

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR YARIŞ ARACI MOTORUNUN TEK BOYUTLU
TERMODİNAMİK MODELLENMESİ VE PERFORMANS
KALİBRASYON OPTİMİZASYONU**

Ayberk Peker

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Otomotiv Programı

Danışman
Doç. Dr. Orkun ÖZENER

Temmuz, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR YARIŞ ARACI MOTORUNUN TEK BOYUTLU
TERMODİNAMİK MODELLENMESİ VE PERFORMANS
KALİBRASYON OPTİMİZASYONU

Ayberk PEKER tarafından hazırlanan tez çalışması 13.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Orkun ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Orkun ÖZENER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ARSLAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Orkun ÖZENER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan bir yarış aracı motorunun tek boyutlu termodinamik modellenmesi ve performans kalibrasyon optimizasyonu başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ayberk PEKER

TEŞEKKÜR

Tez hazırlama süresince bana her türlü desteği sağlayan, mühendislik bakış açısı ile sorunları çözmeme yardımcı olan sayın hocam Doç. Dr. Orkun ÖZENER'e teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda mezun olduğum günden bu yana mühendislik yaklaşımları ile bana destek olan Caner HARMAN ve Mutlu ŞİMŞEK'e, başta yöneticilerim Demirhan MANAV ve Onur BARIŞ olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma, desteklerini her zaman hissettiğim başta kardeşim Alper PEKER olmak üzere bütün aileme, tez yazım sürecinde her zaman motivasyonumu yüksek tutan çok değer verdiğim sevgili Gamze ERDOĞAN'a teşekkürü borç bilirim.

Ayberk PEKER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	VII
KISALTMA LİSTESİ	VIII
ŞEKİL LİSTESİ	IX
TABLO LİSTESİ	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIV
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Orjinal Katkı.....	4
2 BİR BOYUTLU MOTOR MODELLENMESİ	6
2.1 İçten Yanmalı Motorların Çalışma Prensibi.....	6
2.2 Bir Boyutlu Motor Modellemesi.....	7
2.2.1 İçten Yanmalı Motorun Emme ve Egzoz Hattının Modellenmesi.....	8
2.2.2 İçten Yanmalı Motorun Hareketli Parçalarının Modellenmesi.....	10
2.3 Model Test Datası Korelasyonu.....	12
2.3.1 Korelasyon Methodolojisi.....	12
2.3.2 Bir Boyutlu Model Korelasyonu.....	13
3 YAKIT TÜKETİMİ OPTİMİZASYONU VE KALİBRASYON HARİTALARININ ÇIKARILMASI	22
3.1 Yakıt Tüketimi Optimizasyonu.....	22
3.2 Egzoz Manifold Geometrisi Çap Optimizasyonu.....	37
3.3 Kalibrasyon Haritalarının Elde Edilmesi.....	42

4 SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKÇA	46
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	47

SİMGE LİSTESİ

°C	Sıcaklık
%	Yüzde

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BDC	Piston Alt Noktası
BSFC	Özgöl Yakıt Tüketimi
dak	Dakika
dev	Devir
g	Gram
h	Saat
KA	Krank Açısı
Kg	Kilogram
kW	Kilowatt
mg	Miligram
mm	Milimetre
Nm	Newton metre
TDC	Piston Üst Noktası
TDCF	Piston Yanma Üst Noktası

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Emme manifoldu geometrisi	8
Şekil 2.2 Emme manifoldu geometrisi bir boyutlu modellenmiş görünüşü	9
Şekil 2.3 Egzoz manifoldu geometrisi	9
Şekil 2.4 Egzoz manifoldu geometrisi bir boyutlu modellenmiş görünüşü	10
Şekil 2.5 Motor güç çevirim sistem geometrik değerleri.....	11
Şekil 2.6 Motor silindirleri ateşleme sırası	11
Şekil 2.7 Krank açısına bağlı emme ve egzoz valfi açılma eğrileri	12
Şekil 2.8 Optimizasyon parametreleri	14
Şekil 2.9 Dizayn numarasına bağlı tutunma açısı saçılım grafiği	16
Şekil 2.10 Dizayn numarasına bağlı yanma süresi saçılım grafiği.....	17
Şekil 2.11 Dizayn numarasına bağlı motor ısı atım katsayısının saçılım grafiği.....	17
Şekil 2.12 Motor hızına bağlı güç grafiği	19
Şekil 2.13 Motor hızına bağlı özgül yakıt tüketimi grafiği	19
Şekil 2.14 Motor hızına bağlı hava-yakıt oranı grafiği	20
Şekil 2.15 Motor hızına bağlı egzoz gaz sıcaklığı grafiği.....	20
Şekil 3.1 Emme borusu boyu değişiminin saçılım grafiği	24
Şekil 3.2 Emme borusu çap değişiminin saçılım grafiği	24
Şekil 3.3 Emme valf eğrisi zaman değişiminin saçılım grafiği.....	25
Şekil 3.4 Egzoz valf eğrisi zaman değişiminin saçılım grafiği.....	25
Şekil 3.5 Motor hızına bağlı güç grafiği	27
Şekil 3.6 Motor hızına bağlı özgül yakıt tüketimi grafiği.....	28
Şekil 3.7 Motor hızına bağlı hava-yakıt oranı grafiği	28
Şekil 3.8 Motor hızına bağlı egzoz gaz sıcaklığı grafiği	29
Şekil 3.9 Motor hızına bağlı pompalama kaybı grafiği	29
Şekil 3.10 Motor hızına bağlı maksimum silindir içi basınç grafiği	30
Şekil 3.11 Motor hızına bağlı yakıt gücü grafiği.....	30
Şekil 3.12 Motor hızına bağlı kullanılabilir egzoz enerji yüzdesi grafiği	31
Şekil 3.13 2593 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	31
Şekil 3.14 3963 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	32

Şekil 3.15 5455 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	32
Şekil 3.16 7116 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	33
Şekil 3.17 8064 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	33
Şekil 3.18 8681 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	34
Şekil 3.19 10069 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	34
Şekil 3.20 11078 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	35
Şekil 3.21 11968 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	35
Şekil 3.22 13065 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	36
Şekil 3.23 14102 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği.....	36
Şekil 3.24 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı güç grafiği.....	38
Şekil 3.25 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı tork grafiği	38
Şekil 3.26 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı özgül yakıt tüketim grafiği	39
Şekil 3.27 Egzoz manifoldu çap değerine pompalama kaybı grafiği	39
Şekil 3.28 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı hava debisi grafiği.....	40
Şekil 3.29 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı hava-yakıt oranı grafiği	40
Şekil 3.30 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı egzoz gaz sıcaklığı grafiği.....	41
Şekil 3.31 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı kullanılabilir egzoz enerji yüzdesi grafiği.....	41

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Model korelasyon optimizasyon algoritma değerleri.....	15
Tablo 2.2 Motor test datası tablosu	16
Tablo 2.3 Optimizasyon değişken parametrelerinin optimum değerleri tablosu ..	18
Tablo 2.4 Motor test datası ve analiz değerleri karşılaştırma tablosu.....	18
Tablo 3.1 Yakıt tüketimi optimizasyon algoritma değerleri	23
Tablo 3.2 Optimizasyon değişken parametreleri karşılaştırma tablosu	26
Tablo 3.3 Optimizasyon hedef parametreleri karşılaştırma tablosu.....	26
Tablo 3.4 4500-6000 dev/dak motor hızı aralığı için yakıt haritası (mg/çevrim)	42
Tablo 3.5 6500-8000 dev/dak motor hızı aralığı için yakıt haritası (mg/çevrim)	43
Tablo 3.6 8500-11000 dev/dak motor hızı aralığı için yakıt haritası (mg/çevrim)	43
Tablo 3.7 12000-14000 dev/dak motor hızı aralığı için yakıt haritası (mg/çevrim)	44

Bir Yarış Aracı Motorunun Tek Boyutlu Termodinamik Modellenmesi Ve Performans Kalibrasyon Optimizasyonu

Ayberk Peker

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Orkun ÖZENER

Motor kalibrasyon ve geliştirme çalışmaları finansal ve teknik rekabet sebebiyle günden güne daha optimize ürünlere ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde bir boyutlu motor modellemesi tekniğinin içten yanmalı motor geliştirme çalışmalarında; motor geliştime sürelerinin ve maliyetlerinin azaltılması, farklı parametrelerinin birbirlerine etkileşimlerini anlama, HIL ve SIL sistemleri olan modellerin entegre edilmesi gibi birçok alanda kullanması mümkündür. Bu sebeplerden dolayı bir boyutlu motor modellemesi tekniği içten yanmalı motor geliştirme çalışmalarında kritik rol oynamaktadır. Bu çalışmada 4 silindirli 600 cc doğal emişli ve port enjeksiyon sistemine sahip Otto prensibine göre çalışan bir içten yanmalı motor kullanılacaktır. Tezde üzerine çalışacak motor aynı zamanda Formula Student yarışlarında Yıldız Teknik Üniversitesi YTU Racing takımının aracının motorudur. Bir boyutlu analiz programı olarak sektörde oldukça yaygın olarak kullanılan GT-Suite programı kullanılmıştır. Hava yolu modellemesi için GT-Suite programının alt programı olan GEM 3D programı kullanılmıştır. Hava emiş ve egzoz hatları bir boyuta indirgenmiş ve çap ve uzunluk gibi geometrik değerleri analizlerde değişken olarak kullanılmak üzere parametrize edilmiştir. Kurulan bir boyutlu motor modeli, test datası korelasyonundan sonra emme ve egzoz manifold boru çap ve uzunlukları,

emme ve egzoz valf zamanlamaları daha verimli bir motor elde edilmek amacıyla optimize edilmiştir. Yakıt tüketimi optimizasyonu yapılırken herhangi bir dayanım sorunundan kaçınmak için test datasında elde edilen egzoz gaz sıcaklığı limit olarak kullanılmıştır. Tüm bunların sonunda optimize edilen bir boyutlu motor modeli kullanılarak kalibrasyon haritaları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bir boyutlu motor modellemesi, motor performans, kalibrasyon optimizasyonu

One Dimensional Engine Modeling And Calibration Optimization: Racing Car Gasoline Engine Case

Ayberk Peker

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Orkun ÖZENER

Engine calibration and development process needs more optimized products due to powertrain performance improvement, financial competition and technical challenges. Nowadays, it is possible to use one dimensional tools on many purposes, such as in order to reduce development/calibration time and cost , examine the effect of many parameters on each other, integrated model setup for with HIL (hardware in the loop) or SIL (software in the loop) systems. Therefore, one dimensional engine modeling play a critical role in engine development process. In this study, engine to be analyzed, 4-cylinder 600 cc naturally aspirated port injection Otto engine which is used in a Formula Student Race Car. GT-Suite was used as an one dimensional analyze software which is commonly used in the sector. GEM 3D software which is sub-software of GT-Suite, has been used for air path modeling. Air intake and exhaust paths are modeled and reduced to one dimension. The geometric variables such as diameter and length of the parts are parameterized in order to optimized the geometry to more efficient engine. Engine model has been correlated in terms of test data. After engine model correlation, intake runner length and diameter, exhaust pipes diameter, intake and exhaust valve timing were determined

to obtain best fuel consumption without exceed exhaust gas temperature limits at base model. Calibration maps were generated using the optimized one dimensional engine model.

Keywords: One dimensional engine modelling, engine performance, calibration optimization

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde içten yanmalı motor geliştirme sürecinde firmalar arasındaki ciddi rekabet yaşanmaktadır. Firmalar üzerlerindeki gerek maliyet baskısı, gerek emisyon kısıtlamalarının giderek artması sebebiyle araştırma geliştirme faaliyetlerine daha çok önem vermektedir. Bu faaliyetlerde bilgisayar destekli mühendislik çalışmaları önemli yer tutmaktadır. Bilgisayar destekli mühendislik çalışmaları sayesinde test koşullarında değerlendirelemeyecek durumlar analiz edilebilmekte veya test maliyet ve test süresi azaltılarak aynı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Literatür çalışması özelinde bir boyutlu motor modellemesi kullanılarak yapılan motor performans ve emisyon optimizasyonu çalışmaları hedef alınmıştır. Bir boyut motor modellerinin farklı modelleme methotları ile birlikte çalışması mümkündür. Özellikle yanma modellemesi çalışmalarında üç boyutlu hesaplamalı akışkan modellemesi ve bir boyutlu motor modellemesi methotları sıklıkla beraber kullanılmaktadır. [1] Silindir için yanma üç boyutlu hesaplamalı akışkan modellemesi tarafından çözülürken, diğer sistemler bir boyutlu motor modellemesi tarafından çözülür. Bu sayede daha gerçekçi sonuçlar elde edilir. İçten yanmalı motorlar çok farklı tork ve hız değerlerinde çalışmaktadırlar. Bu farklı hız ve tork değerlerinin hepsinde en düşük yakıt tüketimini sağlayacak bir valf zamanlaması veya yanma havası basıncı elde etmek mümkün değildir. Bu sebeple motorun çalışma noktasına göre değişken sistemlerin kullanılması oldukça yaygın ve etkili bir yöntemdir. Değişken valf zamanlaması sonucunda elde edilecek valf zamanlamalarının motor performans ve emisyon etkilerine bir boyutlu motor modelleri ile değerlendirilmesi mümkündür. [2] Aynı zamanda Miller çevriminin etkileri de bir boyutlu modeller ile değerlendirilebilir. [3] Genellikle bir boyutlu analizler motorun çalışma noktasında kararlı hale geldiği durum için yapılırken, aynı zamanda bu analizleri kararlı hale gelen zamana kadar ki bölüm içinde yapmak

mümkündür. [4] Turbosarj içeren içten yanmalı motorlarda turbosarj atalet momenti değeri motorun yük atında hızlanma zamanını ve bu süreçte oluşan emisyon miktarını ciddi olarak etkilemektedir. Farklı atalet momenti değerlerinin performans ve emisyon etkisine bir boyutlu model ile bakılması mümkündür.

Motor tasarım konsept sürecinde bir boyutlu analizler yaygın olarak kullanılmaktadır. Motorun silindir çapı, strok, turbosarj tipi, güç ve tork gibi ana parametrelerinin bir boyutlu analizler ile belirlenmesi ve dizayn sürecine yön verilmesi mümkündür. [5] Bu sayede firmalar bir çok test aşamasını analiz ortamında sonuçlandırarak hem zaman hem de maliyet anlamında önemli kazanımlar elde edebilmektedir. İçten yanmalı motorlarda silindirler arasındaki maksimum basınç değeri farkının belli bir değerin üzerine çıkması durumunda motor üzerinde ciddi hasarlara sebep olabilmektedir. Bir boyutlu analizler ile silindirler arasındaki maksimum basınç değerine bakılabilmekte ve azaltılması için optimizasyon çalışması yapılabilmektedir. [6]

Günümüzde emisyon regülasyonları belli araç çevrimleri baz alınarak yapılmaktadır. Analizler ile bu çevrimler sonucunda oluşan emisyon tahmini çalışmalarında, bir boyutlu motor modeli ile şanzıman ve araç modellerinin birlikte çalışması gerekmektedir. [7] İçten yanmalı motorlarda aynı hacimden daha fazla güç almak için aşırı doldurma sistemleri kullanılmaktadır. Aşırı doldurma sistemlerinin konsept seçimleri bir boyutlu motor modelleri kullanılarak yapılabilmektedir. Bu durum farklı konseptlerin yatırım maliyetleri olmadan incelenebilmesine olanak sağlamaktadır. [8] Bir boyutlu motor modellerinde yanma korelasyonu ciddi önem taşımaktadır. Farklı yanma korelasyonu methodları kullanılabilmektedir. [9] Alternatif yakıt tiplerinin performans ve yakıt üzerine etkilerine bir boyutlu motor modelleri ile bakılabilmektedir. [10]

1.2 Tezin Amacı

Bu tezde analiz edilecek motor Yıldız Teknik Üniversitesi YTU Racing takımının Formula Student yarışlarında kullandığı içten yanmalı motordur. Formula Student, üniversite öğrencileri için dünyanın en büyük mühendislik yarışmasıdır. Her yıl, Otomotiv Mühendisleri Derneği tarafından dünyanın her yerinde yarışmalar düzenlenmektedir. Dünyada ilk yarışma 1981 yılında Michigan-ABD'de

düzenlenmiştir. Avrupa'da ilk yarış 1998 yılında Silverstone-UK 1998'de gerçekleşmiştir.

Yarışma, girişimci ve yenilikçi genç mühendislere ilham vermeyi ve onları geliştirmeyi amaçlamaktadır. Formula SAE'nin arkasındaki konsept, kurgusal bir üretim şirketi oluşturularak küçük bir Formula takımı tarzı yarış aracı geliştirilmesidir. Her öğrenci ekibi bir proje tasarlar, oluşturur ve test eder. Bu sayede öğrenciler bir dizi kurala dayalı prototip ve akıllı problem çözme tecrübeleri edinirler. Aynı zamanda zaman yönetimi, proje yönetimi, bütçeleme ve sunum yeteneklerini geliştirirler.

Formula Öğrenci ekipleri, tasarımlarını araçlarla ilgili kısıtlamalara uyacak şekilde tasarlamalı ve üretmelidir. Tıpkı bir Formula 1 takımı gibi 130 sayfalık kural kitabı mevcuttur. Araçlar, bir sene boyunca bir ekip çalışmasıyla tasarlanırlar ve sene sonunda yarışlara katılırlar. Dünyanın her yerinden yaklaşık 120 üniversite takımı yarışmalara katılmaktadır. Yarış sonunda değerlendirme sadece araçların pist sürelerine bakılarak yapılmamaktadır. Maliyet, yol tutuş, güvenilirlik ve ivlenme gibi farklı parametreler ile araçlar değerlendirilmektedir.

