

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROJEN YAKITININ İÇTEN YANMALI
MOTORLARDA KULLANIMININ MODELLEME
METODUYLA ARAŞTIRILMASI

Emre EMLEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Orkun ÖZENER

Haziran, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROJEN YAKITININ İÇTEN YANMALI MOTORLARDA
KULLANIMININ MODELLEME METODUYLA
ARAŞTIRILMASI**

Emre EMLEK tarafından hazırlanan tez çalışması 05.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Mühendisliği 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

Doç. Dr. Osman Taha ŞEN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Orkun ÖZENER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Hidrojen Yakıtının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımının Modelleme Metoduyla Araştırılması” 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.

Emre EMLEK

İmza



Aileme
ve
arkadaşlarıma

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesi aşamasında yürütücülüğünü üstlenen ve tüm bilgi birikimini içtenliğiyle benimle paylaşan değerli hocam sayın Doç. Dr. Orkun ÖZENER'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmasının gerçekleşmesinde desteklerini eksik etmeyen Fırat AKAR'a emeği için teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte her zaman desteklerini eksik etmeyen Songül AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım. Tez aşamasında emeği geçen ve ismini sıralayamadığım herkese teşekkür ederim.

Emre EMLEK



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	15
1.1 İçten Yanmalı Hidrojen Motor Teknolojisi ve Geleceği	15
1.1.1 Alternatif Yakıtlar İle Hidrojen Yakıtının Karşılaştırılması.....	15
1.2 Buji Ateşlemeli Motorlarda Port Enjeksiyon Yöntemi Ve Kontrol Stratejileri.....	17
1.3 Buji Ateşlemeli Ve Hidrojen Yanmalı Motorların Yanma Karakteristiği.	22
1.4 Hidrojen Enjeksiyonlu Motorların Yanma Teknikleri.....	23
2 MATERYAL VE YÖNTEM	25
2.1 Tek Boyutlu Simülasyon Ortamı İçin Çalışma Koşullarının Belirlenmesi	25
2.2 Hidrojen Motorunun Tek Boyutlu Simülasyon Ortamında Oluşturulması	27
2.3 Model Parametrelerinin Optimize Edilerek Hidrojen Motorunun Çalıştırılması	30
2.4 Yeni İşletme Koşullarıyla Motorun Yeniden Oluşturulması	33
3 ARAŞTIRMA BULGULARI	35
3.1 Farklı Hava-Yakıt Oranlarında Gerçekleştirilen Simülasyon Sonuçları....	35
3.2 Farklı Motor Devirlerinde Gerçekleştirilen Simülasyon Sonuçları	37
3.3 Farklı Aşırı Doldurma Basınçları ve Farklı Hava-Yakıt Oranlarında Gerçekleştirilen Simülasyon Sonuçları	44
4 SONUÇ	47
KAYNAKÇA	49
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	50

SİMGE LİSTESİ

A	Adyabatik Yanmış Gaz Çekirdeği
E_a	Aktivasyon Enerjisi
R	Evrensel Gaz Sabiti
Q	Isı
α	Krank Açısı
A	Ön Üstel Faktör
c_v	Sabit Hacimde Isı Kapasitesi
c_p	Sabit Basıncıta Isı Kapasitesi
P_1	Silindir İçi Basıncı
K	Sıcaklık
ε	Sıkıştırma Oranı
m	Şekil Parametresi
a	Wiebe Parametresi
n_y	Yanma Verimi
Δa_c	Yanma Süresi
a_0	Yanma Başlangıcı
U	Yanmamış Gaz Karışımı
x	Yanmış Kütle Fraksiyonu
BL	Yanmış Gazların Termal Sınır Tabakası
W	Yanmış Gazlardan Pistona Olan Isı Transferi
Q	Yanmış Gazlardan Yanma Odası Duvarına Isı Transferi
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

AHRR	Görünür Isı Yayılım Hızı
A/F	Hava/Yakıt Oranı
BTDC	Üst Ölü Noktadan Önce
CA	Krank Açısı
CO ₂	Karbon Dioksit
CO	Karbon Monoksit
DI	Direkt Enjeksiyon
ECU	Motor Kontrol Ünitesi
HRR	Isı Yayılım Hızı
HP-DI	Yüksek Basıncılı Direkt Enjeksiyon
H ₂ ICE	Hidrojen İçten Yanmalı Motor
H ₂ O	Su
H ₂	Hidrojen
IMEP	İndike Ortalama Efektif Basıncı
K302	Kohler 302
K	Kelvin
LP-DI	Düşük Basıncılı Direkt Enjeksiyon
MAP	Emme Manifoldu Mutlak Basıncı
NO _x	Azot Oksit
PFP	Maksimum Yanma Basıncı
PFI	Port Yakıt Enjeksiyonu
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
1-D	Tek Boyutlu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1 Silindir içerisinde gerçekleşen yanma fraksiyonunun reaktif davranışı ve silindir iç mekanizması	19
Şekil 1. 2 Farklı yanma durumlarında krank açısına bağlı olarak silindir içi basıncın değişimi.....	21
Şekil 2. 1 Hidrojen motorunun AVL Boost programındaki sistemsel yapısı	27
Şekil 2. 2 AVL Boost programında kullanılan emme valf geometrisi	28
Şekil 2. 3 AVL Boost programında kullanılan egzoz valf geometrisi.....	28
Şekil 2. 4 Endüstriyel motorların sıkıştırma oranına kıyasla ortalama silindir çap ve silindir yükseklikleri	33
Şekil 3. 1 Farklı lambda değerlerinde yanma sonucu azot oksit (NO _x) oluşumu .	35
Şekil 3. 2 Farklı lambda değerlerinde yanma sonucu indike ortalama efektif basınç değerlerinin değişimi (IMEP)	36
Şekil 3. 3 Farklı lambda değerlerinde yanma sonucu silindir içi basınç değerlerinin değişimi (PFP)	36
Şekil 3. 4 Farklı motor devirlerinde yanma sonucu azot oksit (NO _x) oluşumu	37
Şekil 3. 5 1500 rpm motor devrinde yanma sonucu sıcaklık oluşumu.....	38
Şekil 3. 6 1500 rpm motor devrinde yanma sonucu silindir içi basınç (PFP) oluşumu	38
Şekil 3. 7 1500 rpm motor devrinde yanma sonucu görünür ısı salınımı oranı (AHRR).....	38
Şekil 3. 8 2000 rpm motor devrinde yanma sonucu sıcaklık oluşumu.....	39
Şekil 3. 9 2000 rpm motor devrinde yanma sonucu silindir içi basınç (PFP) oluşumu	40
Şekil 3. 10 2000 rpm motor devrinde yanma sonucu görünür ısı salınımı oranı (AHRR).....	40
Şekil 3. 11 2500 rpm motor devrinde yanma sonucu sıcaklık oluşumu.....	41
Şekil 3. 12 2500 rpm motor devrinde yanma sonucu silindir içi basınç (PFP) oluşumu.....	41
Şekil 3. 13 2500 rpm motor devrinde yanma sonucu görünür ısı salınımı oranı (AHRR).....	41
Şekil 3. 14 3000 rpm motor devrinde yanma sonucu sıcaklık oluşumu.....	42
Şekil 3. 15 3000 rpm motor devrinde yanma sonucu silindir içi basınç (PFP) oluşumu.....	43
Şekil 3. 16 3000 rpm motor devrinde yanma sonucu görünür ısı salınımı oranı (AHRR).....	43
Şekil 3. 17 Farklı lambda ve manifold hava basınçları değerlerinde yanma sonucu oluşan azot oksit (NO _x) değişimi	44

Şekil 3. 18 Farklı lambda ve manifold hava basınçları değerlerinde indike efektif ortalama basınç (IMEP) değişimi	45
Şekil 3. 19 Farklı lambda ve manifold hava basınçları değerlerinde silindir içi yanma basıncı (PFP) değişimi	46



TABLO LİSTESİ

Tablo 1. 1 İçten yanmalı motor yakıtları için benzin, dizel ve hidrojen yakıtının özelliklerinin karşılaştırılması.....	16
Tablo 2. 1 Referans alınan ve modellenen motorun teknik özellikleri	26
Tablo 2. 2 İndike ortalama efektif basınç (IMEP) sonuçlarının doğrulanması.....	31
Tablo 2. 3 Silindir içi yanma sonucu sıcaklık sonuçlarının doğrulanması	31
Tablo 2. 4 Silindir içi yanma basıncı (PFP) sonuçlarının doğrulanması.....	32
Tablo 2. 5 Azot oksit (NOx) emisyonları sonuçlarının doğrulanması	32
Tablo 2. 6 Endüstriyel araştırma sonucu modellenen motorun teknik özellikleri ve çalışma koşulları	34

Hidrojen Yakıtının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımının Modelleme Metoduyla Araştırılması

Emre EMLEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Orkun ÖZENER

Tez çalışmasında, hidrojen yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda harici aşırı doldurmanın silindir içi yanma, performans fenomenleri ve çevre kirliliği faktörleri üzerindeki etkilerini incelemek için tek boyutlu motor modelleme metodu kullanılmıştır. Model, tek silindirli port enjeksiyonlu motorun çalışma koşulları için optimize edilmiştir. İlk olarak, tek boyutlu (1-D) içten yanmalı hidrojen motor (H2ICE) modeli AVL Boost ortamında oluşturuldu ve literatürdeki deneysel verilerle doğrulandı. Daha sonra, karakteristik parametreler çıkarıldı. Endüstride kullanılan 4 silindirli motorların silindir çapı, yüksekliği ve diğer ilgili teknik ölçümleri için kapsamlı bir araştırma yapıldı. Bu araştırmadan elde edilen verilerle model değiştirildi ve geliştirildi. Son olarak, bu yeni teknik veriler ve doğrulanan yanma modeli özellikleriyle tek boyutlu (1-D) model çalıştırılarak sonuçlar değerlendirildi. Bu çalışmanın sonuçları incelendiğinde, hidrojen yanmasının düşük güç yoğunluğunu ve termal verimliliğini artırmak için lambdanın azaltılması gerekliliğini göstermiştir. Hava giriş basıncını ve hacimsel verimliliği artıran harici süper şarj sistemlerinin kullanılmasıyla güç yoğunluğunun önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Takviye basıncı arttıkça silindir içi basınç ve ortalama gaz sıcaklığı da artmıştır. Sıcaklık ve basınç fenomenlerinin artışının bir sonucu olarak

nitrojen oksit emisyonları artmıştır. Hava-yakıt oranı arttırıldığında, stokiyometrik koşullar altında çalışan bir motorla aynı performansı üretmek için ilave bir hava kütle akışının gerekli olduğu gözlemlenmiştir. Hava-yakıt oranı arttıkça silindir içi termal yükün ve nitrojen oksit emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir. Azot oksit oranı, yaklaşık olarak 1.7-1.8 lambda üzerinde ihmal edilebilir seviyelere düştüğü tespit edilmiştir. Araştırma sonuçları, bu çalışma koşulları altında son işlem sistemlerinin nitrojen oksit indirgeyicilerin kullanılmasını gerektirmediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: İçten yanmalı hidrojen motoru, aşırı doldurma basıncı, nitrojen oksit emisyonları, hava-yakıt oranı.



