYA ile babam Fazlı KAYA'ya çok teşekkür ederim.

Ekim 2023

Abdullah KAYA
Makine Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxiii
ABSTRACT	xxv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Önemi	3
1.2 Literatür Araştırması.....	3
2. SANKİ BOYUTLU TERMODİNAMİK MODEL.....	7
2.1 Yakıt	7
2.2 İş gazı hesabı.....	7
2.2.1 Yakıt hava karışım miktarı.....	7
2.2.2 Yanma ürünleri bileşim miktarı	9
2.3 Çevre ve artık gaz parametreleri	10
2.4 Emme süreci	10
2.5 Sıkıştırma süreci	11
2.6 Silindir içi parametrelerin hesabı.....	11
2.7 İndike ve efektif parametrelerin hesabı	16
2.8 Matematik Modelleme Programı	17
3. REGRESYON ANALİZİ.....	23
3.1 Aykırı Değerler (Outliers)	23
3.2 Doğrusal Regresyon.....	24
3.3 Basit Regresyon Denklemi	24
3.4 Çoklu Regresyon Denklemi.....	24
4. DENEY MOTORU VE LABORATUVAR.....	27
4.1 Deney Motorunun İncelenmesi.....	29
4.2 Laboratuvar Ölçüm Cihazları	29
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	31
5.1 Hacimsel Verim (η_v) Değerine Göre Toplam Yanma Süresinin Belirlenmesi.	34
5.2 Emme Sonu Basıncına (P_a) Göre Isı Kullanım Katsayısının Belirlenmesi	45
5.3 Modelin Farklı Çalışma Noktalarında Doğrulanması	53
6. DEĞERLENDİRME.....	57
KAYNAKLAR	59
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65



KISALTMALAR

AÖN	: Alt Ölü Nokta
AR-GE	: Araştırma ve Geliştirme
ECU	: Elektronik Kontrol Ünitesi
HFK	: Hava Fazlalık Katsayısı
İYM	: İçten Yanmalı Motor
KMA	: Krank Mili Açısı
MR	: MR Tipi Piston
OEB	: Ortalama Efektif Basınç
OİB	: Ortalama İndike Basınç
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta



SEMBOLLER

a	: Vibe verimlilik parametresi
b	: Regresyon denklemi eğim
b_e	: Özgül yakıt tüketimi [g/kWh]
b_i	: İndike özgül yakıt tüketimi [g/kWh]
C	: Karbon
CO	: Karbon Monoksit
CO₂	: Karbon Dioksit
cv	: Özgül Isı değeri [kmol/kj-KgK]
D	: Silindir çapı [mm]
G_e	: Saatteki yakıt tüketimi [kg/h]
h	: Strok boyu [mm]
H	: Hidrojen
HC	: Hidrokarbon
H_u	: Alt ısı değeri [kJ/kg]
H₀	: Sıfır hipotez
i	: Silindir sayısı
ℓ	: Gerçek hava miktarı [kg _{hava} /kg _{yakıt}]
L	: Gerçek hava miktarı [kmol _{hava} /kg _{yakıt}]
ℓ_0	: Havanın terik kütleli miktarı [kg _{hava} /kg _{yakıt}]
L₀	: Havanın teorik hacimsel miktarı [kmol _{hava} /kg _{yakıt}]
L_b	: Biyel uzunluğu [mm]
m	: Vibe şekil faktörü parametresi
m_y	: Yakıt kütleli miktarı [kg/kmol]
m_b	: Bir çevrimde silindire giren yakıt miktarı [kg]
M_a	: İş gazı miktarı [kmol _{iş gazı} /kg _{yakıt}]
M_r	: Artık gaz miktarı [kmol _{artık gaz} /kg _{yakıt}]
m₁	: Kütleli taze dolgu miktarı [kg/kg _{yakıt}]
M₁	: Hacimsel taze dolgu miktarı [kmol/kg _{yakıt}]
M₂	: Yanma ürün miktarı [kmol/kg _{yakıt}]
n	: Motor dönme sayısı [devir/dakika]

N_2	: Azot
Ne	: Efektif güç [kW]
N_i	: İndike güç [kW]
O	: Oksijen
P_a	: Emme sonu basıncı [MPa]
P_c	: Sıkıştırma sonu basıncı [MPa]
P_0	: Atmosfer basıncı [bar]
P_r	: Artık gaz basıncı [bar]
P_e	: Ortalama efektif basınç [MPa]
P_{inet}	: Ortalama indike basınç [MPa]
P_i'	: Pozitif alan ortalama indike basıncı [MPa]
R	: Molar gaz sabiti [J/molK]
S	: Kükürt
T_a	: Emme sonu sıcaklığı [K]
T_c	: Sıkıştırma sonu sıcaklığı [K]
T_r	: Artık gaz sıcaklığı [K]
T_r'	: Egzoz gazları sıcaklığı [K]
T_0	: Atmosfer sıcaklığı [K]
U_a	: İç enerji [kJ]
v	: Silindir hacmi [mm ³]
v_h	: Strok hacmi [mm ³]
v_{oyuk}	: Oyuk hacmi [mm ³]
W	: Su Buharı
W_i	: İndike İş [kJ]
X	: Regresyon denkleminin bağımsız değişkeni
X_b	: Yanan yakıt oranı
Y	: Regresyon denkleminin bağımlı değişkeni
λ	: Hava fazlalık katsayısı
γ_r	: Artık gaz katsayısı
ϵ	: Sıkıştırma oranı
r	: Krank yarıçapı [mm]
ρ_0	: Atmosfer yoğunluğu [kg/m ³]
μ_0	: Moleküler değişim katsayısı
μ	: Gerçek moleküler değişim katsayısı
ξ_d	: Disosyasyona bağlı ısı kullanım katsayısı

η_v	: Hacimsel verim
η_{mv}	: Mekanik verim
η_i	: İndike verim
η_e	: Efektif verim
θ	: Derece cinsinden krank açısı
θ_0	: Yanma başlangıcı krank açısı
$\Delta\theta$	: Toplam yanma süresi krank açısı
η_{mv}	: Mekanik verim
η_i	: İndike verim
η_e	: Efektif verim
α	: Regresyon denklemi kesişme
ϵ	: Regresyon kalıntısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Python programında hesap için giriş değişkenleri.	20
Çizelge 4.1: Deney motorunun özellikleri.	27
Çizelge 5.1: Farklı motor çalışma noktalarında hesaplanan toplam yanma süreleri .	35
Çizelge 5.2: 42 nokta için regresyon analizi sonuçları.	36
Çizelge 5.3: Çıkarılan noktalar durumunda hacimsel verime göre toplam yanma süreleri.	37
Çizelge 5.4: Regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş noktalar için).	38
Çizelge 5.5: Hacimsel verime göre regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş 36 nokta için).	38
Çizelge 5.6: Hacimsel verime göre indirgenmiş noktalar için ANOVA sonuçları. ..	39
Çizelge 5.7: Regresyon katsayıları ve P değerleri.	40
Çizelge 5.8: Hacimsel verime göre regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş noktalar için).	41
Çizelge 5.9: Regresyon katsayıları ve P değerleri (hacimsel verim).	42
Çizelge 5.10: Hacimsel verime göre regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş noktalar için).	43
Çizelge 5.11: Regresyon katsayıları ve P değerleri (hacimsel verim).	43
Çizelge 5.12: Toplam yanma süreleri (Emme sonu basıncına göre).	46
Çizelge 5.13: Regresyon analizinin sonuçları (Emme sonu basıncına göre).	47
Çizelge 5.14: Eklenen bağımsız değişkenler sonrası Regresyon analizinin sonuçları (Emme sonu basıncına göre).	47
Çizelge 5.15: Emme sonu basıncına göre indirgenmiş noktalar için ANOVA sonuçları.	47
Çizelge 5.16: Regresyon katsayıları ve P değerleri (Emme sonu basıncı).	48
Çizelge 5.17: Emme sonu basıncına göre regresyon analizinin sonuçları (indirgenmiş noktalar için).	49
Çizelge 5.18: Regresyon katsayıları ve P değerleri (emme sonu basıncına göre).	50
Çizelge 5.19: Emme sonu basıncına göre regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş noktalar için).	51
Çizelge 5.20: Regresyon katsayıları ve P değerleri (emme sonu basıncı).	51
Çizelge 5.21: Doğrulama için elde edilen toplam yanma süreleri.	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Buji ateşlemeli motorların gerçek ve ideal çevrimleriyle basınç (P) hacim (v) diyagramları (Cengel, Boles ve Kanoglu, 2019).	2
Şekil 2.1: Buji ateşlemeli motorlarda yanma sürecindeki bölümlerin diyagramı (Demirci, 2017).	12
Şekil 2.2: Yakılan kütle oranının krank açısına göre değişim diyagramı diyagramı (Galindo ve diğerleri, 2011).	14
Şekil 2.3: Açık indikatör diyagramı (Koman, 2008).	18
Şekil 2.4: Python programı arayüz görseli.	19
Şekil 2.5: Python programın algoritması	21
Şekil 4.1: Tek silindirli deney motoru.	28
Şekil 4.2: MR tipi yanma odası geometrisi (Demirci, 2017).	28
Şekil 5.1: Deney ve model için basınç değerleri ($n=1500$ d/d; $\lambda=1,4$; $\varepsilon=12$ ve $\eta_v=0,67$).	31
Şekil 5.2: Deney ve model için basınç değerleri ($n=2000$ d/d; $\lambda=1,4$; $\varepsilon=12$ ve $\eta_v=0,66$).	32
Şekil 5.3: Model ve deneysel yanan kütle oranları ($n=1500$ d/d; $\lambda=1,4$; $\varepsilon=12$ ve $\eta_v=0,67$).	32
Şekil 5.4: Model ve deneysel yanan kütle oranları ($n=2000$ d/d; $\lambda=1,4$; $\varepsilon=12$ ve $\eta_v=0,66$).	33
Şekil 5.5: Deney noktaları (42 nokta) için serpilme diyagramı.	34
Şekil 5.6: Çıkarılan noktalar sonucunda oluşan serpilme diyagramı (36 nokta için).	36
Şekil 5.7: Hacimsel verime göre toplam yanma süreleri için bağımsız değişkenlerin t-stat grafiği.	41
Şekil 5.8: Hacimsel verime göre 9 farklı bağımsız değişken için t dağılım grafiği.	42
Şekil 5.9: Hacimsel verime göre 5 farklı bağımsız değişken için t dağılım grafiği.	44
Şekil 5.10: Hacimsel verime göre oluşturulan toplam yanma süresi formülünden elde edilen sonuçlarla ilgili serpilme diyagramı	45
Şekil 5.11: Emme sonu basınca göre toplam yanma süreleri için bağımsız değişkenlerin t-stat grafiği.	49
Şekil 5.12: Emme sonu basınca göre 10 farklı bağımsız değişken için t dağılım grafiği.	50
Şekil 5.13: Emme sonu basınca göre 5 farklı bağımsız değişken için t dağılım grafiği.	52
Şekil 5.14: Emme sonu basınca göre oluşturulan toplam yanma süresi formülünden elde edilen sonuçlarla ilgili serpilme diyagramı	53
Şekil 5.15: Doğrulama modelden elde edilen toplam yanma süreleri ile formüllerden elde edilen sürelerin karşılaştırılması.	54
Şekil 5.16: Model ile türetilen formüllerin toplam yanma süreleri ile ilgili serpilme diyagramı.	54



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA TOPLAM YANMA SÜRESİNDEKİ DEĞİŞİMİN TERMODİNAMİK BİR MODEL İLE İNCELENMESİ

Abdullah KAYA

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman DEMİRCİ

Ekim, 2023, 93 sayfa

Günümüzde kullanılan içten yanmalı motorlar, yakıtın yanma odası adı verilen bir hacimde yakılması sonucu ortaya çıkan enerjinin basınç şeklinde piston üzerine etki ederek, pistonu hareket ettirip, ısı enerjisini mekanik enerjiye çeviren makinelerdir. Temel olarak buji ile ateşlemeli (benzinli) ve sıkıştırma ile ateşlemeli (dizel) motorlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. İçten yanmalı motorlar ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu yakıt tasarrufu ve zararlı egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi üzerinedir. Deneysel çalışmaların yüksek maliyetli ve deney sürecinin uzun zaman alması araştırmacıları matematiksel modelleme ve analiz programlarına yönlendirmiştir.

Bu çalışmada, buji ateşlemeli motorlar için sanki boyutlu bir termodinamik model oluşturulmuştur. Modelde emme ve egzoz süreci noktasal olarak hesaplanmıştır. Sıkıştırma ve genişleme süreci ise 0,5 °KMA adımlarla basınç, sıcaklık ve hacim değerleri hesaplanmıştır. Yanma sürecinde yanan yakıt miktarı Vibe fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Vibe fonksiyonu sayesinde yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisi miktarı hesaplanabilmektedir. Bu çalışmanın temel amacı Vibe fonksiyonunun değişkenlerinden olan toplam yanma süresinin formülize edilebilmesidir. Model python yazılımını kullanarak çalıştırılmıştır. Oluşturulan model farklı motor devri, sıkıştırma oranı, hava fazlalık katsayısı ve hacimsel verim değerlerine göre çalıştırılmış ve toplam yanma süreleri hesaplanmıştır. Herbir çalışma noktası için model ile elde edilen sonuçlar ve deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı oluşturulan sanki boyutlu termodinamik modelde bulunan toplam yanma süresi değişiminin regresyon analizi ile deneysel sonuçlara bağlı olarak incelenmesidir. Toplam yanma süresinin doğru belirlenebilmesi için hesaplanan ortalama indike basınç ile deneyden elde edilen ortalama indike basınç arasındaki fark %5'ten küçük olacak şekilde toplam yanma süresi değiştirilmiştir. Toplam yanma süresi değerlerindeki değişimin anlamlandırılması için regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ile R^2 değeri %90 civarı olmak üzere iki farklı toplam yanma süresi formülü oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Buji ateşlemeli motor, Vibe fonksiyonu, toplam yanma süresi, sanki boyutlu termodinamik model



ABSTRACT

MsThesis

INVESTIGATION OF THE VARIATION OF COMBUSTION DURATION IN A SPARK IGNITION ENGINE WITH A THERMODYNAMIC MODEL

Abdullah KAYA

**Karamanoğlu Mehmetbey University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Abdurrahman DEMİRCİ

October, 2023, 93 pages

The internal combustion engines used today are machines that convert thermal energy into mechanical energy by causing pressure on a piston as a result of the energy produced by the combustion of fuel in a volume called the combustion chamber. They are divided into two different types, one of them is spark ignition (petrol) engine and the other one is compression ignition (diesel) engine. Most of the research on internal combustion engines focuses on improving fuel efficiency and reducing harmful exhaust emissions. The high cost and time-consuming nature of experimental studies have led researchers towards mathematical modeling and analysis programs.

In this study, a quasi-dimensional thermodynamic model has been created for spark ignition engines. The intake and exhaust processes are calculated step by step in the model. Pressure, temperature, and volume values are calculated for 0.5-degree crank angle steps at the compression and expansion periods. The amount of burned fuel in the combustion process is calculated using the Vibe function. Thanks to the Vibe function, the amount of thermal energy released as a result of combustion can be calculated. The main aim of this study is to formulate the total combustion duration as one of the variables of the Vibe function. The model was run using Python software. The created model was operated based on different engine speeds, compression ratios, air-fuel ratios, and volumetric efficiency values, and the total combustion durations were calculated. The results obtained with the model for each operating point were compared with the results obtained from experimental studies.

The main purpose of this study is to examine the change in total combustion duration with the created quasi-dimensional thermodynamic model in relation to experimental results through regression analysis. In order to accurately determine the total combustion duration, it was modified to have a difference of less than 5% compared to the calculated average mean indicated pressure and the average mean indicated pressure obtained from the experiment. Regression analysis was conducted to interpret the variation in total combustion duration values. With a regression analysis, two different formulas for total combustion duration were created, with an R^2 value of around 90%.

Keywords: Spark ignition engine, Vibe function, combustion duration, quasi dimensional thermodynamic model

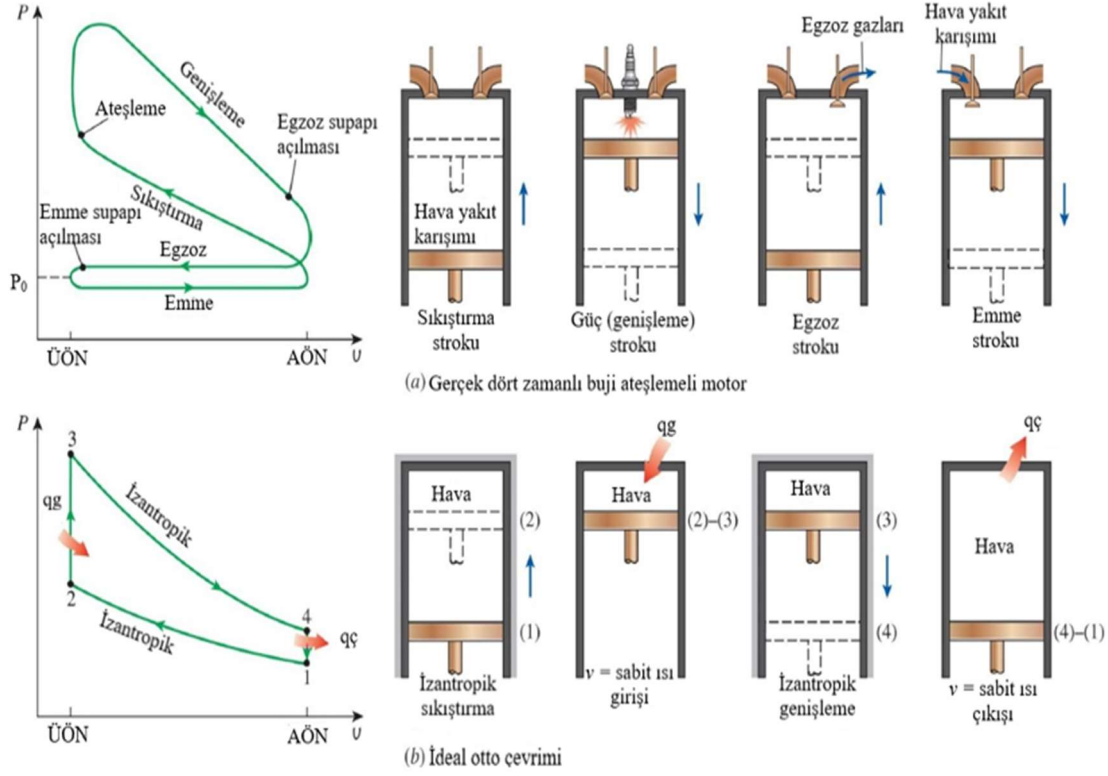


1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı dünya nüfusuna bağılı olarak artmaya devam etmektedir. Hayatımızda enerji birçok alanda kullanılmaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü ulaşım sektörüne kaymıştır. Yıllar geçtikçe çoğalan taşıt sayısı yakıt tüketiminin artmasına, dolayısıyla zararlı egzoz emisyonlarının çevreye yayılmasına sebep olmaktadır. Çevreye yayılan zararlı egzoz emisyonları ve yakıt tüketimi ile ilgili Avrupa Birliği ülkeler arasında yasal standartlar ortaya koymuştur. Avrupa pazarı için otomotiv üretici firmalarında bu yasal zorunluluklar nedeni ile araştırma ve geliştirme (AR-GE) çalışmalarına hız vermiştir. Mevcut taşıtlarda kullanılmakta olan petrolden üretilen yakıt rezervinin azalmasından dolayı araştırmacıları alternatif yakıtla ilgili çalışmalara da yönlenmiştir. Yakıt tasarrufunun artırılması ve zararlı egzoz emisyonlarının azaltılması motor içinde gerçekleşen yanma olayına bağılıdır. Yanma sürecinin iyi olması ilgili konuları doğrudan etkilemekte ve söz konusu iyileştirmeleri sağlamaktadır (Demir, 2013). İçten yanmalı motorlarda (İYM) performans ve zararlı egzoz emisyonlarının azaltılması konusunda yapılan araştırmalar halen devam etmektedir. İçten yanmalı motorlar (İYM) temel olarak buji ile ateşlemeli motorlar ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar olarak sınıflandırılmaktadır. Termodinamik çevrimlerine göre ise Otto çevrimi (benzinli), dizel çevrimi (Diesel) ve karma çevrim olarak sınıflandırılmaktadır. İçten yanmalı pistonlu motorlar bugünkü temel yapısıyla ilk defa 1876 yılında Nikolaus August Otto tarafından yapılmıştır. Bu motor, sabit hacimde yanma çevrimi ile çalışan 4 zamanlı benzin motoru olup efektif verimi daha 1890'lı yıllarda %20-25'e kadar yükseltilmiştir. Bugün verimi %35-50 arasında değişmekte olan dizel motoru aynı yıllarda (1892) Rudolf Diesel tarafından, sabit basınçta yanma çevrimi ile çalışan 4 zamanlı dizel motor olarak icat edilmiştir. Bu motor önceleri kara taşıtlarında, 1890'lı yıllarda gemilerde, 1910'lu yıllarda lokomotiflerde kullanılmaya başlanmıştır (Heywood, 2005; Pulkrabek, 2013).

İYM otto çevrimi hesaplamalarda ideal ve gerçek çevrim olarak incelenir. İdeal çevrimde izantropik durum söz konusudur. Çevreden ısı alışverişi olmadan sabit hacimde ısı girişi ve çıkışı olarak hesaplamalar yapılır. Ancak gerçekte durum öyle

değildir. Yanma anında basınç ve sıcaklık değişimi sadece ısı çıkışıyla değil mol sayısının değişimiyle de ilgilidir. Dolayısıyla hesaplamalarımızı gerçek çevrime göre yapmamız gerekmektedir. Şekil 1.1’de gerçek Otto çevrimi ile ideal Otto çevrimlerinin basınç (P) ve hacim (v) diyagramları gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Buji ateşlemeli motorların gerçek ve ideal çevrimleriyle basınç (P) hacim (v) diyagramları (Çengel, Boles ve Kanoğlu, 2019).