Formula Student yarışması, statik ve dinamik disiplinlerden oluşur. Statik disiplinlerde mühendisler araçlarını otomotiv endüstrisinde tecrübeli, prestijli yarışlarda değerlendirici olarak görev almış uzmanlara sunarlar. Bu kısımda uzmanlar araçları güvenlik açısından incelerler. Yakıt hatlarında bir kaçak olup olmadığı, eğim durumunda motorun sağlıklı bir şekilde çalıştığından emin olunur. Sonrasında ise fren testleri ile değerlendirme tamamlanır. Bu değerlendirin puan değeri olmasada bu aşamaları geçemeyen araçlar yarışlara katılım sağlayamazlar.

Statik disiplin puan içerikleri:

- Mühendislik Dizaynı : Teknik yönlerin değerlendirilmesi, araç temel özellikleri (150 puan)
- Maliyet & İmalat : Finansal planlama ve imalat süreci (100 puan)
- İş Planlaması : Potansiyel bir yatırımcıyı ikna etmek için iş planlaması (75 puan)

Dinamik disiplin puan içerikleri:

- İvmelenme : Aracın durur pozisyonundan 75 metre boyunca ivmelenme süresi (75 puan)
- Araç kayma dairesi : Aracın yanal ivmelenme yeteneği. (75 puan)
- Otokros : 800 metre uzunluğunda teknik olarak oldukça zor bir pisti araçların tamamlama süresi (100 puan)
- Dayanıklılık : 22 km lik bir yolu sadece 1 mola ile tamamlama süresi (325 puan)
- Verimlilik : Dayanıklılık parkuru boyunca harcanan yakıt tüketimi miktarı(100 puan)

İçten yanmalı motorların tasarım ve geliştirme süreçlerinde bilgisayar destekli mühendislik uygulamaları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmaların içinde bir boyutlu modelleme tekniği büyük yer tutmaktadır. Bir boyutlu modeller vasıtasıyla motor performansı etkileyen geometrik değişiklikler kolaylıkla değerlendirilebilmekte, test süreleri ve test maliyetinde azalış elde etmek mümkün olmaktadır. Bu tez çalışmasında bir yarış aracı motoru olan 4 silindirli, doğal hava emişli, benzinli bir içten yanmalı motor, bir boyutlu modellenmeye çalışılacak ve analiz sonuçları ile test verileri arasında bir korelasyon yakalanmaya çalışılacaktır.

Korelasyon sağlanan motor modeli kullanılarak, motor gücünü artırılması ve yakıt tüketiminin azaltılması amacıyla geometrik ve kalibrasyonel değişiklikler değerlendirilecektir. Tez sonucunda elde edilecek motor modeli ileride gerçekleştirilecek araç modeli ve şanzıman modelleri ile entegre edilerek araç analizlerinin yapılmasına olanak sağlayacaktır.

1.3 Orjinal Katkı

Bu çalışmada bir boyutlu motor modellemesi tekniği ile benzinli bir yarış aracı motoru GT Suite ortamında modellenenecektir. Model sonuçları ile test verileri arasında korelasyon sağlanırken genetik algoritma optimizasyon yöntemi kullanılacaktır. Korele edilmiş model kullanılarak motorun maksimum güç değerinde artış veya yakıt tüketiminde azalış hedeflenmektedir. Hava emiş ve egzoz

hattında farklı geometriler değ erlendirilecek olup, performansı arttıracak yeni kalibrasyon haritaları bir boyutlu analizler sonucunda elde edilecektir.

2.1 İçten Yanmalı Motorların Çalışma Prensibi

İlk dört zamanlı içten yanmalı motor 1876 yılında Nicolaus Otto'nun Gottlieb Daimler ve Wilhelm Maybach'ın çalışması sonucunda ortaya çıkmıştır. Geçen 100 yılda ulaşım ve taşıma sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde birim hacimden alınan gücün arttırılması, yakıt tüketiminin ve emisyon üretiminin azaltılması amacı ile çok daha teknolojik sistemler kullanılsada temel prensipler değişmemiştir.

İçten yanmalı motorlar kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren termik makinelerdir. Burada kimyasal enerji kaynağı olarak dizel, benzin, doğal gaz gibi yakıtlar kullanılır. Kullanılan yakıt sistemde sıkıştırılarak basınçlandırılır ve dışardan bir etki ile veya kendi kendine yanması sağlanır. Bunun sonucunda çıkan enerji piston ve krank mili vasıtasıyla mekanik enerjiye çevrilir.

Dört zamanlı içten yanmalı motorların bir çevrimi 4 aşamadan oluşur. Bunlar; emme, sıkıştırma, genişleme ve egzoz aşamalarıdır. Emme aşamasında kam milinden tahrik alan emme subabı açılır ve yanma sürecinde kullanılacak olan temiz hava silindir içerisine alınır. Bu süreçte piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya hareket eder. Doğal emişli motorlarda emme havası silindir içerisine vakum etkisiyle alınırken, turbo motorlarda ise yanma havası hale hazırda basınçlandırıldığı için silindir içerisine basınç farkında dolayı alınır. Emme aşamasından sonra sıkıştırma aşamasına geçilir. Burada pistonun alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru hareket etmesiyle yanma havası basınç ve sıcaklığı arttırılır. Sıkıştırma aşamasının sonunda kendiliğinden veya dışarıdan bir etkiyle yakıt yanmaya başlar ve bunun sonucunda oluşan yüksek basınç ve sıcaklıktaki gaz pistonu üst ölü noktadan alt ölü noktaya iter. Bu aşamaya genişleme aşaması adı verilir. Bu aşama motordan iş elde edilen zaman dilimidir. Sonrasında pistonun alt ölü noktadan üst ölü noktaya hareketiyle birlikte egzoz subabı açılır ve yanmış egzoz

silindirlerden dışarıya atılır. Böylece içten yanmalı motorun bir çevrimi tamamlanmış olur.

Günümüzde emisyon ve yakıt tüketiminin azaltılması amacıyla farklı yakıt enjeksiyon sistemleri kullanılmaktadır. Temel olarak bu sistemler silindir içi direk enjeksiyon ve emme portuna enjeksiyon olarak ikiye ayrılabilir. Silindir içi direk enjeksiyon olan sistemlerde sıkıştırma zamanının sonuna doğru piston üst ölü noktaya yaklaşırken yakıt yüksek basınç ile yanma odasına püskürtülür. Emme portuna enjeksiyon kullanılan sistemlerde ise yakıt emme portuna temiz hava silindir içine girmeden püskürtülür ve hava-yakıt karışımının oluşması sağlanır. Oluşan hava-yakıt karışımı emme zamanında silindir içine alınır.

İçten yanmalı motorlarda yanmanın başlatılması prosesi kullanılan yakıt tipine göre değişmektedir. Benzin, doğal gaz gibi yakıtlarda buji adı verilen yardımcı ateşleyici ile yanma başlatılırken, dizel kullanılan motorlarda ise sıkıştırma sonucunda yüksek basınç ve sıcaklık elde edilir ve yanmanın kendiliğinden başlaması sağlanır.

2.2 Bir Boyutlu Motor Modellemesi

İçten yanmalı motorlar son yüz yılda kullanılan en önemli güç ünitelerinden biridir. Birçok araştırmacı farklı yöntemler ile içten yanmalı motor geliştirmesi için çalışmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte, bilgisayar destekli mühendislik çalışmaları daha da önem kazanmaktadır. Üzerine çalışılan konunun bilgisayar destekli sistemler ile değerlendirilmesi fiziksel test yapmaktan daha ucuz, daha kolay ve daha hızlıdır. Bilgisayar sistemlerinin gelişmesi de bu çalışmalarda büyük avantaj sağlamıştır. Yine de modellemenin doğru yapılması ve modelin hangi konularda doğru sonuç verebileceğini bilmek oldukça önemlidir.

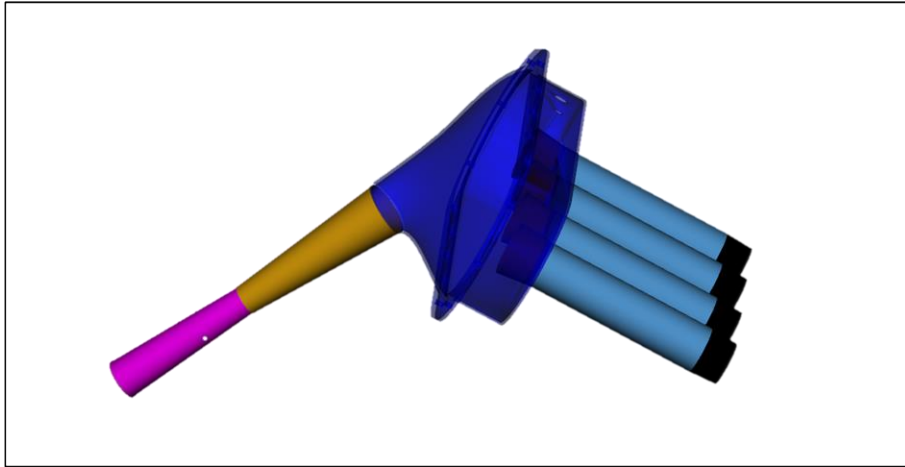
Akış ve yanma modellemesi, bir boyutlu motor modellemesinde en önemli kısımlardır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu motor içinde oluşan akış hesaplamalarında kullanılır. Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodları neredeyse bütün geometrilere kullanılabilir. Dizayn yapan kişinin kendi koduna yazmasına gerek yoktur.

GT-SUITE yaygın olarak kullanılan bir boyutlu modelleme programlarından biridir. GT-SUITE içerisinde motorda akışın geçtiği hava emiş hattı, hava emiş manifoldu,

emme portları, silindirler, egzoz manifoldu ve egzoz hattının modellenmesi mümkündür. Yanma modellemesi için ise programın kendi kodları kullanılabileceği gibi test datasından elde edilen ısı atım dataları da kullanılabilir. Günümüzde emisyon kısıtlamaları sebebiyle emisyon tahmini yapamayan modellerin kullanması gerçekçi değildir. Yanma modellemesi yapılırken emisyon tahmin kodlarında korelasyonunun yapılması oldukça önemlidir.

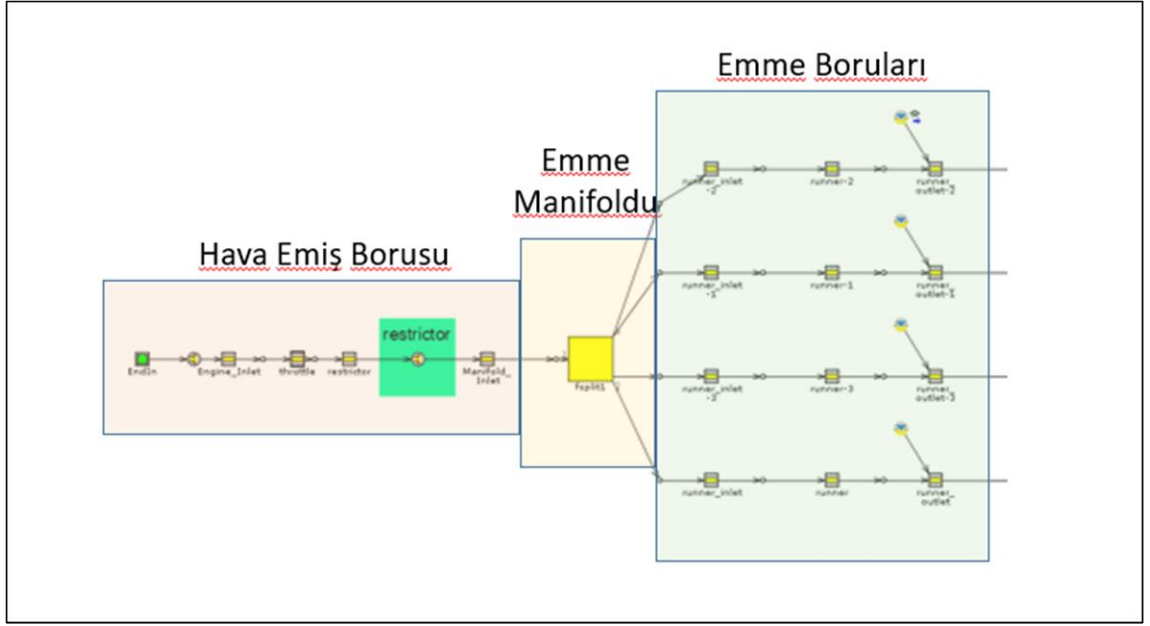
2.2.1 İçten Yanmalı Motorun Emme ve Egzoz Hattının Modellenmesi

Tezde üzerine çalışılacak motor dört silindirli, doğal hava emişli, emme portuna enjeksiyon sistemi içeren Otto çevrimi ile çalışan benzinli bir motordur. Hava emiş ve egzoz hattının modellenmesi için GT-SUITE programının alt modülü olan GEM 3D programı kullanılmıştır. GEM 3D programı geometriyi belli parçalara ayırıp sonrasında her parçanın çap, uzunluk değerlerini parametrize ederek ana modelde kullanılmasını sağlar.

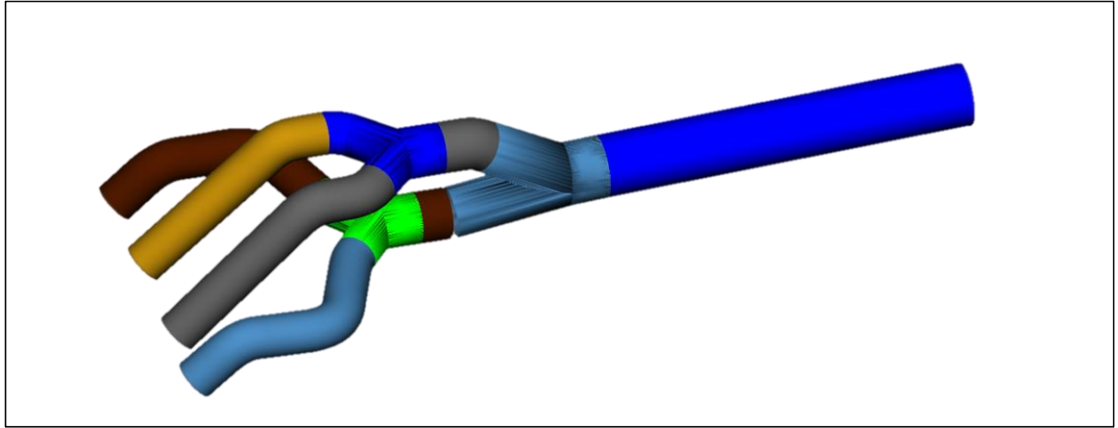


Şekil 2.1 Emme manifoldu geometrisi

Şekil 2.1 de görüldüğü gibi hava emiş borusu, emme manifoldu ve emme boruları parçalara ayrılmış ve ana modelde kullanılmak üzere parametrize edilmiştir. Şekil 2.2 de ilgili kısımların ana model üzerindeki görünimleri görülebilir.

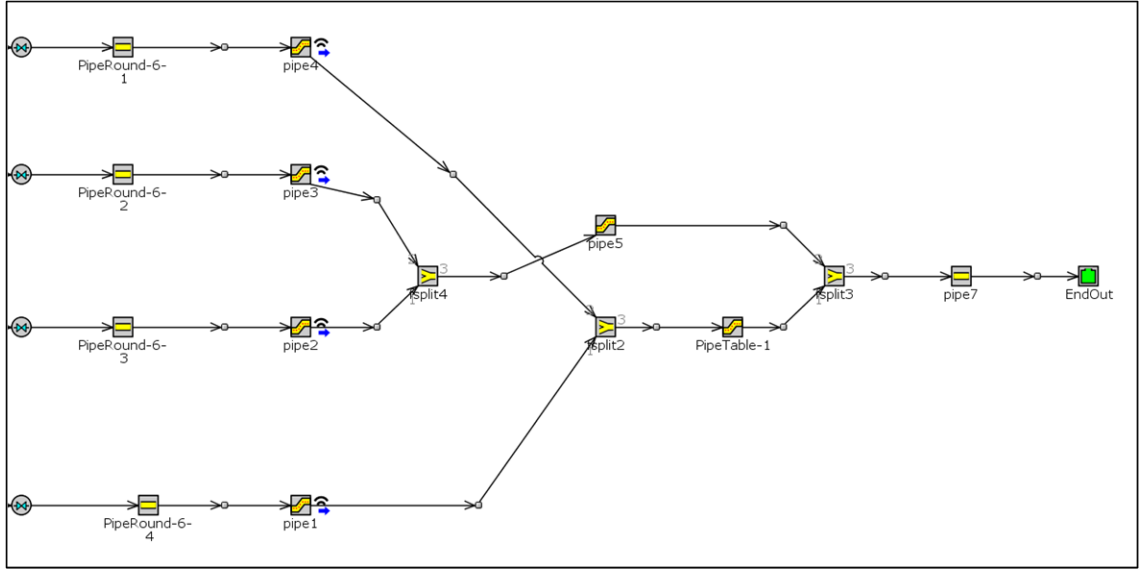


Şekil 2.2 Emme manifoldu geometrisi bir boyutlu modellenmiş görünüşü



Şekil 2.3 Egzoz manifoldu geometrisi

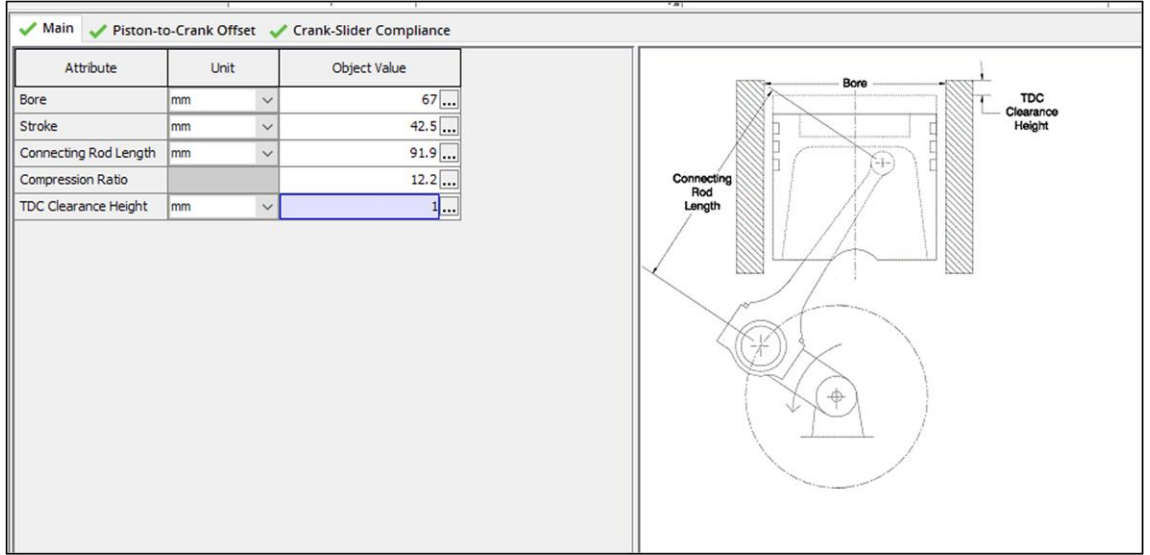
Şekil 2.3 de görüldüğü gibi egzoz hattı parçalara ayrılmış ve ana modelde kullanılmak üzere parametrize edilmiştir. Şekil 2.4 de ilgili kısımların ana model üzerindeki görünümleri görülebilir.