Investigation Of The Useage Of Hydrogen Fuel In Internal Combustion Engines Utilize Modelling Method

Emre EMLEK

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Orkun ÖZENER

In this paper, the 1–D engine modeling method is used to examine the effects of external supercharging on in-cylinder combustion, performance phenomena, and environmental pollution factors in hydrogen-fueled spark ignition engines (H2ICE). The model is optimized for the operating conditions of a single-cylinder port injection engine. First, the 1-D internal combustion hydrogen engine (H2ICE) model was built in the AVL Boost Environment and it was validated with experimental data from the literature. Then, characteristic parameters were extracted. An extensive survey for cylinder bore, stroke, and other related technical measures of 4-cylinder engines used in the industry was conducted. Then the model was modified and improved with the data obtained from this survey. Finally, the 1-D model was run with this new technical data and the verified combustion model characteristics, and the results were assessed. The results of this study showed that the lambda should be decreased to improve the low power density and thermal efficiency of hydrogen combustion. It has been observed that power density improves significantly with the use of external supercharging systems, which increase the air intake pressure and volumetric efficiency. In-cylinder pressure and average gas temperature both rose as boost pressure increased. Emissions of nitrogen oxide have increased as a result of the increase in temperature and pressure phenomena. Observations have shown that as the air-fuel ratio increases, an

additional airflow rate is necessary to maintain the same performance as an engine operating under stoichiometric conditions. It was found that as the air-fuel ratio increased, the in-cylinder thermal load and nitrogen oxide emissions decreased. The nitrogen oxide rate has been determined to be operating at negligible levels above an approximately 1.7-1.8 lambda value. The results of the investigation indicate that nitrogen oxide reductants are not necessary for utilization in after-treatment systems in these operating conditions.

Keywords: Hydrogen internal combustion engine, boosting pressure, nox emissions, air-fuel ratio.



1.1 İçten Yanmalı Hidrojen Motor Teknolojisi ve Geleceği

İklim değişikliği, yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik ulaşım araçlarının geliştirilmesi için temel yapıtaşlarındandır. Otomotiv endüstrisi, enerji tüketimini azaltmak ve sera gazlarıyla oluşan emisyon düzeyini indirmek için stratejik çözümler üretmektedir. Hidrojenin çeşitli kaynaklardan üretilbilir olması içten yanmalı motorlar ve yakıt üretimi için çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Hidrojen enerjisinin üretimi, depolanması, dağıtımı ve kullanımı hakkında zorluklar olmasına rağmen mevcut çözümler arasında tutarlı bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Günümüz endüstrisinin enerji kaynakları, alternatif yakıt arayışları içerisinde. Bunun en önemli nedenlerinden birisi emisyon standartlarının iyileştirilmesi ve daha çevreci limitlerle sınırlandırılmasıdır. İçten yanmalı motorlardaki yakıt tercihleri artan fiyatlar ve azalan rezervler dolayısıyla yeni teknolojilerin gelişmesine ve üretilmesine zemin hazırlamıştır.

Geliştirilebilecek alternatif yakıtların içten yanmalı motorların performansını artırması veya mevcut performans değerlerini olumlu yönde etkileyerek egzoz emisyonlarını azaltması beklenmektedir. Ayrıca hidrojen üretiminin, çeşitli hidrokarbonlar kullanılarak üretilbilir bir yapısı vardır. Bu sayede kaynak çeşitliliği sağlama potansiyeline sahiptir. Üretilcek alternatif yakıtların otomotiv endüstrisinde maliyet ve ulaşım olarak makul seçenekler sunması, endüstride teknolojik geçişi hızlandırabilecek etkenler olarak görülmektedir.

1.1.1 Alternatif Yakıtlar İle Hidrojen Yakıtının Karşılaştırılması

Hidrojenin nötr CO₂ hareketliliğine önemli bir katkı yapma potansiyeli, hidrojen yakıtını oldukça kullanabilir kılmaktadır. Global dünyada artan emisyon kirliliğine karşı büyük avantajlara sahiptir. Hidrojenin yüksek bir kalorifik değeri (120 MJ/kg) olmasına rağmen, düşük yoğunluğa (ortam koşullarında 0,09 kg/m³) sahiptir. Görece düşük yoğunluğu, harici karışım oluşumu olan konseptler için nispeten düşük güç yoğunluğuna sebep olmaktadır. Ulaşılabilir özgül tork ve güç sınırlı seviyelere çıkabilmektedir. Dahili bir karışım oluşumunun (H₂ direkt

enjeksiyonu) kullanımı, özellikle yüksek H₂ kütle akışları gerçekleştirilebiliyorsa önemli iyileştirmelere neden olmaktadır. Çok yüksek laminar alev hızıyla birlikte çok geniş ateşleme limitleri (hacimce %4 ile %76), motor çıkışında en düşük NO_x emisyonları elde edilmesine olanak sağlar. Aynı zamanda verimli, homojen karışım ve yakıtça fakir bir çalışma ortamı oluşmaktadır. Doğrudan enjeksiyonlu (DI) ve turbo şarjlı bir benzinli motor, binek otomobil ve hafif ticari araçlar için bir H₂ içten yanmalı motorun türetilmesi ve geliştirilmesi için tercih edilen motor temeli olabilmektedir. Hidrojen kimyasal yapısı gereğince sıvı ve gaz fazlarında bulunabilmektedir. Hidrojen gaz fazından sıvı fazına göre 14 kat daha hafif bir elementtir. Hidrojenin içten yanmalı motorlardaki kullanımına baktığımızda en büyük avantajlarının başında tutuşma sınırının çok geniş olmasıyla birlikte karışım oranının mümkün olan limitler dahilinde daha esnek olduğu görülmektedir. Hidrojenin hava içindeki oranının ortalama %4.1 ile %74.9 oranları arasında tutuşabilmektedir. Hidrojenin hava fazlalık katsayısı geniş ve yüksek (ortalama 0.1 ile 4.3) bir yayılım sağlayabilme özelliği sunmaktadır. Hidrojenin alt ısı değeri kütsel olarak diğer alternatif yakıt türlerine kıyasla yüksek olmasına rağmen hacimsel olarak kıyasladığımızda ise alt ısı değerinin düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 1. 1 İçten yanmalı motor yakıtları için benzin, dizel ve hidrojen yakıtının özelliklerinin karşılaştırılması

Özellik	Benzin	Dizel	Hidrojen
Yoğunluk (kg/m ³)	730-780	820-845	0.084
Alt Isıl Değeri (MJ/kg)	43.5	42.5	120
Stokiyometrik hava yakıt oranı (A/F)	14.7	14.5	34.3
Minimum ateşleme enerjisi (mJ)	0.24	0.24	0.02
Ateşleme limiti oranları (lambda)	0.5-1.3	0.4-1.4	0.2-10
Laminar alev hızı (cm/s)	40-80	40-80	200
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C)	210-280	280-470	500

Hidrojen ve benzin yanma ürünleri olarak karşılaştırıldığında, kimyasal olarak hidrojen yanmasının sonucunda su buharı (H₂O) oluşuyorken, benzin yanmasının sonucunda su buharı (H₂O), sıcaklık ve basınçlara bağlı azot oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO) ve karbon dioksit (CO₂) oluşumunun yanı sıra farklı kirleticiler de oluşmaktadır. Hidrojenin yüksek yanma sıcaklıklarında, azot oksit (NO_x) oluşumu görülmektedir. Benzin alev hızının daha yavaş olmasından dolayı yanma süreci daha uzun sürmesine rağmen sahip olduğu enerjiden dolayı hidrojene kıyasla daha fazla enerji içeriğinden dolayı daha yüksek güç sağlayabilmektedir. Hidrojenin hızlı tutuşma özelliği sayesinde benzine göre daha verimli yanma olasılığı oluşmaktadır.

Hidrojenin düşük enerji yoğunluğu nedeniyle daha performansı yüksek yakıt sistemlerine gereksinim duymaktadır. Benzin yanmasında ise yüksek enerji yoğunluğu sayesinde, yanma sonucu yüksek performans ve uzun menzil opsiyonu sağlayabilmektedir. Hidrojenin moleküler ağırlığının düşük olmasından dolayı taşımada hacim sorunları yaratması muhtemel görünmektedir. Bu durumda alternatif olarak otomotiv endüstrisinde sıvılaştırma veya gazın sıkıştırılması yoluyla hacimsel olarak depolanma ihtimali üzerinde çalışılmaktadır. Bu durum güvenlik ve maliyet sorununu yanında getirmektedir. Benzin yakıtının depolanma ve taşıma maliyeti olarak hidrojene kıyasla günümüz teknoloji koşullarında daha avantajlı olduğu öngörülmektedir. Hidrojen yanmasının aynı zamanda yüksek alev hızı nedeniyle geri tepme riski ve ön ateşleme riski arttığından, yanma parametreleri üzerine ekstra bir kontrol stratejisi gerektirmektedir. Bu sebepten motor konsepti olarak daha kompleks yapıların gereksinimi oluşabilmektedir.

Hidrojenin hafif ve ağır ticari uygulamaları ile arazi uygulamaları için uygun olması beklenmektedir, ancak araştırmaların çoğu öncelikle küçük motorlara ve özellikle kolayca uyarlanabilen buji ateşlemeli motorlara odaklanmaktadır. Bununla birlikte ilk yatırım maliyetinin düşük olması ve motorun teknik yönergelere yönelik uygunluğundan dolayı içten yanmalı hidrojen motorlarının adaptasyon sürecinin hızlı olması öngörülmektedir.