Buji ile ateşlemeli motorlarda bir iş çevrimi 4 zamanda gerçekleşir. İlk olarak emme zamanında emme supapları açılarak hava yakıt karışımı üst ölü noktadan (ÜÖN) önce dolmaya başlar. Emme subapları kapandıktan sonra hava yakıt karışımı sıkıştırma zamanında sıkıştırılır. Yanma ve genişleme zamanında ÜÖN’den 5-40 krank mili açısından ($^{\circ}$ KMA) önce buji kıvılcımı ile yanma süreci başlatılır. Yanan yakıttan oluşan enerji silindir içindeki basıncı yükselterek pistonu aşağı doğru hareket ettirir. Bunun sonucunda iş elde edilmiş olur. Egzoz zamanında ise piston alt ölü noktaya (AÖN) doğru hareket ederken silindir içinde yanmış gazlar bulunmaktadır. Piston AÖN’ya varmadan 15-50 $^{\circ}$ KMA önce egzoz supapları açılır ve yanma sonucu oluşan egzoz gazları dışarı çıkar. Egzoz supapları ÜÖN’den 20-50 $^{\circ}$ KMA sonra kapanarak bir iş çevrimi tamamlanmış olur (Demirci, 2017). Bir iş çevrimi 720 $^{\circ}$ KMA’lık süreçte tamamlanmaktadır.

1.1 Tezin Amacı ve Önemi

Motorlar, kullandıkları yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan ısıyı, mekanik enerjiye dönüştürerek güç üretirler. İçten yanmalı motorlarda yapılan çalışmaların çoğunluğu zararlı egzoz emisyonları azaltmaya ve enerji sarfiyatını düşürmeye odaklanmıştır. Günümüzde, deneysel çalışmalar daha zor olduklarından öncelikle simülasyon çalışmaları yapılmakta ve devamında elde edilen sonuçlar yapılacak deneylere yön vermektedir. Silindir içi parametreler ile ilgili matematiksel modelleme konusu üzerine çalışmalar yoğunlaşmış durumdadır.

İçten yanmalı motorlarda yanma hızına yaklaşan analitik fonksiyonlar, motor çevrimi simülasyonları için kullanışlı ve uygun maliyetli araçlardır. Bu fonksiyonlardan en bilineni, kaynakların bazılarında Wiebe fonksiyonu olarak da geçen, Vibe fonksiyonudur. Vibe fonksiyonu ilk kez Alman asıllı Rus bilim insanı ve mühendis Ivan Ivanovitch Wiebe tarafından 1967 yılında “Wiebe Yanma Yasası” olarak geliştirilmiştir. Bu yasa hem dizel hem de benzin motorları için geçerlidir.

Vibe fonksiyonu ile verilen parametreler arasında ortalama hız, maksimum yanma hızının bağıl zamanı ve püskürtme avansı varsa, yanma eğrisinin ve bütün çevrimin hesapları yapılabilmektedir. Vibe fonksiyonu ile krank açısının değişimine bağlı olarak sıcaklık ve basınç, yanma hızına bağlı olarak bulunabilmektedir. Tezimizde python yazılım programı ile arayüzlü bir hesaplama programı oluşturulmuştur. Oluşturulan hesaplama programı adım adım °KMA’ya göre piston yolu, hacim, silindir basıncı, silindir sıcaklığı, Vibe, yanma sonu açığa çıkan enerji, toplam açığa çıkan ısı miktarı vb. gibi hesapları yapabilmektedir. Arayüze girilen çalışma koşullarına göre toplam yanma süresi bağlı olduğu değişkenlerin değişimine göre hesaplanmaktadır. Dolayısıyla hesaplamalar sonucunda Vibe fonksiyonunun en önemli değişkenlerinden biri olan toplam yanma süresinin değişimi incelenecektir. Elde edilecek çıktılar ile ilgili detaylı sonuçların literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.2 Literatür Araştırması

İçten yanmalı pistonlu motorların kullanımı, son yüz yılda yaygınlaştığından gürültü, hava kirliliği ve petrol rezervlerinin azalması gibi sorunlar ortaya çıkmıştır. Hava kirliliği ile gürültü etkilerini azaltıcı yönde önlemler almak amacıyla motorlarda teknik

değişiklikler yapılmıştır (Doğan, 2019; Safgönül, B., Ergeneman, M. A., Arslan, H. E. ve Soruşbay, 2008).

Demirci ve arkadaşları sıkıştırma ile ateşlemeli motordan buji ateşlemeli motora dönüştürülen İYM üzerinde deneyler yapmışlardır. Deneylerde farklı yanma odası tipleri kullanmışlardır. Deneyler sonucunda MR ve Silindir Oyuklu Piston tipi yanma odası geometrilerinin hava fazlalık (HFK) katsayısının yüksek olduğu durumlarda emisyon ile performans bakımından düz yanma odası geometrisine nispeten iyi sonuçlar elde edildiğini görmüşlerdir (Demirci, Mehdiyev, Doğan ve Cihan, 2017).

De Faria ve arkadaşları biyogaz yakıtı kullanan buji ateşlemeli motorlarda performans tahmini yapmak için model geliştirmişlerdir. Deneysel maliyetlerin yüksek olması nedeni ile geliştirilen modelin daha az maliyetli olduğundan kullanıcılara alternatif yol sunmuşlardır. Brezilya'nın Rio de Janeiro şehrinde bulunan biyogaz üretim tesisine kurulan deney motorundan elde edilen sonuçlar ile oluşturulan modelin sonuçlarını kıyaslamışlar ve modelin deneysel sonuçlara yakın olduğunu görmüşlerdir. Önerilen model farklı yakıt bileşimleri için uyarlanabilir ve kullanılabilir şekilde ortaya çıkmıştır (de Faria, Vargas Machuca Bueno, Ayad ve Belchior, 2017).

Andersson ve arkadaşları içten yanmalı motorlarda krank milinden tork ölçümüne dayalı, yanma olayını analiz eden tork oranı yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Bu yöntem sayısal olarak geliştirilmiş ve basınç oranı, net ısı salınımı gibi diğer yanma analiz yöntemleri ile teorik olarak ilişkilendirilmiştir. Söz konusu çalışmada buji ateşlemeli motor için, Vibe fonksiyonuna dayalı olarak değişken fonksiyonlar seçilmiştir. Çalışma sonunda tork oranı fonksiyonunun net ısı salınımı hesaplamalarına temel oluşturabileceği görülmüştür (Andersson, Thor ve McKelvey, 2012).

Giglio ve arkadaşları, Vibe modeli ile laminar yanma hızı arasında bir bağlantı ortaya koymanın, önceden karıştırılmış hava-yakıt karışımlarının hesaba katılmasına izin verdiğinden, motor modelleme açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır. Sonuç olarak, ortaya çıkan Vibe tabanlı yanma modeli, farklı yakıtların motor performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırmak ve buna göre motor tasarımı sırasında sadece niteliksel olarak bile olsa avantaj ve dezavantajları önceden değerlendirmek için kullanılabileceğini söylemişlerdir (Giglio ve di Gaeta, 2020).

Galindo ve arkadaşları, Vibe'nin fonksiyon parametreleri (yanma açısı ve form faktörü) ile ortalama piston hızı, yük yoğunluğu ve tutulan artık gaz miktarı gibi motorla ilgili değişkenler arasında birçoklu regresyon analizinin uygulanması ile seçilen motorların çalışmasının birbirinden farklı olduğu dikkate alınarak korelasyonlar elde edilirse, iki korelasyon seti ortaya çıktığını göstermişlerdir (Galindo, Climent, Plá ve Jiménez, 2011).

Yasar ve arkadaşları çalışmalarında bir çift Vibe işleviyle daha yavaş yanmanın bir oranını tanımlayarak, standart bir Vibe işlevine kıyasla deneysel verilerle daha iyi bir eşleşme elde etmenin mümkün olduğunu göstermişlerdir (Yasar, Soyhan, Walmsley, Head ve Sorousbay, 2008).

Yeliana ve arkadaşları Vibe fonksiyonu ile 5 (beş) farklı yöntem uygulamışlardır. 1. yöntemde verilen çalışma koşulunda test edilen tüm yakıt karışımları için 0,20 krank açısından daha az bir fark gösterdiği, 2. yöntemde yanma başlangıcı ateşleme noktasının ötesine geçtiğini ve bu durumda model ile deneysel veriler arasındaki yanma evresindeki maksimum fark (%0-90) 1 derece krank açısını geçemediğini, 3. yöntemde modellenen yanma evresi, deneysel verilere kıyasla erken fazda biraz daha düşük (1.5 dereceden az) ve yanmanın ikinci yarısında biraz daha yüksek olduğunu, 4. yöntemde yanma evresindeki fark yaklaşık 0,5 derece krank açısı olduğunu, son olarak 5. yöntemde kütle kesri yanığını Vibe fonksiyonuna uydurulduğunu görmüşlerdir (Yeliana, Cooney, Worm, Michalek ve Naber, 2008).

Chan ve arkadaşları, buji ateşlemeli bir motorda yanma, emisyonlar ve karbüratörlü benzin motorundaki uzun ateşleme avansının etkisi incelenmiştir. Kullanılan sıfır boyutlu termodinamik simülasyonda, yanma iki bölgeli modellenmiş ve yanma süreci için Vibe bağıntısı kullanılmıştır. Egzoz valfinin açıldığı andan AÖN'ya kadar olan egzoz valfindeki akış sırasında silindir basıncı ampirik ifade ile düzeltilerek, Vibe bağıntısına müdahale edilmiştir. Silindir basıncı ve sıcaklığı, egzoz valfi açıldığı anda silindir içerisinde bulunan dolgu kütlelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Simülasyon ve deney sonuçları birbiriyle uyumlu çıkmıştır (Chan ve Zhu, 2001).

Sekmen ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, yakıt olarak metan kullanan, tek silindirli, 4 zamanlı, buji ile ateşlemeli bir motorun çalışma karakteristikleri ideal hava-yakıt çevrimine göre teorik olarak analiz etmişlerdir. Hava fazlalık katsayısının (HFK) 1,0 şartlarında sıkıştırma oranı ve motor hızı parametrelerinin motor

performansına etkilerinin sayısal olarak incelemek için bir bilgisayar programı hazırlamışlar ve oluşturulan model hesabında, basınç ve sıcaklık değerleri, ideal çevrimin meydana geldiği 360 °KMA için 1'er derece adım aralıklarıyla hesaplatmışlardır. Elde edilen sonuçlar ile literatürün benzerliğini görmüşlerdir (Sekmen, Sekmen ve Çınar, 2004).

Hu ve arkadaşları Vibe fonksiyonundaki parametrelerin her birine yanmış kesir duyarlılığı analiz etmiş, Vibe fonksiyonunun parametrelerinin daha doğru belirlenmesine yardımcı olacağını görmüşlerdir. Analiz sonucuna göre, her motor yükü için doğru bir yanma modeli belirlenmiştir. Yaptıkları çalışmada yanma işleminin erken ve son aşamasını göz ardı etmek, seçilen Vibe fonksiyonlarının sayısını doğrulamak için toplam yanma süresi ve verimlilik parametresini tahmin etmek için yeni bir yöntem denemişlerdir (Hu, Wang, Yang ve Wang, 2017).

Özcan, İYM'nin silindir içi parametreleri ve egzoz emisyonlarının belirlenmesi üzerine deneysel ve modelleme sonuçlarının analizi ile ilgili çalışma yapmıştır. Yapmış olduğu hesaplamalarda Vibe fonksiyonu parametresi yanma hızı etkisi ile ateşleme avansı değişiminin silindir içi parametrelerde, motor performansında, özgül yakıt tüketiminde, egzoz gazları emisyonlarında ve efektif verimde etkili olduğunu görmüştür. Yanma üssünün artması silindir içi maksimum basınçlarda azalma olduğunu görmüştür. Ateşleme avansının artması ile de sıcaklık değerlerinde yükselme olduğunu dolayısıyla ateşleme avansının yakıtın kimyasal özelliklerine göre belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir (Özcan, 2010).

Literatür incelemesinden, Vibe fonksiyonunun motor üzerine yapılan araştırmalarda yaygın olarak kullanıldığı ve Vibe fonksiyonunda bulunan değişkenlerin değişimi üzerine yapılan çalışmaların ise az olmasından dolayı bu konu üzerine daha fazla çalışmaya yapılmasına ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır.

2. SANKİ BOYUTLU TERMODİNAMİK MODEL

Termodinamik model ile yanma sürecinde sanki boyutlu bir hesap yönteminden faydalanılabilmektedir. Yanma sürecinde silindir içi basınç değerleri kullanılarak yanmış ve yanmamış bölgelerin fiziksel büyüklüklerine ait ortalama değerleri termodinamik süreçlerle hesaplanabilmektedir (Doğan, 2019).

Bu bölümde yapılan hesaplamalar Prof. Dr. Rafig MEHDİYEV ve arkadaşlarının yüksek lisans ve doktora öğrencileri için hazırlamış oldukları iki modülden oluşan İçten Yanmalı Motorların Hesabı ve Geliştirilmesi adlı ders notlarından faydalanılmıştır.

2.1 Yakıt

Termodinamik hesabı kolaylaştırmak için yakıt-hava karışımında yakıt 1 kilogram (kg) olarak kabul edilmiştir.

$$C + H + O = 1 \quad (2.1)$$

Burada C, H ve O karbon, hidrojen ve oksijenin 1 kg yakıttaki kütle kesridir. Kütle kesir belli ise yakıtın alt ısı değeri (H_u) kJ/kg hesaplanabilir.

$$H_u = [33,91C + 125,6H - 10,89(O - S) - 2,51(9H + W)]. 10^3 \quad (2.2)$$

Burada S, W kükürt ve su buharı kütle kesirleridir.

2.2 İş gazı hesabı

2.2.1 Yakıt hava karışım miktarı

1 kg yakıtın tam yanması için gerekli teorik hava miktarı kütle kesir (kg hava/kg yakıt) olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\ell_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3}C + 8H - O \right) \quad (2.3)$$

1 kg yakıtın tam yanması için gerekli teorik hava miktarı hacimsel (kmol hava/kg yakıt) olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{14} - \frac{O}{32} \right) \quad (2.4)$$

Hava fazlalık katsayısı belli ise ($\lambda=L/L_0$) yakıt hava karışımındaki gerçek hava miktarı kütleli (kg hava/kg yakıt) olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\ell = \lambda \cdot \ell_0 \quad (2.5)$$

Hava fazlalık katsayısı belli ise ($\lambda=L/L_0$) yakıt hava karışımındaki gerçek hava miktarı hacimsel (kmol hava/kg yakıt) olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$L = \lambda \cdot L_0 \quad (2.6)$$

Taze dolgu yakıt hava karışımı kütleli (kg/1kg yakıt) olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$m_1 = 1 + \ell = 1 + \lambda \cdot \ell_0 \quad (2.7)$$

Taze dolgu yakıt hava karışımı hacimsel (kmol/1kg yakıt) olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$M_1 = \frac{1}{m_y} + L = \frac{1}{m_y} + \lambda \cdot L_0 \quad (2.8)$$

Taze dolgu M_1 artı artık gazlardan M_r (egzoz sürecinde atılamayan yanma ürünleri) oluşan iş karışımı miktarı (kmol/kg yakıt) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$M_a = M_1 + M_r \quad (2.9)$$

Egzoz sürecinde atılamayan yanma ürünleri formülü de denklemden hesaplanabilir.

$$M_r = M_a - M_1 \quad (2.10)$$

Artık gazların miktarı artık gazlar katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\gamma_r = M_r/M_1 \quad (2.11)$$

İş karışımı M_a (kmol/1kg yakıt) formülü tekrar düzenlenirse,

$$M_a = M_1 + \gamma_r \cdot M_1 = M_1 (1 + \gamma_r) \quad (2.12)$$

2.2.2 Yanma ürünleri bileşim miktarı

Yakıt hava karışımının ($\lambda=1$) olduğunda yanma ürünleri karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O) ve azot (N_2) bileşimleridir. Fakir yakıt hava karışımı olduğunda ($\lambda \geq 1$) yukarıdakilere ek olarak oksijen (O_2) de vardır. Dolayısıyla sıvı yakıtın yanma ürün miktarı ($\lambda \geq 1$) iken (kmol/kgyakıt) aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$M_2 = M\text{CO}_2 + M\text{H}_2\text{O} + M\text{O}_2 + M\text{N}_2 \quad (2.13)$$

$$M_2 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + (\lambda - 0,208).L_0 \quad (2.14)$$

Zengin yakıt hava karışımı ($\lambda < 1$) kullanıldığında iş gazları tam yanma ürünlerinin ($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{N}_2$) yanısıra eksik yanma ürünleri karbonmonoksit (CO) ve hidrojen (H_2) bileşimlerinden oluşmaktadır. Bu durumda yanma ürün miktarı (kmol/kgyakıt) aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$M_2 = M\text{CO}_2 + M\text{H}_2\text{O} + M\text{CO} + M\text{H}_2 + M\text{N}_2 \quad (2.15)$$

$$M_2 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,792.\lambda.L_0 \quad (2.16)$$

Yanma sırasında bağıl hacim değişimi, yanma ürünleri mol miktarının yakıt hava karışımı mol miktarı oranına eşit olan, yakıt hava karışımının kimyasal moleküler değişim katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\mu_0 = M_2/M_1 \quad (2.17)$$

Yakıt hava karışımının kimyasal moleküler değişim katsayısı $\lambda \leq 1$ olduğunda aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\mu_0 = 1 + \frac{\left[\frac{H}{4} + \frac{O}{32} + 0,208(1 - \lambda).L_0 - \frac{1}{m_y} \right]}{[\lambda.L_0 + \frac{1}{m_y}]} \quad (2.18)$$

Yakıt hava karışımının kimyasal moleküler değişim katsayısı $\lambda > 1$ olduğunda aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\mu_0 = 1 + \frac{\left[\frac{H}{4} + \frac{O}{32} - \frac{1}{m_y} \right]}{\left[\lambda \cdot L_0 + \frac{1}{m_y} \right]} \quad (2.19)$$

İş karışımının ($M_a = M_1 + M_r$) gerçek moleküler değişim katsayısı aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

$$\mu = \frac{M_2 + M_1}{M_1 + M_r} \quad (2.20)$$

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} \quad (2.21)$$

2.3 Çevre ve artık gaz parametreleri

Atmosfer basını ile sıcaklığı çevre parametreleri olarak kabul edilir. Atmosfer basıncı P_0 (MPa), atmosfer sıcaklığı ise T_0 (K) ile ifade edilir.

$$P_0 = 0,1 \quad (2.22)$$

$$T_0 = 293 \quad (2.23)$$

Artık gaz değişkenleri P_r (MPa) ile T_r (K) aşağıdaki deneysel formüllerle hesaplanır.

$$P_r = P_0 \cdot (1 + 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot n) \quad (2.24)$$

$$T_r = 1302 - (403,5 \cdot \lambda + 0,037 \cdot n - 7,38 \cdot \varepsilon) \quad (2.25)$$

2.4 Emme süreci

Emme süreci sonundaki basınç P_a (MPa) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_a = \frac{[(T_0 + \Delta T) \cdot (\varepsilon - 1) P_0 \cdot \eta_w + P_r \cdot T_0]}{\varepsilon \cdot T_0} \quad (2.26)$$

Burada ΔT , M_1 'in emme sürecinde İYM'nin sıcak cidarlarından aldığı ısıdan dolayı sıcaklık artışı olup, buji ateşlemeli motorlarda 0~20 K arasındadır. Deneysel olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\Delta T = 30 - 0,006 \cdot n \quad (2.27)$$

Artık gazlar katsayısı formülü ΔT kullanılarak aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\gamma_r = \frac{P_r \cdot (T_0 + \Delta T)}{T_r \cdot (\epsilon \cdot P_a - P_r)} \quad (2.28)$$

Emme süreci sonundaki sıcaklık T_a (K) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$T_a = \frac{(T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r)}{(1 + \gamma_r)} \quad (2.29)$$

2.5 Sıkıştırma süreci

Sıkıştırma süreci sonu basınç P_c (Mpa) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_c = P_a \cdot \epsilon^{n1} \quad (2.30)$$

Burada $n1$ politropik üsü ifade etmektedir.

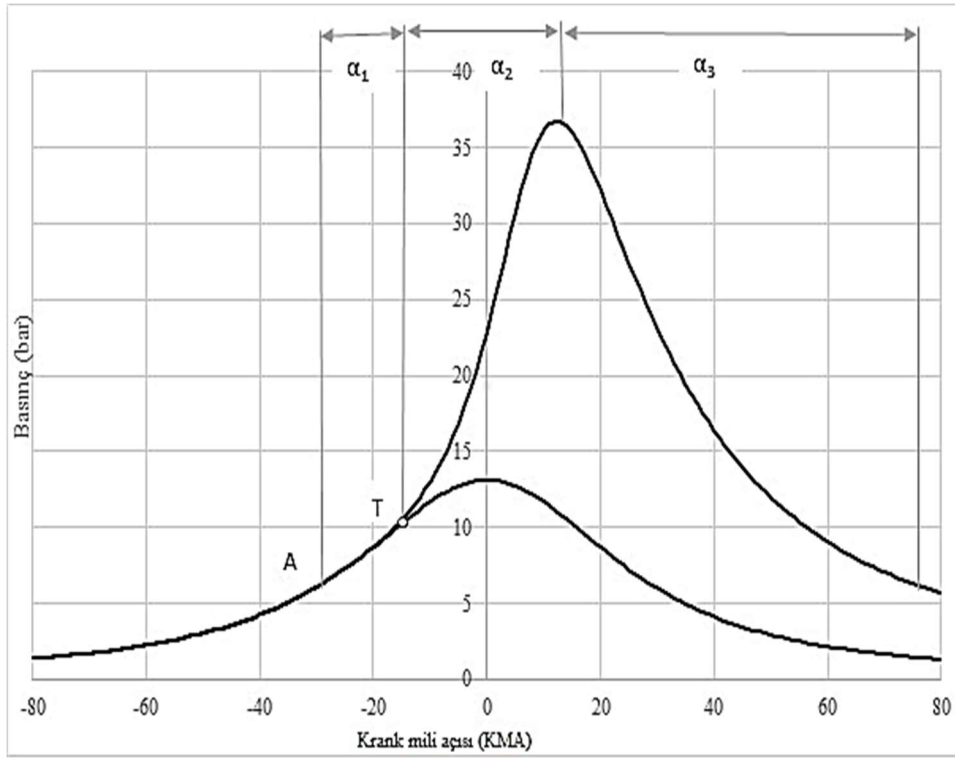
Sıkıştırma süreci sonu sıcaklık T_c (K) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$T_c = T_a \cdot \epsilon^{n1-1} \quad (2.31)$$

2.6 Silindir içi parametrelerin hesabı

Buji ateşlemeli motorlarda yanma süreci motor performansı ile zararlı egzoz emisyonlar için önemli bir süreçtir. Bu sürecin verimli olması motor performansını arttırmakla birlikte zararlı egzoz emisyonlarını ise önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Harry Ralph Ricardo, buji ateşlemeli motorlarda yanma sürecini üç bölüme ayırmıştır (Ricardo, 1923). Yanma sürecine ait bölümler Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Buji ateşlemeli motorlarda yanma sürecindeki bölümlerin diyagramı (Demirci, 2017).