Şekil 2.4 Egzoz manifoldu geometrisi bir boyutlu modellenmiş görünüşü

2.2.2 İçten Yanmalı Motorun Hareketli Parçalarının Modellenmesi

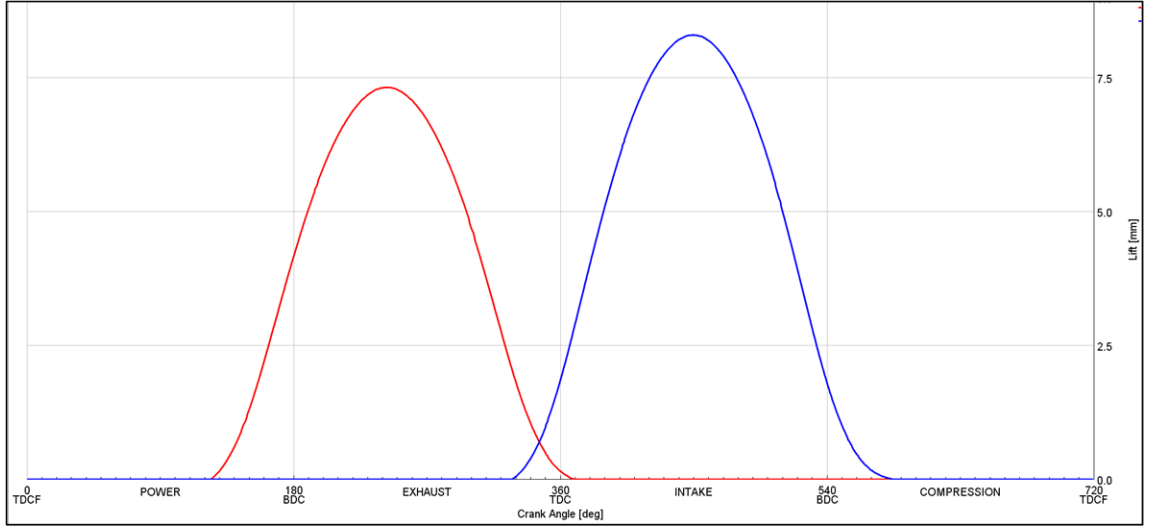
Bir boyutlu motor modelinde hava yolu modellemesinden sonra motorun hareketli parçalarının modellemesi yapılmıştır. Burada motorun bore, strok, biyel kol uzunluğu, sıkıştırma oranı, emme ve egzoz valf açılma eğrileri ve silindirlerin ateşlenme sıralaması değerleri girilmiştir. Aynı zamanda silindir arası ateşleme zaman aralıkları da tanımlanmıştır.



Şekil 2.5 Motor güç çevirim sistem geometrik değerleri

✓ Main ✓ Cylinder Geometry ✓ Firing Order ✓ RLT Norms ✓ Inertia ✓ Bearing Loads Plots						
Attribute	Unit	1	2	3	4	
Cylinder Number		1	2	4	3	
Firing Intervals	deg	0.0	180.0	180.0	180.0	
2-Stroke		☐	☐	☐	☐	

Şekil 2.6 Motor silindirleri ateşleme sırası



Şekil 2.7 Krank açısına bağlı emme ve egzoz valfi açılma eğrileri

2.3 Model Test Datası Korelasyonu

2.3.1 Korelasyon Metodolojisi

Günümüzde bir boyutlu motor modeli korelasyonu yapılırken farklı yaklaşımlar izlenmektedir. Bunlardan en yaygın olanı komponentlerin parçalara ayrılarak test dataları referans alınarak korele edilmesi ve sonrasında birleştirilerek sistem seviyesinde korelasyon yapılmasıdır. Kuşkusuzdur ki bir boyutlu motor modeli korelasyonunda en önemli kısımlar; yanma ve eğer varsa turboşarjın davranışının simüle edilmesidir.

Bir boyutlu motor modellenmesi yanma korelasyonu yapılırken farklı methodlar uygulanabilmektedir. Buradaki en kritik nokta kurulan yanma modelinin sadece korelasyonu yapılan test noktalarında mı yoksa farklı noktalarda da doğru sonuçlar vermesi beklentisidir. Eğer yanma korelasyonunda yanma modelinin sadece kullanılan test noktalarında doğru sonuçlar vermesi hedefleniyorsa test sırasında alınan krank açısına bağlı silindir içi gaz basıncı datasından çıkarılan yakıt ısı salım hızı eğrisinin modele girilmesi en doğru sonucu verecektir. Bu sayede test noktalarında yanma modeli korelasyonu tamamlanmış olur. Fakat modelin farklı çalışma noktalarında veya kalibrasyon değişikliklerinde doğru sonuçlar vereceği şüphelidir.

Yukarıda bahsedilen yanma korelasyon methodunda modelin test noktalarından farklı noktalarda veya kalibrasyonlarda doğru sonuç verememe ihtimali oldukça dezavantaj içeren bir durumdur. Bir boyutlu motor modellerinin genel kullanım amacı olan farklı dizayn ve kalibrasyon değişiklikleri ile optimizasyon çalışmalarına bu durum engel olmaktadır. Bu sebeple hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları yapan geliştiriciler farklı yanma modelleri geliştirmişlerdir. Bu modellerde genel amaç belli parametrelerin ayarlanarak test datası ile korele edilmesidir. Aynı zamanda korele edilen modelin farklı noktalarda da doğru sonuç vermesi beklenmektedir. Bu süreçte izlenen method test datalarının, korelasyonda kullanılacak datalar ve modeli test edecek datalar olarak ikiye ayrılmasıdır. Korelasyonda kullanılacak datalar ile yanma modeli parametreleri belirlenirken, kalan datalar ile korele edilen modelin farklı noktalarda veya kalibrasyonlarda istenilen performansda çalışıp çalışmadığına bakılır.

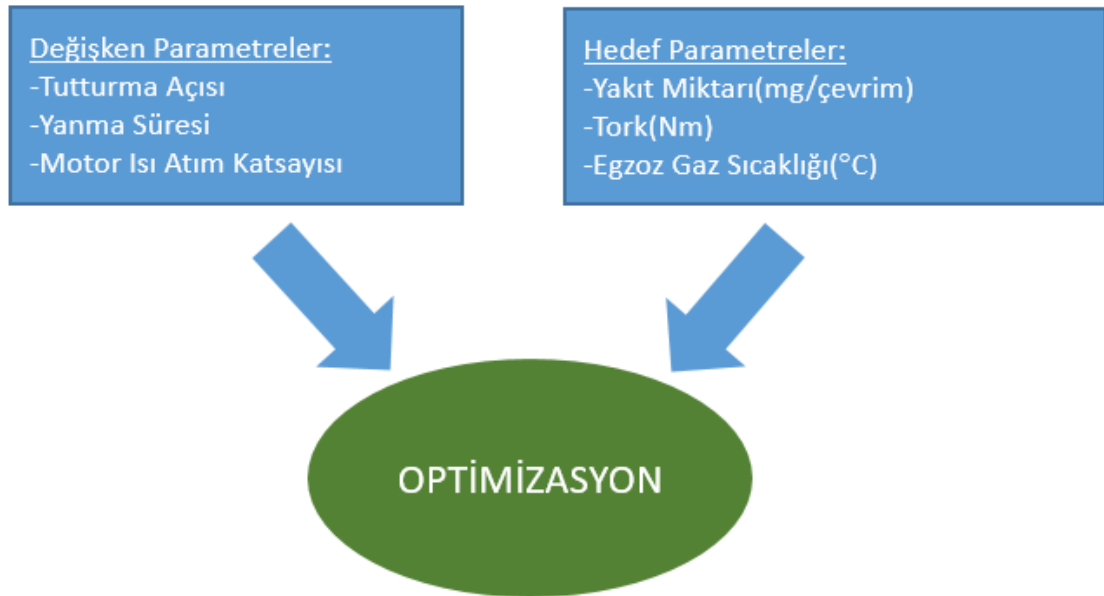
Bu tezde yukarı bahsedilen methodların dışında bir method incelenecektir. Yanma korelasyonu için genetik algoritması kullanılarak yanma parametreleri belirlenmeye çalışılacaktır. Optimizasyon algoritmasına hedef olarak motor testlerinden elde edilen yakıt tüketimi, tork, egzoz gaz sıcaklığı gibi değerler tanımlanacak ve optimizasyon sonucunda bunları sağlayan yanma parametrelerini bulunması hedeflenecektir.

2.3.2 Bir Boyutlu Model Korelasyonu

Analizlerde dört silindire sahip, doğal emişli, Otto çevrimi prensibine göre çalışan bir motor kullanılmıştır. Hava yolu, emme ve egzoz valf zamanlamaları GT Suite ortamında modellenmiştir. Aynı zamanda modele bore, strok, sıkıştırma oranı, ateşleme sırası gibi temel parametreler modele tanımlanmıştır.

Yanma korelasyonu için GT Suite'in benzinli motorlar için önerdiği SI Wiebe yanma modellemesi kullanılacaktır. Bu yanma modellemesinde yanma korelasyonu tutturma açısı ve yanma süresi parametreleri ile sağlanmaktadır. GT Suite tutturma açısı olarak yakıtın %50 sinin yandığı krank açısını, yanma süresi parametresi içinde yakıtın %10 ile %90 arasında geçen sürenin krank açısı olarak değerini ilk değerler olarak alınmasını önermektedir.

Optimizasyon algoritması olarak genetik algoritim methodu seçilmiştir. Genetik algoritması ile ilgili belirlenen değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Optimizasyon değişken parametreleri olarak tutturma açısı, yanma süresi ve motor ısı atım katsayısı parametreleri belirlenmiştir. Optimizasyon bu değerleri değiştirerek yakıt miktarı, tork ve egzoz gaz sıcaklığı değerlerini tutturmaya çalışacaktır.



Şekil 2.8 Optimizasyon parametreleri

Tablo 2.1 Model korelasyon optimizasyon algoritma değerleri

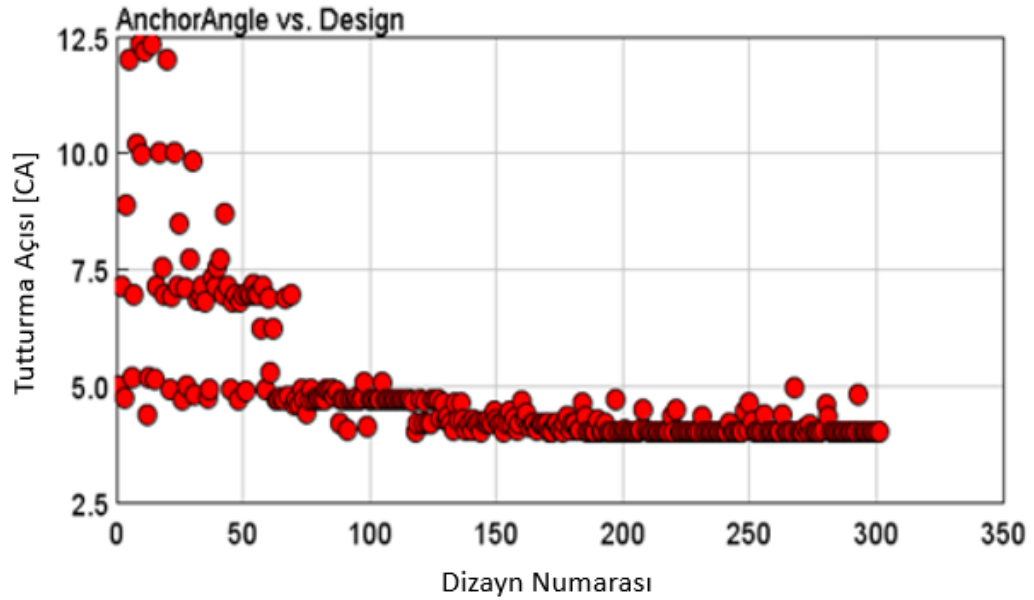
Optimizasyon Algoritması Tipi	Genetik Algoritma
Popölasyon Boyutu	4
Nesil Sayısı	14
Geçiş Hızı	1
Geçiş Oranı Dağılım Endeksi	15
Mutasyon Oranı	5
Mutasyon Oranı Dağılım Endeksi	20

Analiz edilen motor 2500 dev/dak ve 14 000 dev/dk hızları aralığında çalışmaktadır. Motorun maksimum güç aldığı motor hızı 11 000 dev/dak – 12 000 dev/dak mertebelerindedir. Optimizasyon için egzoz gaz sıcaklığı değerini bildiğimiz 11 000 dev/ dak hızı seçilmiştir. Tabiki optimizasyon farklı motor hızları içinde koşulabilirdi fakat bu durumda elde edilen parametrelerin farklı motor çalışma noktalarında ve kalibrasyonlarda çalışıp çalışmadığı bilinemeyeceğı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada motor 11 000 dev/dk tam yük koşulundaki test datalarına göre korele edilmiş ve sonrasında korelasyon sonucuda elde edilen parametrelerin diğer tam yük hızlarındaki test dataları ile karşılaştırılmıştır. Motorun 11 000 dev/dk tam yükte çalışma durumunda tork değeri 49.86 Nm, bir çevrimde atılan yakıt miktarı 15.02 mg/çevrim ve egzoz gaz sıcaklığı 715 °C olarak ölçülmüştür.

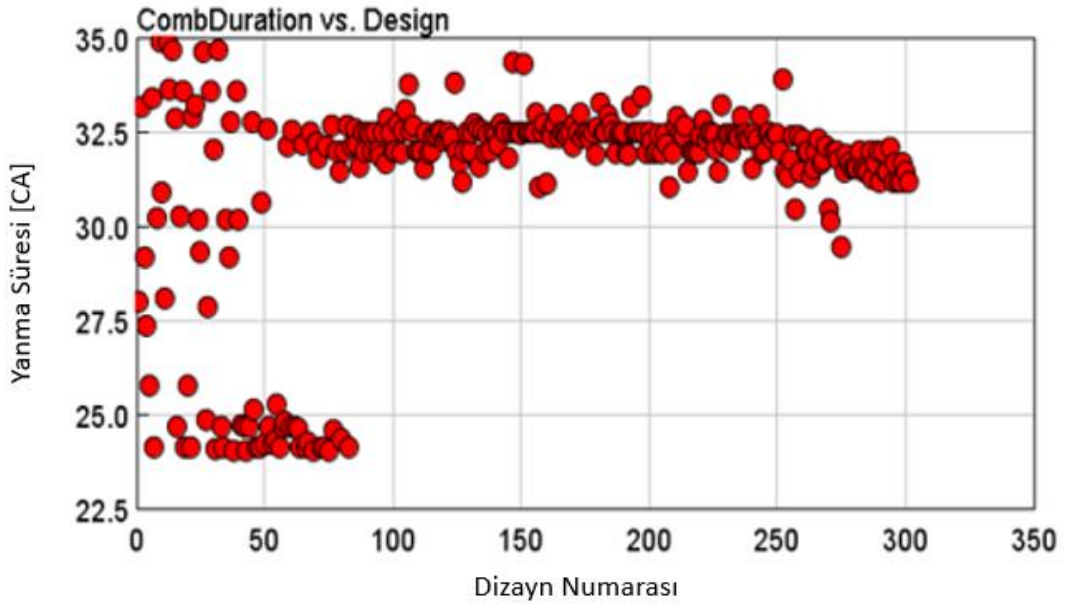
Tablo 2.2 Motor test datası tablosu

Motor Test Datası		
Motor Hızı	dev/dak	11000
Yakıt Miktarı	mg/çevrim	15.02
Motor Torku	Nm	49.86
Motor Gücü	kW	57.44
Egzoz Gaz Sıcaklığı	°C	715

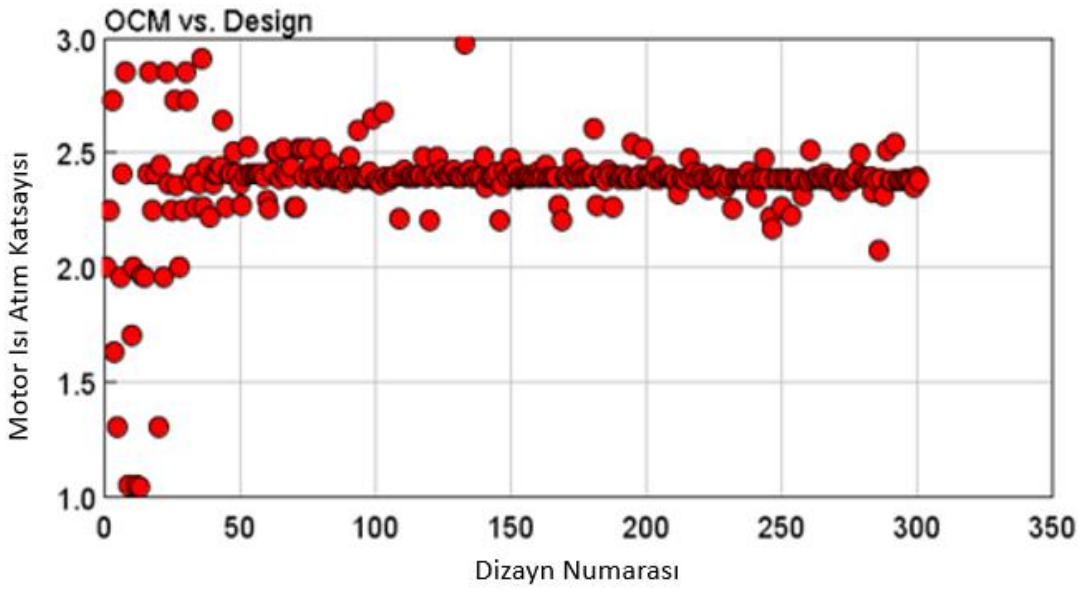
Optimizasyon sonuçları incelediğinde optimizasyon değişken parametrelerinin analiz süresince sabit bir değere yakınsadığı gözlenlenmiştir. Bu sebeple optimizasyon analizinin başarılı bir şekilde tamamlandığı yorumu yapılmıştır.