1.2 Buji Ateşlemeli Motorlarda Port Enjeksiyon Yöntemi Ve Kontrol Stratejileri

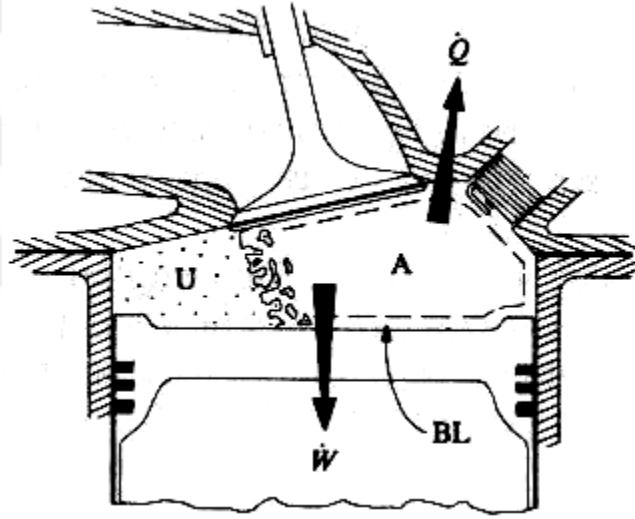
Konvansiyonel çevrimli içten yanmalı motorda birden çok çalışma sistemi ve yanma stratejileri vardır. Stratejik farklılıklar aynı zamanda motorlara mekanik

gereksinimler getirmekte ve sistem çeşitliliği oluşturmaktadır. Kontrol yöntemleri ise motorun çalışma koşullarına göre ayarlanarak emisyon, verim ve yakıt ekonomisi gibi konularda etkili olmaktadır. Port enjeksiyonlu ve buji ateşlemeli dört zamanlı motorlarda geleneksel yanma, egzoz, emme ve sıkıştırma zamanları bulunur. Bu zamanlamalar emme ve egzoz valflerinin açılıp kapanması ile başlar ve sonlandırılırlar. Port enjeksiyonlu motorlarda enjeksiyon süreci, emme zamanında yapılarak silindir içerisine havayla karışmış yakıt gönderme prensibine dayanmaktadır. Silindir içerisindeki yanma olayı incelediğinde temel olarak emme zamanlaması, hava filtresinden geçen temiz havanın emme manifoldu aracılığıyla silindir içine doğrudan yönlendirilen homojen hava-yakıt karışımının oluşturulduğu süreci kapsamaktadır. Emme valfinin açılmasıyla birlikte emme portuna alınan havaya yakıt enjeksiyonu yapılarak, homojen bir hava-yakıt karışımı elde edilmeye çalışılır. Porta enjekte edilen yakıtın buharlaşma oranı, homojen karışım olma durumunu iyileştirmektedir. Homojen karışım oluşumu port enjeksiyonlu motorlarda, silindir içerisindeki yanmayı doğrudan etkileyen önemli bir fenomendir. Performans ve yakıt ekonomisi gibi çalışma modlarına göre hava-yakıt oranı belirlenmekte olup yakıtça zengin veya yakıtça fakir stratejileri ortaya çıkmaktadır.

Emme valfinin kapanmasıyla emme zamanlaması tamamlanıp sıkıştırma zamanlamasına geçilmektedir. Sıkıştırma zamanlamasında pistonun silindir içerisindeki doğrusal hareketi ile aşağı yukarı hareket etmesi, silindir içine alınan hava-yakıt karışımını sıkıştırmaktadır. Alınan hava-yakıt karışımı, üst ölü noktaya (ÜÖN) yaklaşıldığında basıncının artmasından dolayı silindir içi sıcaklığını da arttırmaktadır. Sıkıştırma oranı, silindir içerisinde gerçekleşen sıcaklık ve basınç değişimlerini etkileyerek motor performansına etki etmektedir. Aynı doğrultuda yanma verimini de etkilemektedir.

Hava-yakıt karışımının üst ölü noktaya (ÜÖN) çıkarılarak sıkıştırıldıktan sonra buji tarafından bu karışımın ateşlenerek yanmasıyla sıkıştırma zamanlaması tamamlanıp, yanma zamanlamasına geçiş yapılmaktadır. Güç üretimi için sıkıştırılan yakıtın tutuşturulmasıyla, sıcak ve basınçlı karışımın yanma süreci başlamaktadır. Yanma prosesi bujinin kıvılcım oluşturmasıyla birlikte, homojen karışımın tutuşmasını sağlamaktadır. Buji kıvılcımının maksimize olması yanmanın potansiyelini ve gücünü arttırarak, homojen karışımdan maksimum

enerji elde edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bujinin ateşleme zamanlaması (ateşleme avansı) maksimum silindir içi basıncı ve silindir içi termal yükü doğrudan etkileyen fenomenlerin başında gelmektedir. Alevin aniden tutuşmasıyla yanmaya başlayan karışım aşamalı bir şekilde silindir içerisinde ilerlemektedir. Aynı zamanda ateşleme avansı, tutuşma sonrası oluşan enerjinin silindir duvarlarına ulaşma zamanını da etkilemekte ve oluşan gücün efektif bir şekilde kullanılmasını etkilemektedir. Kullanılan yakıtın kimyasal içeriğine bağlı olarak alev oluşumu ve yayılma karakteristiği, doğrudan alevin yayılma hızını etkilediği için yanmış gazın silindir yüzeyine ulaşp enerjisini kaybetme sürecini etkilemektedir. Bu sebepten ateşleme avansı silindir içerisinde oluşacak güç yoğunluğu için optimize edilmektedir.



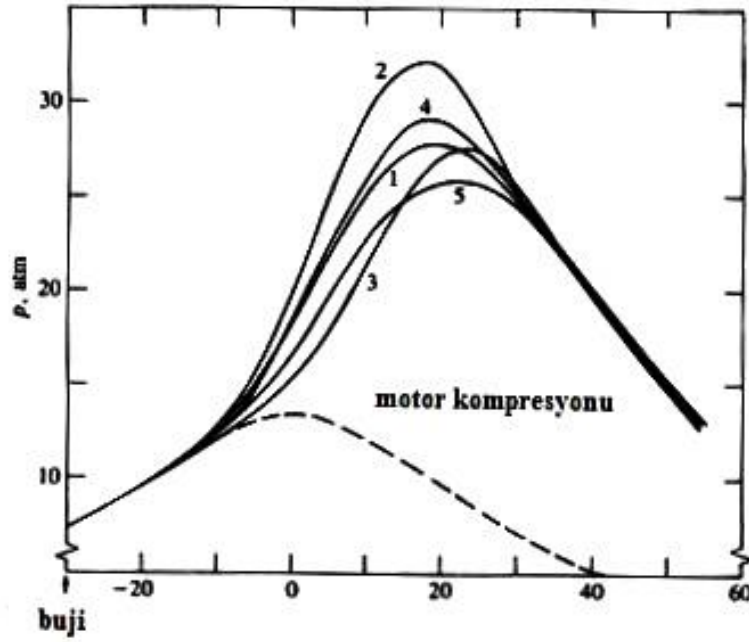
Şekil 1. 1 Silindir içerisinde gerçekleşen yanma fraksiyonunun reaktif davranışı ve silindir iç mekanizması [1]

Yanma sonucunda pistonun üst ölü noktayı geçmesiyle birlikte piston aşağı yönde hareketine başlamaktadır. Port enjeksiyonlu stratejilerde ateşleme genellikle üst ölü noktadan önce yapıldığı için yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle piston itilir ve motorun güç ürettiği süreç hazırlanmış olur. Yanma sürecinde açığa çıkan enerjiyle birlikte ısı transferinin piston ve silindir içerisindeki davranışı Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Burada yanmış gaz bölgesini A alanıyla, yanmamış ve silindir içerisindeki bujiden uzak olan yanmamış karışım bölgesi U, yanmış gazlardan oluşan enerjisini pistonu olan ısı transferi W ile, yanmış gazlardan oluşan enerjinin

silindir duvarlarına olan ısı transferi Q ile ve yanmış gazların termal iletileme sınır tabakasını da BL ile gösterilmektedir [1].

Pistonun itilmesiyle birlikte genişleme süreci başlatılarak, ısı enerji hareket enerjisine dönüşmektedir. Bu sürecin sonunda pistonun tekrar yukarı hareketiyle birlikte egzoz zamanlaması başlar ve egzoz valfinin de açılmasıyla yanmış gazların silindir içerisinden uzaklaştırılması sağlamaktadır. Egzoz valfinin açılmasıyla yanma sonrası oluşan gaz ve partikül maddeler emisyon indirgeyici komponentler aracılığıyla minimum seviyelere düşürülmeye çalışılmaktadır. Egzoz zamanlaması sonunda silindir içerisindeki yanmış gazlar uzaklaştırıldığında, silindir içerisi taze hava-yakıt dolgusu için hazır hale getirilmektedir.

Modernize port yakıt enjeksiyonlu motorlar bir takım kontrol mekanizmalarıyla donatılmaktadır. Bunlardan en önemlisi motor kontrol üniteleridir (ECU). Motor kontrol üniteleri yanma sürecini çeşitli sensörler aracılığıyla takip ederek, parametrik ölçümler gerçekleştirir ve kontrol stratejilerini yönetmektedirler. Sistemde bulunan sensörler vasıtasıyla silindire alınan hava miktarı, hava basıncı, motor devri, motor yükü, hava-yakıt oranı, gaz keleşi konumu, kam ve krank mili konum verileri, motor su sıcaklık verileri ve egzoz sıcaklıkları yanı sıra birçok parametrik veri takip edilir. Motor kontrol ünitelerinin stratejileri belirlenirken hava-yakıt oranı, yakıt enjeksiyon avansı, enjektör açık kalma süresine bağı yakıt miktarı, enjektör yakıt basıncı ve buji ateşleme avansı gibi önemli süreçler değerlendirilmektedir. Bu süreç doğrudan yanma verimi ve motor performansını etkilemektedir. Motor kontrol ünitesi port enjeksiyonlu motorlarda, püskürtme stratejisi motor çalışma koşuluna göre ayarlanır. Motorun ısınma süreci ve soğuk çalıştırma koşulları, yakıt enjeksiyon zamanlamalarının değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Enjeksiyon kontrolü aynı zamanda tam yük durumlarında, daha ekonomik bölgelerde, hızlanma anlarında ve rölantide motoru çalıştırırken farklı stratejilerle yönetilmektedir. Püskürtülen yakıt basıncı aynı zamanda yüksek basınçlara ulaşıldığında ince bir atomik yapı oluşturabildiğinden dolayı hava-yakıt karışımının homojenize olmasına katkı sağlayarak yanma performansını arttırabilmektedir. Motor kontrol ünitesinin bu sistemleri kontrol etmesi, verimli yanmaya ve yüksek performans sonuçları almaya önemli katkılar sağlamaktadır.



Şekil 1. 2 Farklı yanma durumlarında krank açısına bağlı olarak silindir içi basıncın değişimi [1]

Yanma sürecinde oluşan basınç eğrilerinin davranışı ve farklılığı, alev ilerlemesinin yanma bölgesinde oluşturmuş olduğu önemli sonuçlarından biridir. Çevrimler farklılaşmaya başladığında alev ilerlemesinde etki oluşturacak olan buji ateşlemesi motor kompresyonunu değiştirmektedir. Buji tırnaklarında oluşacak kıvılcımın zamanı ve yönelimi, alevin genişlemesiyle birlikte ilk tutuşma hareketi için önem kazandırmaktadır. Hava-yakıt karışımının buji yardımıyla tutuşturulmasıyla aniden ve yüksek hızlarla patlayarak tutuşmasından dolayı kontrolsüz yanmalar oluşabilmektedir. Alev cephesinin tutuşma sonrasında silindir içinde yanmamış hava-yakıt karışım alanının, yüksek sıcaklık ve basınç mertebelerine çıktığında kendiliğinden tutuşmaya başlatarak yüksek frekanslarda silindir duvarına çarpılmaktadırlar. Bu durum vuruntu oluşturarak motorun birçok mekanik aksamına zarar vermekte ve yanma performansını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca vuruntu oluşumu, anormal yanmalardan dolayı azot oksit (NOx) ve diğer kirleticilerin oranının artışına neden olmaktadır. Anormal yanmalar aynı zamanda yanma sonucu oluşan sıcak yüzeylerin hava-yakıt karışımını beklenmedik bir şekilde tutuşmasıyla, kararsız yüzey yanmaları oluşturabilmektedir. Kontrolsüz yüzey ateşlemeleriyle birlikte motorda geri tepmelere bağlı titreşimler ve dengesiz enerji üretimi süreci tetiklenmiş olur. Bu duruma ek olarak yüksek oktanlı yakıtlar, sahip oldukları yüksek basınç ve sıcaklık altındaki göstermiş olduğu dirençli yapısı ile

kontROLSÜZ yanmaları daha kontrol edilebilir bir etken haline getirebilmektedir. Oktan sayısı yakıtın kendiliğinden tutuşma davranışını değiştirebilmektedir. Bu sayede yüksek oktanlı yakıt enjeksiyonu ile kontROLSÜZ yanmalar sonu oluşacak motor kompresyon sapmalarının önüne geçilir ve kararlı bir yanma sonucu elde edilebilmektedir. Hidrojen yanmasının kimyası gereği erken tutuşma veya yüzey tutuşması için önlemler alınması, alevin kontROLSÜZ yanmasını engelleyebilmekte ve yanma verimini arttırabilmektedir.