İlk bölümde bujinin meydana getirdiği kıvılcım ile yakıt hava karışımı tutuşur ve 30-100 mJ arası enerji açığa çıkar. Yakıt hava karışımının %5-10'luk kısmı yanar. Bu bölümde çok az enerji oluştuğu için düşük bir basınç yükselmesi gerçekleşir. İkinci bölüm olarak tanımlanan süreçte yakıtın büyük bir bölümü %80-90'ı yanar. Bu bölüm ana faz olarak da geçmektedir. Ana fazda basınç artış hızı önemli ölçüde arttığı için yüksek basınç gerçekleşir. Üçüncü bölümde ise yanmanın bittiği bölümdür. Geri kalan yakıt hava karışımının %5-10'luk kısmı yanar. Basınç düşer ve yanma biter. Süreçte basınç değerinin maksimum olduğu nokta ÜÖN'den 10-20 °KMA sonradır. İYM'nin bütün şartlarda maksimum verim elde edebilmek için verimi etkileyen parametrelerin optimum düzeyde olması gerekir. Dolayısıyla ilk olarak ateşleme avansı seçimi önemlidir. Ateşleme avansı bu süreçteki en önemli parametrelerden birisidir. Otto çevrimine göre çalışan motorlarda yanma prosesine etki eden diğer değişkenleri hava yakıt oranı, sıkıştırma oranı, motor yükü, türbülans şiddeti (yanma odası profili ile emme portu şekli) ve motor devri sayılabilir (Demirci, 2017).

Yanma sürecinde yanmanın başlaması anından itibaren basınç ve sıcaklıkların krank mili açısına göre adım adım değişiminin hesaplanması için Vibe fonksiyonu kullanılmıştır.

Alman asıllı Rus bilim insanı Ivan Ivanovitch Wiebe tarafından 1967 yılında “Wiebe Yanma Yasası” olarak geliştirilen Vibe fonksiyonu aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$X_b = 1 - \exp\left[-a \cdot \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right] \quad (2.32)$$

Burada;

X_b : Yanmış kütle oranını (Yanma başlangıcı $X_b=0$, yanma sonu $X_b=1$ ’dir.)

a : Verimlilik parametresini

θ : Derece cinsinden krank açısını

θ_0 : Yanma başlangıcını

$\Delta\theta$: Toplam yanma süresini

m : Şekil faktörünü ifade etmektedir.

Vibe fonksiyon eğrisi karakteristik bir “S” şekilli eğriye sahiptir ve genellikle yanma sürecini karakterize etmek için kullanılır. Yanmış kütle oranı profili sıfırdan büyür, burada sıfır kütle fraksiyonu yanması yanmanın başlangıcını gösterir ve ardından katlanarak yanmanın sonunu gösteren bire eğilim gösterir (Yeliana ve diğerleri, 2008).

Şekil 2.2’de Yakılan kütle oranının krank açısına bağlı olarak değişim diyagramı gösterilmiştir.

Vibe fonksiyonunda yanma oranının belirlenmesinde değişken olan şekil faktörünün (m) farklı motor devirlerinde farklı yükler için değişimi önemlidir. Motor devri (n), ortalama efektif basınç (OEB), hava fazlalık katsayısı (λ) ile şekil faktörü (m) arasında doğrusal bir ilişki vardır. Şekil faktörü (m) düşük yüklere daha küçük değer alırken yük arttıkça değeri artmaktadır. OEB ile m parametresi arasında pozitif ilişki varken, n ve λ ile ise negatif ilişkisi vardır (Demirci, Doğan ve Kutlar, 2023).

İdeal gaz denklemine göre basınç (MPa) ve sıcaklık (K) değerleri hesaplanabilir.

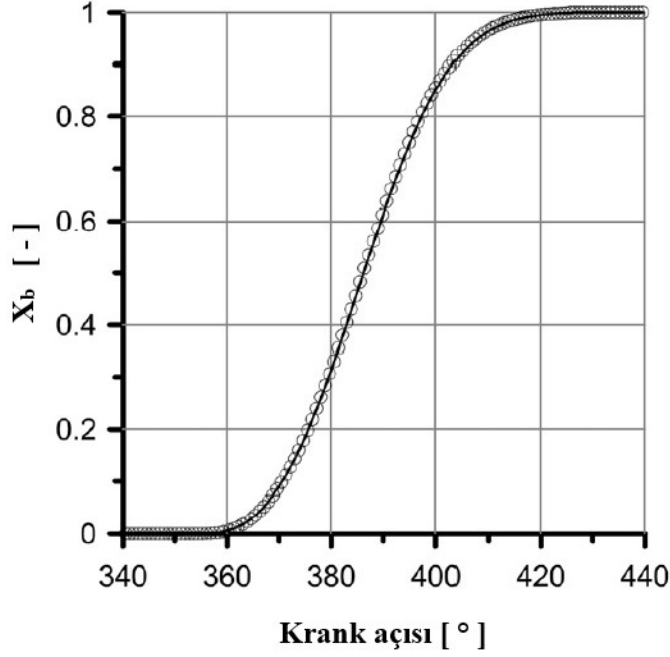
$$P \cdot v = M \cdot a \cdot R \cdot T \quad (2.33)$$

Silindir pistonun hareketine bağlı hacimsel değişim (mm^3) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$v = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot s + v_{oyuk} \quad (2.34)$$

Burada v_{oyuk} (mm³) oyuk hacmini ifade etmektedir.

$$v_{oyuk} = \frac{\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h}{\varepsilon - 1} \quad (2.35)$$



Şekil 2.2: Yakılan kütle oranının krank açısına göre değişim diyagramı (Galindo ve diğerleri, 2011).

“ s ” (mm) ise piston yolunu ifade etmekte olup aşağıdaki formülle hesaplanır. Piston yolu heabı için kullanılan formül John B. Heywood’un Internal Combustion Engine Fundamentals kitabından faydalanılmıştır.

$$s = r \cdot \cos\theta + (L_b^2 - r^2 \cdot \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}} \quad (2.36)$$

Burada r (mm) krank yarıçapını, L_b (mm) ise biyel uzunluğunu ifade etmektedir.

Yanma sonu açığa çıkan enerji (kJ) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$dQ_h = \xi_d \cdot H_u \cdot m_b \cdot dx \quad (2.37)$$

Burada;

ξ_d : Yanma ürünlerinin disosyasyona bağlı ısı kullanım katsayısını ifade eder.

m_b : Bir çevrimde silindire giren yakıt miktarı (kg)

dx : Göreceli yanan kütle miktarı (yanma başlangıcında $x = 0$, yanma sonunda $x = 1$)

Bir çevrimde silindire giren yakıt miktarı (kg) ise aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$m_b = \eta_v \cdot \rho_0 \cdot v / \lambda / l_0 \quad (2.38)$$

Burada;

η_v : Hacimsel verim

ρ_0 : Atmosfer yoğunluğu (kg/m^3)

Atmosfer yoğunluğu (kg/m^3) ile silindir strok hacmi (l) aşağıdaki formüllerden hesaplanır.

$$\rho_0 = P_0 \cdot 1000 / T_0 \cdot ((R/28.97)) \quad (2.39)$$

Burada R molar gaz sabitini ifade etmektedir. Birimi (J/molK)'dir.

İç enerji (kJ) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$U_a = M_1 \cdot T_a \cdot (20,6 + 0,002638 \cdot (T_a - 273)) \quad (2.40)$$

Özgül Isı değeri (kmol/kJ-KgK) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$cv = 20,6 + 0,002638 \cdot (T - 273) \quad (2.41)$$

Buradaki T aynı adımdaki krank açısına bağlı sıcaklığını (K) ifade etmektedir.

Soğutma ve iş değişimi (kJ) hesaplarında Özcan'ın yüksek lisans tezinden faydalanılmıştır ve aşağıdaki formülle hesaplanır (Özcan, 2010).

$$dQ_w + Pdv = \frac{P_j \cdot v_j \cdot \left[1 - \left(\left(\frac{v_j}{v_{j+1}} \right)^{n_p - 1} \right) \right]}{n_p - 1} \quad (2.42)$$

Egzoz gazları sıcaklığı (K) formülü aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$T_r' = T / (P/P_r)^{1/3} \quad (2.43)$$

2.7 İndike ve efektif parametrelerin hesabı

İndike işin (kJ) anlık değeri aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$W_{j+1} = W_j + \frac{(P_{j+1} - P_j) \cdot (v_{j+1} - v_j)}{2} \quad (2.44)$$

Tam değeri ise aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$W_{j+1} = W_j + \frac{1}{6 \cdot n} \cdot \int_{\alpha_a}^{\alpha_b} W_j \cdot d\alpha \quad (2.45)$$

Pozitif alan ortalama indike basınç (MPa) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_i' = \frac{W_i}{v_h} \quad (2.46)$$

Ortalama İndike basınç (MPa) Hesabı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_{inet} = P_i' - (P_r - P_a) \quad (2.47)$$

İndike güç (kW) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$N_i = P_{inet} \cdot v_h \cdot i \cdot n / 120 \quad (2.48)$$

Mekanik verim aşağıdaki formülle hesaplanır. Bu denklem Uyar ve Demirbay'ın türetmiş olduğu denklemdir (Uyar ve Derinbay, 2018).

$$\eta_{mv} = 0.758953 - 0.000043 \cdot n + 0.028463 \cdot P_{inet} \quad (2.49)$$

İndike verim aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\eta_i = \frac{P_{inet} \cdot l_0 \cdot \lambda}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_w} \quad (2.50)$$

Efektif verim aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\eta_e = \eta_{mv} \cdot \eta_i \quad (2.51)$$

İndike özgül yakıt tüketimi (g/kWh) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$b_i = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_i} \cdot 1000 \quad (2.52)$$

Ortalama efektif basınç (MPa) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_e = P_{inet} \cdot \eta_{mv} \quad (2.53)$$

Efektif güç (kW) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$N_e = (P_e \cdot v_h \cdot n) / 30 / 4 \quad (2.54)$$

Efektif özgül yakıt tüketimi (g/kWh) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$b_e = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_e} \cdot 1000 \quad (2.55)$$

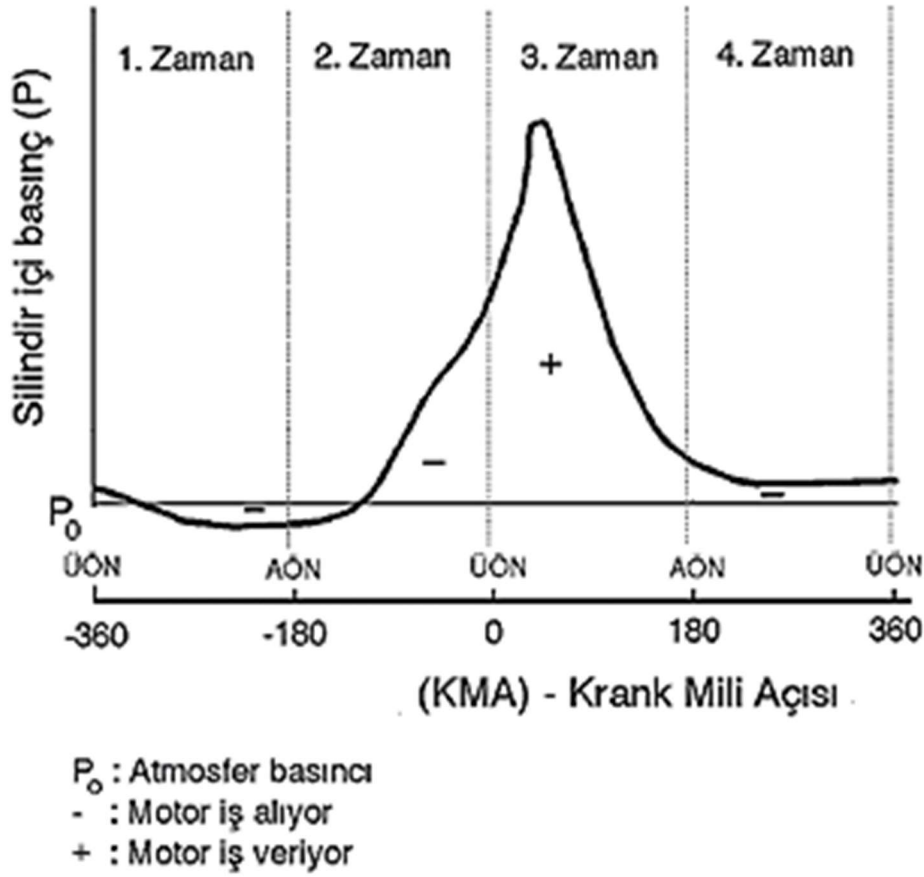
Saatteki yakıt tüketimi (kg/h) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$G_e = \frac{N_e \cdot b_e}{1000} \quad (2.56)$$

2.8 Matematik Modelleme Programı

Motorlarla ilgili deneysel çalışmaların maliyetli ve fazla zaman alması istenilen bir durum değildir. Araştırmacılar bu sebepten dolayı modellemeler üzerine çalışmalar yapmaktadır. Modelleme, deneysel çalışmalarda geçen süre ve harcanılan para konusunda tasarruf sağlayarak alternatif bir seçenek olmuştur. Fakat modelleme işlemi karmaşık sistemler için kolay da olmayabilir. İYM'lerde silindir içi parametreler oldukça karmaşıktır ve temel denklemlerle çözülemez. Dolayısıyla modelleme yapmak için termodinamik, motor termodinamiği, motor dinamiği, fizik, kimya gibi disiplinlerarası konular ile ilgili bilgilere de hakim olmak gerekir.

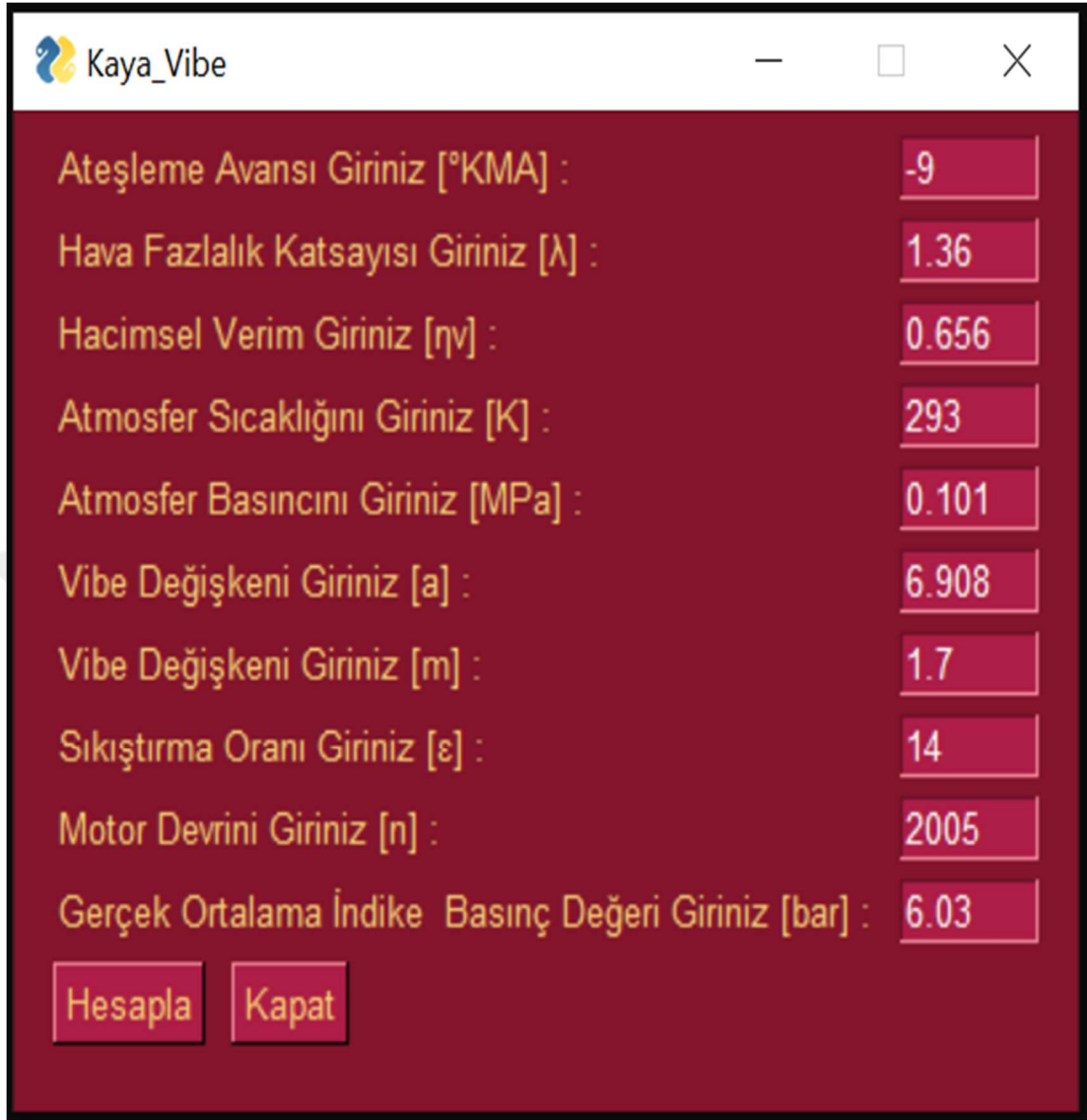
Bir iş çevrimi 720 °KMA'da (-360,360) gerçekleşmektedir. Oluşturduğumuz modelde silindir içi olayların gerçekleştiği -180 °KMA ile 180 °KMA arası 0,5 derecelik adımlarla hesaplamalar yapılabilmektedir. Şekil 2.3'de açık indikatör diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Açık indikatör diyagramı (Koman, 2008).

Bölüm 2.1 ile 2.7 arasında anlatılan bilgiler doğrultusunda python programı kullanarak model oluşturulmuştur. Programımızda silindir içi parametrelerin hesaplamaları adım adım hesaplanmıştır. Python spyder PySimpleGUI kütüphanesi kullanılarak arayüz programı oluşturulmuş ve girdi değerlerimizi arayüz programından girerek veri işleme işlemi zaman açısından tasarruf sağlanmıştır. Şekil 2.4'te arayüz programı ile girdi değerlerimizi girerek hesaplama butonuna basarak bölüm 2.1 ile 2.7 anlatılan denklemlerin hesaplama sonuçları excel dosyası olarak çıktı verebilmektedir. Sanki boyutlu termodinamik modelimiz ile adım adım o andaki sıcaklık ve basınç değerlerini çıktı olarak alabilmekteyiz.

Kaya_Vibe olarak isimlendirilen arayüz görseli Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Parametre	Değer
Ateşleme Avansı Giriniz [$^{\circ}$ KMA] :	-9
Hava Fazlalık Katsayısı Giriniz [λ] :	1.36
Hacimsel Verim Giriniz [η_v] :	0.656
Atmosfer Sıcaklığını Giriniz [K] :	293
Atmosfer Basıncını Giriniz [MPa] :	0.101
Vibe Değişkeni Giriniz [a] :	6.908
Vibe Değişkeni Giriniz [m] :	1.7
Sıkıştırma Oranı Giriniz [ε] :	14
Motor Devrini Giriniz [n] :	2005
Gerçek Ortalama İndike Basınç Değeri Giriniz [bar] :	6.03

Hesapla Kapat

Şekil 2.4: Python programı arayüz görseli.