Şekil 2.9 Dizayn numarasına bağlı tutunma açısı saçılım grafiği



Şekil 2.10 Dizayn numarasına bağlı yanma süresi saçılım grafiği



Şekil 2.11 Dizayn numarasına bağlı motor ısı atım katsayısının saçılım grafiği

Optimizasyon sonuçları incelendiğinde; tutturma açısı için 4.01 KA, yanma süresi için 31.16 KA ve motor ısı atım katsayısı için 2.37 değerlerinin optimum sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Bu değerler ile koşan final modelin hedef parametrelerinin test sonuçları ile karşılaştırıldığında hata oranının kabul değeri olan %5 altında olduğu gözlemlenmiştir.

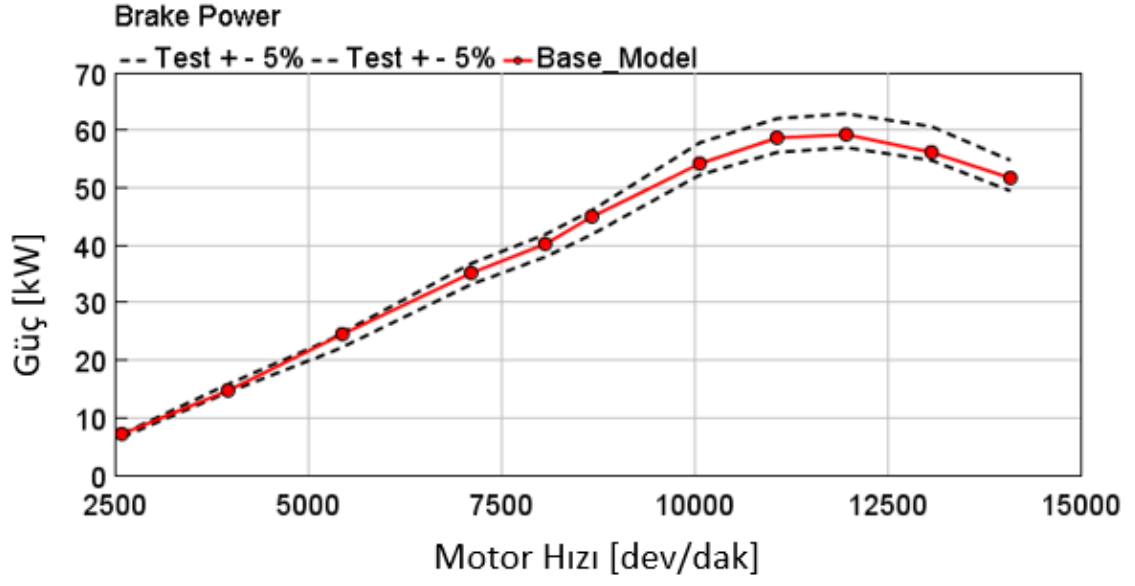
Tablo 2.3 Optimizasyon değişken parametrelerinin optimum değerleri tablosu

Optimizasyon Değişken Parametreleri	Optimum Değerler
Tutturma Açısı	4.01
Yanma Süresi	31.16
Motor Isı Atım Katsayısı	2.37

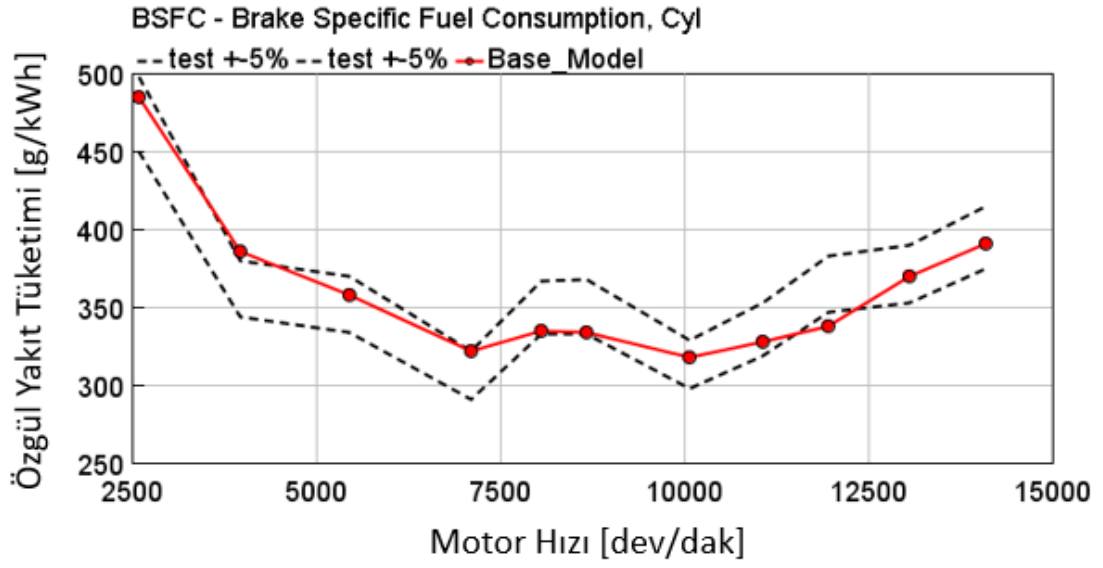
Tablo 2.4 Motor test datası ve analiz değerleri karşılaştırma tablosu

Optimizasyon Hedef Parametreleri	Birim	Motor Test Datası Değeri	Analiz Değeri	Hata[%]
Motor Hızı	dev/dk	11000	11000	0
Motor Torku	Nm	49.86	50.49	1.26
Motor Gücü	kW	57.44	58.57	1.97
Yakıt Miktarı	mg/çevrim	15.02	14.44	3.86
Egzoz Gaz Sıcaklığı	°C	715	737	3.08

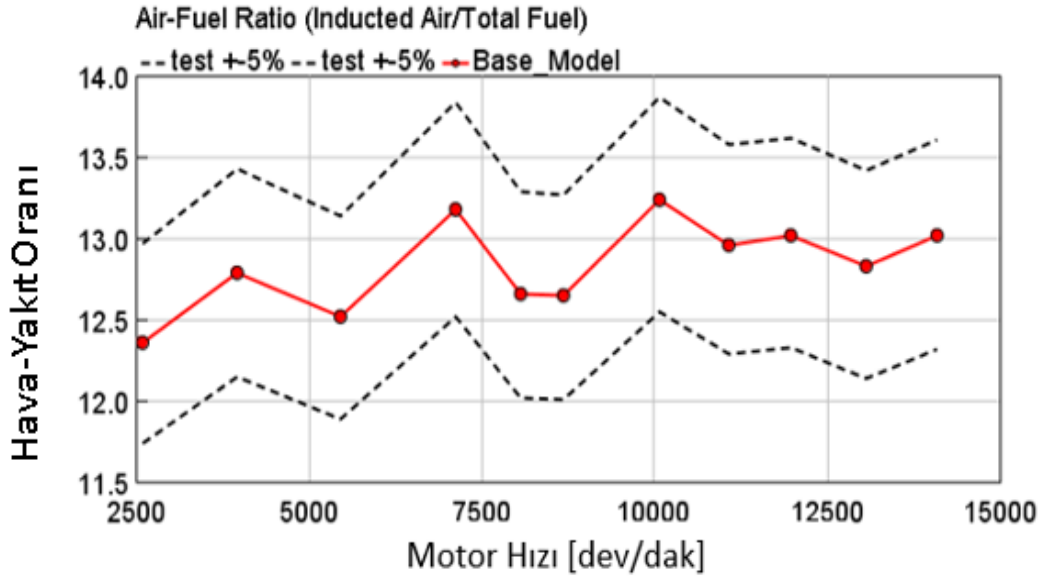
Daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi optimizasyon farklı motor hızlarında da gerçekleştirilebilirdi. Fakat bu durumda test datalarından farklı çalışma noktalarında modelin doğru çalışmadığını bilinemiyor olacaktı. Modelin farklı çalışma noktalarında durumunu anlamak için model farklı motor hızlarında koşturulmuş ve çoğu noktanın %5 hata aralığının içinde kaldığı gözlemlenmiştir.



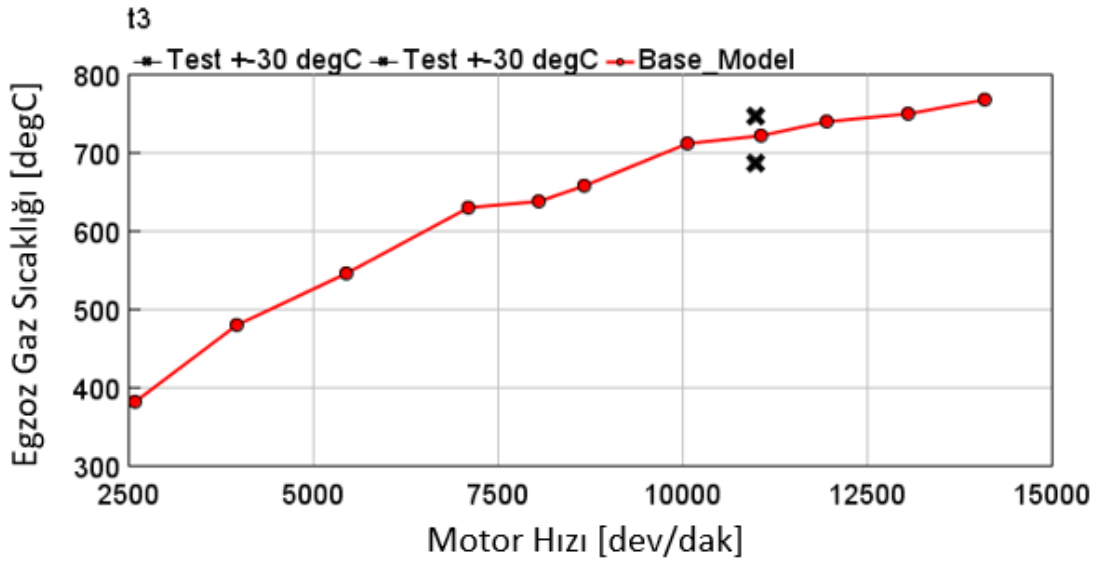
Şekil 2.12 Motor hızına bağlı güç grafiği



Şekil 2.13 Motor hızına bağlı özgül yakıt tüketimi grafiği



Şekil 2.14 Motor hızına bağlı hava-yakıt oranı grafiği



Şekil 2.15 Motor hızına bağlı egzoz gaz sıcaklığı grafiği

Farklı motor hızlarında sonuçlar detaylı incelendiğinde motor gücü parametresinde test ile korelasyon seviyesi oldukça iyidir. Hava yakıt oranı model için girdi olduğu için test ile tamamen aynıdır. Özgül yakıt tüketimi değerine baktığımızda ise bazı noktalarda %5 hata oranının dışına çıkmasına rağmen genel olarak kabul edilebilir seviyededir. Egzoz gaz sıcaklığı sadece 11 000 dev/dak çalışma noktasında olduğu

için diğer noktalarda karşılaştırma yapılamamıştır. Bu noktada korelasyon seviyesinin limit değerlerin içinde kaldığı gözlemlenmiştir.

Yakıt Tüketimi Optimizasyonu ve Kalibrasyon Haritalarının Çıkarılması

3.1 Yakıt Tüketimi Optimizasyonu

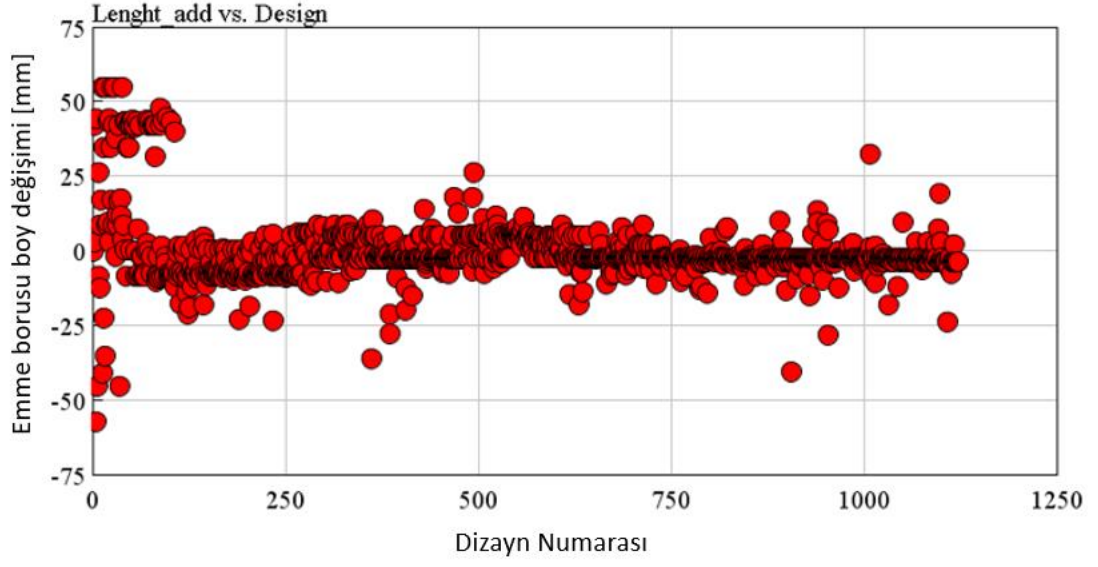
Bir boyutlu motor modeli korelasyonundan sonra motorda görece basit geometrik değişiklikler ile 11 000 dev/ dk olan motorun max gücünü verdiği verdiği çalışma durumunda yakıt tüketimi optimizasyon çalışması ile daha düşük bir yakıt tüketimi elde etmek amaçlanmıştır.

Optimizasyon değişken parametleri olarak emme borusu çapı, uzunluğu ve emme ve egzoz valf eğrisinin açılma zamanlaması belirlenmiştir. Optimizasyon süresince, egzoz gaz sıcaklıklarının daha yüksek değere gittiği bir durum, daha düşük yakıt tüketim değeri sağlasada yaşanabilecek termal mekanik dayanım problemleri sebebiyle optimizasyona 737 °C değeri egzoz gaz sıcaklığı sınır değeri olarak tanımlanmıştır. Kuşkusuzdur ki emme ve egzoz valf eğrileri de optimizasyona eklenebilirdi fakat bu durum kam mili ve valf lifti için dinamik analizlerin tekrarlanmasını gerektirirdi. Bu durumdan kaçınmak için emme ve egzoz valf eğrilerini değiştirmeden optimizasyona sadece açılma zamanlamaları değişken parametre olarak tamamlanmıştır.