1.3 Buji Ateşlemeli Ve Hidrojen Yanmalı Motorların Yanma Karakteristiği

Benzin ve hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlar temelde benzer konfigürasyonlara sahip olsalar da yanma karakteristiğine göre değerlendirildiğinde bazı farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu duruma neden olan faktör ise kimyasal ve fiziksel olarak benzin ile hidrojenin önemli farklılıklara sahip olmasıdır. Hidrojen yanma karakteristiğinin benzine kıyasla daha geniş yanma aralığına sahip olması, hidrojen yakıtının fakir ve zengin çalışma koşullarında kolaylıklar sağlamaktadır [2].

Bu potansiyel sayesinde farklı motor yüklerinde ve bölgelerinde kontrol edilebilirliği arttırmak mümkündür. Benzinli stratejilere kıyasla daha fakir hava-yakıt enjeksiyon bölgelerinde çalışabilen hidrojen yakıtı, egzoz sonu kirleticilerinin oluşması açısından da avantaj sağlamaktadır. Hidrojenin önemli avantajlarından biri de teorik olarak düşük hava-yakıt karışım oranında da ideal koşullarda çalışabilmesidir. Hidrojenin yanma reaksiyonu sonucunda oluşan laminar alev hızı diğer yakıtlara göre çok yüksektir. Bu sayede hızlı yanma reaksiyonlarını gerçekleştirebilmektedir. Yanma hızının yüksek olması aynı zamanda içten yanmalı motoru yüksek hızlarda çalıştırabilme kabiliyeti sunmaktadır. Yakıtlarda tutuşma enerjisi yanmanın başlama zamanını önemli ölçüde belirlemektedir. Bu prosesi en verimli yanma sürecine çevirmek için ateşleme zamanlaması yakıtın tutuşma özelliği dikkate alınarak yapılmaktadır. Hidrojenin sahip olduğu düşük tutuşma enerjisi optimum yanma için olanak sağlarken aynı zamanda vuruntu riski oluşturabilmektedir [3][4].

Vuruntu oluşumundan dolayı kontrol edilmesi gereken bir süreçtir. Hidrojen yakıtının başlıca içten yanmalı ve buji ateşlemeli motorlarda kullanımıyla ilgili işletme şartlarını yanma hızı, yanma süresi, yanma ve tutuşma enerjisi ile birlikte

oluşacak enerjiyi büyük oranda belirleyen yüksek alt ısı değeri önemli ölçüde etkilemekte ve belirlemektedir.

1.4 Hidrojen Enjeksiyonlu Motorların Yanma Teknikleri

Hidrojen yanma öncesinde silindir içine farklı yöntemlerle alınabilmektedir. Bu yöntemler termal yanmayı etkilemekte ve yanma fraksiyonlarında farklılar oluşturmaktadır. Temelde yakıt enjeksiyonu porta püskürtme, silindir içerisine basınçlı püskürtme ve silindir içerisine normal basınçta püskürtme yaparak hava-yakıt karışımı sağlayan tekniklerden oluşur. Bu tekniklerin uygulama açısından değerlendirildiğinde maliyet ve performans etkileri farklıdır.

Port yakıt enjeksiyon (PFI) sistemleri kolay entegrasyonu sayesinde maliyet açısından avantajlı olmakla birlikte aynı zamanda homojen hava-yakıt karışımı oluşumunda da avantajlara sahiptir. Silindir içerisine alınan hava-yakıt karışımı, emme portundan silindir içerisine gelene kadar geçen zaman aralığında homojenize olma olasılığı artmakta ve bu durum yanma sonucu verimi pozitif yönde etkilemektedir. Diğer yöntemlere kıyasla nispeten daha düşük güçler üretilmektedir.

Yakıtın düşük basınçta silindir odasına doğrudan enjekte (LP-DI) edildiği yöntemlerde, yakıt hava karışımı doğrudan silindir içerisinde sıkışma zamanlamasında elde edildiği için daha yüksek verim ve geniş güç aralıklarına çıkma imkânı verebilmektedir. Enjeksiyon zamanlaması daha iyi kontrol edilebildiğinden dolayı emisyon oluşumu açısından ideal sistemler arasındadır. Yüksek ve düşük basınçta silindir içerisine yapılan enjeksiyon sistemleri port yakıt enjeksiyonlarına göre daha maliyetli olabilmektedir [5].

Yakıtın yüksek basınçta silindir odasına doğrudan enjekte (HP-DI) edilmesi, yakıtın atomize olmasıyla birlikte sağlanacak homojen karışım sayesinde gücü doğrudan arttırabilmektedir. Reaksiyon gelişimi yüksek basınçlı direkt enjeksiyon sistemlerinde daha hızlı gerçekleşmektedir. Yüksek basınçlı enjektörler sayesinde silindir içi sıcaklıklar daha kontrollü gerçekleştirilebilir, bu durumda doğrudan yanma sonu kirleticileri azaltmak için uygun koşullar sağlamaktadır [5].

Hidrojen yanmasının enjeksiyon yöntemleri haricinde kimyasal özelliklerinden dolayı oluşturduğu zorlukların başında yanma sonucu oluşan ani ve yüksek

sıcaklıkların kararsız yanmalar oluşturması gelmektedir. Bu durum sıkıştırma oranını ve yüksek güç bölgelerine motoru çalıştırmayı kısıtlamaktadır. Emme valfinin açılmasıyla hava-yakıt karışımının silindir içine girmeden tutuştuğu durumlarda sistem hasarları oluşabilme riski artmaktadır [6].



2 MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Tek Boyutlu Simülasyon Ortamı İçin Çalışma Koşullarının Belirlenmesi

Gelişmekte olan H2 teknolojilerine hızlı adaptasyon sağlayabilen benzinli motor yanma stratejisinin, hidrojen yanmasıyla karakterizasyonunu sağlanarak konsept çalışmalarını analiz etmek için tez kapsamında tek boyutlu simülasyon ortamı kullanılmıştır. Buji ateşlemeli bir motorun harici aşırı doldurma sistemleri uygulamasıyla birlikte farklı karışım konsantrasyonları kullanılarak yanma öncesi fonksiyonları ve silindir içi yanma parametreleri simülasyon programında model bazlı çalıştırılarak geliştirilmiştir.

Tez çalışmasında, simülasyon ortamında tek silindirli içten yanmalı ve konvansiyonel koşullarda çalışan port enjeksiyon bir motor, AVL Boost programında modellenmiştir. Literatürdeki açık kaynak referans alınarak ve parametreleri fiziksel koşullarla doğrulanarak yanma parametreleri çıkarılmıştır. Referans kaynakta K302 model, maksimum 3600 devir çevirebilen, 4 zamanlı, tek silindirli ve port enjeksiyonlu bir motor kullanılmıştır. Motor maksimum 8.8 kW güç ve maksimum 25 Nm tork verebilmektedir [7].

Konvansiyonel koşullarda çalışan port enjeksiyon bir motor AVL Boost programında modellenmiştir. Ardından literatürdeki açık kaynak referans kullanılarak oluşturulan tek boyutlu simülasyon modeli çıktıları ile referans alınan kaynaktaki performans verileri karşılaştırılmış ve doğrulanmaya çalışılmıştır. İlgili referans çalışmada yapılan deneydeki motor işletme parametreleri simülasyona girdi olarak tanımlanarak simülasyonun çıktıları incelenmiştir [8].

Referans çalışma ile karşılaştırılmış ve elde edilen hata oranları, modelleme esnasında kullanılan alt model tiplerinin ve bu modellerdeki karakteristik parametrelerin değiştirilmesiyle (wiebe modeli yanma modeli değişim karakterizasyonu, ısı transfer modeli tipleri vb.) optimize edilmiştir. Aynı zamanda kullanılan alt modellerdeki korelasyon katsayılarının ayarlanmasıyla (emisyon korelasyon katsayısı, ısı transfer korelasyon katsayıları vb.) optimizasyon

genişletilmiştir. Bu noktada temel amaç çalışmanın ilerleyen aşamalarında kullanılacak olan benzer çap ve stroktaki motorların modellenmesine zemin hazırlamaktır. Performans ve emisyon çıktılarının analizinde kullanılacak alt modellerin ve karakteristik parametreleri bu kapsamda belirlenmiştir.

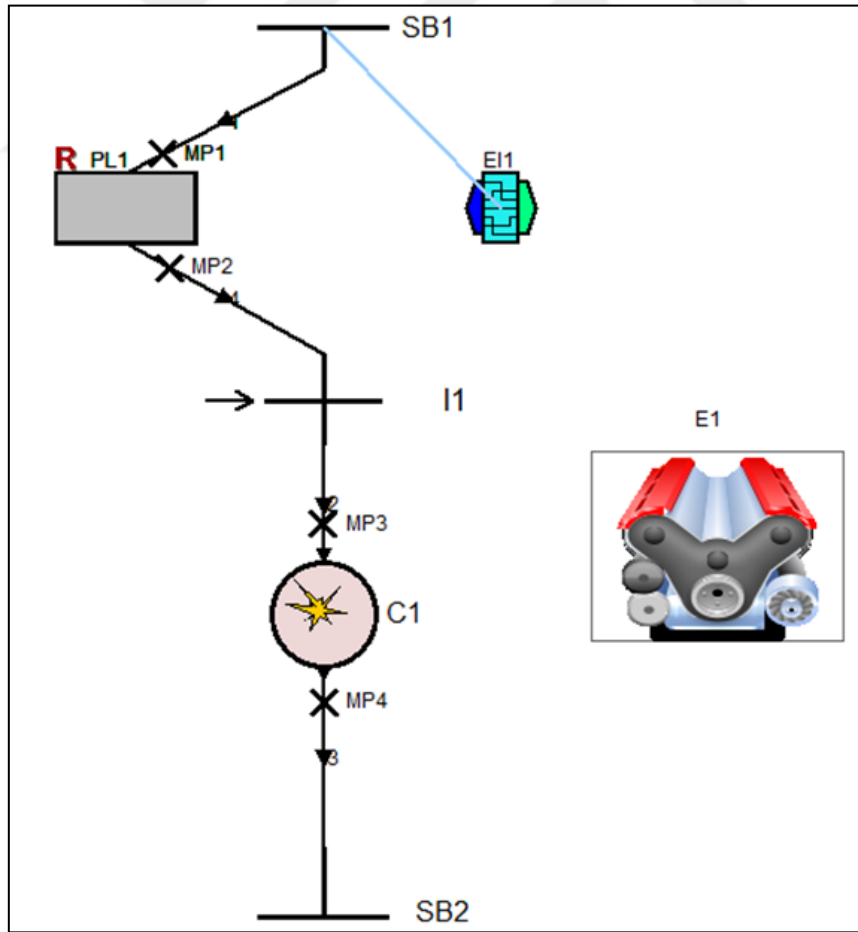
Tablo 2. 1 Referans alınan ve modellenen motorun teknik zellikleri [8]

Teknik zellikler	Motora Ait zellikler
Motor Tipi	Tek Silindirli, 4 Zamanlı
Motor Hacmi [litre]	0.47
Yakıt Enjeksiyon Türü	Port Yakıt Enjeksiyonu
Silindir Yüksekliği [mm]	82
Silindir apı [mm]	85
Maksimum Devir [rpm]	3000
Maksimum Güç [kW]	8.8
Maksimum Tork [Nm]	25
Sıkıştırma Oranı	7.6

Motor yanma parametreleri doğrulama çalışması yürütülürken, optimize edilmiş ateşleme zamanlaması ve doğal emişli durumla karşılaştırılarak dört farklı takviye basıncı (10 kPa ile 40 kPa arasında) altında 1600 motor hızında çalıştırılarak performans kriterleri oluşturulmuştur. Sabit devir ve sabit hava-yakıt oranında farklı basınçlar altında işletme koşulları incelenen referans çalışma için motor simülasyon parametreleri, doğrulama işlemleri için kullanılmıştır.