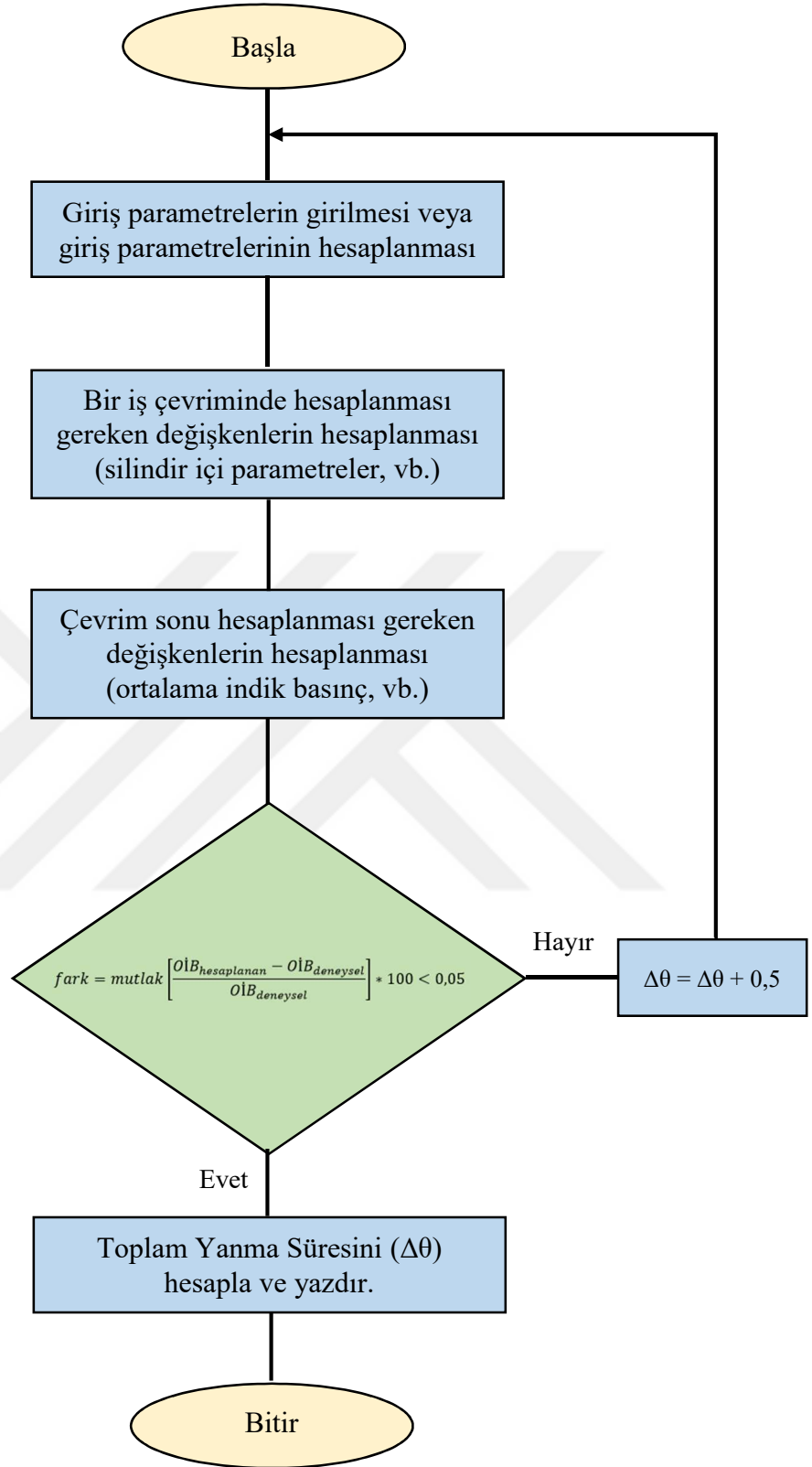
Kaya_Vibe olarak isimlendirdiğimiz arayüzümüz bize gireceğimiz parametrelerin hızlı bir şekilde girilmesi açısından zamandan tasarruf sağlamakla beraber, görsel olduğu için parametrelerin doğru girilmesi kontrolü açısından ise kolaylık sağlamaktadır.

Çizelge 2.1’de program giriş parametreleri gösterilmiştir. Bir çok parametreyi kendimizin belirleyebilmesi programımızın avantajlarından.

Çizelge 2.1: Python programında hesap için giriş değişkenleri.

Değişken İsmi	Seçilen değer / durum
Yakıt türü	Benzin
Aşırı Doldurma	Yok
Yanma Türü	Homojen
Strok, mm	80
Piston Çapı, mm	85
Motor Hacmi, litre	0.454
Motor çevrim zamanı	4
Silindir sayısı	1
Motor Dönme Sayısı, d/d	Değişken
Sıkıştırma Oranı	Değişken
Isı Kullanım Katsayısı	Değişken
Hacimsel Verim	Değişken
Hava Fazlalık Katsayısı	Değişken
Vibe parametresi [a]	6,908
Vibe parametresi [m]	Değişken
Ateşleme Avansı	Değişken
Atmosfer Basıncı P_0 [MPa]	Değişken
Atmosfer Sıcaklığı T_0 [K]	Değişken
Toplam Yanma Süresi	Değişken

Python programı ile oluşturulan sanki boyutlu termodinamik model programının akış diyagramı Şekil 2.5’ te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Python programın akış şeması



3. REGRESYON ANALİZİ

Regresyon analizi, aralarında neden-sonuç ilişkisi bulunan bağımlı ve bağımsız değişkenler olarak kabul edilen iki veya daha fazla değişkenden bağımsız olan(lar) bilindiğinde bağımlı değişkenin alabileceği değeri tahmin etmek için kullanılan istatistiksel bir araçtır. Tek bir değişken kullanılarak analiz yapılıyorsa buna tek değişkenli regresyon, birden çok değişken kullanılıyorsa çok değişkenli regresyon analizi olarak isimlendirilir (Çakıcı, 2023).

Değişkenler arasındaki ilişkinin matematiksel modellerle ifade edilebilmesi için regresyon analizine ihtiyaç duyulmaktadır.

Regresyon analizi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Y = M.X + b \quad (3.1)$$

Burada;

Y, regresyon denkleminin bağımlı değişkenidir.

M, regresyon denkleminin eğimidir.

X, regresyon denkleminin bağımsız değişkenidir.

b, denklemin sabitidir.

Regresyon analizi değişkenler arasındaki ilişkiye göre doğrusal regresyon ile doğrusal olmayan regresyon analizi olarak ikiye ayrılır. Değişkenlerin sayısına göre ise basit regresyon ve çoklu regresyon olarak ikiye ayrılır.

3.1 Aykırı Değerler (Outliers)

Bir veri kümesindeki dağılımı normal olmayan ve bir regresyon modelini bozmaya yatkın değerler aykırı değerler olarak isimlendirilir. Bu nedenle, datalardan doğru bir netice için aykırı değerlerin seçiminde çok dikkatli olunmalıdır. Genellikle deneylerden elde edilen datalar, farklı gözlemlerden meydana geldiğinden ve değerlerin büyük bir kısmı hatalı yerleştirilmiş olabilir. Aykırı değerlerin nedeni

araştırılmalı ve aykırı değerler incelenmeli, bu değerlerin doğru olup olmadığı kontrol edilmelidir. Aykırı modele koyulabilir veya daha doğru sonuçlu bir regresyon modeli yapmak için koyulmayabilir.

3.2 Doğrusal Regresyon

Doğrusal bir regresyon, bağımlı bir değişken ile bir veya birden fazla bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi bulmak için kullanılan tahmine dayalı bir modeldir. Kompleks verileri incelememize katkıda bulunur(Çakıcı, 2023).

Doğrusal bir regresyon modeli için formül aşağıdaki gibidir:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \epsilon_i \quad (3.2)$$

Burada;

β : hesap edilecek lineer değişken tahminlerini,

ϵ : hatayı ifade etmektedir.

3.3 Basit Regresyon Denklemi

Bir bağımlı değişken ile bir bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi inceler. Basit regresyon denklemi aşağıdaki gibidir.

$$Y = \alpha + bX + \epsilon \quad (3.3)$$

Burada;

Y : Bağımlı değişken,

X : Bağımsız (Açıklayıcı) değişken,

α : Kesişme,

b : Eğim,

ϵ : Regresyon kalıntısını (hatasını) ifade etmektedir.

3.4 Çoklu Regresyon Denklemi

Bir bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi inceler. Çoklu regresyon denklemi aşağıdaki gibidir.

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + eX_4 + \dots + tX_t + \epsilon \quad (3.4)$$

Burada;

Y : Bağımlı değişken,

X₁, X₂, X₃, X₄ : Bağımsız (Açıklayıcı) değişkenler,

α : Kesişme,

b, c, d : Eğimler,

ϵ : Regresyon kalıntısı

Regresyon kalıntısı, gözlemlenen değer ile tahmin değeri arasındaki farktır.

Çoklu r: Yapılan regresyon analizinde birden fazla bağımsız değişken olduğunu ve ilgili değişkenlerin arasındaki bağlantı oranını ifade eder.

Standart sapma: Verilerin tutarlı olup olmaması hakkında bilgi vermektedir.

Varyans: Verilerin dağılımı ile ilgili bilgi vermektedir.

ANOVA: Anova “analysis of variance” İngilizce terimin kısaltması olup, anlamındanda anlaşılacağı üzerine varyans analizini ifade etmektedir.

R² (Belirlilik katsayısı): Yapılan regresyon analizi sonucunda 0 ile 1 değeri arasında sonuç çıkmalıdır. R² değeri sıfıra ne kadar yaklaşmışsa sonucun yanlış olduğu, hesaplanmış olan parametreler için kullanılan modelin uygun olmadığı anlamına gelmektedir. R² değeri bire ne kadar yaklaşmışsa sonucun doğru olduğu anlamına gelir ve hesaplanmış olan parametreler için analiz sonucunda oluşturulan modelin uygun olduğu ifade edilebilir.

Ayarlı R²: R² değeri ile arasındaki farkın az olması istenir. Eğer fark çok ise modeldeki bağımsız değişkenlerinden bazılarının bağımlı değişken üzerinde önemli bir etkisi olmadığını ifade eder.

Gözlem: 42 adet veri girişi olmuştur.

DF değeri: Serbestlik derecelerini ifade eder.

SS değeri: Çıktıların kareler toplamını ifade eder.

F değeri: Tüm bağımsız değişkenleri kullanarak çıktı verir. F testinin sonucunun yüksek olması elde edilecek çıktının anlamlı olmasını ifade eder

Katsayılar: Oluşturulacak yeni formülün katsayılarını ifade eder.

T testi (t stat): t testinin sonuçlarının sıfırdan farklı olması istenir. T testi değişkene özel hesap yapar yani değişkenler için ayrı ayrı hesaplar yaparak sonuçları verir.

P değeri: P değeri sonucunun 0,05'ten küçük olması gerekir. Eğer P değeri 0,05'ten büyük ise bağımsız değişkenlerin sonuç üzerinde etkili olmadığını ifade eder.

Sıfır hipotezi (H_0)

İki değişken arasında ilişki ya da fark bulunmadığını kabul eden bir varsayımdır. Çalışmamızda sıfır hipotezi kullanma amacımız yeni türetilen formülün içindeki değişkenlerin toplam yanma süresi ($\Delta\theta$) üzerinde etkisinin olup olmadığını test etmektir.



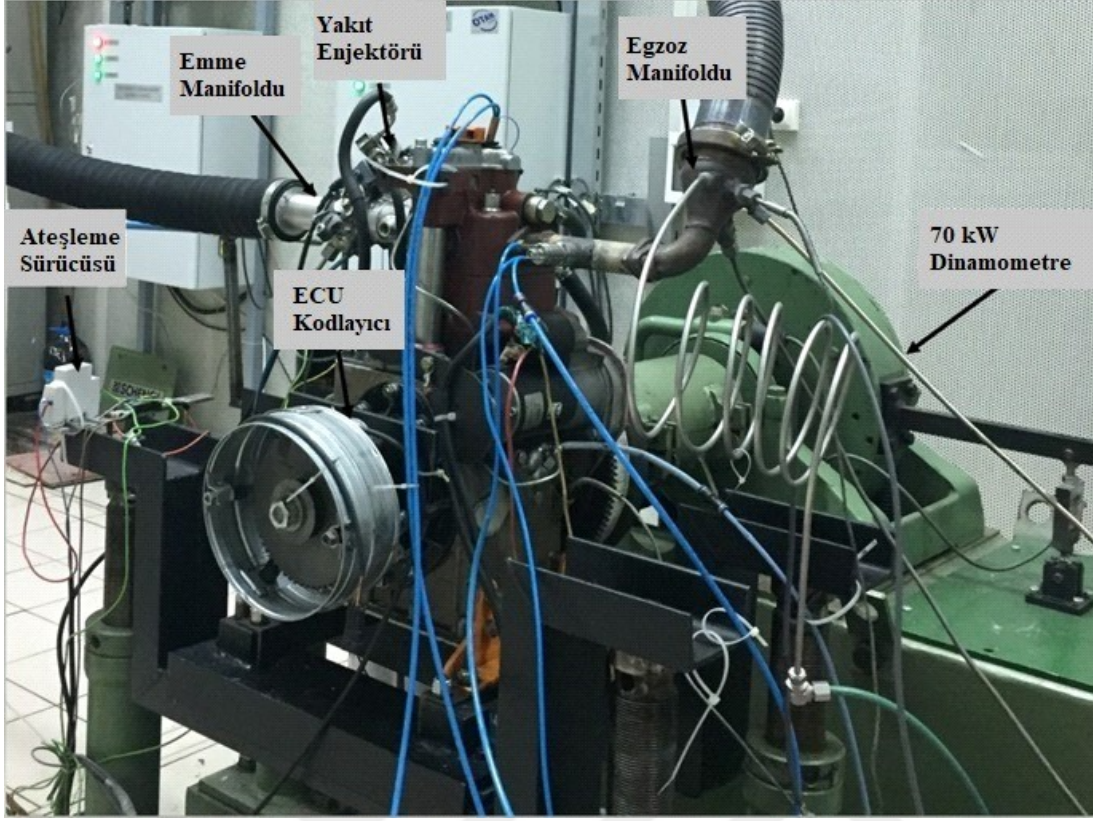
4. DENEY MOTORU VE LABORATUVAR

Matematiksel model oluşturmak için kullanılacak veriler Demirci tarafından yapılan çalışmalardan faydalanılmıştır (Demirci, 2017). Antor 3LD 450 isimli deney motoru İstanbul Teknik Üniversitesi motor laboratuvarında kullanılan, önceleri sıkıştırma ateşlemeli bir motor olup, Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR tarafından buji ateşlemeli bir deney motoruna dönüştürülmüştür (Kutlar, 1999). Dizel motorda bulunan enjektör yerine buji yerleştirilmiştir. 2013 yılında tek silindirli deney motoruna elektronik kontrol ünitesi (ECU) yerleştirilmiş, böylelikle bujinin ateşleme zamanı ile püskürtme süresinin kontrol edilmesi sağlanmıştır (Tekeli, 2013). Buji ateşlemeli deney motoruna ait detaylı bilgiler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Deney motorunun özellikleri.

Deney motorunun adı	Antor 3LD 450
Silindir sayısı	1
Silindir hacmi	453 cm ³
Çap	85 mm
Strok	80 mm
Sıkıştırma oranı	10,5 12 14
Emme supabı çapı	32 mm
Egzoz supabı çapı	27 mm
Emme supabı açılma zamanı	16 °KMA
Egzoz supabı açılma zamanı	40 °KMA
Emme supabı kapanma zamanı	40 °KMA
Egzoz supabı kapanma zamanı	16 °KMA
Supap bindirme süresi	32 °KMA simetrik

Kutlar tarafından sıkıştırma ateşlemeli motorun sıkıştırma oranı buji ateşlemeli motorun sıkıştırma oranına (6 ~14) göre yüksek olduğundan motorun çalışabilmesi için piston üzerinde gerekli revizyon işlemleri (talaşlı imalat) uygulanarak ilgili sıkıştırma oranına (9,5) ayarlanıp hazır hale getirilmiştir (Kutlar, 1999).



Şekil 4.1: Tek silindirli deney motoru.

Demirci tarafından 2017 yılında deney motoru Antor 3LD 450 üzerinde farklı sıkıştırma oranları ve farklı yanma odası geometrileri ile çalışmalar yapılmıştır. Şekil 4.2’de deneysel verileri kullanılan MR tipi yanma odası geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.2: MR tipi yanma odası geometrisi (Demirci, 2017).

4.1 Deney Motorunun İncelenmesi

Silindir içerisine alınacak hava, emme manifoldunda bulunan gaz kelebeği (motor ykne göre ayarlama yapar) yardımı ile sağlanır. Deney motorunun emme manifoldu ile gaz kelebeği bütün olarak tasarlandığı için ilgili donanımların çapları bu detaylara göre ayarlanmıştır. Gaz kelebeğinin atmosfere bakan kısmı roots tipi debimetreye bağlanarak hava debisi ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Yanmış gazların dışarı atılması egzoz manifold aracılığı ile gerçekleşir. Motor içinde yanan gazların (573 – 973 K) dışarıya kolay atılabilmesi için egzoz manifoldları akışı kolaylaştıracak şekilde tasarlanmalıdır (Demirci, 2017).

Tekeli tarafından tasarlanan ve üretilen elektronik kontrol ünitesinde, tek silindirli buji ateşlemeli deney motorunun önemli parametreleri olan ateşleme zamanı ve pşkrtme sürelerinin bilgisayar ile kontrolünün sağlanabilmesi için mikroişlemcili Arduino 2560 kart kullanılmıştır. Arduino yazılımı ile krank mili sensörüne gelen sinyallerle kart çalıştırılmış ve bu sayede ateşleme avansı ve pşkrtme zamanının giriş parametreleri olan ateşleme zamanı ve dwell (bobinin dolum süresi) süresi ile bir çevrimde pşkrtlen hava yakıt karışımı ile zamanı kontrol edilebilmiştir (Tekeli, 2013).

4.2 Laboratuvar lm Cihazları

Motor 70 kW kapasiteli bir dinamometreye bağlanarak deneyler yapılmıştır. Motorun üretmiş olduğu kuvvet bir algılayıcı aracılığı ile ölçülmüştür. Algılayıcının duyarlılığı $\pm 0,025$ kg'dır. Motor devir sayısı dinamometre çıkışına bağlanan endüktif hız algılayıcısı ile ölçülmüştür. Algılayıcının hassasiyeti ± 1 devir/ dakika'dır (Demirci, 2017; Doğan, 2019).

Tek silindirli buji ateşlemeli deney motorunun yakıt tüketimi ölçümü için kütlesel değişim odaklı AVL 733S cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yakıt lm hassasiyeti $\pm 0,1$ 'dir. Yakıt şartlandırılması için AVL 753C cihazı kullanılmış, ilgili cihaz yakıt sıcaklığını kullanıcının tercihine göre ayarlayabilmektedir. Yakıt basıncı ise hat üzerinde mevcut olan bir düzenleyici (regülatör) ile 0,1-0,6 MPa basınç arasında istenilen değerlere ayarlanabilmektedir (Demirci, 2017; Doğan, 2019).

İndike değerlerin bilinmesi yanma analizi için önemli bir parametredir. Söz konusu değerler için ise silindir içi basınçlarının ölçüm sonuçları gereklidir. Deney motorunda AVL GU13Z-24 algılayıcısı ile silindir içi basınçlar ölçülmüştür. Algılayıcıdan llen sinyaller Kistler Kibox To Go 2893A veri toplama makinesi ile sayısal (dijital)

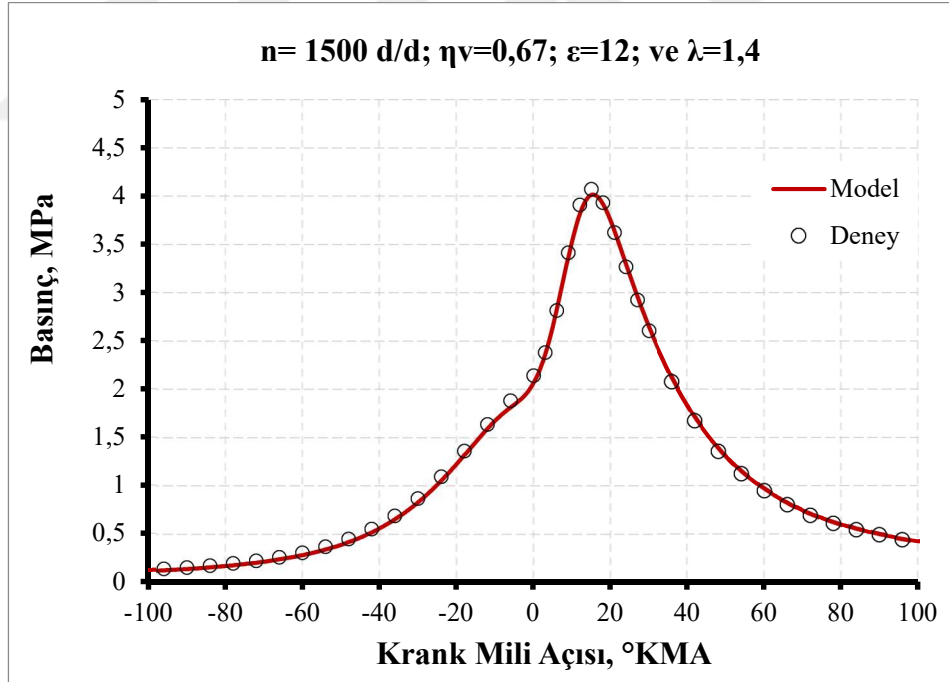
değerlere dönüştürülmüştür. Krank mili açısı ($^{\circ}$ KMA) ayrı bir algılayıcıdan gelen sinyallerle toplanmıştır. İlgili cihaz yanma analizi için kullanılan açığa çıkan ısı miktarı ile yanma süresi verilerini de hesaplamaktadır (Demirci, 2017).