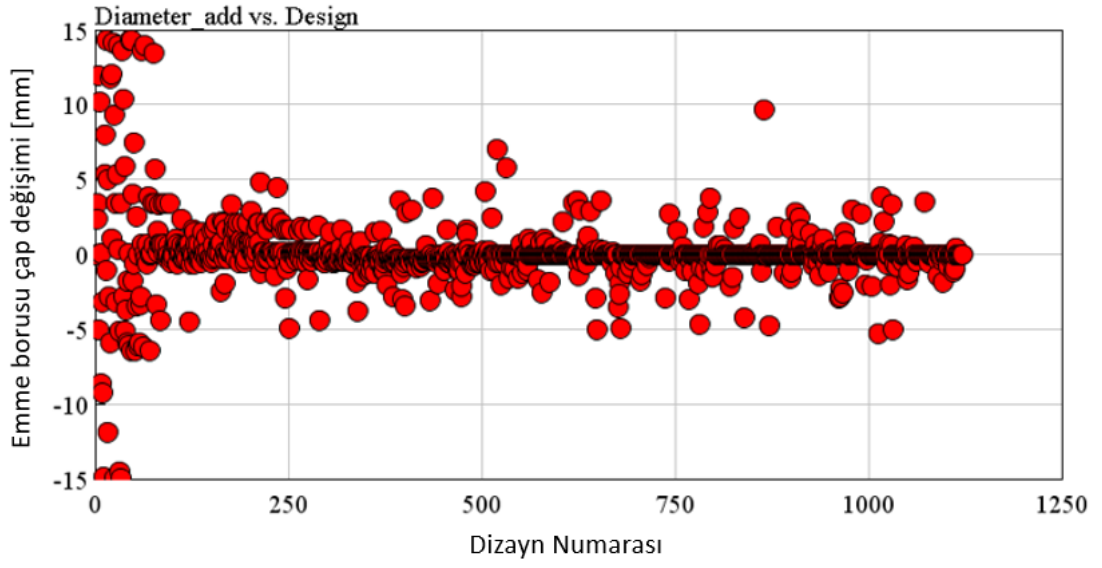
Tablo 3.1 Yakıt tüketimi optimizasyon algoritma değerleri

Optimizasyon Algoritması Tipi	Genetik Algoritma
Popülasyon Boyutu	5
Nesil Sayısı	17
Geçiş Hızı	1
Geçiş Oranı Dağılım Endeksi	15
Mutasyon Oranı	5

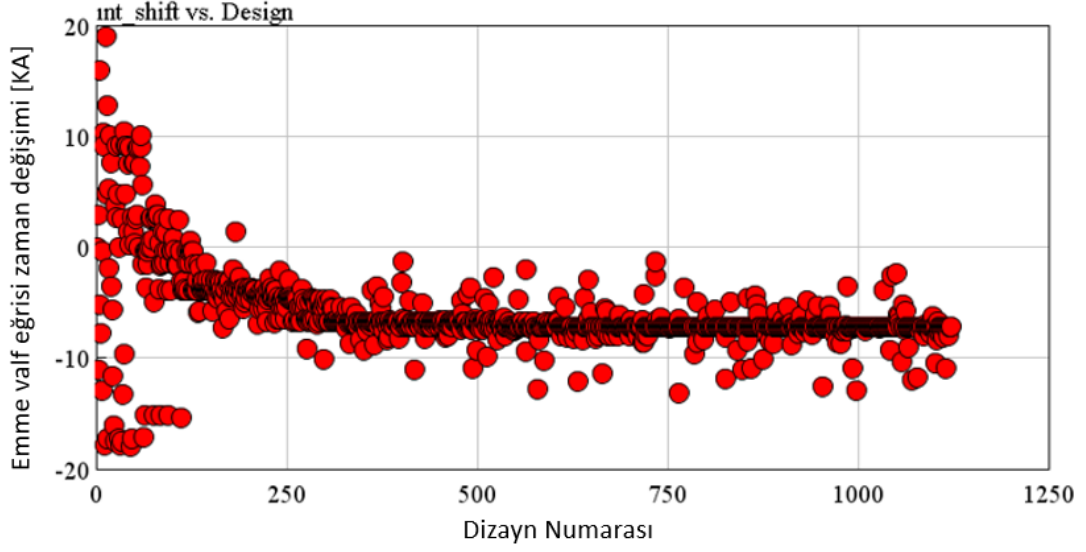
Analiz sonuçları incelendiğinde değişken parametrelerinin analiz boyunca belli bir değere sabitlendiği gözlemlenmiştir. Buradan analiz süresinin yeterli olduğu çıkarımına varılmıştır. Eğer değişken parametre değerleri belirli bir değeri sabitlendiği gözlemlenmeseydi Tablo 3.1 de belirlenen optimizasyon algoritması ayar değerleri ile oynanması gerekirdi. Özellikle popülasyon boyutu ve nesil sayısı değerlerinin analiz süresinde etkili olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada popülasyon boyutu sayısı olan 5 değerinin ve nesil sayısı değeri olan 17 değerinin yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerlerin çok yüksek seçilmesi gereksiz yere analiz süresini uzatacaktır. Bu sebeple bu değerler belirlenirken değişken parametre sayısı ve hedef parametre sayısı gözönüne alınmalıdır ve optimum değerlerin bulunmaya çalışılması sağlanmalıdır.



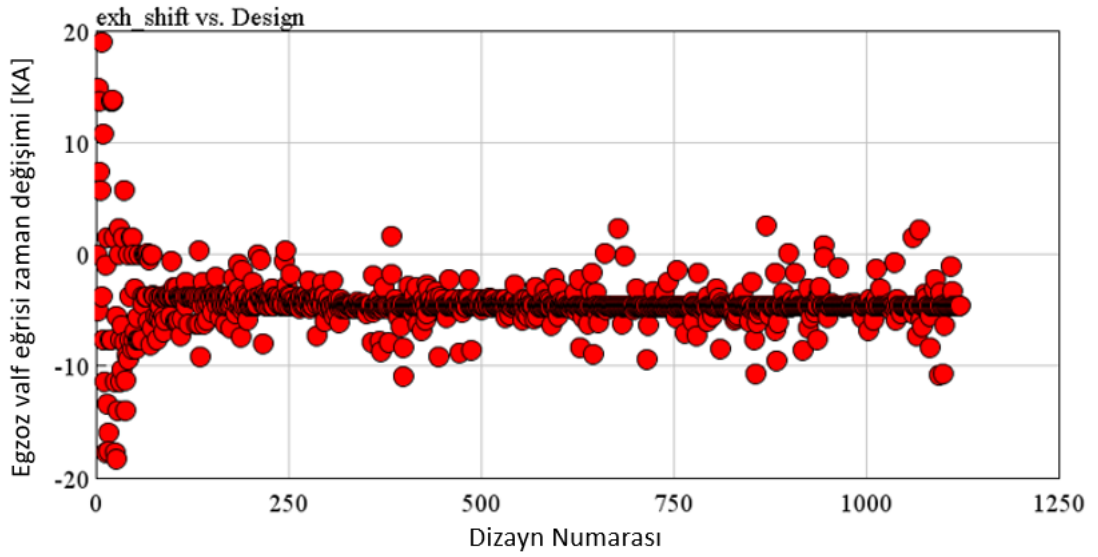
şekil 3.1 Emme borusu boyu değişiminin saçılım grafiği



şekil 3.2 Emme borusu çap değişiminin saçılım grafiği



Şekil 3.3 Emme valf eğrisi zaman değişiminin saçılım grafiği



Şekil 3.4 Egzoz valf eğrisi zaman değişiminin saçılım grafiği

Optimizasyon sonuçlarına göre emme borusu çap değerinde bir değişime gerek olmadığı görülmüştür. Emme borusu uzunluğunda ise 132 mm den 128.5 mm ye kısalma gözlemlenmiştir. Emme ve egzoz valf zamanlamalarında negatif değişim gözlemlenmiştir. Bu değer emme valfi için -7.18 KA iken egzoz valfi için -4.54 KA olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.2 Optimizasyon değişken parametreleri karşılaştırma tablosu

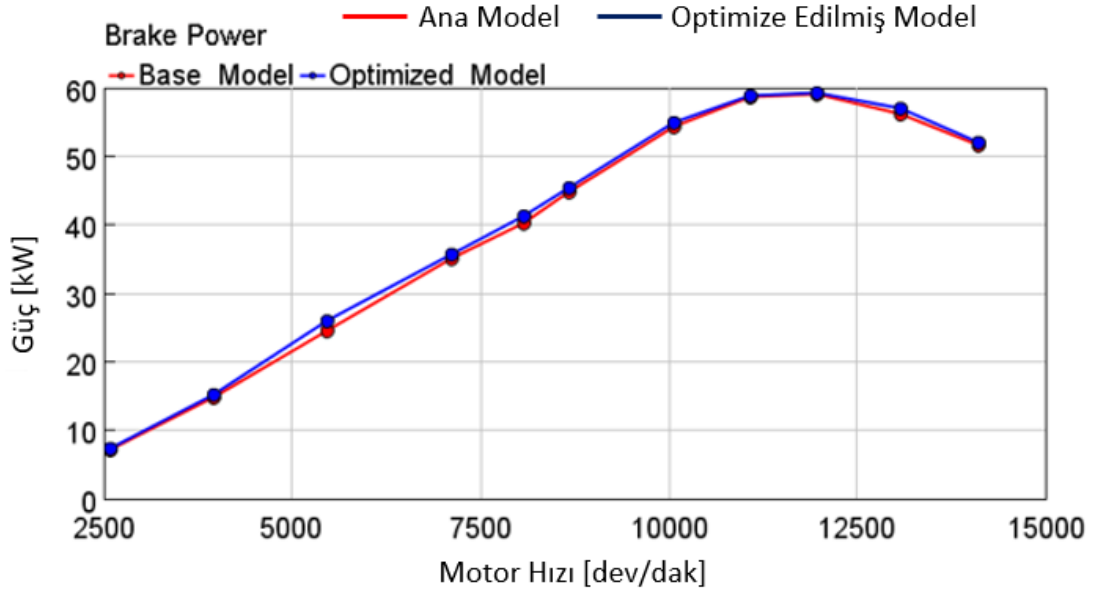
Optimizasyon Değişken Parametreleri	Ana Model Değerleri	Optimize Edilmiş Model Değerleri
Emme Borusu Çapı [mm]	38	38
Emme Borusu Uzunluğu [mm]	132	128.5
Emme Valfi Zaman Değişimi [KA]	0	-7.19
Egzoz Valfi Zaman Değişimi [KA]	0	-4.54

Optimizasyon sonucunda özgül yakıt tüketiminde %0.61 değerinde azalma elde edilmiştir.

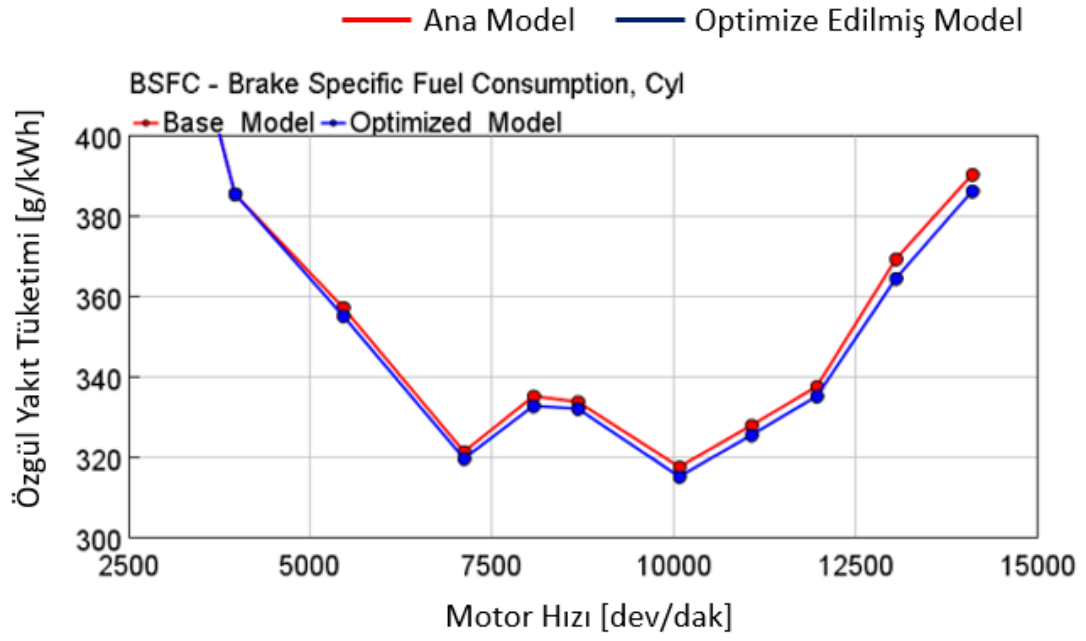
Tablo 3.3 Optimizasyon hedef parametreleri karşılaştırma tablosu

Optimizasyon Hedef Parametreleri	Birim	Ana Model Değerleri	Optimize Edilmiş Model Değerleri	Fark [%]
Motor Hızı	dev/dak	11000	11000	0
Tork	Nm	50.49	50.81	0.63
Güç	kW	58.57	58.95	0.64
Özgül Yakıt Tüketimi	g/kWh	327	325	0.61
Egzoz Gaz Sıcaklığı	°C	737	736	0.13

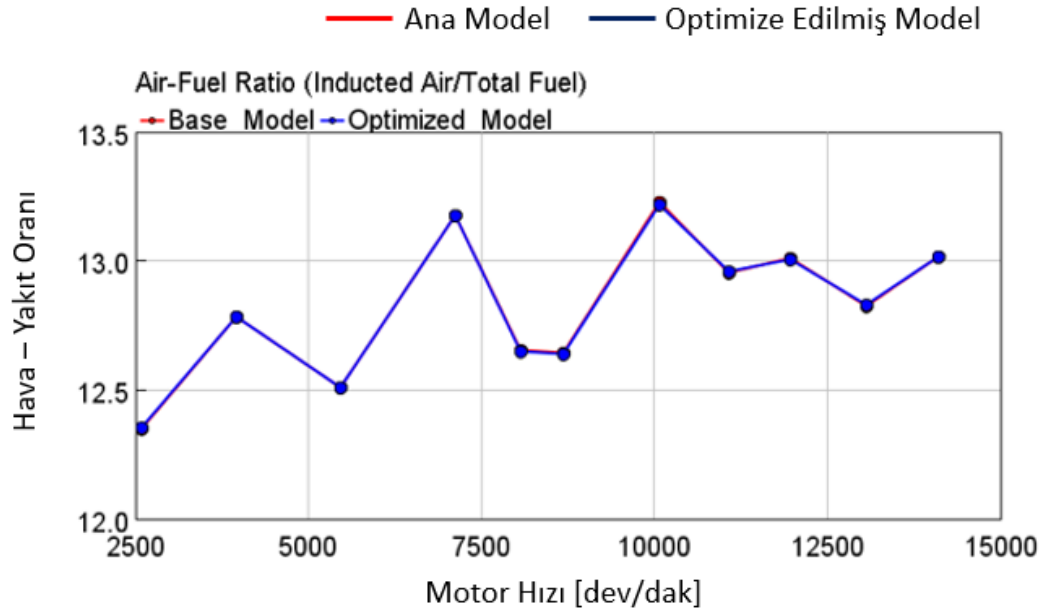
Optimizasyon sonucunda elde edilen emme borusu çap, emme borusu uzunluk emme ve egzoz valf zamanlamaları değerleri ile motor modeli farklı motor hızlarında tam yük durumların analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda farklı motor hızlarında performans parametrelerinde negatif bir etki gözlemlenmemiştir.



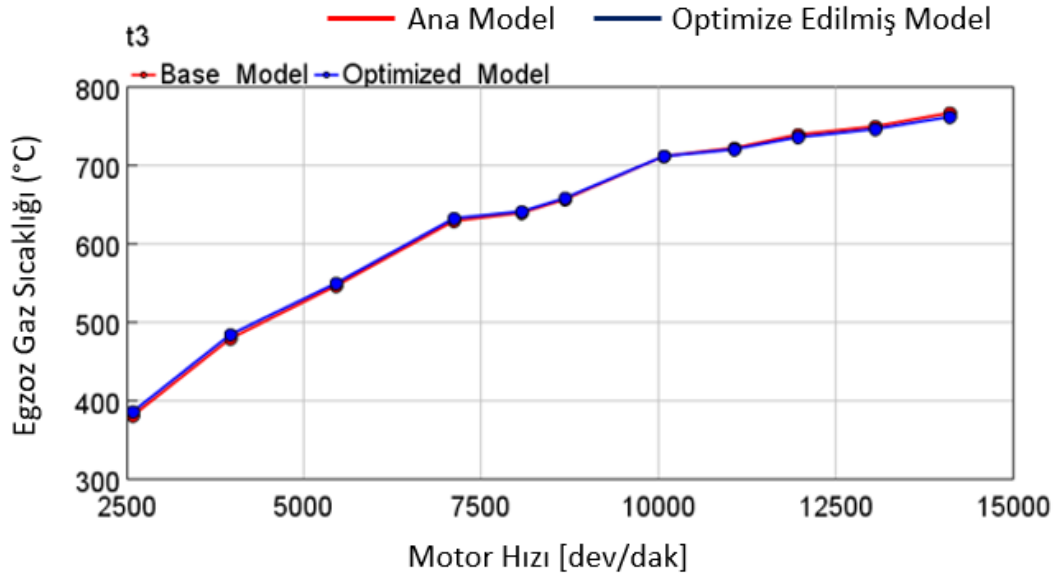
Şekil 3.5 Motor hızına bağlı güç grafiği



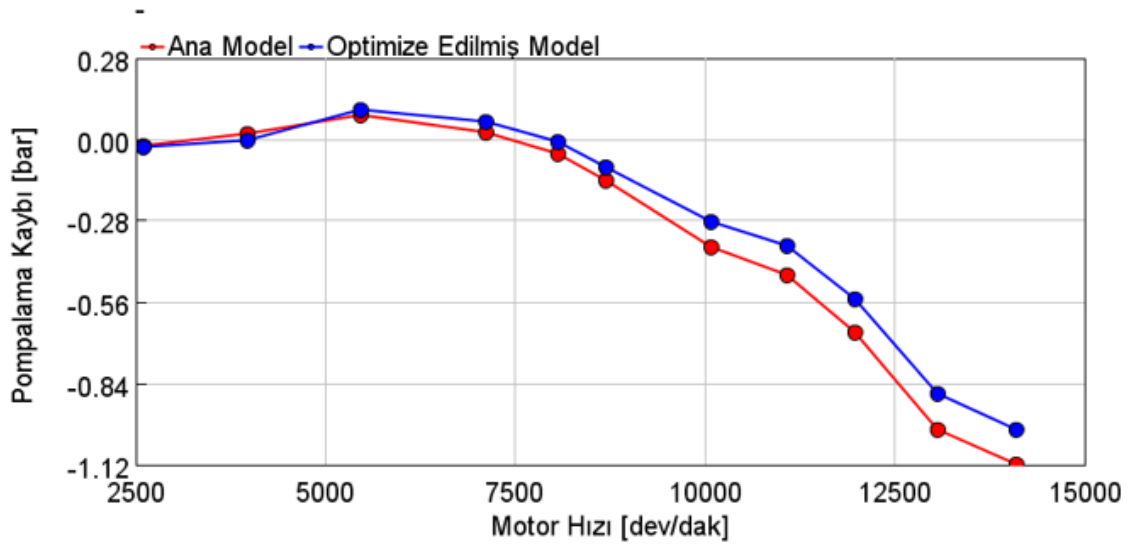
Şekil 3.6 Motor hızına bağlı özgül yakıt tüketimi grafiği