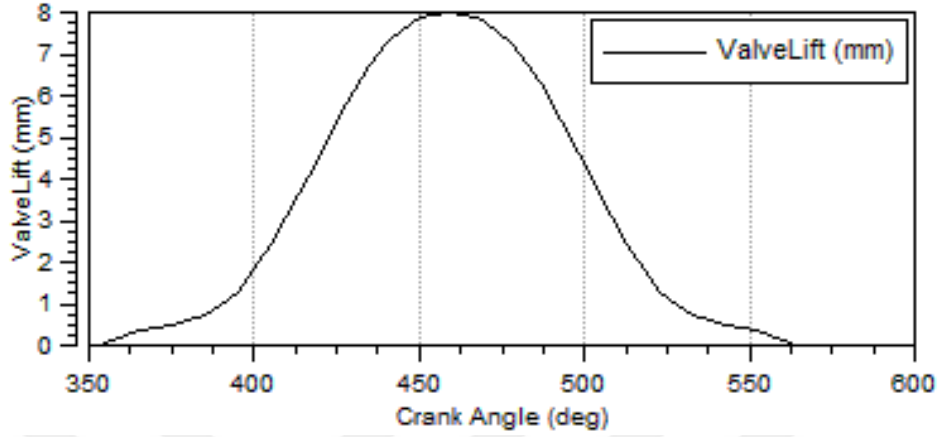
2.2 Hidrojen Motorunun Tek Boyutlu Simülasyon Ortamında Oluşturulması

Tek boyutlu (1-D) içten yanmalı hidrojen motor (H2ICE) modeli AVL Boost ortamında oluşturulurken Şekil 2.1’te görüldüğü gibi alt sistemler kullanılmıştır. Motora alınan havanın statik ve dinamik basınçlarını dengelemek için 2 litrelik emme manifoldu kapasitesinden yararlanılmıştır. Hava giriş basıncı tüm simülasyon döngüsü boyunca kararlı bir şekilde sağlandıktan sonra, motora alınan havaya bağlı olarak belirtilen lambda değerlerinde bir başlangıç hava yakıt oranı oluşturacak şekilde hidrojen enjekte edildi. İndike ortalama etkin basınç ve ateşleme basıncı değerleri sabit kaldıktan sonra, çeşitli emme havası kütle akışı ve hava-yakıt oranlarını da kompanse edebilecek şekilde giriş basıncı değiştirildi. Motor modeli Şekil 2.1’te verildiği üzere sistemde ortam koşulları, manifold yapısı, port enjeksiyon enjektörü, tek silindir bloğu ve egzoz sistemleriyle birlikte motor çalışma parametrelerini kontrol edebilen bir motor parametre arayüzüne sahiptir.

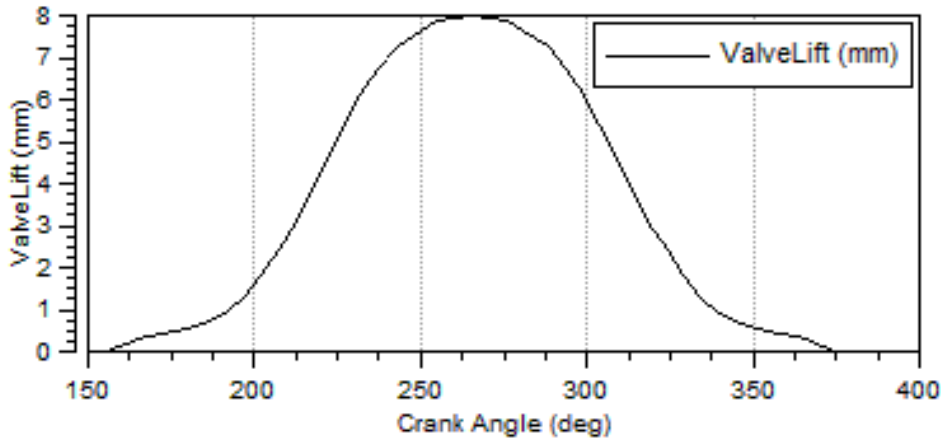


Şekil 2. 1 Hidrojen motorunun AVL Boost programındaki sistemsel yapısı

Referans alınan çalışmada valf açılma ve valf kapanma zamanları verilmiş olup valf açılma ve valf kapanma eğrileri verilmemiştir. Bu nedenle referans olabilecek benzer motorlardaki valf eğrileri kullanılarak yaklaşım yapılmıştır. Valf geometrileri için modele uygun optimizasyon çalışmaları uygulanmıştır.



Şekil 2. 2 AVL Boost programında kullanılan emme valf geometrisi



Şekil 2. 3 AVL Boost programında kullanılan egzoz valf geometrisi

AVL Boost ortamında kurulan simülasyonda içten yanmalı bir hidrojen motorunun tek boyutlu simülasyon modeli tasarlanırken motor parametreleri, enjeksiyon profili, valf kaldırma geometrisi, motor giriş ve çıkış portu geometrileri, yanma modeli, ısı transfer parametreleri ve hava takviye sistemi gereksinimleri ile motorun fiziksel çalışma koşullarına uygun olacak şekilde ayarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarında kullanılan yaklaşımlar, teorik sonuçlarla incelenmiştir. İndike ortalama basınç (IMEP), nitrojen oksit oranı (NOx), görünür ısı salınımı (AHRR) ve yanma parametreleri, hidrojen yanma özellikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

İndike ortalama basınç (IMEP) hesaplanırken; P_1 silindir için basınç değeri (kN/m²), ρ = yoğunluk (kg/m³), ε = sıkıştırma oranı, $k = c_p / c_v$, c_p ve c_v ise sabit hacimde ve basınçta ki özgül ısı değeri (kJ/kg.K), n_y ise yanma verimini ifade etmektedir [9].

$$IMEP = n_y \cdot \frac{P_1}{k-1} \cdot \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon-1} \cdot (\rho-1) \quad (2.1)$$

Yanma sürecini simüle etmenin yöntemi, ısı salınım oranını numerik olarak hesaplamaktır. Ölçülen silindir basıncı, belirli bir krank açısında silindirin ısı aktarım hızının temsili olarak görülür. Silindirdeki yakıt miktarına ve anlık A/F oranının yaydığı toplam ısıya bağlı olarak krank açısı başına gerçek ısı girişi belirlenir.

Ön karışımli yanma kontrolü, ısı transferi ve emisyonların modellenmesine yönelik yaklaşımlar yapılmıştır [10]. Bu numerik yaklaşımda, genel görünür ısı salınımı (AHRR) dikkate alınmıştır. Genel görünür ısı salınımı hesabı yapılırken, şekil parametresi (m), yanma süresi ($\Delta\alpha_c$) ve wiebe parametresi (a) uygulanmıştır.

$$\frac{d_x}{d_\alpha} = \frac{a}{\Delta\alpha_c} \cdot (m+1) \cdot y^m \cdot e^{-a \cdot y^{(m+1)}} \quad (2.2)$$

Isı salınımı yaklaşımıyla yanmış kütle fraksiyonu (x) elde edilebilmektedir.

$$d_x = \frac{dQ}{Q} \quad (2.3)$$

Y değerleri, ısı salınım eğrisinin altında bir alan elde edecek şekilde ölçeklendirilir. Yanma başlangıcı (α_0) değerini ifade eder ve krank açısı (α) olarak belirtilmiştir.

$$y = \frac{\alpha - \alpha_0}{\Delta\alpha_c} \quad (2.4)$$

Azot oksit (NO_x) hesaplama mekanizması, NO konsantrasyonundaki zamansal değişiklikler yaklaşımını kullanır. Aktivasyon enerjisi (E_a), ön üstel faktör (A), sıcaklık (K), evrensel gaz sabiti (R) modellenerek hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial c_{NO}}{\partial t} = \frac{A}{\sqrt{T}} \cdot c_{N_2} \cdot \sqrt{c_{O_2}} \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (2.5)$$

Bu kapsamda yapılan hesaplamalar doğrultusunda azot oksit (NO_x) konsantrasyonu hesaplanılarak referans doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Isı

salınımı yaklaşımıyla birlikte yanma karakterizasyonu için yaklaşım yapılmasına ortam sağlanmıştır.

2.3 Model Parametrelerinin Optimize Edilerek Hidrojen

Motorunun Çalıştırılması

Model simülasyon koşulları hidrojen yanmasının termal sonuçları kullanılarak, referans alınan motorun yanma karakterizasyonu yapılabilecek bir yapı kurulmuştur. Tek silindirli hidrojen motoru 1600 devir ve sabit 1.6 lambda değeri ile referans alınarak yanma parametreleri optimize edilmeye çalışılmıştır. İşletme koşullarını aynı zamanda farklı manifold hava basınçları (MAP) altında incelenmiştir. Aşırı doldurma altında karışım ateşleme basıncı, indike ortalama efektif basınç, yanma sonrası egzoz sıcaklıkları, silindir içi yanma sıcaklıkları, emme ve egzoz manifoldundaki hava akış hız değerleri, hava-yakıt oranına bağlı olarak alınan havaya karşılık püskürtülen yakıt oranı, yanma fraksiyonunun gelişimi, yanma sonrası oluşan azot oksit oranı ve yanma sonrası oluşan güç değerleri incelenerek optimizasyon yaklaşımı yapılmıştır.