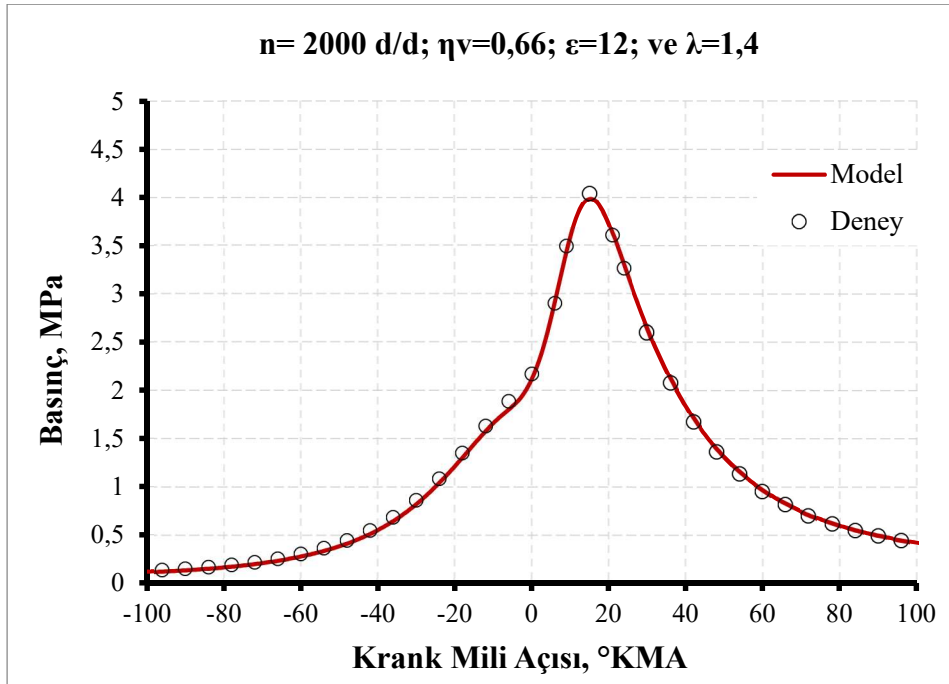
5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İkinci bölümde anlatılan sanki boyutlu termodinamik model için Vibe formülünde bulunan toplam yanma süresinin doğru hesaplanması ve oluşturulan modelin doğru çalışması için önemlidir. Bu tez kapsamında sanki boyutlu bir termodinamik model oluşturulup, sıkıştırma ve genişleme sürecinde 0,5 krank mili açısı adımlarla silindir içi parametreler hesaplatılmıştır. Hesaplanan değerlerin doğruluğu deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Oluşturulan model ile deneysel çalışmalarda elde edilen basınç değerleri farklı çalışma koşullarında karşılaştırılmıştır ve çıkan farkların kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar ve modelimize ait basınç sonuçları ile ilgili örnek diyagramlar Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

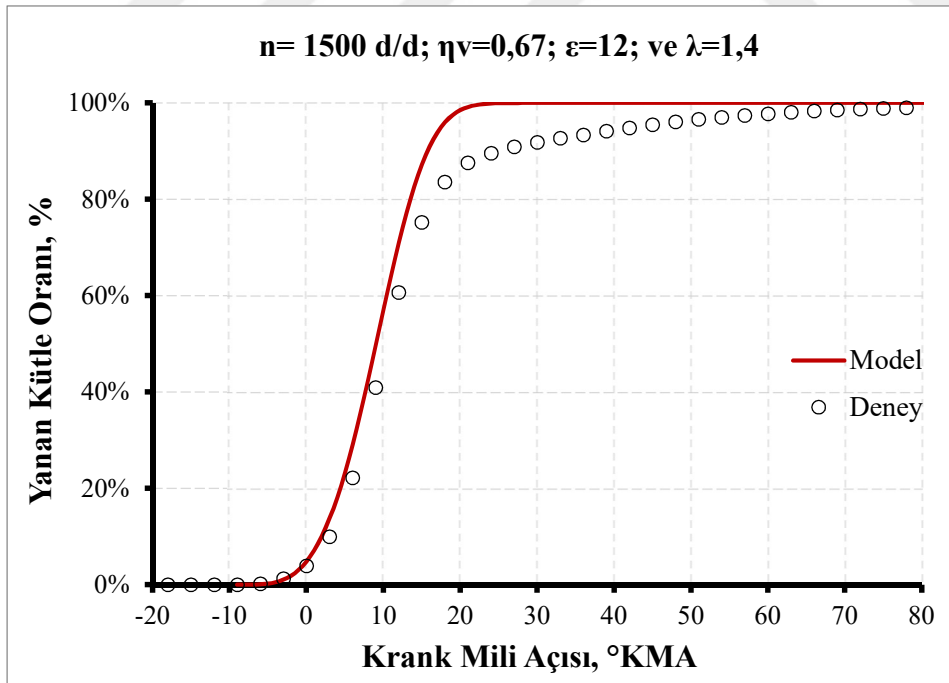


Şekil 5.1: Deney ve model için basınç değerleri (n=1500 d/d; λ=1,4; ε=12 ve ηv=0,67).

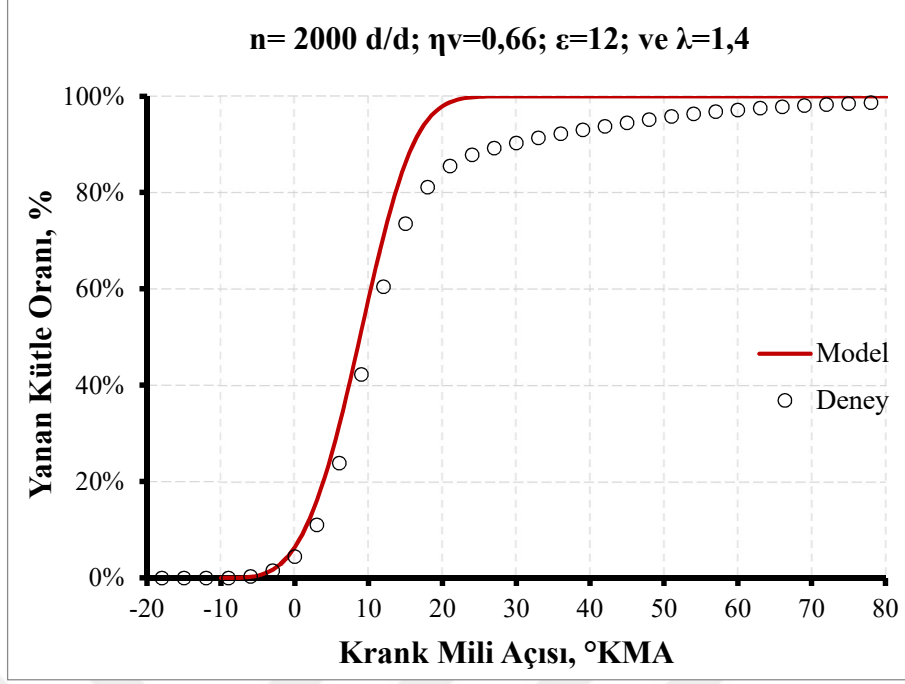


Şekil 5.2: Deney ve model için basınç değerleri ($n=2000 \text{ d/d}; \lambda=1,4; \varepsilon=12$ ve $\eta v=0,66$).

Yanan kütle oranı için model ile deneysel sonuçları karşılaştırıldığında kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te örnek diyagramlar gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Model ve deneysel yanan kütle oranları ($n=1500 \text{ d/d}; \lambda=1,4; \varepsilon=12$ ve $\eta v=0,67$).



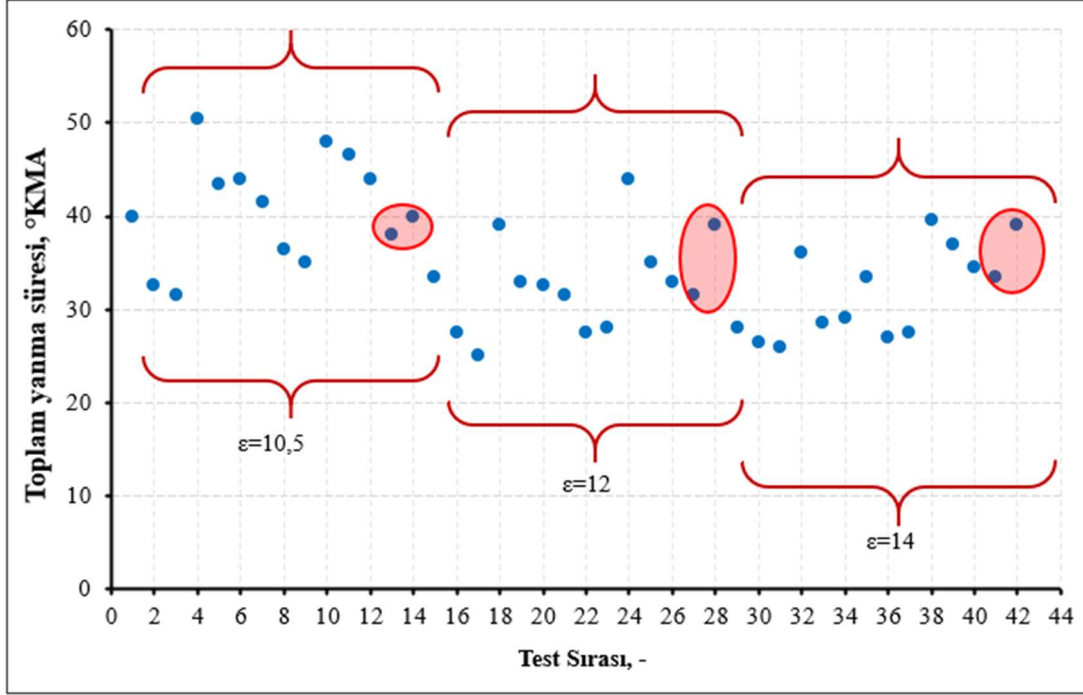
Şekil 5.4: Model ve deneysel yanan kütle oranları ($n=2000$ d/d; $\lambda=1,4$; $\varepsilon=12$ ve $\eta_v=0,66$).

Model 42 farklı noktada çalıştırılarak veriler elde edilmiş ve bu veriler deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre toplam yanma süresinin doğru seçilmesinde hesaplanan OİB ile deneysel olarak elde edilen OİB değerlerinin arasında %5'ten küçük olacak şekilde toplam yanma süreleri belirlenmiştir. Bunun için oluşturulan python programında denklem 5.1 kullanılarak iterasyon yapılmıştır.

$$fark = mutlak \left[\frac{OİB_{hesaplanan} - OİB_{deneysel}}{OİB_{deneysel}} \right] * 100 \quad (5.1)$$

Farklı çalışma noktalarına göre hesaplanan toplam yanma süreleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Sanki boyutlu model ile hesap yapılacağı zaman toplam yanma sürelerinin, motor çalışma parametrelerine göre hesaplanmasını sağlayacak bir denklemin oluşturulması da bu tezin temel amaçlarından biridir. Buna göre deneysel veya teorik çalışmalarda hesap öncesinde bilinen değerlere göre farklı motor çalışma parametreleri için farklı formüller türetilmiştir. Her iki çalışma türünde de motor dönme sayısı, hava fazlalık katsayısı, sıkıştırma oranı genelde bilinen değerlerdir. Fakat OİB'nin deneysel çalışma olmaksızın doğrudan bilinmesi mümkün değildir. Bundan dolayı oluşturulan regresyon denkleminde hacimsel verim (η_v), ve emme zamanı sonu basıncı (Pa) değerlendirilmiş ve toplam yanma sürelerindeki değişimi açıklayan iki farklı denklem türetilmiştir.

Toplam yanma süreleri ile motor çalışma parametreleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için farklı motor çalışma noktalarına göre toplam yanma sürelerinin değişimi grafiklendirilmiştir. Şekil 5.5'te toplam yanma süresi için serpilme diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.5: Deney noktaları (42 nokta) için serpilme diyagramı.

Çizelge 5.1'de detaylı olarak farklı motor çalışma noktalarında hesaplanan toplam yanma süreleri gösterilmiştir. Bu diyagram (Şekil 5.5) ve Çizelge 5.1 üzerinden toplam yanma süreleri ve motor çalışma parametreleri arasında nasıl bir ilişki olduğunu açıklamak zordur. Bu nedele daha fazla bilgi için inceleme yapmaya devam edilmiştir.

5.1 Hacimsel Verim (η_v) Değerine Göre Toplam Yanma Süresinin Belirlenmesi

Motor çalışma parametreleri ve toplam yanma süreleri arasındaki ilişkinin daha ayrıntılı incelenmesi için regresyon analizi yapılmıştır.

Regresyon analizinde verilen bilgiler göz önüne alınarak ilk önce 42 gözlem değeri için regresyon analizi yapılmıştır. Çizelge 5.2'de bu farklı motor çalışma noktaları için regresyon analizi sonuçları verilmiştir. Regresyon analizi için Microsoft Excel programından faydalanılmıştır.

Çizelge 5.1: Farklı motor çalışma noktalarında hesaplanan toplam yanma süreleri

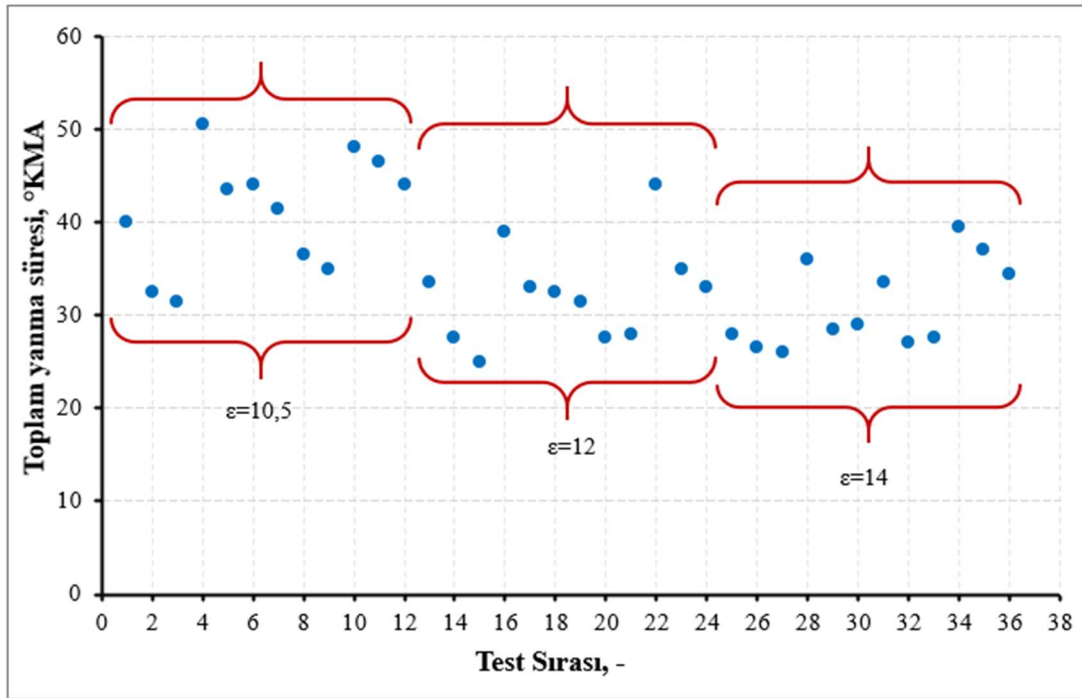
Test Sıklığı	Sıkıştırma oranı, ε (-)	Devir, n (d/d)	Hacimsel Verim, η_v (-)	Emme Sonu Basınç Pa (bar)	Hava fazlalık katsayısı, λ (-)	Ortalama İndike Basınç, OİB (bar)	Toplam Yanma Süresi, $\Delta\theta$ (°KMA)
1	10,5	1500	0,374	0,46	0,99	3,822	40,0
2	10,5	1500	0,531	0,6	0,99	5,865	32,5
3	10,5	1500	0,684	0,75	1,01	7,769	31,5
4	10,5	1500	0,472	0,55	1,36	3,947	50,5
5	10,5	1502	0,66	0,73	1,36	5,913	43,5
6	10,5	1501	0,859	0,91	1,4	7,849	44,0
7	10,5	2002	0,368	0,45	0,99	3,916	41,5
8	10,5	2004	0,556	0,63	1,06	5,899	36,5
9	10,5	1990	0,739	0,8	1,09	7,892	35,0
10	10,5	2002	0,465	0,54	1,35	3,98	48,0
11	10,5	2005	0,703	0,77	1,46	5,924	46,5
12	10,5	2009	0,919	0,97	1,48	7,939	44,0
13	10,5	2505	0,962	1,01	1,07	10,572	38,0
14	10,5	2504	0,984	1,03	1,47	8,561	40,0
15	12	1500	0,375	0,45	0,98	3,93	33,5
16	12	1500	0,528	0,59	0,99	5,849	27,5
17	12	1499	0,7	0,76	0,99	7,8	25,0
18	12	1500	0,468	0,53	1,34	3,941	39,0
19	12	1502	0,667	0,72	1,37	5,878	33,0
20	12	1500	0,838	0,89	1,35	7,824	32,5
21	12	2002	0,382	0,45	0,98	4,055	31,5
22	12	2004	0,525	0,59	0,99	5,933	27,5
23	12	2007	0,677	0,73	0,99	7,865	28,0
24	12	2002	0,47	0,54	1,33	3,996	44,0
25	12	2005	0,662	0,72	1,36	5,929	35,0
26	12	2010	0,862	0,91	1,35	8,052	33,0
27	12	2505	0,903	0,95	1	10,531	31,5
28	12	2503	0,923	0,97	1,42	8,415	39,0
29	14	1500	0,37	0,43	0,98	3,902	28,0
30	14	1500	0,522	0,58	0,99	5,866	26,5
31	14	1501	0,689	0,74	1	7,791	26,0
32	14	1508	0,459	0,52	1,31	3,877	36,0
33	14	1501	0,646	0,7	1,33	5,939	28,5
34	14	1497	0,843	0,89	1,35	7,865	29,0
35	14	2003	0,379	0,44	0,97	4,133	33,5
36	14	2005	0,524	0,58	0,99	6,065	27,0
37	14	2007	0,658	0,71	0,99	7,835	27,5
38	14	2003	0,464	0,52	1,32	4,086	39,5
39	14	2005	0,656	0,71	1,36	6,03	37,0
40	14	2009	0,85	0,89	1,35	8,071	34,5
41	14	2504	0,905	0,95	0,99	10,688	33,5
42	14	2509	0,919	0,96	1,4	8,573	39,0

Çizelge 5.2: 42 nokta için regresyon analizi sonuçları.

<i>Regresyon istatistikleri</i>	
Çoklu R	0,87936
R^2	0,77327
Ayarlı R^2	0,74876
Standart Hata	3,28297
Gözlem	42

Burada $R^2=0,77327$ ve ayarlı $R^2=0,74876$ olarak bulunmuştur. Bu değerler toplam yanma süreleri ile ilgili bir modelden istenilen değerlerden düşük çıkmıştır. Literatürde R^2 değerinin en az 0,8 olması güvenli bir model için istenmektedir. Bu değerlerin yükseltilmesi için çalışma noktaları tekrar incelenmiştir. Buna göre yüksek devirlerde bulunan noktaların denklemin lineerliğini bozacak şekilde sonuç verdiği Şekil 5.5'te de görülmüştür. Bu nedenle yüksek devirli çalışma noktaları regresyon analizinden çıkarılmıştır.

Çizelge 5.3'te yüksek devirli noktaların çıkarılması ile 42 noktadan 36 noktaya düşürülmüş çalışma noktaları için toplam yanma süreleri ve motor çalışma noktası verileri verilmiştir.



Şekil 5.6: Çıkarılan noktalar sonucunda oluşan serpilme diyagramı (36 nokta için).

Çizelge 5.3: Çıkarılan noktalar durumunda hacimsel verime göre toplam yanma süreleri.

Test Sıklığı	Sıkıştırma oranı, ε (-)	Devir, n (d/d)	Hacimsel Verim, η_v (-)	Hava fazlalık katsayısı, λ (-)	Toplam Yanma Süresi, $\Delta\theta$ (°KMA)
1	10,5	1500	0,374	0,99	40,0
2	10,5	1500	0,531	0,99	32,5
3	10,5	1500	0,684	1,01	31,5
4	10,5	1500	0,472	1,36	50,5
5	10,5	1502	0,66	1,36	43,5
6	10,5	1501	0,859	1,4	44,0
7	10,5	2002	0,368	0,99	41,5
8	10,5	2004	0,556	1,06	36,5
9	10,5	1990	0,739	1,09	35,0
10	10,5	2002	0,465	1,35	48,0
11	10,5	2005	0,703	1,46	46,5
12	10,5	2009	0,919	1,48	44,0
13	12	1500	0,375	0,98	33,5
14	12	1500	0,528	0,99	27,5
15	12	1499	0,7	0,99	25,0
16	12	1500	0,468	1,34	39,0
17	12	1502	0,667	1,37	33,0
18	12	1500	0,838	1,35	32,5
19	12	2002	0,382	0,98	31,5
20	12	2004	0,525	0,99	27,5
21	12	2007	0,677	0,99	28,0
22	12	2002	0,47	1,33	44,0
23	12	2005	0,662	1,36	35,0
24	12	2010	0,862	1,35	33,0
25	14	1500	0,37	0,98	28,0
26	14	1500	0,522	0,99	26,5
27	14	1501	0,689	1	26,0
28	14	1508	0,459	1,31	36,0
29	14	1501	0,646	1,33	28,5
30	14	1497	0,843	1,35	29,0
31	14	2003	0,379	0,97	33,5
32	14	2005	0,524	0,99	27,0
33	14	2007	0,658	0,99	27,5
34	14	2003	0,464	1,32	39,5
35	14	2005	0,656	1,36	37,0
36	14	2009	0,85	1,35	34,5

Serpilme diyagramından (Şekil 5.6) ve Çizelge 5.3'ten bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken olan toplam yanma süreleri arasında bir doğrusal ilişki olacağı tahmin edilmiş ve bu noktalar için tekrar regresyon analizi yapılmıştır. Kalan noktalar

için yapılan regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.4'te verilmiştir. Deney nokta sayısının indirgenmesi ile R^2 değeri 0,7736'dan 0,8439'a ve ayarlı R^2 değeri 0,7487'den 0,8237'ye yükselmiştir. Çalışma nokta sayısının indirgenmesi ile beklendiği gibi iyileşme elde edilmiştir.

Çizelge 5.4: Regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş noktalar için).

<i>Regresyon istatistikleri</i>	
Çoklu R	0,91864
R^2	0,8439
Ayarlı R^2	0,82376
Standart Hata	2,90773
Gözlem	36

Çıkarılan noktalar sonucunda 0,8 değerinin üstüne çıkmış fakat regresyon analizinden beklenen daha yüksek ($>0,90$) R^2 ve ayarlı R^2 değerlerine ulaşamamıştır. Bundan dolayı bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin ve her bir bağımsız değişkenin doğrusal olmayan etkilerinin de incelenmesine karar verilmiştir. Bağımsız değişkenler arasında olan ilişki, bağımsız değişkenlerin birbiri ile çarpımını, doğrusal olmayan etkileri ise bağımsız tüm değişkenlerin karesi alınarak tabloya yeni bir bağımsız değişken gibi ilave edilmesi ile yapılmıştır. Böylece doğrusal (lineer) regresyon analizinden çıkmış ve doğrusal olmayan bir değişimi inceleyen yeni daha kapsamlı bir regresyon modeli kurulmuştur. Çıkarılan noktalar için ilk yapılan analizde bağımsız değişkenlerin sayısı (ϵ , n , η_v ve λ) dört iken yeni durumda bağımsız değişkenler (ϵ , n , η_v , λ , $\epsilon * n$, $\epsilon * \eta_v$, $\epsilon * \lambda$, $n * \eta_v$, $n * \lambda$, $\eta_v * \lambda$, ϵ^2 , n^2 , η_v^2 , λ^2) olmak üzere sayısı 14'e çıkmıştır. Bu şekilde, bağımsız değişkenler arasındaki ilişki ve bağımsız değişkenlerin karesi ile olan ilişkileri incelenmiştir. Regresyon analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5'te verilmiştir. Burada, R^2 değeri 0,8439'dan 0,9680'e ve ayarlı R^2 değeri 0,8237'den 0,9467'ye yükselmiştir. Bu değerler bir regresyon analizi için oldukça doğru ve geçerli değerlerdir.