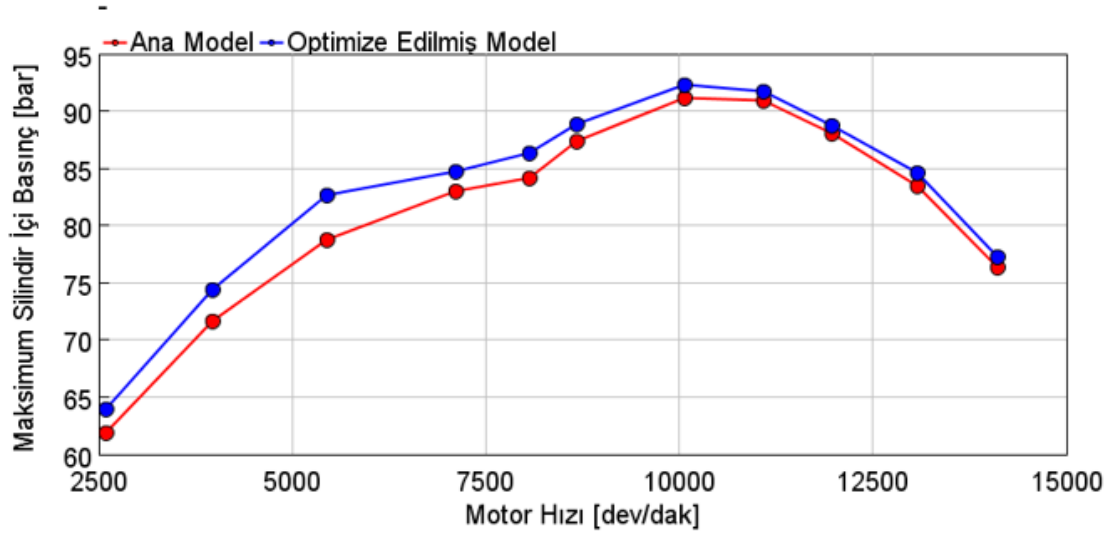
Şekil 3.7 Motor hızına bağlı hava-yakıt oranı grafiği



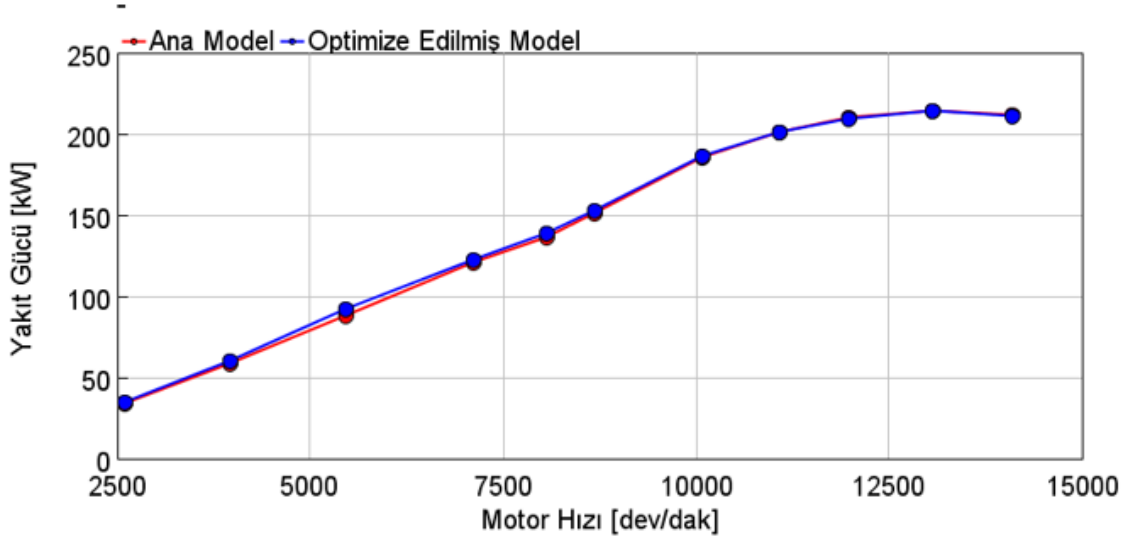
Şekil 3.8 Motor hızına bağlı egzoz gaz sıcaklığı grafiği



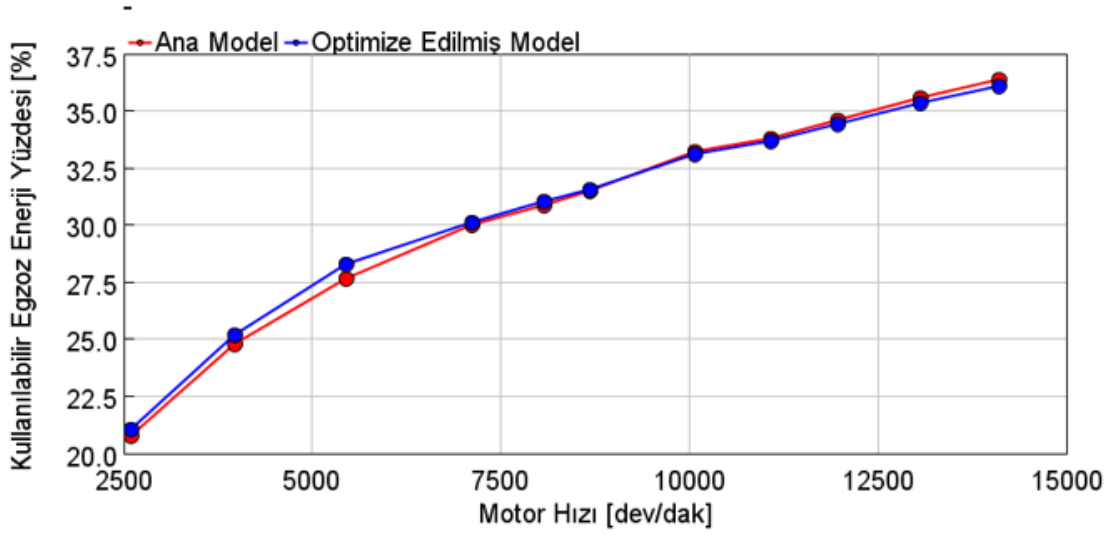
Şekil 3.9 Motor hızına bağlı pompalama kaybı grafiği



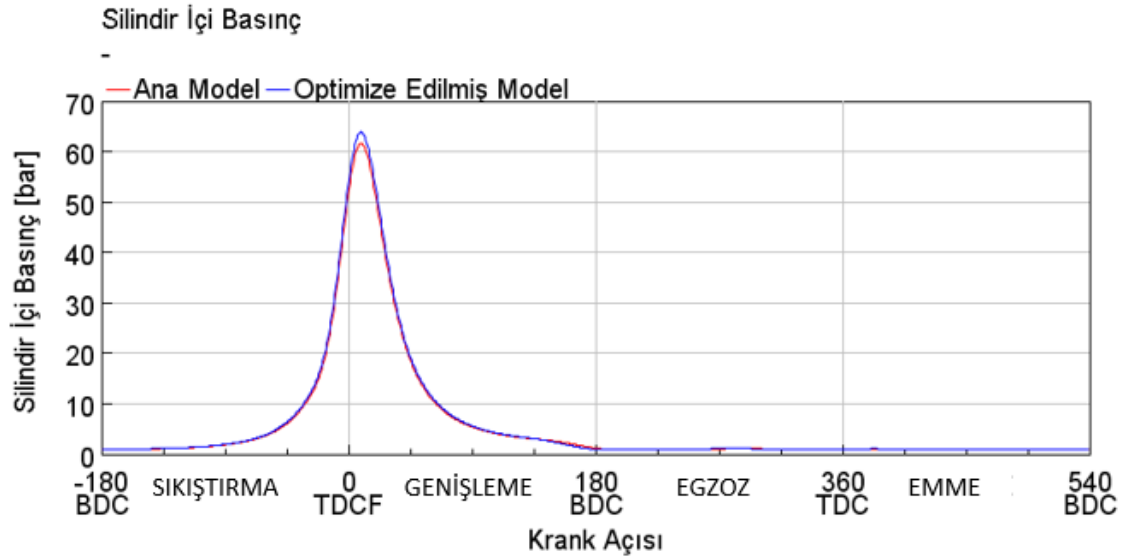
Şekil 3.10 Motor hızına bağlı maksimum silindir içi basınç grafiği



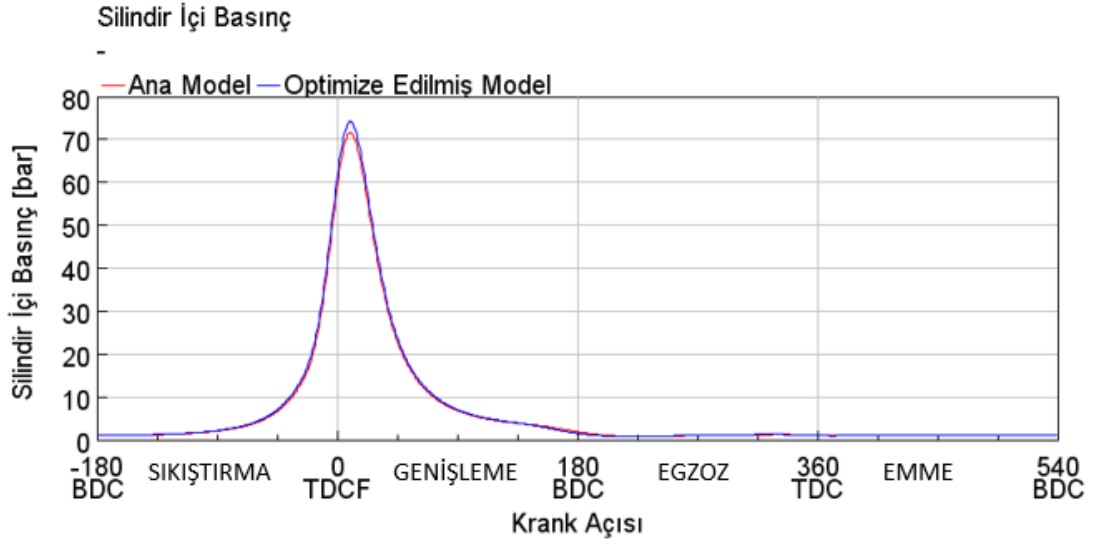
Şekil 3.11 Motor hızına bağlı yakıt gücü grafiği



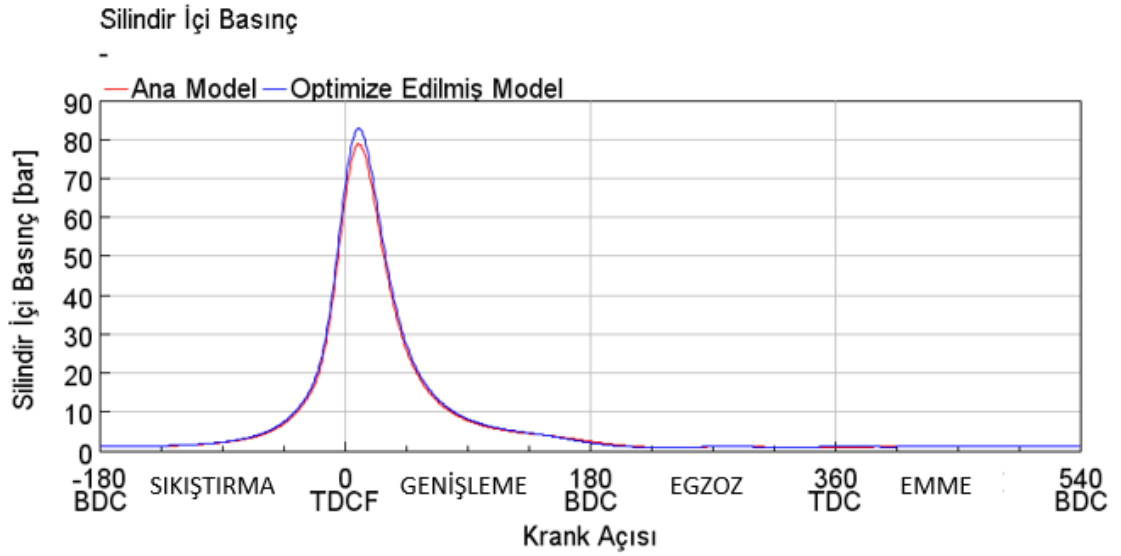
Şekil 3.12 Motor hızına bağlı kullanılabilir egzoz enerji yüzdesi grafiği



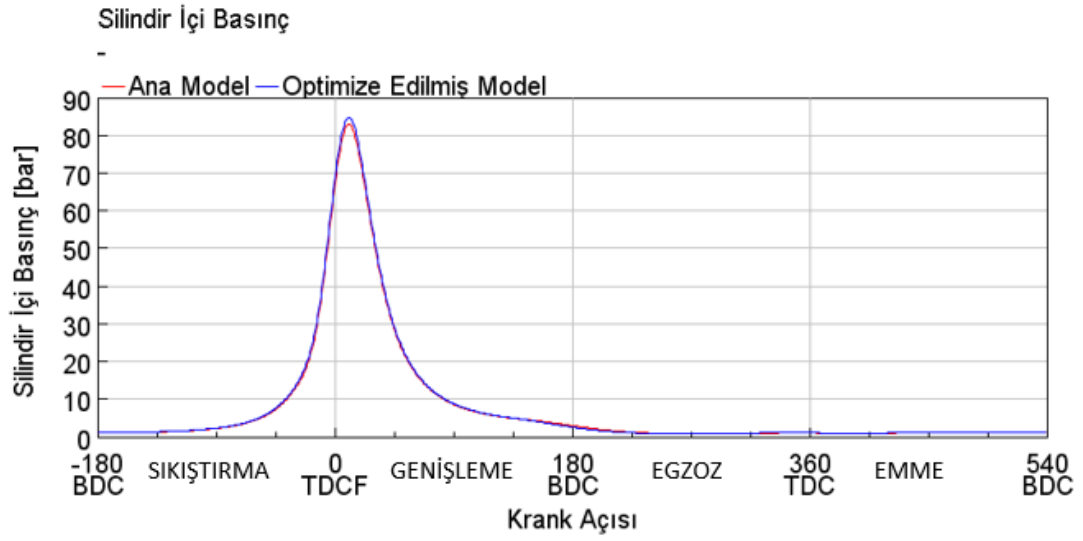
Şekil 3.13 2593 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



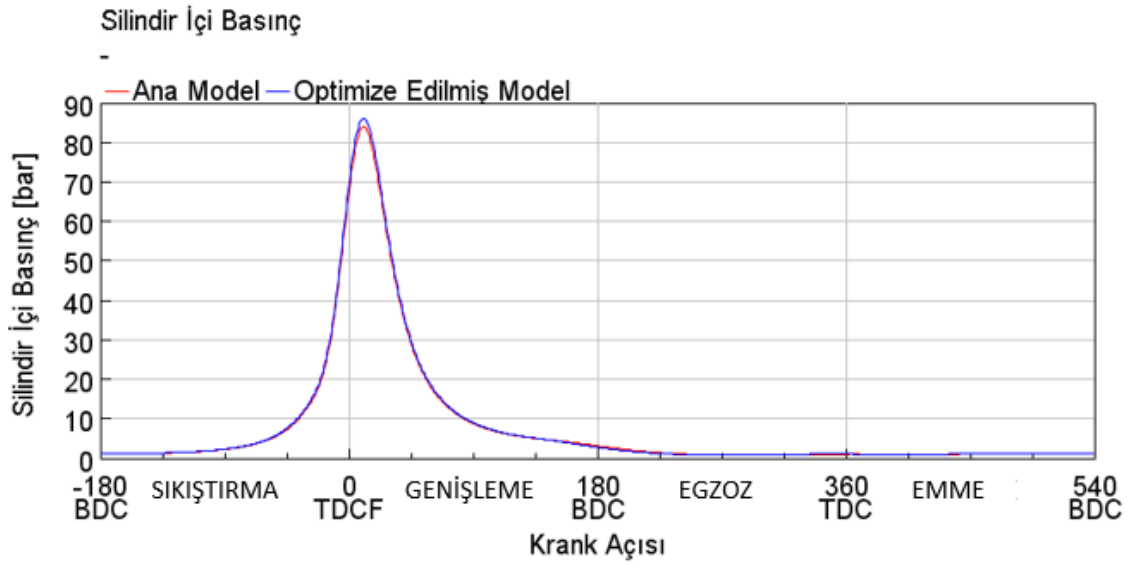
Şekil 3.14 3963 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



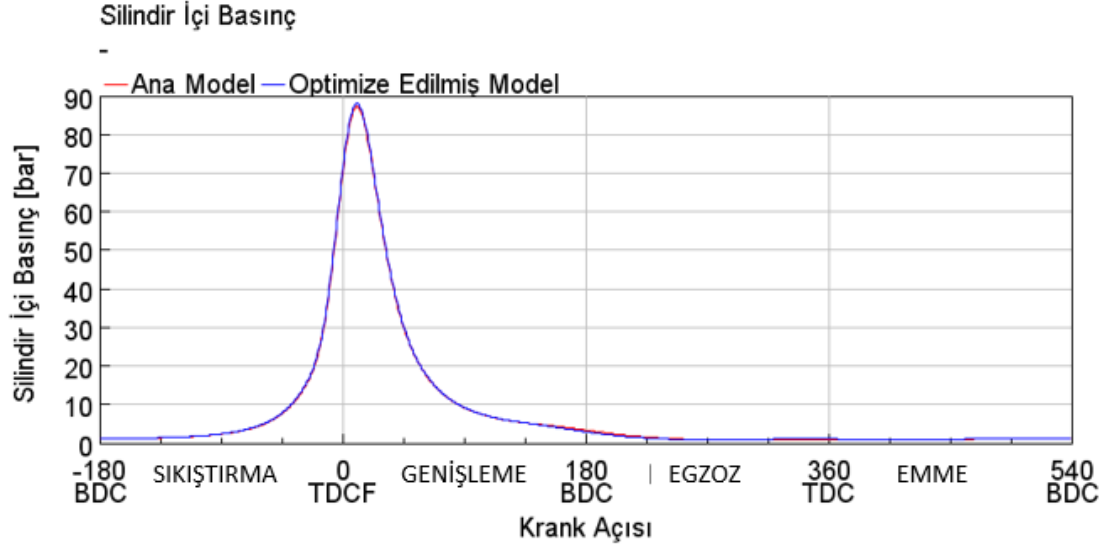
Şekil 3.15 5455 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