Motor yanma parametreleri için, 10 kPa ile 40 kPa aşırı doldurma basınçları altında yanma sonuçları incelenerek motor parametreleri belirlenmiştir. Motor performans parametrelerinin belirlendiği 1-D model çalıştırılırken ateşleme avansı, yanma süresi, emme ve egzoz valf geometrileri, emme ve egzoz hava basınç ve hava akış hızları, ısı transferi parametreleri, silindir kafası geometrisine bağlı kurs hacmiyle birlikte sıkıştırma oranı optimizasyon doğrulaması için kullanılmıştır.

Yanma sonrası hidrojenin yanma karakteristiğinin oluşumu, özellikle yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığından dolayı anormal yanmalardan kaçınabilmek için yapılan ateşleme avansından etkilenmektedir. Eğer yanma fraksiyonları anormal yanma limitleri ve vuruntu bölgesinden uzak ise motorun verimliliğini artırılabilir. Port enjeksiyonlu motorlarda hidrojen enjeksiyon stratejisiyle birlikte yanma sonrası yanma karakterizasyonu geri tepme, ön ateşleme ve vuruntu sorunlarını çözmek için çeşitli yaklaşımlara sahiptir.

Tablo 2. 2 İndike ortalama efektif basınç (IMEP) sonuçlarının doğrulanması [8]

MAP	Referans (bar)	Model (bar)	Hata Oranı
94 kPa	4.6	4.4	%4.3
104 kPa	5.1	4.8	%5.9
114 kPa	5.4	5.1	%5.6
124 kPa	5.9	5.6	%5.1

Tablo 2. 3 Silindir içi yanma sonucu sıcaklık sonuçlarının doğrulanması [8]

MAP	Referans (K)	Model (K)	Hata Oranı
94 kPa	2032	2120	%4,3
104 kPa	2073	2125	%2,5
114 kPa	2116	2131	%0,7
124 kPa	2210	2155	%2,5

Ateşleme zamanlamaları piston üst ölü nokta öncesinde (BTDC) sırasıyla 9 derece krank açısı (CA), 12 derece krank açısı (CA), 14 derece krank açısı (CA), 15 derece krank açısı (CA) ile farklı ateşleme zamanlarına sahiptir.

Aşırı doldurma koşullarıyla birlikte yanma süresi ve ateşleme avansları değişmiştir. Yanma sürelerine bakıldığında doldurma basıncının artışına bağlı olarak yanma süresi uzamaktadır. Sırasıyla yanma süreleri, 30 derece krank açısı (CA), 33 derece krank açısı (CA), 36 derece krank açısı (CA), 38 derece krank açısıyla (CA) birlikte aşırı doldurma basınçları 10 kPa arttırılarak çalışma koşulları sağlanmıştır.

Wiebe parametreleri yanma fraksiyonunun oluşumu için optimize edilerek farklı aşırı doldurma koşullarında oluşan yanmayı optimize etmektedir. Yanma

karakterizasyonunu elde edildikten sonra model işletme koşullarıyla birlikte yeniden model çalıştırılarak termal reaksiyonlar incelenmiştir.

Tablo 2. 4 Silindir içi yanma basıncı (PFP) sonuçlarının doğrulanması [8]

MAP	Referans (bar)	Model (bar)	Hata Oranı
94 kPa	26.6	27.3	%2.6
104 kPa	28.6	29.4	%2.8
114 kPa	30.5	30.9	%1.3
124 kPa	32.5	33.0	%1.5

Tablo 2. 5 Azot oksit (NO_x) emisyonları sonuçlarının doğrulanması [8]

MAP	Referans (ppm)	Model (ppm)	Hata Oranı
94 kPa	1121	1081	%3.5
104 kPa	1269	1207	%4.8
114 kPa	1398	1398	%4.9
124 kPa	1420	1364	%3.9

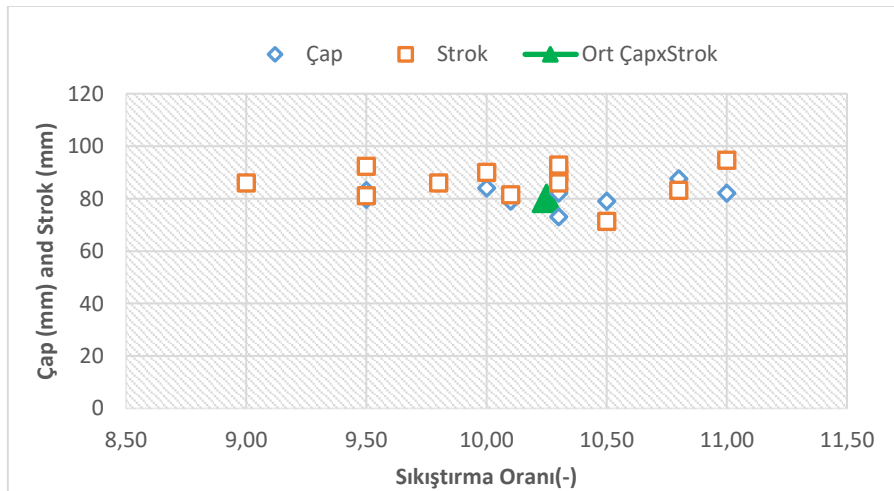
Silindir içi yanma basınç eğrileri, yanma fraksiyonlarının optimize edilmesinden sonra referans verilerle karşılaştırılmıştır. Silindir içi yanma basıncıyla birlikte elde edilen enerji, silindir için yanma sıcaklıklarını da doğru orantı ile etkilemektedir. Silindir içi basınç ve sıcaklık verilerinin doğrulanması aynı zamanda termal fenomenlerin yorumlanmasını sağlamaktadır.

Aşırı doldurma miktarı arttıkça silindir içine alınan hava miktarının artışıyla birlikte aynı hava-yakıt oranını sağlamak için porta püskürtülen yakıt miktarında da artış olmuştur. Bu durum sonucunda silindir içinde oluşan basınç ve sıcaklığın arttığı gözlemlenmiştir. Manifold hava basıncını (MAP) 40 kPa arttırmak silindir

içerisinde oluşan basınç %22 oranında arttırmıştır. Farklı manifold hava basınçları (MAP) altında ısı faktörleri ve yanma fenomenleri incelenmiş ve doğrulanmıştır. Basınç ve sıcaklık değişimlerini kullanarak yanma süreci analiz edilmiştir. Bu doğrultuda emme, egzoz ve yanma prosesleri çözümlenerek performans değerleri incelenmiştir. Yanma karakterizasyonu ile birlikte reaksiyon hızları ve yanma sonucu oluşan ürünler hakkında tutarlı çıkarımlar yapılabilmektedir. Özellikle ısı salınım oranı (HRR) yanma verimliliğini değerlendirmek için önemli parametrelerden birini oluşturmaktadır.

2.4 Yeni İşletme Koşullarıyla Motorun Yeniden Oluşturulması

Motor yanma parametreleri optimize edildikten sonra, deneysel çalışmanın motor işletme koşulları ile değerlendirilmiştir. Yanma karakterizasyonu elde edildikten sonra yeni işletme koşulları ile model yeniden çalıştırılmıştır. Simülasyon çalışmaları 0.47 litrelik tek silindirli ve port yakıt enjeksiyonlu bir motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kapasiteleri 1.5 litreden 2 litreye kadar değişen binek araçların kullanımının giderek yaygınlaştığı bilinmektedir. Şekil 2.2'de, otomobil üreticileri ve endüstrideki önemli hacimlerde en popüler olan günümüz binek otomobillerinin motor silindir çapı ve silindir yüksekliği ile sıkıştırma oranları gösterilmektedir. Ortalama sıkıştırma oranı silindir başına hacme göre belirlendi (silindir çapı 85 mm, silindir stroğu 82 mm). Endüstride kullanılan 4 silindirli motorların silindir çapı, yüksekliği ve diğer ilgili teknik ölçümleri için kapsamlı bir araştırma yapıldı. Bu araştırmadan elde edilen verilerle model değiştirildi ve geliştirildi.



Şekil 2. 4 Endüstriyel motorların sıkıştırma oranına kıyasla ortalama silindir çap ve silindir yükseklikleri

Endüstriyel bir motorun, hidrojenli işletme şartlarına uygunluğunu gözlemlemek için yeni motor parametreleri belirlenmiştir. Yeni işletme koşulları altında simülasyonda elde edilen yanma karakterizasyonu motora uygulanmıştır. Değişen silindir ölçüleriyle birlikte yeni işletme koşulları farklı devirlerde, farklı hava-yakıt oranlarında ve farklı aşırı doldurma basınçlarında yeniden analiz edilmiştir.

Tablo 2. 6 Endüstriyel araştırma sonucu modellenen motorun teknik özellikleri ve çalışma koşulları

Teknik Özellikler	Motora Ait Çalışma İşletme Koşulları
Silindir Yüksekliği [mm]	82
Silindir Çapı [mm]	85
Devir [rpm]	1400-3000
Hava-Yakıt Oranı [lambda]	0.9-3.0
Manifold Mutlak Basıncı [bar]	100-150

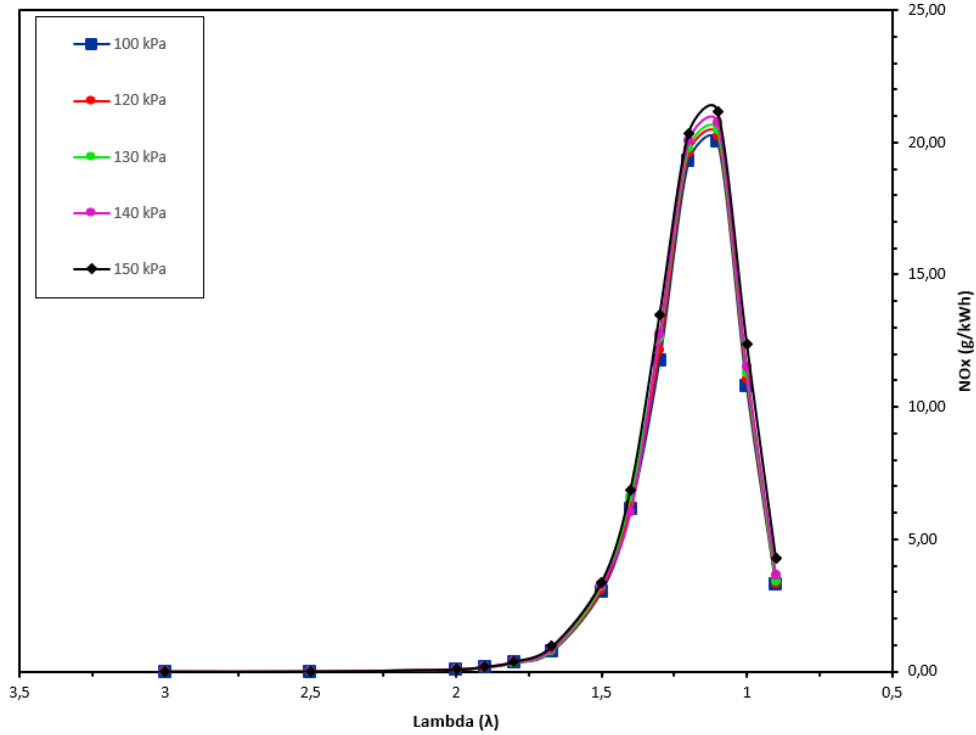
3

ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1 Farklı Hava-Yakıt Oranlarında Gerçekleştirilen Simülasyon Sonuçları

Simülasyon modeli yeni işletme koşullarıyla birlikte silindir ölçüleri yenilendikten sonra farklı aşırı doldurma basınçlarında model çalıştırılmıştır. Artan manifold hava basıncına bağlı olarak ısı salınım fenomenleri optimize edilmiştir.