Çizelge 5.5: Hacimsel verime göre regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş 36 nokta için).

<i>Regresyon istatistikleri</i>	
Çoklu R	0,983883
R^2	0,968025
Ayarlı R^2	0,946709
Standart Hata	1,598913
Gözlem	36

Regresyon analizinden iyi sonuçlar elde edilmesinden sonra, regresyon analizinin sonuçlarının daha ayrıntılı incelenmesi için ANOVA sonuçlarına bakılmıştır. Bu şartlar altında ANOVA sonuçları indirgenmiş 36 nokta için Çizelge 5.6’da verilmiştir. Çizelge 5.6’ya göre, burada sıfır hipotezi önerilmiştir. İkinci bölümde anlatılan sıfırhipotezine göre tüm testler %95 güven aralığına göre değerlendirilmiştir. Sıfır hipotezine göre, başlangıçta tüm bağımsız değişkenlerin toplam yanma süresinin değişimi üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı iddia edilmiştir. Bu analizde F değeri Çizelge 5.6 ’dan görüleceği üzere 45,41 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre sıfır hipotezi reddedilmiştir. F dağılım tablosundan $F_{0,05;14;21}=2,20$ (interpolasyon yöntemi ile) olarak bulunmuştur. F dağılım tablosu eklerde verilmiştir.

Çizelge 5.6: Hacimsel verime göre indirgenmiş noktalar için ANOVA sonuçları.

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Anlamlılık F</i>
Regresyon	14	1625,369	116,0978	45,41234	1,67E-12
Fark	21	53,68701	2,556524		
Toplam	35	1679,056			

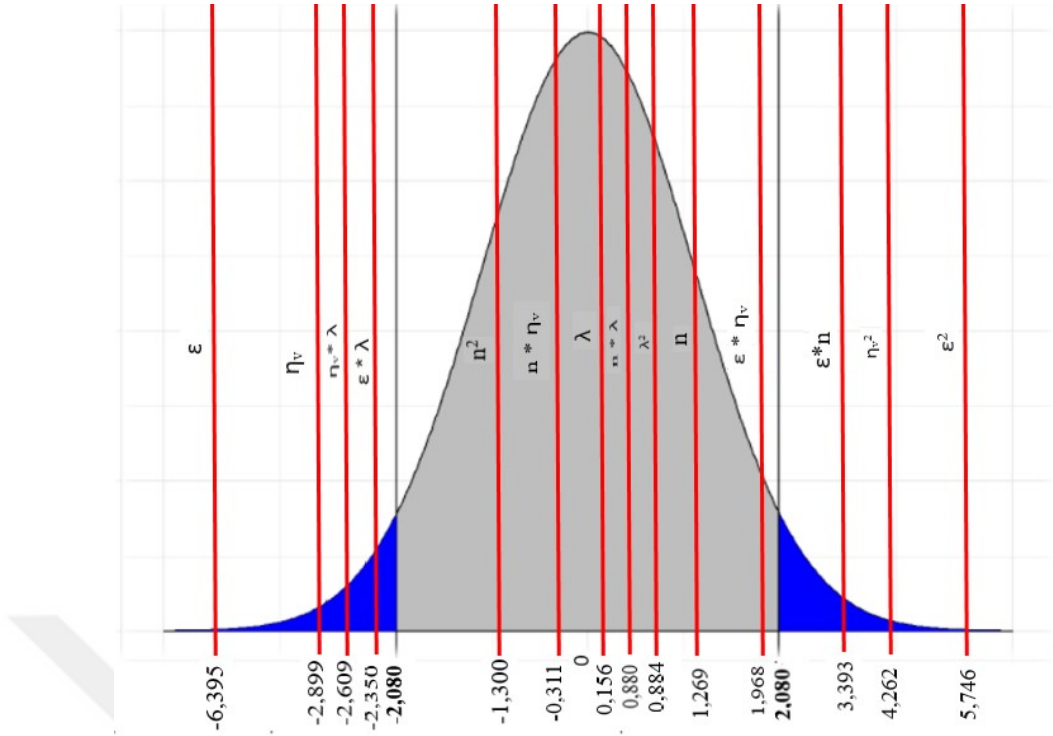
$F > F_{0,05;14;21}$ olduğu için sıfır hipotezi red edilmiştir. Buna göre bağımsız değişkenlerden en azından birisi bağımlı değişkeni (toplam yanma süresini) etkilemektedir. Hangi bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni etkilediğini F testine göre belirlemek zordur. Bu nedenle, toplam yanma süresinin hangi değişkenin nasıl etkilediği t testi ile incelenmiştir. Burada, başlangıçta sıfır hipotezi $\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_n = 0$ olarak kabul edilmiştir. Her bir bağımsız değişken için istatistiksel t ve P değerleri Çizelge 5.7’de gösterilmiştir. Eğer bir bağımsız değişkenin P değeri 0,05’ten küçük (%95 güven aralığına göre) ise o değişken için sıfır hipotezi reddedilmiştir. Dolayısıyla sıfır hipotezini red eden bağımsız değişkenler kurulan regresyon denkleminde yer almalıdır. Bu durumu yalnızca P değerlerine göre karar vermek yerine t testi uygulanmıştır. Bu test (t) ile her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde etkili olup olmadığı belirlenebilmektedir. Yapılan t testinde, yine sıfır hipotezi kurularak uygulanmıştır. Yaptığımız regresyon analizinde gözlem sayımız 36’dır. Serbestlik derecesi 14 bağımsız değişken için 21’dir. %95 doğruluk aralığı için $\alpha = 0,05$ tir. Eklerde bulunan t dağılım tablosundan ortaya çıkan t sınır değerimiz 2,080’dir ($t_{0,05;21}=2,080$).

Çizelge 5.7: Regresyon katsayıları ve P değerleri.

	Katsayılar	Standart hata	t stat	P-değeri
Kesişim	-739,58	767,4595	-0,96367	0,346177
Sıkıştırma oranı, ε	-33,2084	5,192694	-6,39522	2,44E-06
Devir, n	1,156915	0,911132	1,269757	0,218062
Hacimsel verim, η_v	-86,8239	29,94442	-2,8995	0,008574
Hava fazlalık katsayısı, λ	13,80511	87,96276	0,156943	0,876789
$\varepsilon * n$	0,002783	0,00082	3,393569	0,002739
$\varepsilon * \eta_v$	3,127321	1,588722	1,968451	0,062358
$\varepsilon * \lambda$	-3,50298	1,49058	-2,35008	0,028623
$n * \eta_v$	-0,00238	0,007639	-0,31141	0,758559
$n * \lambda$	0,006363	0,007229	0,880156	0,388737
$\eta_v * \lambda$	-52,5827	20,14865	-2,60974	0,016363
ε^2	1,150344	0,20019	5,74627	1,05E-05
n^2	-0,00034	0,000262	-1,30074	0,20744
η_v^2	79,3912	18,62535	4,262535	0,000347
λ^2	32,19691	36,39478	0,884657	0,386359

Bu değerlere göre t-stat grafiği Şekil 5.7’te gösterilmiştir. Bu grafiğe göre bağımsız değişkenlerden, devrin karesi (n^2), devir*hacimsel verim ($n * \eta_v$), hava fazlalık katsayısı (λ), devir*hava fazlalık katsayısı ($n*\lambda$), hava fazlalık katsayısının karesi (λ^2),devir (n), sıkıştırma oranı*hacimsel verim ($\varepsilon * \eta_v$) sıfır hipotezini kabul etmişlerdir. Sıkıştırma oranı (ε), hacimsel verim (η_v), hacimsel verim* hava fazlalık katsayısı ($\eta_v * \lambda$), sıkıştırma oranı*hava fazlalık katsayısı ($\varepsilon * \lambda$), sıkıştırma oranı*devir ($\varepsilon * n$), hacimsel verimin karesi (η_v^2) ve sıkıştırma oranının karesi (ε^2) sıfır hipotezini reddetmişlerdir. Sıfır hipotezini reddeden bağımsız değişkenler ve denklemin çıkarılmasında temel değişkenler olan hava fazlalık katsayısı (λ) ve motor devrinin (n) ilavesi ile yeniden regresyon analizi yapılmıştır.

Yapılan regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.8’de verilmiştir. Bu durumda R^2 değeri 0,9680’dan 0,9605’e düşmüş ve ayarlı R^2 değeri ise 0,9467’den 0,9469’a yükselmiştir.



Şekil 5.7: Hacimsel verime göre toplam yanma süreleri için bağımsız değişkenlerin t-stat grafiği.

Çizelge 5.8: Hacimsel verime göre regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş noktalar için).

<i>Regresyon istatistikleri</i>	
Çoklu R	0,980097
R ²	0,960589
Ayarlı R ²	0,946947
Standart Hata	1,595341
Gözlem	36

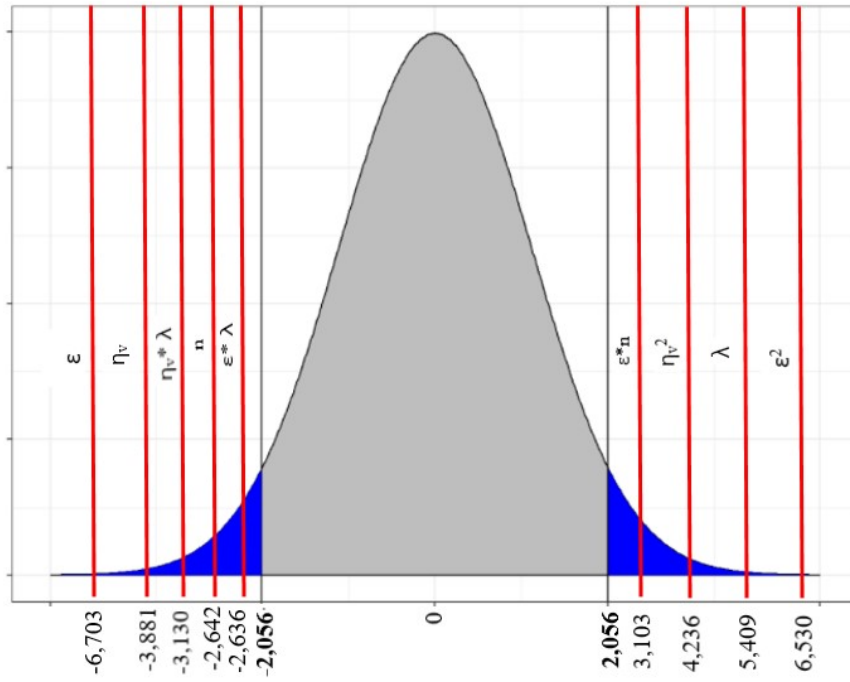
Sonuçlar regresyon analizi için beklenen değerleri karşılamaktadır. Çizelge 5.7'ye göre yüksek R² (0,9680) değerine sahip bir model vardır fakat bu model 14 adet bağımsız değişkeni içermektedir. Bunun yerine 9 adet bağımsız değişkeni olan ve 0,9605 oranında değişimi açıklayan daha sade bir model tercih edilmiştir. Bağımsız değişken olan ϵ , n , η_v , λ , $\epsilon*n$, $\epsilon*\lambda$, $\eta_v*\lambda$, ϵ^2 ve η_v^2 bağımsız değişken olarak yapılan regresyon analizinde elde edilen regresyon katsayıları ve P değerleri Çizelge 5.9'da gösterilmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere P değerinin 0,05'ten büyük olması durumunda sıfır hipotezini doğrulanmakta ve 0,05'ten küçük olduğu durumda sıfır hipotezi reddedilmektedir. Burada yapılan analizde tüm bağımsız değişkenler için P değerleri 0,05'ten oldukça küçük elde edilmiştir.

Çizelge 5.9: Regresyon katsayıları ve P değerleri (hacimsel verim).

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
Kesişim	223,8977	36,88785	6,069687	2,06E-06
ε	-33,7878	5,040059	-6,70385	4,11E-07
n	-0,02406	0,009106	-2,64241	0,013755
η_v	-52,2313	13,45564	-3,88174	0,000636
λ	89,96408	16,63187	5,409139	1,15E-05
ε^*n	0,002303	0,000742	3,103408	0,004572
$\varepsilon^* \lambda$	-2,70145	1,024602	-2,63659	0,013941
$\eta_v^* \lambda$	-50,3196	16,07171	-3,13094	0,004273
ε^2	1,239713	0,189821	6,530961	6,35E-07
η_v^2	75,84826	17,90165	4,236943	0,000251

Ayrıca, istatistiksel P değerlerinin yanı sıra Çizelge 5.9’da verilen t değerleri de t dağılım grafiği üzerinden incelenmiştir.

Eklerde bulunan t dağılım tablosundan ortaya çıkan t sınır değerimiz 2,056’dır ($t_{0,05;26}=2,056$).



Şekil 5.8: Hacimsel verime göre 9 farklı bağımsız değişken için t dağılım grafiği.

Bu değerlere göre t-stat grafiği Şekil 5.8’de verilmiştir. Bu grafiğe göre bağımsız değişkenlerden, ε , n, η_v , λ , ε^*n , $\varepsilon^* \lambda$, $\eta_v^* \lambda$, ε^2 ve η_v^2 değerleri sıfır hipotezini reddetmişlerdir. Yapılan son regresyon analizinde sıfır hipotezini doğrulayan bir

bağımsız değişken olmadığından bu bağımsız değişkenlere göre toplam yanma süresinin hacimsel verime göre denklemi (5.1)'de verilmiştir.

$$\Delta\theta = 223,8977 - 33,7878 * \varepsilon - 0,02406 * n - 52,2313 * \eta_v + 89,9640 * \lambda + 0,002303 * (\varepsilon * n) - 2,70145 * (\varepsilon * \lambda) - 50,3196 * (\eta_v * \lambda) + 1,239713 * \varepsilon^2 + 75,84826 * \eta_v^2 \quad (5.1)$$

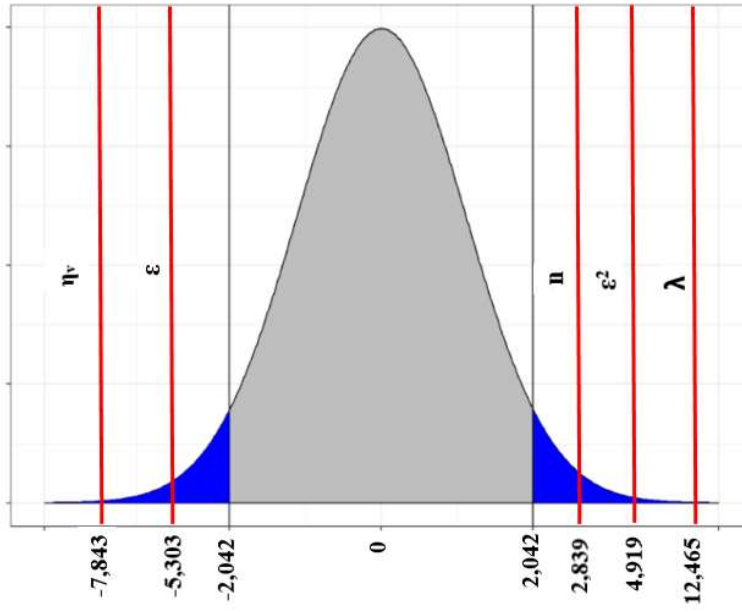
Hacimsel verim değerinin belirli olması durumuna göre toplam yanma süresini hesaplayan bir denklem türetilmiştir. Türetilen denklemin fazla bağımsız değişken içermesinden dolayı t stat değerleri tekrar incelenmiş ve temel değişkenler dışında t stat değeri düşük olan değişkenler çıkartılarak tekrar regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan regresyon analizi için oluşan sonuçlar Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Regresyon katsayıları ve P değerleri Çizelge 5.11'de verilmiştir. Bu analiz sonucunda R² değeri yaklaşık %90 değerine düşmüş olsada oluşturulan formül yalnızca beş değer içerdiğinden çok daha sade ve kullanışlı hale gelmiştir. Bu formül için bulunan R² ve ayarlı R² değeri kullanım için tatmin edici değerlerdir.

Çizelge 5.10: Hacimsel verime göre regresyon analizinin sonuçları (indirgenmiş noktalar için).

<i>Regresyon istatistikleri</i>	
Çoklu R	0,95582
R ²	0,91360
Ayarlı R ²	0,89920
Standart Hata	2,19893
Gözlem	36

Çizelge 5.11: Regresyon katsayıları ve P değerleri (hacimsel verim).

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
Kesişim	227,5274	39,23318	5,799365	2,45E-06
ε	-33,9914	6,409078	-5,3037	9,88E-06
n	0,0041	0,001458	2,839882	0,008028
η_v	-20,4885	2,612145	-7,84359	9,41E-09
λ	28,4713	2,284088	12,4651	2,15E-13
ε^2	1,28144	0,260461	4,919916	2,92E-05



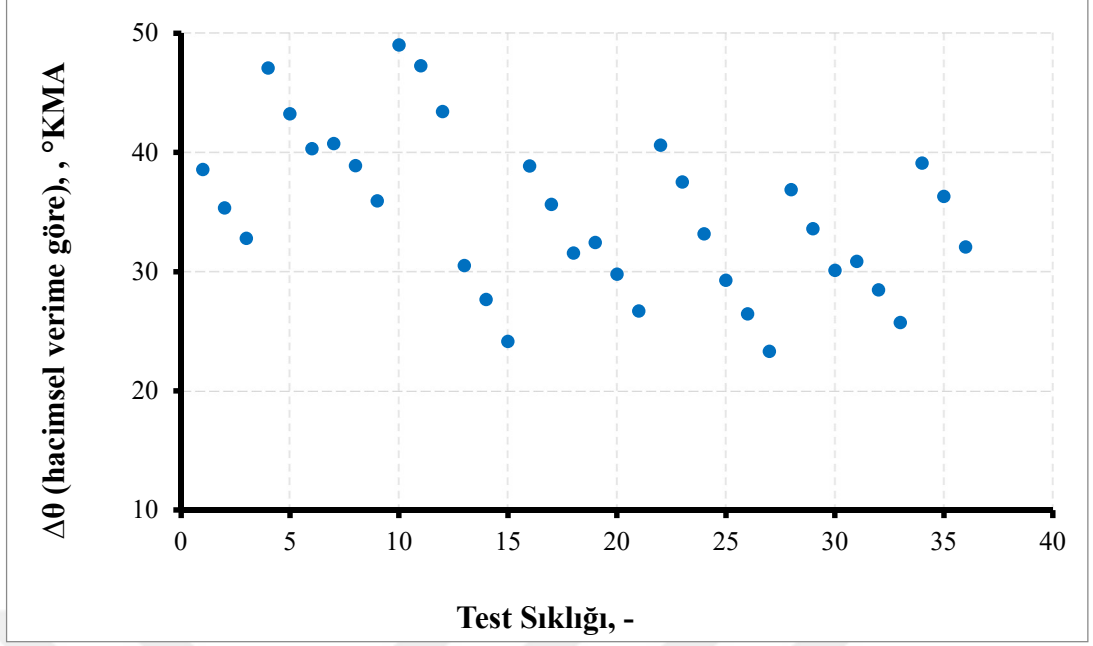
Şekil 5.9: Hacimsel verime göre 5 farklı bağımsız değişken için t dağılım grafiği.

Eklerde bulunan t dağılım tablosundan ortaya çıkan t sınır değerimiz 2,042'dir ($t_{0,05;30}=2,042$).

Bu değerlere göre t-stat grafiği Şekil 5.9'da verilmiştir. Bu grafiğe göre bağımsız değişkenlerden, ε , n , η_v , λ ve ε^2 değerleri sıfır hipotezini reddetmişlerdir. Yapılan son regresyon analizinde sıfır hipotezini doğrulayan bir bağımsız değişken olmadığından bu bağımsız değişkenlere göre toplam yanma süresinin hacimsel verime göre denklemi (5.2)'de verilmiştir.

$$\Delta\theta = 227,5274 - 33,9914 * \varepsilon + 0,0041 * n - 20,4885 * \eta_v + 28,4713 * \lambda + 1,28144 * \varepsilon^2 \quad (5.2)$$

Regresyon analizi sonucunda hacimsel verime göre oluşturulan toplam yanma süresi sıkıştırma oranının karesi, devir ve hava fazlalık katsayısı ile pozitif ilişkili olduğu, sıkıştırma oranı ve hacimsel verim ile de negatif ilişkili olduğu görülmüştür. Hacimsel verime göre oluşturulan toplam yanma süresi formülünden elde edilen sonuçlarla ilgili serpilme diyagramı Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10: Hacimsel verime göre oluşturulan toplam yanma süresi formülünden elde edilen sonuçlarla ilgili serpilme diyagramı.