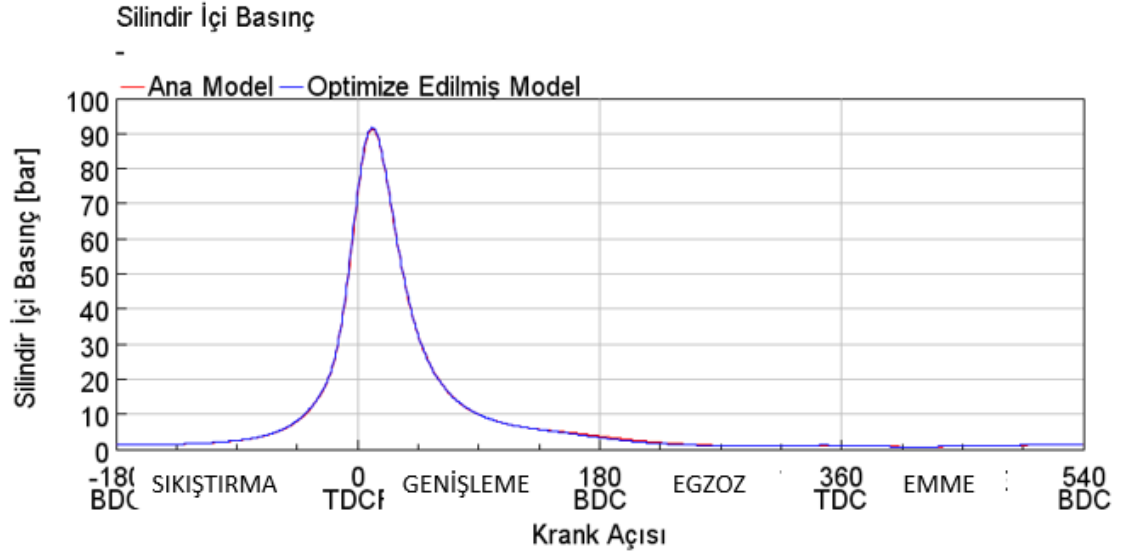
Şekil 3.16 7116 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



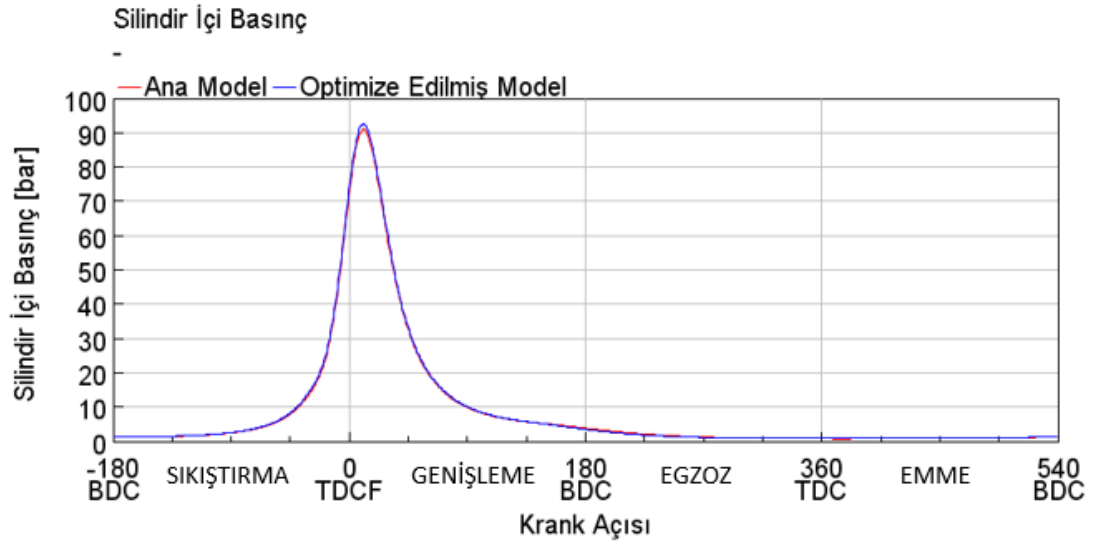
Şekil 3.17 8064 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



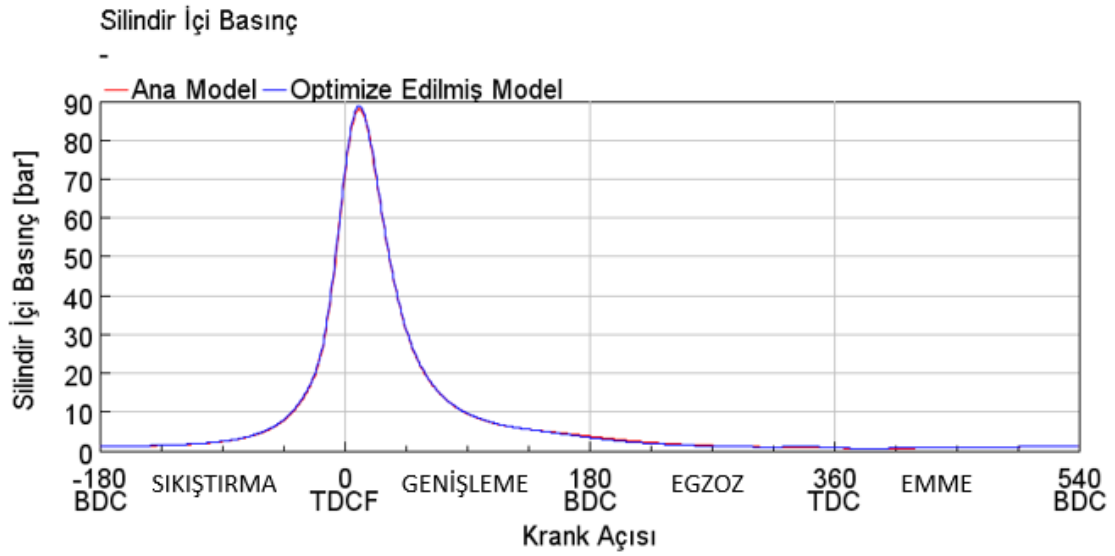
Şekil 3.18 8681 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



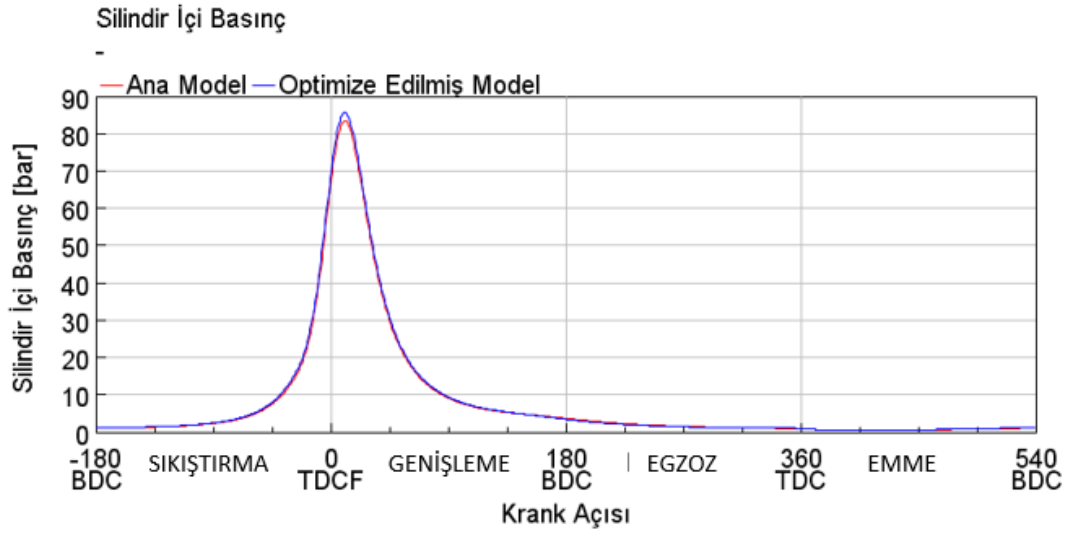
Şekil 3.19 10069 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



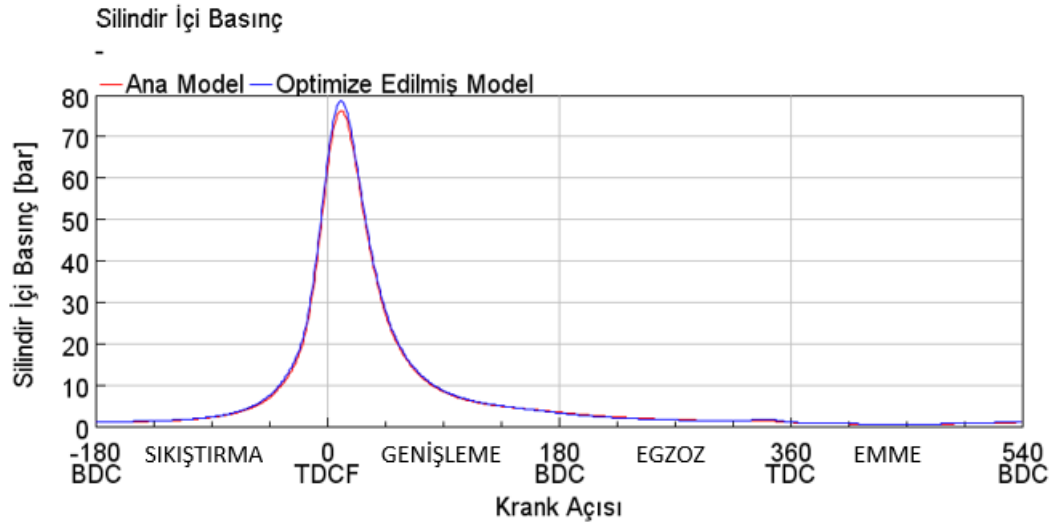
Şekil 3.20 11078 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



Şekil 3.21 11968 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



Şekil 3.22 13065 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği



Şekil 3.23 14102 dev/dak motor hızında krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği

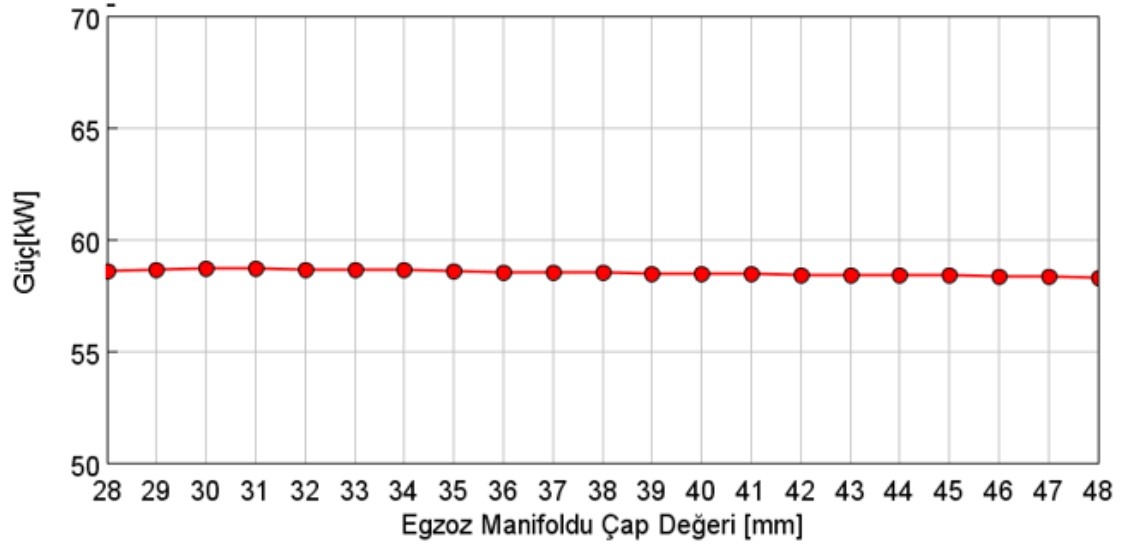
3.2 Egzoz Manifold Geometrisi ap Optimizasyonu

Yakıt tüketime optimizasyon çalışmasından elde edilen parametrelerin kullanıldığı model ile farklı egzoz manifold boruları çap değeri için motorun maximum güç verdiği 11 000 dev/dak motor hızında tam yükte analizler yapılmıştır.

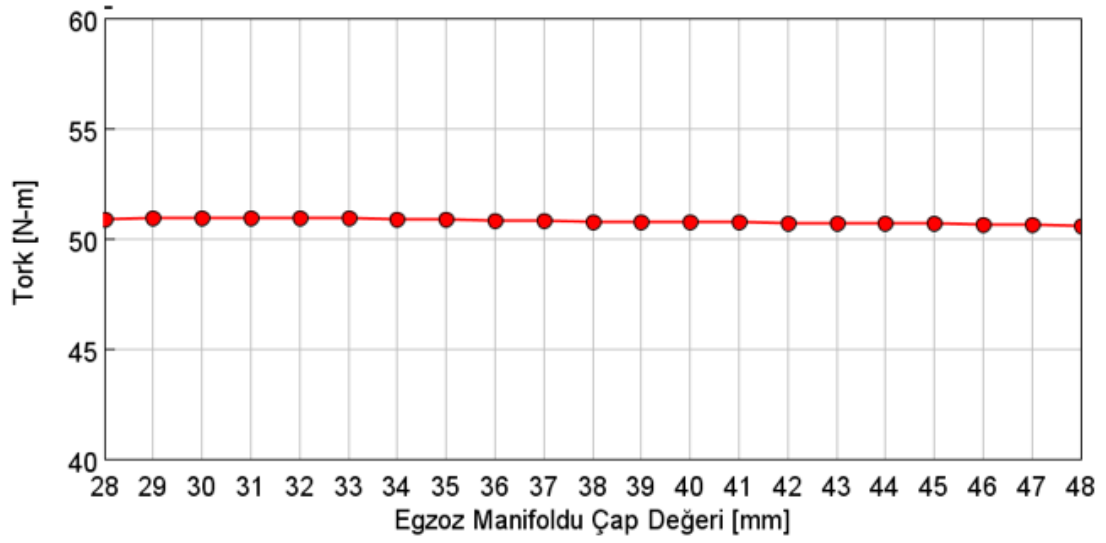
Motorun güncel egzoz manifold boruları çap değeri 38 mm dir. Analizlerde 28 mm den 48 mm ye kadar 1 er mm aralıklarla farklı egzoz manifold borusu çap değerinin motor performans parametrelerine etkisi incelenmiştir.

Analizlerde sağlıklı karşılaştırma yapabilmek adına sabit hava-yakıt değeri kullanılmıştır. 12.95 olan test verisi hava- yakıt karışım değeri olarak kullanılmıştır.

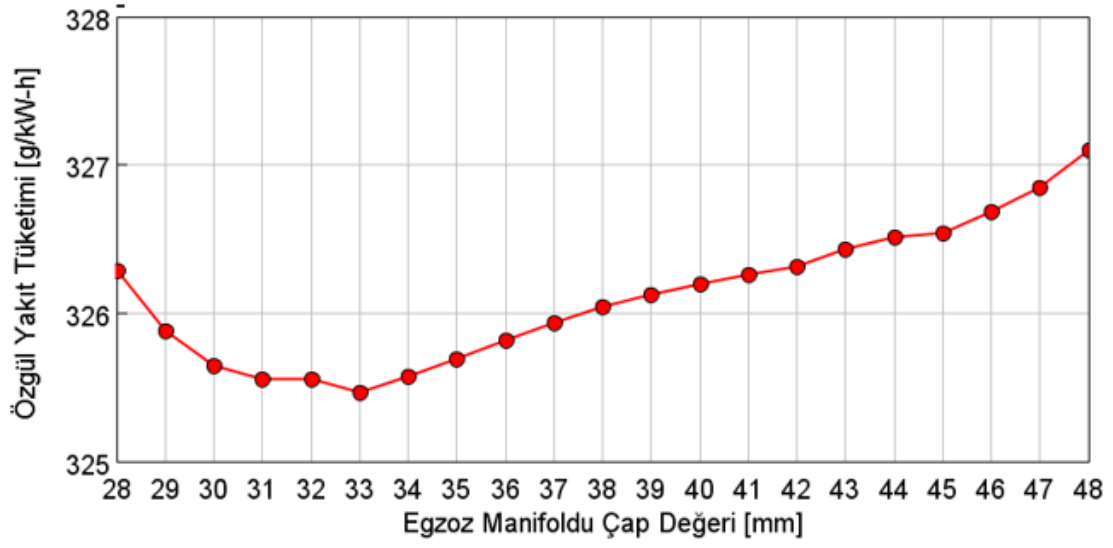
Analiz sonuçları incelendiğinde farklı çap değerlerinde aynı hava-yakıt karışım değeri kullanıldığından motorun güç ve tork değerlerinde anlamlı bir değışim elde edilmemiştir. Dört zamanlı içten yanmalı motorlarda egzoz stroğu sırasında negatif iş elde edilir. Bu duruma pompalama kaybı ismi verilmektedir. Analiz sonuçlarına göre farklı egzoz manifold boru çapı değerlerinin motorun pompalama kaybı değerini ciddi olarak etkilediğı gözlemlenmiştir. Pompalama kaybındaki farklılık sebebiyle motorun özgül yakıt tüketim değeri değışmektedir. Analiz sonuçlarına göre optimum egzoz manifold borusu çap değerinin 33 mm olduğu görülmüştür. Aynı zamanda egzoz manifold çap değeri arttıkça egzoz gaz sıcaklığı değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.