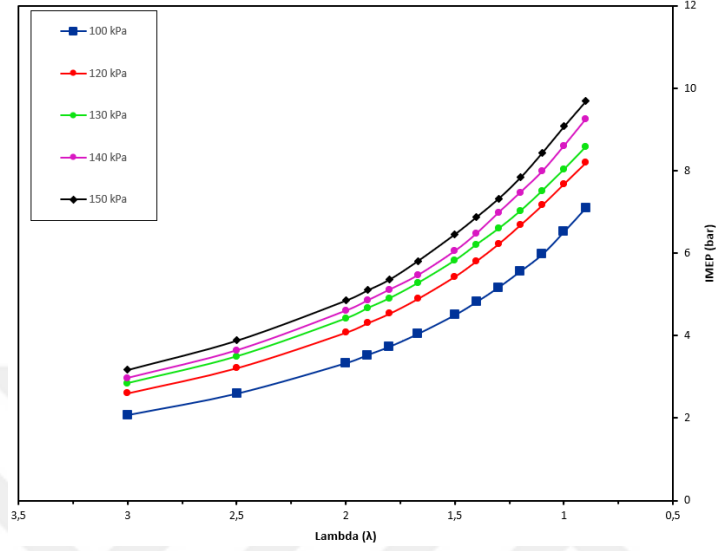
Model çalışma koşulları, motor devri 1600 rpm, %100 açık gaz kelebeği konumunda, 5 farklı manifold hava basıncıyla (100 kPa-150 kPa) ayrı ayrı farklı hava-yakıt oranlarında (λ 0.9-3.0) oluşturulmuştur. Farklı manifold basınçları için farklı hava kütle akışı olacağı için aynı λ oranını sağlayabilmesi için yakıt enjeksiyon stratejisinde düzenleme yapılmıştır.



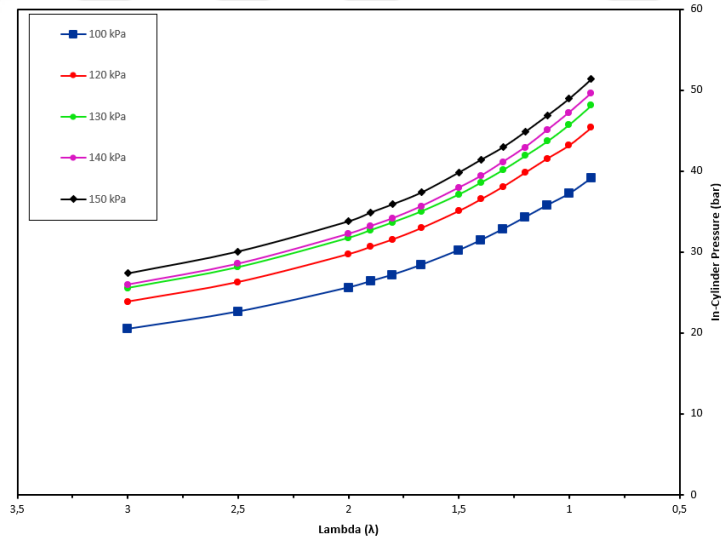
Şekil 3. 1 Farklı λ değerlerinde yanma sonucu azot oksit (NO_x) oluşumu

Azot oksit (NO_x) emisyonlarının üretimi, fakir yanma ile önemli ölçüde azaltılır ($\lambda > 1.8$). Yakıtça fakir λ bölgelerinde PFP ve sıcaklık düşüşü azot oksit (NO_x) oluşumunu etkilemektedir. λ 1.8 değerinin üzerinde, azot

oksit (NO_x) emisyonlarında ciddi oranda düşüş gözlemlenmiştir. Lambda 2.0 ulaştığında ise azot oksit değeri (0.08 g/kWh) minimal düzeylere inmektedir. Lambda 1.1 değerinde ise azot oksit (NO_x) emisyonları maksimum seviyeye (21.15 g/kWh) çıkmıştır.



Şekil 3. 2 Farklı lambda değerlerinde yanma sonucu indike ortalama efektif basınç değerlerinin değişimi (IMEP)



Şekil 3. 3 Farklı lambda değerlerinde yanma sonucu silindir için basınç değerlerinin değişimi (PFP)

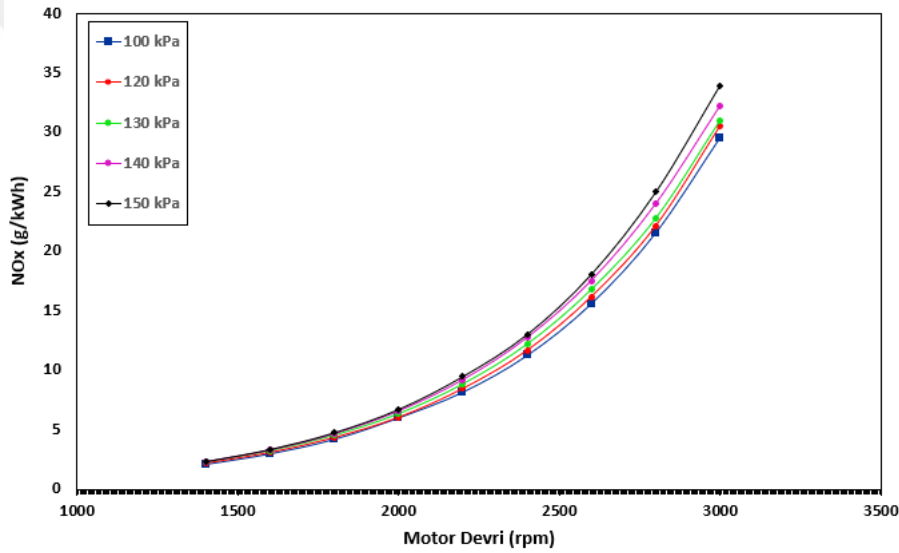
Lambdanın arttırılmasıyla birlikte azot oksit (NO_x) emisyonları düşmektedir fakat silindir için basınç değerleri ve indike ortalama efektif basınç bu doğrultuda azalmaktadır. Hidrojen yanmasının düşük güç yoğunluğunu arttırmak için

lambdanın azaltılması yani yakıt olarak zenginleştirilmesi gerekmektedir. Yakıtça fakir bölgede çalışmayı, mümkün olan en yüksek spesifik yüklere ve hızlar bantlarına genişletmek için, nispeten düşük egzoz gazı sıcaklıklarında çok yüksek hava kütlesi akışları sağlayan kabiliyetli olarak nitelendirilebilecek turbo şarj sistemlerinin gerekliliği görülmektedir.

3.2 Farklı Motor Devirlerinde Gerçekleştirilen Simülasyon

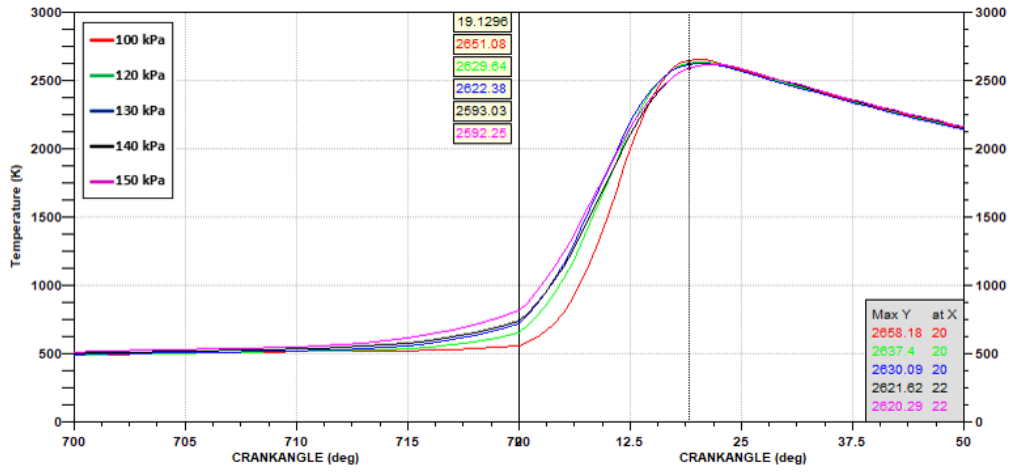
Sonuçları

Model çalışma koşulları, lambda 1.6 değerinde, %100 açık gaz keleşi konumunda, 5 farklı manifold hava basıncıyla (100 kPa-150 kPa) ayrı ayrı farklı motor devirlerinde (1400 rpm-3000 rpm) oluşturulmuştur.