5.2 Emme Sonu Basıncına (P_a) Göre Isı Kullanım Katsayısının Belirlenmesi

Bu bölümde, hacimsel verim değer değişkeninden farklı olarak emme zamanı sonu basınç (P_a) değerine göre regresyon analizi yapılmıştır. Çizelge 5.12’de indirgenmiş 36 deney noktası için emme sonu basıncına göre regresyon temel değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.13’te emme sonu basıncına göre regresyon analizi sonuçları verilmiştir. 0,8 değerinin üstüne çıkmış fakat regresyon analizinden beklenen daha yüksek ($>0,90$) R^2 ve ayarlı R^2 değerlerine ulaşamamıştır. Bundan dolayı bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin ve her bir bağımsız değişkenin doğrusal olmayan etkilerinin de incelenmesine karar verilmiştir. Bağımsız değişkenler arasında olan ilişki, bağımsız değişkenlerin birbiri ile çarpımını, doğrusal olmayan etkileri ise bağımsız bazı değişkenlerin karesi alınarak tabloya yeni bir bağımsız değişken gibi ilave edilmesi ile yapılmıştır. Böylece doğrusal (lineer) regresyon analizinden çıkılmış ve doğrusal olmayan bir değişimi inceleyen yeni daha kapsamlı bir model regresyon modeli kurulmuştur. Çıkarılan noktalar için ilk yapılan analizde bağımsız değişkenlerin sayısı (ϵ , n , P_a ve λ) 4 iken yeni durumda bağımsız değişkenler (ϵ , n , P_a , λ , $\epsilon * n$, $\epsilon * P_a$, $\epsilon * \lambda$, $n * P_a$, $n * \lambda$, $P_a * \lambda$, ϵ^2 , n^2 , P_a^2 , λ^2) olmak üzere sayısı 14’e çıkmıştır. Bu şekilde, bağımsız değişkenler arasındaki ilişki ve bağımsız değişkenlerin karesi ile olan ilişkiler incelenmiştir. Regresyon analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.14’de verilmiştir.

Çizelge 5.12: Toplam yanma süreleri (Emme sonu basıncına göre).

Test Sıklığı	Sıkıştırma oranı, ε (-)	Devir, n (d/d)	Emme Sonu Basıncı Pa (bar)	Hava fazlalık katsayısı, λ (-)	Toplam Yanma Süresi, $\Delta\theta$ (°KMA)
1	10,5	1500	0,46	0,99	40,0
2	10,5	1500	0,6	0,99	32,5
3	10,5	1500	0,75	1,01	31,5
4	10,5	1500	0,55	1,36	50,5
5	10,5	1502	0,73	1,36	43,5
6	10,5	1501	0,91	1,4	44,0
7	10,5	2002	0,45	0,99	41,5
8	10,5	2004	0,63	1,06	36,5
9	10,5	1990	0,8	1,09	35,0
10	10,5	2002	0,54	1,35	48,0
11	10,5	2005	0,77	1,46	46,5
12	10,5	2009	0,97	1,48	44,0
13	12	1500	0,45	0,98	33,5
14	12	1500	0,59	0,99	27,5
15	12	1499	0,76	0,99	25,0
16	12	1500	0,53	1,34	39,0
17	12	1502	0,72	1,37	33,0
18	12	1500	0,89	1,35	32,5
19	12	2002	0,45	0,98	31,5
20	12	2004	0,59	0,99	27,5
21	12	2007	0,73	0,99	28,0
22	12	2002	0,54	1,33	44,0
23	12	2005	0,72	1,36	35,0
24	12	2010	0,91	1,35	33,0
25	14	1500	0,43	0,98	28,0
26	14	1500	0,58	0,99	26,5
27	14	1501	0,74	1	26,0
28	14	1508	0,52	1,31	36,0
29	14	1501	0,7	1,33	28,5
30	14	1497	0,89	1,35	29,0
31	14	2003	0,44	0,97	33,5
32	14	2005	0,58	0,99	27,0
33	14	2007	0,71	0,99	27,5
34	14	2003	0,52	1,32	39,5
35	14	2005	0,71	1,36	37,0
36	14	2009	0,89	1,35	34,5

Çizelge 5.13: Regresyon analizinin sonuçları (Emme sonu basıncına göre).

<i>Regresyon istatistikleri</i>	
Çoklu R	0,91729
R ²	0,84143
Ayarlı R ²	0,82096
Standart Hata	2,93068
Gözlem	36

Burada, R² değeri 0,84143'ten 0,96543'e ve ayarlı R² değeri 0,82096'dan 0,94239'a yükselmiştir. Bu değerler bir regresyon analizi için oldukça doğru ve geçerli değerlerdir.

Çizelge 5.14: Eklenen bağımsız değişkenler sonrası Regresyon analizinin sonuçları (Emme sonu basıncına göre).

<i>Regresyon istatistikleri</i>	
Çoklu R	0,98257
R ²	0,96543
Ayarlı R ²	0,94239
Standart Hata	1,66243
Gözlem	36

Regresyon analizinden beklenen sonuçları karşılamıştır. Regresyon analizinden iyi sonuçlar elde edilmesinden sonra, regresyon analizinin sonuçlarının daha ayrıntılı incelenmesi için ANOVA sonuçlarına bakılmıştır.

Çizelge 5.15: Emme sonu basıncına göre indirgenmiş noktalar için ANOVA sonuçları.

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Anlamlılık F</i>
Regresyon	14	1621,018	115,787	41,89586	3,73E-12
Fark	21	58,03741	2,763686		
Toplam	35	1679,056			

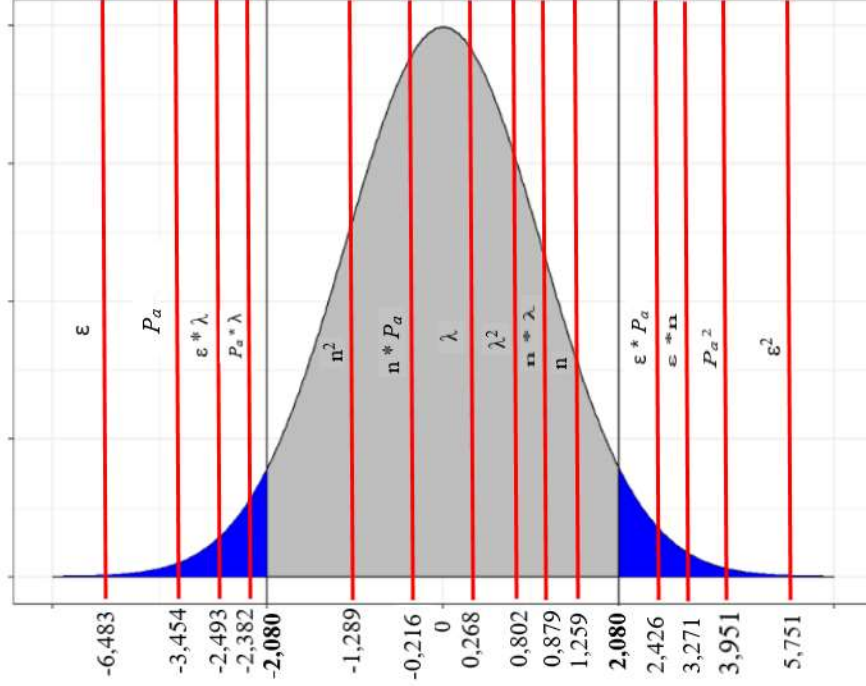
ANOVA sonuçları 36 nokta için emme sonu basıncı değerine göre Çizelge 5.15'te verilmiştir. Çizelge 5.15'e göre, burada sıfır hipotezi önerilmiştir. Sıfır hipotezine göre tüm testler %95 güven aralığına göre değerlendirilmiştir. Sıfır hipotezine göre, başlangıçta tüm bağımsız değişkenlerimizin toplam yanma süresi değişimi üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı kabul edilmiştir. Bu analizde F değeri Çizelge 5.15'ten görüleceği üzere 41,89586 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda sıfır hipotezi reddedilmiştir. Buna göre bağımsız değişkenlerden en azından birisi bağımlı değişkeni (toplam yanma süresini) etkilemektedir. Toplam yanma süresinin hangi değişkenin nasıl etkilediği t testi ile incelenmiştir.

Çizelge 5.16: Regresyon katsayıları ve P değerleri (Emme sonu basıncı).

	Katsayılar	Standart hata	t stat	P-değeri
Kesişim	-749,461	794,1214	-0,94376	0,356024
Sıkıştırma oranı, ε	-34,9122	5,384754	-6,48353	2,01E-06
Devir, n	1,19073	0,945193	1,259774	0,221572
Emme sonu basınç, P_a	-118,75	34,37391	-3,45465	0,002373
Hava fazlalık katsayısı, λ	24,2187	90,22216	0,268434	0,790985
$\varepsilon * n$	0,002801	0,000856	3,271253	0,003646
$\varepsilon * P_a$	4,2311	1,743959	2,426147	0,024352
$\varepsilon * \lambda$	-3,80486	1,52603	-2,49331	0,021081
$n * P_a$	-0,0018	0,008334	-0,21602	0,831059
$n * \lambda$	0,006617	0,007526	0,879124	0,389283
$P_a * \lambda$	-51,9772	21,81948	-2,38215	0,026744
ε^2	1,190658	0,207003	5,751889	1,04E-05
n^2	-0,00035	0,000272	-1,28996	0,21109
P_a^2	84,039	21,26647	3,951714	0,000729
λ^2	30,35984	37,84671	0,802179	0,431434

Her bir bağımsız değişken için istatistiksel t ve P değerleri Çizelge 5.16’da gösterilmiştir. Eğer bir bağımsız değişkenin P değeri 0,05’ten küçük ise o değişken için sıfır hipotezi reddedilmiştir. Dolayısıyla sıfır hipotezini ret eden bağımsız değişkenler kurulan regresyon denkleminde yer almalıdır. Bu durumu yalnızca P değerlerine göre karar vermek yerine t testi uygulanmıştır. t testi ile her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde etkili olup olmadığı test edilebilmektedir. Yapılan t testinde, yine sıfır hipotezi kabul edilerek t testi uygulanmıştır. Yaptığımız regresyon analizinde gözlem sayımız 36’dır. Serbestlik derecesi 14 bağımsız değişken için 21’dir. %95 doğruluk aralığı için $\alpha = 0,05$ tir. Eklerde bulunan t dağılım tablosundan ortaya çıkan t sınır değerimiz 2,080’dir ($t_{0,05;21}=2,080$). Bu değerlere göre t-stat grafiği Şekil 5.11’de gösterilmiştir.

Bu grafiğe göre bağımsız değişkenlerden, devrin karesi (n^2), devir*emme sonu basıncı ($n * P_a$), hava fazlalık katsayısı (λ), hava fazlalık katsayısının karesi (λ^2), devir*hava fazlalık katsayısı ($n*\lambda$) ve devir (n) sıfır hipotezini kabul etmişlerdir. Sıkıştırma oranı (ε), emme sonu basınç (P_a), sıkıştırma oranı*hava fazlalık katsayısı ($\varepsilon * \lambda$), emme sonu basınç* hava fazlalık katsayısı ($P_a * \lambda$), sıkıştırma oranının karesi (ε^2), emme sonu basınç karesi (P_a^2), sıkıştırma oranı*devir ($\varepsilon * n$) ve sıkıştırma oranı*emme sonu basınç ($\varepsilon * P_a$) sıfır hipotezini reddetmişlerdir. Sıfır hipotezini reddeden bağımsız değişkenler ve denklemin çıkarılmasında temel değişkenler olan hava fazlalık katsayısı (λ) ve motor devrinin (n) ilavesi ile yeniden regresyon analizi yapılmıştır.



Şekil 5.11: Emme sonu basınca göre toplam yanma süreleri için bağımsız değişkenlerin t-stat grafiği.

Yapılan regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.17’de verilmiştir. Bu durumda R^2 değeri 0,96543’ten 0,961294’e düşmüş ve ayarlı R^2 değeri ise 0,94239’dan 0,945811’e yükselmiştir.

Çizelge 5.17: Emme sonu basıncına göre regresyon analizinin sonuçları (indirgenmiş noktalar için).

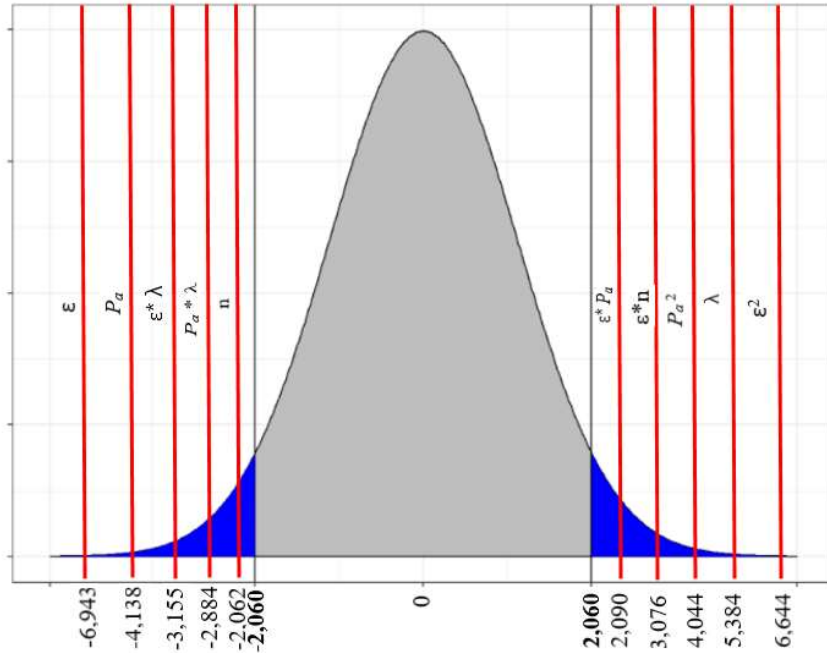
Regresyon istatistikleri	
Çoklu R	0,980456
R^2	0,961294
Ayarlı R^2	0,945811
Standart Hata	1,612329
Gözlem	36

Sonuçlar regresyon analizi için beklenen değerleri karşılamaktadır. Çizelge 5.14’e göre yüksek R^2 (0,96543) değerine sahip bir model vardır fakat bu model 14 adet bağımsız değişkeni içermektedir. Bunun yerine 10 adet bağımsız değişkeni olan ve 0,961294 oranında değişimi açıklayan daha sade bir model tercih edilmiştir. Bağımsız değişken olan ϵ , n , P_a , λ , $\epsilon * n$, $\epsilon * P_a$, $\epsilon * \lambda$, $P_a * \lambda$, ϵ^2 ve P_a^2 bağımsız değişken olarak yapılan regresyon analizinde elde edilen regresyon katsayıları ve P değerleri Çizelge 5.18’de gösterilmiştir. P değerinin 0,05’ten küçük olduğu durumda sıfır hipotezi reddedilmektedir. Burada yapılan analizde tüm bağımsız değişkenler için P değerleri 0,05’ten oldukça küçük elde edilmiştir.

Çizelge 5.18: Regresyon katsayıları ve P değerleri (emme sonu basıncına göre).

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
Kesişim	246,1708	37,90891	6,493747	8,42E-07
ε	-35,4606	5,10691	-6,94366	2,81E-07
n	-0,02414	0,00921	-2,62084	0,014708
P_a	-106,658	25,7724	-4,13847	0,000347
λ	105,4592	19,58462	5,384798	1,38E-05
$\varepsilon * n$	0,002309	0,000751	3,076355	0,005022
$\varepsilon * P_a$	2,987765	1,42911	2,090647	0,046886
$\varepsilon * \lambda$	-3,79457	1,202674	-3,15511	0,004147
$P_a * \lambda$	-48,9071	16,95677	-2,88422	0,00796
ε^2	1,275029	0,191888	6,644654	5,81E-07
P_a^2	80,56648	19,92119	4,04426	0,000442

İstatiksel P değerlerinin yanı sıra Çizelge 5.18’de verilen t değerleri de t dağılım grafiği üzerinden incelenmiştir. Eklerde bulunan t dağılım tablosundan ortaya çıkan t sınır değerimiz 2,060’dır ($t_{0,05;25}=2,060$).



Şekil 5.12: Emme sonu basıncına göre 10 farklı bağımsız değişken için t dağılım grafiği.

Bu değerlere göre t-stat grafiği Şekil 5.12’de verilmiştir. Bu grafiğe göre bağımsız değişkenlerden ε , n, P_a , λ , $\varepsilon * n$, $\varepsilon * P_a$, $\varepsilon * \lambda$, $P_a * \lambda$, ε^2 ve P_a^2 değerleri sıfır hipotezi

reddetmişleridir. Yapılan son regresyon analizinde sıfır hipotezi doğrulayan bir bağımsız değişken olmadığından bu bağımsız değişkenlere göre toplam yanma süresinin emme sonu basınca göre denklemi (5.3)'de verilmiştir.

$$\Delta\theta = 246,171 - 35,461 * \varepsilon - 0,0241 * n - 106,66 * Pa + 105,459 * \lambda + 0,00231 * (\varepsilon * n) + 2,98777 * (\varepsilon * Pa) - 3,7946 * (\varepsilon * \lambda) - 48,907 * (Pa * \lambda) + 1,27503 * \varepsilon^2 + 80,5665 * Pa^2 \quad (5.3)$$

Emme sonu basıncı değerinin belirli olması durumuna göre toplam yanma süresini hesaplayan bir denklem türetilmiştir. Türetilen denklemin fazla bağımsız değişken içermesinden dolayı t stat değerleri tekrar incelenmiş ve düşük değere sahip değişkenler çıkartılarak yeniden regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.19'da gösterilmiştir. Regresyon katsayıları ve P değerleri Çizelge 5.20'de verilmiştir.

Çizelge 5.19: Emme sonu basıncına göre regresyon analizinin sonuçları (İndirgenmiş noktalar için).

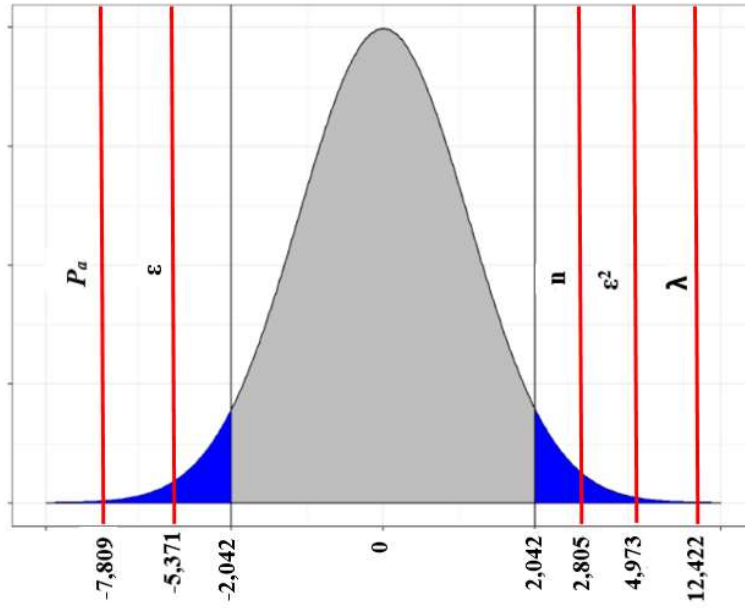
<i>Regresyon istatistikleri</i>	
Çoklu R	0,955559
R ²	0,913093
Ayarlı R ²	0,898608
Standart Hata	2,20545
Gözlem	36

Çizelge 5.20: Regresyon katsayıları ve P değerleri (emme sonu basıncı).

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
Kesişim	233,3494	39,35015	5,930079	1,7E-06
ε	-34,5261	6,427459	-5,37166	8,16E-06
n	0,0041	0,001462	2,805875	0,008727
P_a	-21,4734	2,749805	-7,80907	1,03E-08
λ	28,4547	2,29062	12,4223	2,34E-13
ε^2	1,2992	0,26121	4,973893	2,51E-05

Bu değerlere göre t-stat grafiği Şekil 5.13'te verilmiştir. Bu grafiğe göre bağımsız değişkenlerden, ε , n, P_a , λ ve ε^2 değerleri sıfır hipotezini reddetmişlerdir.

Eklerde bulunan t dağılım tablosundan ortaya çıkan t sınır değerimiz 2,042'dir ($t_{0,05;30}=2,042$).



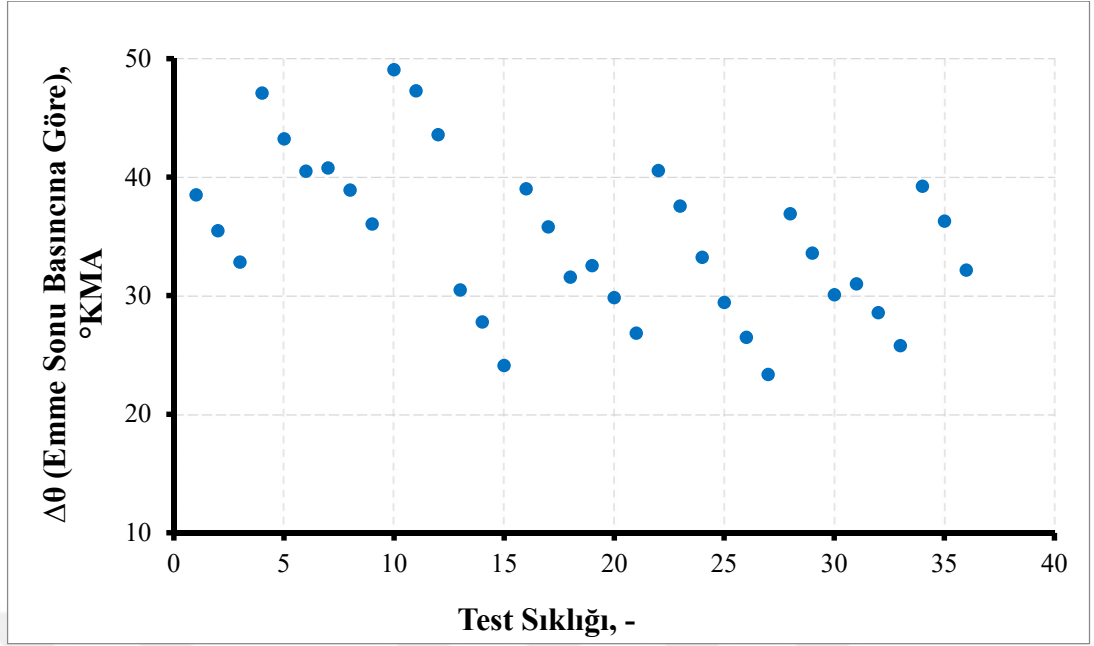
Şekil 5.13: Emme sonu basınca göre 5 farklı bağımsız değişken için t dağılım grafiği.