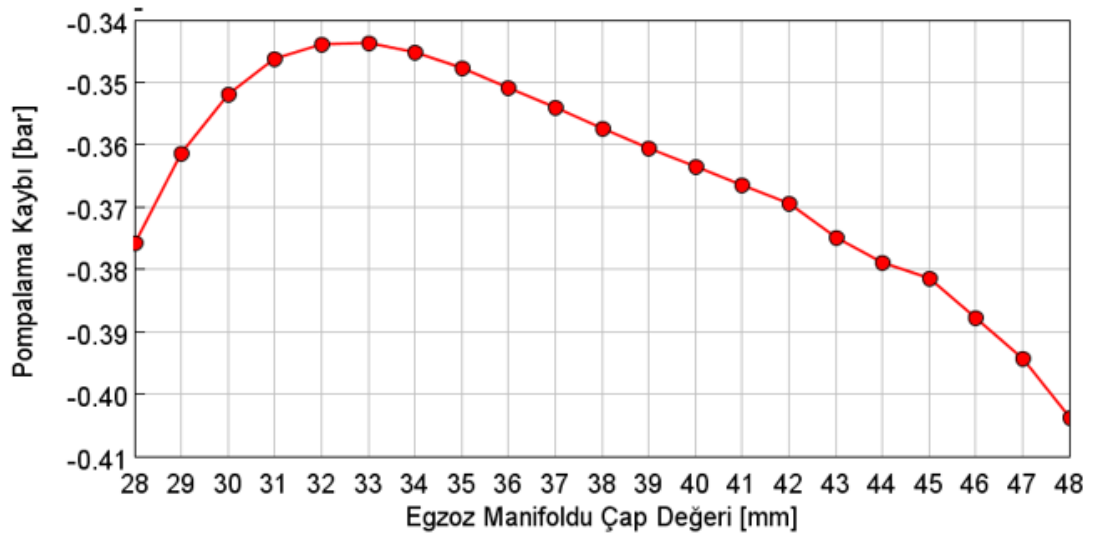
Şekil 3.24 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı güç grafiği



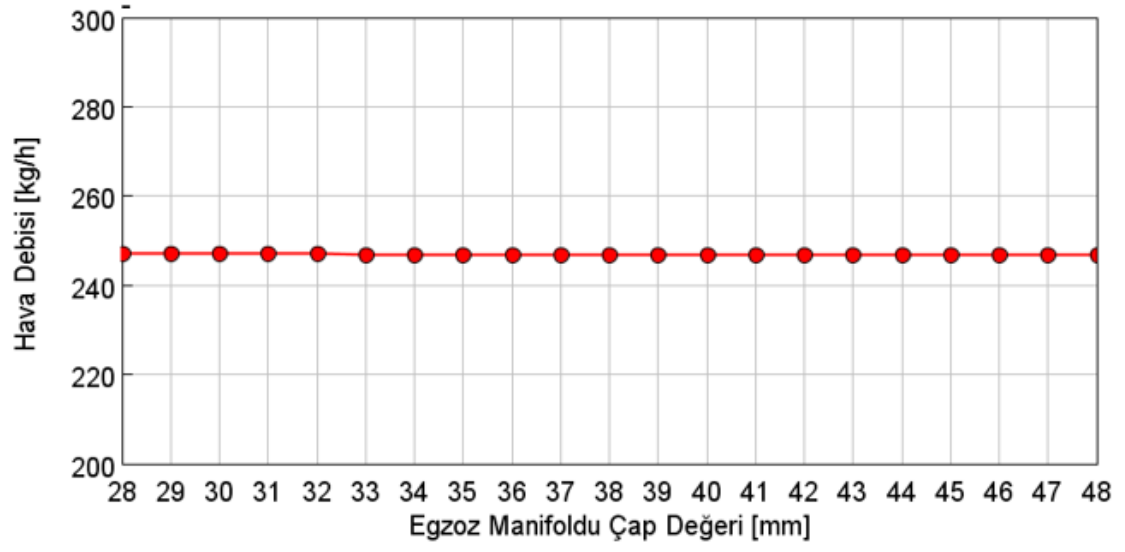
Şekil 3.25 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı tork grafiği



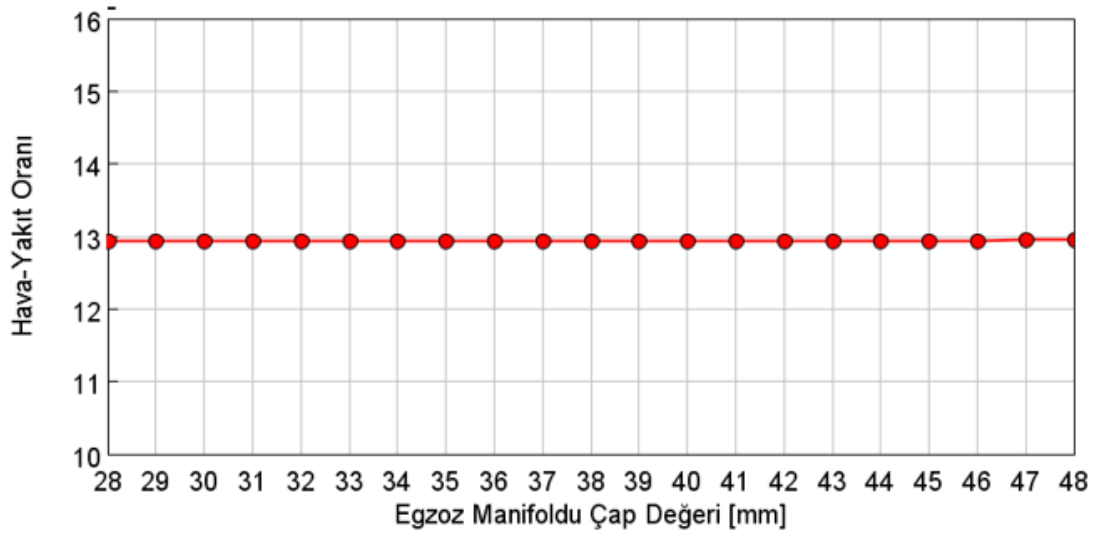
Şekil 3.26 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı özgül yakıt tüketim grafiği



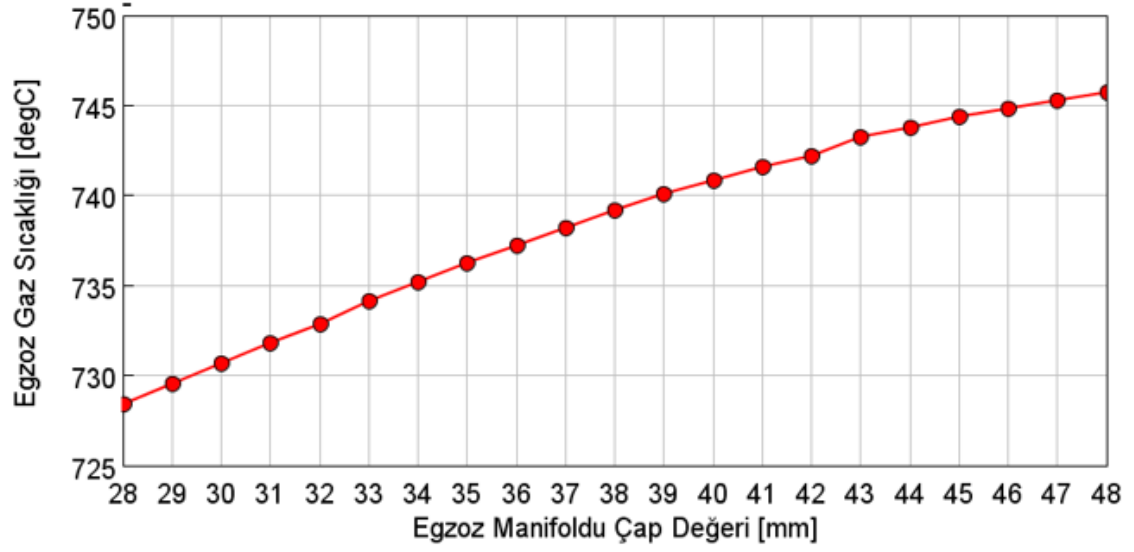
Şekil 3.27 Egzoz manifoldu çap değerine pompalama kaybı grafiği



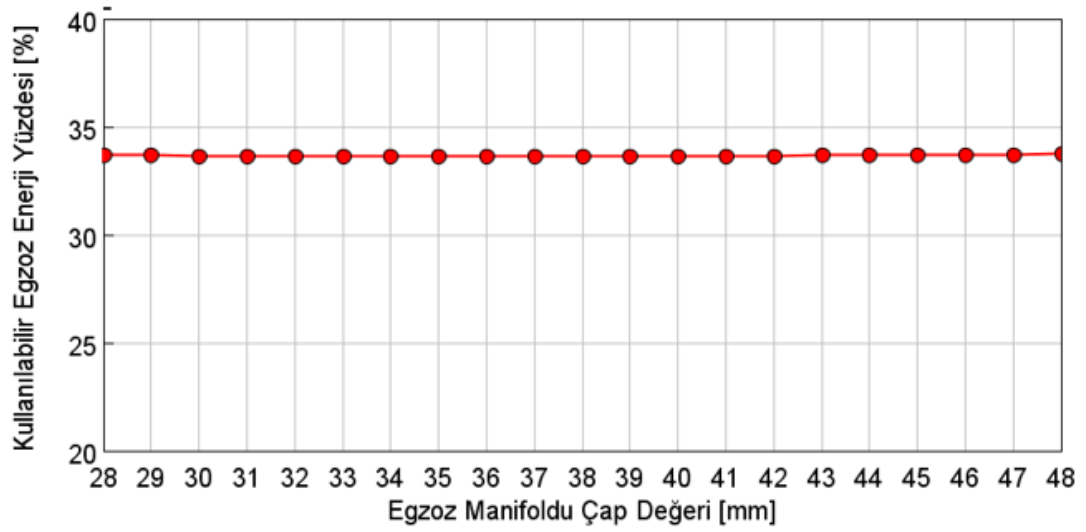
Şekil 3.28 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı hava debisi grafiği



Şekil 3.29 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı hava-yakıt oranı grafiği



Şekil 3.30 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı egzoz gaz sıcaklığı grafiği



Şekil 3.31 Egzoz manifoldu çap değerine bağlı kullanılabilir egzoz enerji yüzdesi grafiği

3.3 Kalibrasyon Haritalarının Elde Edilmesi

Motor kontrol ünitesi içine gömülü birçok kalibrasyon haritası bulunmaktadır. Bu haritalar çevre sıcaklığı, rakım, pedal pozisyonu, yol eğimi gibi birçok parametreye bağlı olarak motordaki valflerin, aktuatörlerin, yakıt miktarı veya yakıt basıncı gibi değerleri belirlerler. Günümüzde oldukça zorlayıcı olan emisyon hedefleri sebebiyle bu haritalarda oldukça karmaşık ve önemli hal almıştır. Analizi yapılan içten yanmalı motor ise görece daha basit bir kontrol sistemine sahiptir. Bu kısımda yapılan analizlerde farklı motor hızları ve farklı yük yüzdeleri için enjekte edilmesi gereken yakıt miktarı değerleri bulunmuştur.

Analizlerde hedeflenen motor torku değerine gitmek için PID sistemlerinden faydalanmıştır. PID sistemi hedeflenen tork değerini tutturan şekilde hava-yakıt karışımı değerini belirlemekte, enjektörde hava- yakıt karışımı değerini sağlayacak kadar yakıt püskürtmektedir.

Tablo 3.4 4500-6000 dev/dak motor hızı aralığı için yakıt haritası (mg/çevrim)

Tork Yüzdesi [%]/ Motor Hızı [dev/dak]	4500	5000	5500	6000
20	3.45	3.51	3.32	3.46
30	4.21	4.29	3.99	4.17
40	5.01	5.09	4.68	4.92
50	5.85	5.93	5.40	5.69
60	6.75	6.79	6.14	6.50
70	7.69	7.69	6.90	7.33
80	8.67	8.64	7.68	8.18
90	9.67	9.62	8.49	9.06
100	9.50	10.63	9.31	9.96

Tablo 3.5 6500-8000 dev/dak motor hızı aralığı için yakıt haritası (mg/çevrim)

Tork Yüzdesi [%]/ Motor Hızı [dev/dak]	6500	7000	7500	8000
20	3.69	3.86	3.86	3.85
30	4.5	4.75	4.73	4.66
40	5.35	5.66	5.62	5.51
50	6.23	6.61	6.55	6.39
60	7.15	7.61	7.51	7.3
70	8.11	8.65	8.5	8.24
80	9.09	9.72	9.53	9.21
90	10.1	10.83	10.59	10.2
100	11.13	17.68	11.68	11.22

Tablo 3.6 8500-11000 dev/dak motor hızı aralığı için yakıt haritası (mg/çevrim)

Tork Yüzdesi [%]/ Motor Hızı [dev/dak]	8500	9000	10000	11000
20	3.97	4.08	4.46	4.61
30	4.78	4.93	5.39	5.49
40	5.63	5.80	6.36	6.41
50	6.51	6.72	7.38	7.37
60	7.43	7.66	8.43	8.37
70	8.37	8.64	9.53	9.41
80	9.35	9.65	10.65	10.48
90	10.34	10.69	11.80	11.59
100	11.36	11.75	12.10	12.73

Tablo 3.7 12000-14000 dev/dak motor hızı aralığı için yakıt haritası (mg/çevrim)

Tork Yüzdesi [%]/ Motor Hızı [dev/dak]	12000	13000	14000
20	4.75	5.04	5.05
30	5.51	5.75	5.66
40	6.30	6.50	6.30
50	7.14	7.27	6.96
60	8.00	8.08	7.64
70	8.90	8.91	8.34
80	9.84	9.77	9.06
90	10.80	10.65	9.81
100	11.78	11.59	10.58

Günümüzde test sürelerini ve maliyetlerini azaltmak amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da dört silindirli, doğal hava emiş sistemine sahip, Otto prensibine bağlı olarak çalışan içten yanmalı motor bir boyutlu modelleme tekniği ile analiz edilmiştir.

İlk aşamada model kurulmuş ve test datası ile korele edilmiştir. Korelasyon motorun maksimum güç aldığı nokta 11 000 dev/dk motor hızında yapılmıştır. Sonrasında optimizasyon sonucunda elde edilen model ile farklı motor hızları analiz edilmiş ve test dataları ile karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda korelasyon seviyesinin yeterli olduğu görülmüştür.

Korelasyonu sağlanmış model kullanılarak emme manifold borularına çap ve uzun değerleri ile emme valfi ve egzoz valfi açılma zamanları değişken parametreler olarak tanımlanarak, yakıt tüketimini azaltmak amacıyla optimizasyon koşulluştır. Optimizasyon sonucunda yüzde 0.61 lik bir yakıt tüketimi iyileşmesi sağlanmıştır. Bu değer, motorun yıllardır endüstride kullanılan optimize bir ürün olduğu düşünüldüğünde kabul edilebilir bir değerdir. Sonrasında egzoz manifold çap değerine 28-48 mm aralığında, 1 mm lik artış ile analizler yapılmış ve 38 mm olan çap değerine yerine 33 mm değerinin minimum yakıt tüketimi değerini verdiği görülmüştür. Son olarak tork yüzdesi ve motor hızına bağlı atılması gereken yakıt miktarını içeren yakıt haritaları oluşturulmuştur.

Bu çalışmanın devamı olarak, daha detaylı test dataları ile modelin korelasyon seviyesi arttırılabilir. Aynı zamanda motor modeli, araç modeli ve şanzıman modeli ile entegre edilip araç seviyesi analizler ile araç performansında artış sağlanabilir.

- [1] Julien Bohbot, Christos Chryssakis, Marjorie Miche, Simulation of a 4-Cylinder Turbocharged Gasoline Direct Injection Engine Using a Direct Temporal Coupling Between a 1D Simulation Software and a 3D Combustion Code, SAE, 2006
- [2] Deppenkemper, K., Özyalcin, C., Ehrly, M., Schoenen, 1D Engine Simulation Approach for Optimizing Engine and Exhaust Aftertreatment Thermal Management for Passenger Car Diesel Engines by Means of Variable Valve Train (VVT) Applications, SAE, 2018
- [3] Henrik Dembinski, Clive Lewis, Miller-cycle on a heavy duty diesel engine. Master of Science Thesis MMK 2009:1 MFM124, 2009
- [4] F.-A. Lafossas, O. Colin, F. Le Berr and P. Menegazzi , Application of a New 1D Combustion Model to Gasoline Transient Engine Operation, SAE, 2005
- [5] Dr. Dimitrov D.1, Dr. Pirker G.1, Dr. Schnessl E. 1, Prof. Dr. Wimmer A.1, 1d Simulation as an Element Of An Efficient Methodology For Engine Concept Development, 2016
- [6] Mateos Kassa and Carrie Hall, Andrew Ickes and Thomas Wallner, Cylinder-to-Cylinder Variations in Power Production in a Dual Fuel Internal Combustion Engine Leveraging Late Intake Valve Closings, 2016
- [7] Martín Díaz, J.; Arnau Martínez, FJ.; Piqueras Cabrera, P.; Auñón García, Á, Development of an Integrated Virtual Engine Model to Simulate New Standard Testing Cycle, SAE, 2017
- [8] Prasad Shingne, Dennis Assanis and Aristotelis Babajimopoulos, Philip Keller, David Roth and Michael Becker, Turbocharger Matching for a 4-Cylinder Gasoline HCCI Engine Using 1D Engine Simulation, SAE, 2010
- [9] Wagner Roberto Trindade Rogério Gonçalves Dos Santos, Combustion modeling applied to engines using a 1D simulation code, SAE, 2016
- [10] Simeon Penchev Iliev, Developing of a 1-D Combustion Model and Study of Engine Characteristics Using Ethanol-Gasoline Blend, WCE, 2014

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

- [1] Ayberk Peker, Orkun Özener, Alp Tekin Ergenç, One dimensional engine modeling and calibration optimization: Racing car gasoline engine case, 8th International Conference on Renewable Fuels, Combustion and Fire, 2021