Yapılan son regresyon analizinde sıfır hipotezini doğrulayan bir bağımsız değişken olmadığından bu bağımsız değişkenlere göre toplam yanma süresinin hacimsel verime göre denklemi (5.4)'de verilmiştir.

$$\Delta\theta = 233,3494 - 34,5261 * \varepsilon + 0,0041 * n - 21,4734 * Pa + 28,4547 * \lambda + 1,2992 * \varepsilon^2 \quad (5.4)$$

Regresyon analizi sonucunda emme sonu basıncına göre oluşturulan toplam yanma süresi hava fazlalık katsayısı, sıkıştırma oranının karesi ve devir ile pozitif ilişkili olduğu, sıkıştırma oranı ve emme sonu basıncı ile de negatif ilişkili olduğu görülmüştür.

Emme sonu basınca göre oluşturulan toplam yanma süresi formülünden elde edilen sonuçlarla ilgili serpilme diyagramı Şekil 5.14'de gösterilmiştir.

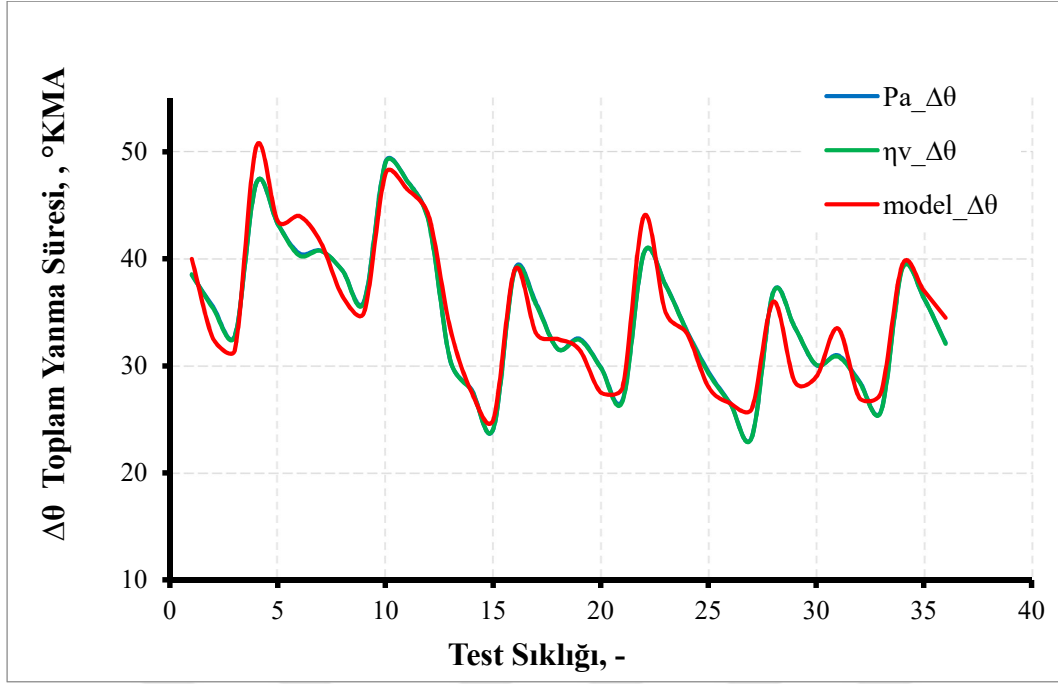


Şekil 5.14: Emme sonu basınca göre oluşturulan toplam yanma süresi formülünden elde edilen sonuçlarla ilgili serpilme diyagramı

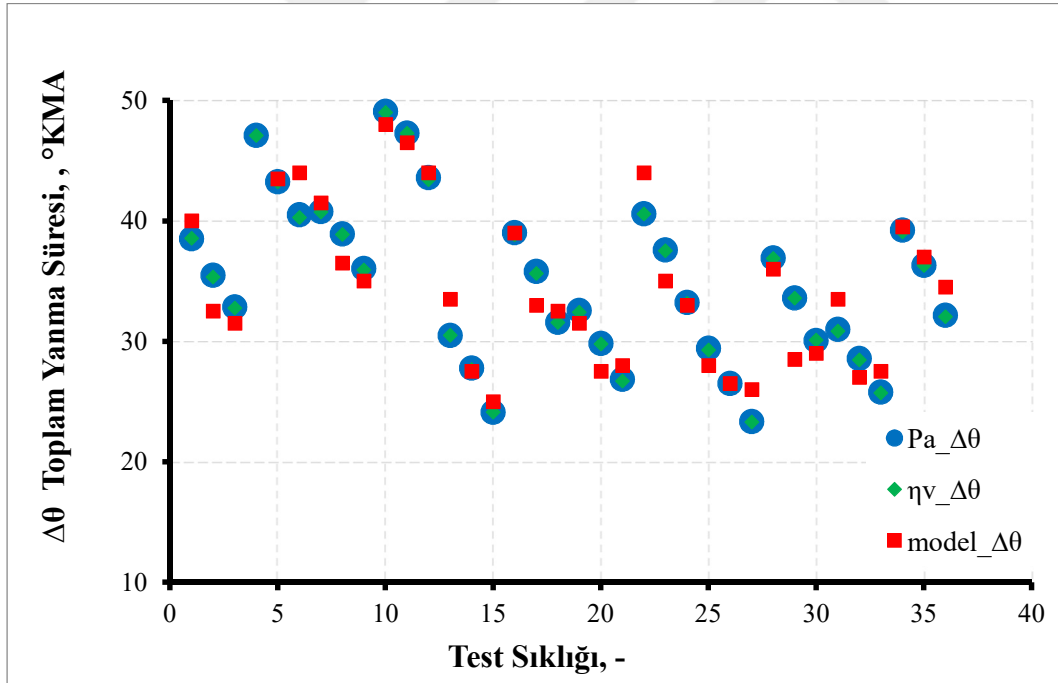
5.3 Modelin Farklı Çalışma Noktalarında Doğrulanması

Bu çalışmada, 36 farklı deney noktası kullanılarak sanki boyutlu termodinamik model için, iki farklı değişkene dayandırılarak iki farklı formül türetilmiştir. Türetilen formüller (5.2) ve (5.4)'de verilmiştir. Formüllerin doğrulanması için kullanılan 36 çalışma noktaları Çizelge 5.21'de verilmiştir. Elde edilen formüllerin sonuçları ile modelin sonuçları kıyaslandığında birbirine çok yakın değerler çıktığı gözlemlenmiştir. Modelimizin formüllerle doğruluk oranı oldukça yüksektir. Türetilen formüllerin toplam yanma süreleri ($\Delta\theta$) ve regresyon modelinden elde edilen denklemin verdiği sonuçlar Şekil 5.15'te gösterilmiştir.

Model ile formüllerin hesaplama sonucu çıkan serpilme diyagramı Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.15: Doğrulama modelden elde edilen toplam yanma süreleri ile formüllerden elde edilen sürelerin karşılaştırılması.



Şekil 5.16: Model ile türetilen formüllerin toplam yanma süreleri ile ilgili serpilme diyagramı.

Çizelge 5.21: Doğrulama için elde edilen toplam yanma süreleri

Test Sıklığı 1	Sıkıştırma oranı, ε (-)	Devir , n (d/d)	Hacimsel Verim, η_v (-)	Emme Sonu Basınç Pa (bar)	Hava fazlalık katsayısı, λ (-)	OİB (bar)	Model, $\Delta\theta$ (°KMA)	$\Delta\theta$ formülü η_v	$\Delta\theta$ formül Pa
1	10,5	1500	0,374	0,46	0,99	3,822	40,0	39,41	39,74
2	10,5	1500	0,531	0,6	0,99	5,865	32,5	34,17	34,37
3	10,5	1500	0,684	0,75	1,01	7,769	31,5	33,20	32,71
4	10,5	1500	0,472	0,55	1,36	3,947	50,5	49,70	50,25
5	10,5	1502	0,66	0,73	1,36	5,913	43,5	43,16	43,29
6	10,5	1501	0,859	0,91	1,4	7,849	44,0	42,81	42,39
7	10,5	2002	0,368	0,45	0,99	3,916	41,5	39,75	40,32
8	10,5	2004	0,556	0,63	1,06	5,899	36,5	36,09	36,15
9	10,5	1990	0,739	0,8	1,09	7,892	35,0	35,48	34,92
10	10,5	2002	0,465	0,54	1,35	3,98	48,0	49,73	50,48
11	10,5	2005	0,703	0,77	1,46	5,924	46,5	45,10	45,33
12	10,5	2009	0,919	0,97	1,48	7,939	44,0	44,83	44,39
13	10,5	2505	0,962	1,01	1,07	10,57 2	38,0	31,31	31,28
14	10,5	2504	0,984	1,03	1,47	8,561	40,0	26,56	26,70
15	12	1500	0,375	0,45	0,98	3,93	33,5	25,03	24,92
16	12	1500	0,528	0,59	0,99	5,849	27,5	40,05	40,34
17	12	1499	0,7	0,76	0,99	7,8	25,0	34,10	34,32
18	12	1500	0,468	0,53	1,34	3,941	39,0	32,58	32,61
19	12	1502	0,667	0,72	1,37	5,878	33,0	32,80	33,10
20	12	1500	0,838	0,89	1,35	7,824	32,5	28,43	28,52
21	12	2002	0,382	0,45	0,98	4,055	31,5	26,79	26,73
22	12	2004	0,525	0,59	0,99	5,933	27,5	41,41	41,32
23	12	2007	0,677	0,73	0,99	7,865	28,0	35,76	35,89
24	12	2002	0,47	0,54	1,33	3,996	44,0	34,62	34,62
25	12	2005	0,662	0,72	1,36	5,929	35,0	30,04	29,68
26	12	2010	0,862	0,91	1,35	8,052	33,0	25,15	25,21
27	12	2505	0,903	0,95	1	10,53 1	31,5	23,63	24,28
28	12	2503	0,923	0,97	1,42	8,415	39,0	36,25	35,36
29	14	1500	0,37	0,43	0,98	3,902	28,0	30,16	30,16
30	14	1500	0,522	0,58	0,99	5,866	26,5	29,10	29,97
31	14	1501	0,689	0,74	1	7,791	26,0	33,42	33,09
32	14	1508	0,459	0,52	1,31	3,877	36,0	29,23	29,37
33	14	1501	0,646	0,7	1,33	5,939	28,5	27,59	28,18
34	14	1497	0,843	0,89	1,35	7,865	29,0	40,35	39,71
35	14	2003	0,379	0,44	0,97	4,133	33,5	34,66	34,68
36	14	2005	0,524	0,58	0,99	6,065	27,0	33,35	34,18



6. DEĞERLENDİRME

Otomotiv sektörü kendini sürekli geliştiren ve iyileştiren bir süreç içerisinde. Hibrit ve elektrikli araçların kullanımı yaygınlaşsa da içten yanmalı motorlar, taşıtlar ve enerji üretimi için hala çok büyük çoğunlukta tercih edilmektedir. Bu nedenle, içten yanmalı motorlar üzerine yapılan bilimsel çalışmalar ve AR_GE çalışmaları yoğun şekilde devam etmektedir. İçten yanmalı motorlardan beklenen en önemli özellikler motor performansının yüksek olması, yakıt maliyeti ile zararlı egzoz emisyonlarının da düşük olmasıdır. İçten yanmalı motorlarda yanma süreci bahsedilen konuların sağlanabilmesi için önemli parametrelerden biridir. Yanma ne kadar iyi olursa istediğimiz koşulların sağlanması daha kolay olur. Bu tez çalışmasında, silindir içi parametrelerin detaylı incelenebilmesi için sanki boyutlu bir termodinamik model oluşturulmuştur. Yanma sürecinin analizi için Profesör Ivan Ivanovitch Wiebe tarafından ortaya konulmuş olan Vibe fonksiyonu kullanılmış olup, oluşturan model ile Python programına 0,5 krank mili açısı adım aralığı ile hesaplamalar yaptırılmıştır. Vibe fonksiyonu içerisinde bulunan toplam yanma süresi program ile oluşturulan arayüz sayesinde belirlediğimiz şartlarda hesaplanmıştır. Model ve deneysel sonuçlar arasındaki fark ortalama indike basınç (OİB) için 5%'ten küçük olacak şekilde hesaplanmıştır. Başlangıçta 42 nokta için hesaplanan toplam yanma süresi değerlerinden bazılarının çıkarılması ile 36 nokta için ayrıntılı regresyon analizi yapılmıştır. Motor devrinin yüksek olduğu şartlarda elde edilen $\Delta\theta$ parametrelerinin modeli olumsuz etkilediği tespit edilmiş ve analizden çıkartılmıştır. Kurulan regresyon modeli için R^2 değeri %90'ın üzerinde bulunmuştur. Bu analizler sonucunda hacimsel verim ve emme sonu basıncı değerlerinin temel alındığı iki farklı toplam yanma süresi formülü türetilmiştir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, Vibe fonksiyonu ile oluşturulan model ile eldedilen sonuçlar benzer tek boyutlu model ile karşılaştırılıp modelin benzer sonuçlar verip vermediği test edilmelidir. Yanan yakıt kütlesi belli olduğundan, bu model aracılığı ile emisyonların hesabı yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Andersson, I., Thor, M. ve McKelvey, T. (2012). The torque ratio concept for combustion monitoring of internal combustion engines. *Control Engineering Practice*, 20(6), 561–568. doi:10.1016/j.conengprac.2011.12.007
- Çakıcı, F. (2023). *Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda Farklı Yanma Odası Geometrilerinin Performans Ve Emisyonlara Etkisi*. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A. ve Kanoğlu, M. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (9th bs.). McGraw-Hill Education.
- Chan, S. H. ve Zhu, J. (2001). Modelling of engine in-cylinder thermodynamics under high values of ignition retard. *International Journal of Thermal Sciences*, 40(1), 94–103. doi:10.1016/S1290-0729(00)00274-X
- de Faria, M. M. N., Vargas Machuca Bueno, J. P., Ayad, S. M. M. E. ve Belchior, C. R. P. (2017). Thermodynamic simulation model for predicting the performance of spark ignition engines using biogas as fuel. *Energy Conversion and Management*, 149, 1096–1108. doi:10.1016/j.enconman.2017.06.045
- Demir, Ü. (2013). *İçten Yanmalı Motorlarda Yanma Modellemesinde 0 ve 3 Boyutlu Simülasyon Yazılımlarının Performans Değerlendirmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye.
- Demirci, A. (2017). *İçten yanmalı motorlarda farklı yanma odası geometrilerinin performans ve emisyonlara etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Demirci, A., Mehdiyev, R., Doğan, H. E. ve Cihan, Ö. (2017). Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda Farklı Yanma Odası Geometrilerinin Performans Ve Emisyonlara Etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(5), 932–942.
- Demirci, Doğan, H. E. ve Kutlar, O. A. (2023). Estimation of the shape factor (m) in Wiebe function at different operating conditions for a SI engine. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 3, 75–82. doi:10.18245/ijaet.1234678
- Doğan, H. E. (2019). *Farklı yanma odası geometrilerinin doğal gaz ve benzin yakıtı ile incelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Galindo, J., Climent, H., Plá, B. ve Jiménez, V. D. (2011). Correlations for Wiebe function parameters for combustion simulation in two-stroke small engines. *Applied Thermal Engineering*, 31(6–7), 1190–1199. doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.12.020
- Giglio, V. ve di Gaeta, A. (2020). Novel regression models for wiebe parameters aimed at 0D combustion simulation in spark ignition engines. *Energy*, 210, 118442. doi:10.1016/j.energy.2020.118442
- Heywood, J. B. (2005). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. United States: McGraw-Hill Education.
- Hu, S., Wang, H., Yang, C. ve Wang, Y. (2017). Burnt fraction sensitivity analysis and 0-D modelling of common rail diesel engine using Wiebe function. *Applied Thermal Engineering*, 115, 170–177. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.12.080
- Koman, H. C. (2008). *İçten yanmalı motorlarda indikatör diyagramının çıkarılması ve analizi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans

- Tezi, Türkiye.
- Kutlar, O. A. (1999). *Dört zamanlı otto (rochas) çevrimli motorlarda kısmi yükte yakıt tüketimini azaltmak için yeni bir yöntem (periyot atlatmalı motor)*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özcan, F. (2010). *Buji Ateşlemeli Bir Motorda Lpg Ve Cng (Sıkıştırılmış Doğal Gaz) Kullanımının Motor Performansı Ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi*. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye.
- Pulkrabek, W. W. (2013). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Ricardo, H. R. (1923). The internal-combustion engines (II., C. 1) (England: D.).
- Safgönül, B., Ergeneman, M. A., Arslan, H. E. ve Sorousbay, C. (2008). *İçten Yanmalı Motorlar*.
- Sekmen, P., Sekmen, Y. ve Çınar, C. (2004). Yakıt Olarak CH₄ Kullanan Değişken Sıkıştırma Oranlı Buji İle Ateşlemeli Bir Motorun İdeal Hava-Yakıt Çevrim Analizi İle Teorik Simülasyonu, 211–218.
- Tekeli, Ö. (2013). *Çevrim atlatmalı bir benzin motorunun ateşleme ve püskürtme ünitelerinin tasarımı ve üretimi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Uyar, A. ve Derinbay, U. (2018). *Deney motoru veri toplama ve işleme ünitesi tasarımı*. İstanbul.
- Yasar, H., Soyhan, H. S., Walmsley, H., Head, B. ve Sorousbay, C. (2008). Double-Wiebe function: An approach for single-zone HCCI engine modeling. *Applied Thermal Engineering*, 28(11–12), 1284–1290. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.10.014
- Yeliana, Cooney, C., Worm, J., Michalek, D. ve Naber, J. (2008). Wiebe function parameter determination for mass fraction burn calculation in an Ethanol Gasoline fuelled SI engine. *Journal of KONES*, 15(3), 567–574.

EKLER

EK A: t dağılım grafiği.

EK B: F dağılım grafiği.



EK A: t dağılım grafiği.

sd	TEK YÖNLÜ (BİR YANLI) TEST için α											
	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.02	0.01	0.005	0.0025	0.001	0.0005
	İKİ YÖNLÜ (İKİ YANLI) TEST için α											
sd	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.04	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.710	15.890	31.820	63.660	127.300	318.300	636.600
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	4.849	6.965	9.925	14.090	22.330	31.600
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	3.482	4.541	5.841	7.453	10.210	12.920
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	2.999	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	2.757	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	2.612	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.517	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.449	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.398	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.359	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.328	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.303	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.282	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.264	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.249	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.235	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.224	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.214	2.552	2.878	3.197	3.611	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.205	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.197	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.189	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.183	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.177	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.172	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.167	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.162	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.150	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.154	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.150	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.147	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.631	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.123	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.295	1.676	2.009	2.109	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.099	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.088	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.081	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
1000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.056	2.330	2.581	2.813	3.098	3.300
∞	0.674	0.841	1.036	1.282	1.640	1.960	2.054	2.326	2.576	2.807	3.091	3.291

EK B: F dağılım grafiği.

F TABLOSU ($\alpha=0.05$)

		v ₁ (Pay serbestlik derecesi)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	18	20	25	30	40	60	100	200
v ₂ (Payda serbestlik derecesi)	1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91	245.95	247.32	248.01	249.26	250.10	251.14	252.20	253.04	254.68
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.44	19.45	19.46	19.46	19.47	19.48	19.49	19.49
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.67	8.66	8.63	8.62	8.59	8.57	8.55	8.54
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.82	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.65
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.58	4.56	4.52	4.50	4.46	4.43	4.41	4.39
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.90	3.87	3.83	3.81	3.77	3.74	3.71	3.69
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.47	3.44	3.40	3.38	3.34	3.30	3.27	3.25
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.17	3.15	3.11	3.08	3.04	3.01	2.97	2.95
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.96	2.94	2.89	2.86	2.83	2.79	2.76	2.73
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.80	2.77	2.73	2.70	2.66	2.62	2.59	2.56
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.67	2.65	2.60	2.57	2.53	2.49	2.46	2.43
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.57	2.54	2.50	2.47	2.43	2.38	2.35	2.32
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.48	2.46	2.41	2.38	2.34	2.30	2.26	2.23
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.41	2.39	2.34	2.31	2.27	2.22	2.19	2.16
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.35	2.33	2.28	2.25	2.20	2.16	2.12	2.10
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.30	2.28	2.23	2.19	2.15	2.11	2.07	2.04
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.26	2.23	2.18	2.15	2.10	2.06	2.02	1.99
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.22	2.19	2.14	2.11	2.06	2.02	1.98	1.95
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.18	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.94	1.91
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.15	2.12	2.07	2.04	1.99	1.95	1.91	1.88
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.12	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.88	1.84
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.10	2.07	2.02	1.98	1.94	1.89	1.85	1.82
	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.08	2.05	2.00	1.96	1.91	1.86	1.82	1.79
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.05	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.80	1.77
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.04	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.78	1.75
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	2.02	1.99	1.94	1.90	1.85	1.80	1.76	1.73
	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	2.00	1.97	1.92	1.88	1.84	1.79	1.74	1.71
	28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.99	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.73	1.69
	29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.97	1.94	1.89	1.85	1.81	1.75	1.71	1.67
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.96	1.93	1.88	1.84	1.79	1.74	1.70	1.66
	40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.87	1.84	1.78	1.74	1.69	1.64	1.59	1.55
	50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.95	1.87	1.81	1.78	1.73	1.69	1.63	1.58	1.52	1.48
	60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.78	1.75	1.69	1.65	1.59	1.53	1.48	1.44
	70	3.98	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97	1.89	1.81	1.75	1.72	1.66	1.62	1.57	1.50	1.45	1.40
	80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.88	1.79	1.73	1.70	1.64	1.60	1.54	1.48	1.43	1.38
	90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94	1.86	1.78	1.72	1.69	1.63	1.59	1.53	1.46	1.41	1.36
	100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.85	1.77	1.71	1.68	1.62	1.57	1.52	1.45	1.39	1.34
	200	3.89	3.04	2.65	2.42	2.26	2.14	2.06	1.98	1.93	1.88	1.80	1.72	1.66	1.62	1.56	1.52	1.46	1.39	1.32	1.26



ÖZGEÇMİŞ