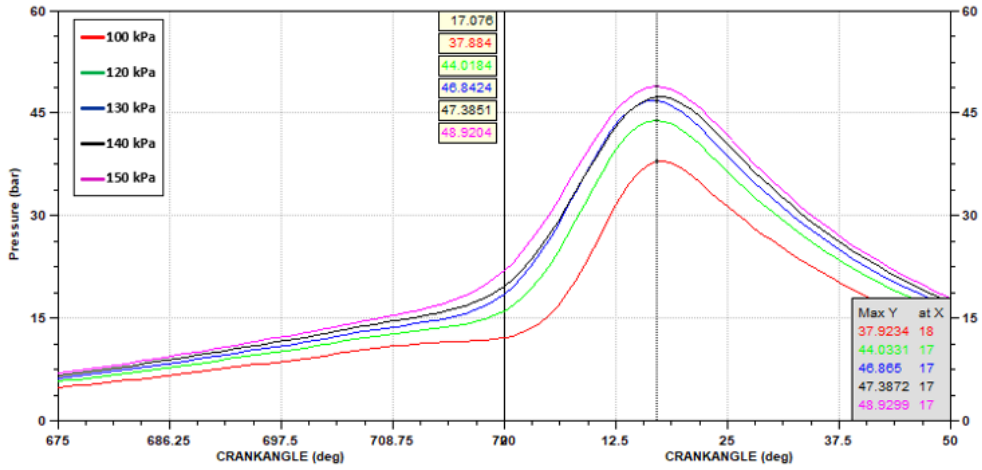


Şekil 3. 4 Farklı motor devirlerinde yanma sonucu azot oksit (NOx) oluşumu

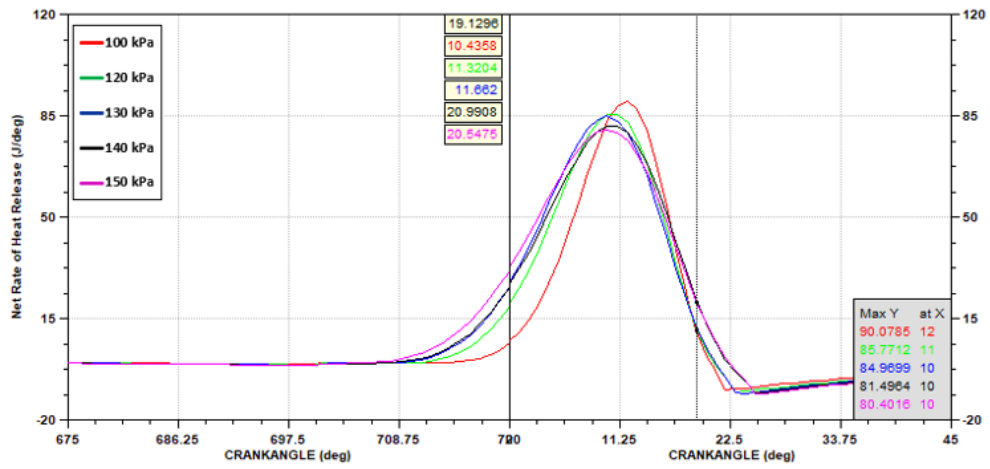
Azot oksit (NOx) emisyonlarının üretimi, lambda 1.6 değerinde motor devrenin artmasına bağılı olarak artış göstermiştir. Motor devrinin 1500 rpm değerinde azot oksit (NOx) emisyonu 2.5 g/kWh civarında iken motor devri 3000 rpm seviyelerine çıkarıldığında azot oksit (NOx) 32 g/kWh seviyelerine yükselmektedir. Motor devrinin arttırıldığı durumlarda (tek bir lambda değerinde) indike ortalama efektif basınç değeriyle birlikte silindir için basınç değeri de düşmektedir. Aynı lambda değerinde farklı motor devirleri tarandığı için değişen hava miktarına bağılı olarak yakıt miktarı ayarlanmıştır. Artan motor devirlerinde lambdanın optimize edilmesi gerektiği geri tepme olasılığını azaltacaktır.



Şekil 3. 5 1500 rpm motor devrinde yanma sonucu sıcaklık oluşumu

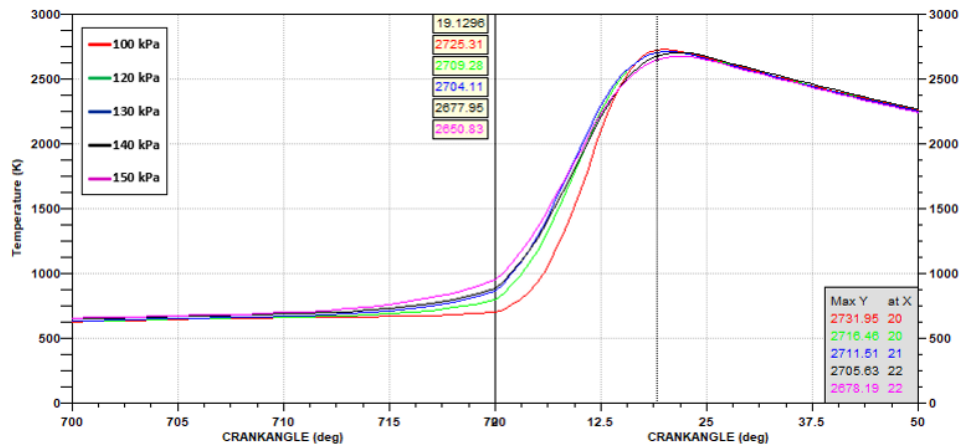


Şekil 3. 6 1500 rpm motor devrinde yanma sonucu silindir içi basınç (PFP) oluşumu

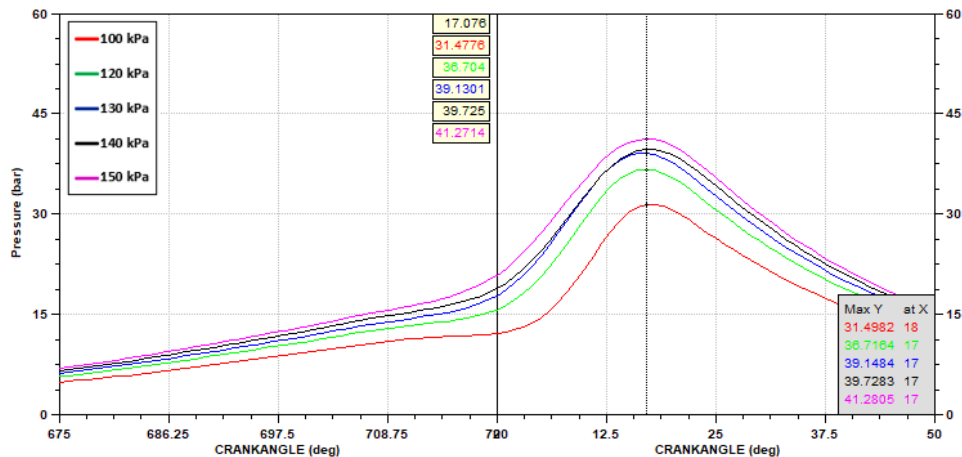


Şekil 3. 7 1500 rpm motor devrinde yanma sonucu görünür ısı salınımı oranı (AHRR)

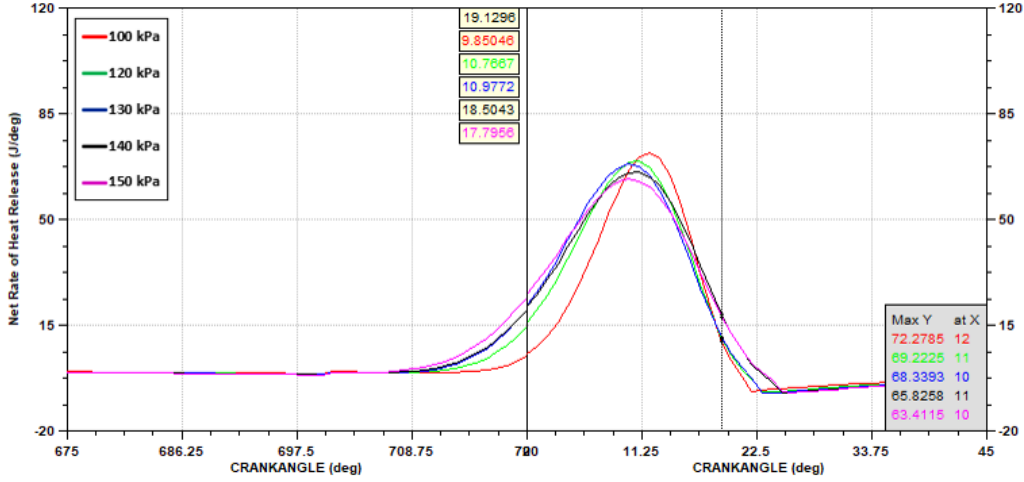
Model çalışma koşulları, 1500 motor devrinde, lambda 1.1 hava-yakıt karışım oranında, 5 farklı manifold basıncında (100kPa-150kPa) koşularak sonuçlar değerlendirilmiştir. 1500 motor devrinde, yanma sonucunda oluşan silindir içi sıcaklık verileri incelendiğinde farklı manifold basınçlarında sıcaklık ortalaması yakın değerler görülmektedir. 100 kPa manifold basıncında silindir içi sıcaklığının maksimum değeri 2658 kelvin mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise silindir içi sıcaklığının maksimum değeri 2620 kelvin mertebelerinde olduğu görülmektedir. 100 kPa manifold basıncında silindir içi basıncın maksimum değeri (PFP) 37.9 bar mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise silindir içi basıncın maksimum değeri 48.9 bar mertebelerinde olduğu görülmektedir. Aynı koşullar altında 100 kPa manifold basıncında görünür ısı salınım oranının maksimum değeri (AHRR) 90 J/deg mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise görünür ısı salınım oranının maksimum değeri 80.4 J/deg mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 8 2000 rpm motor devrinde yanma sonucu sıcaklık oluşumu

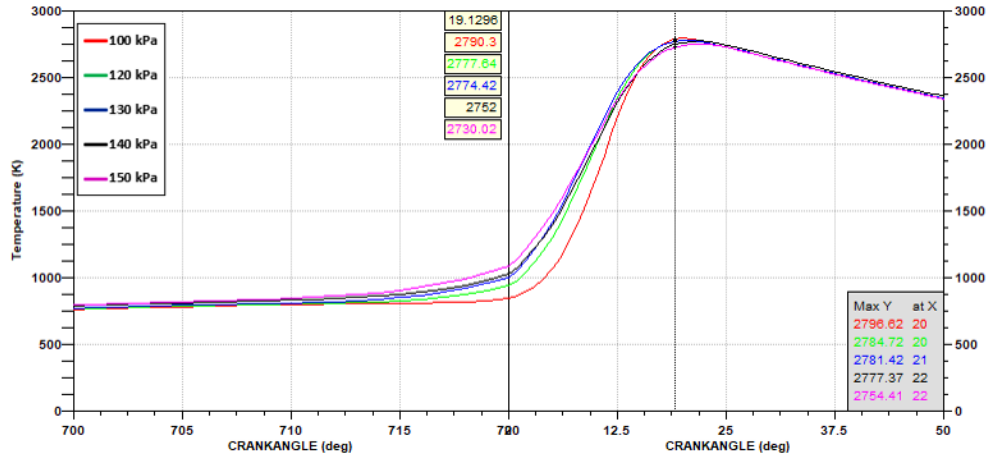


Şekil 3. 9 2000 rpm motor devrinde yanma sonucu silindir içi basınç (PFP) oluşumu

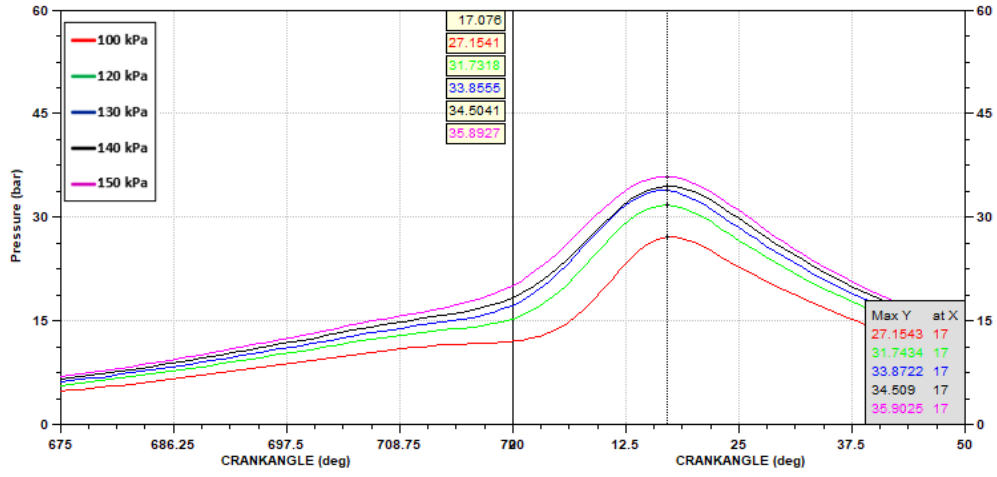


Şekil 3. 10 2000 rpm motor devrinde yanma sonucu görünür ısı salınımı oranı (AHRR)

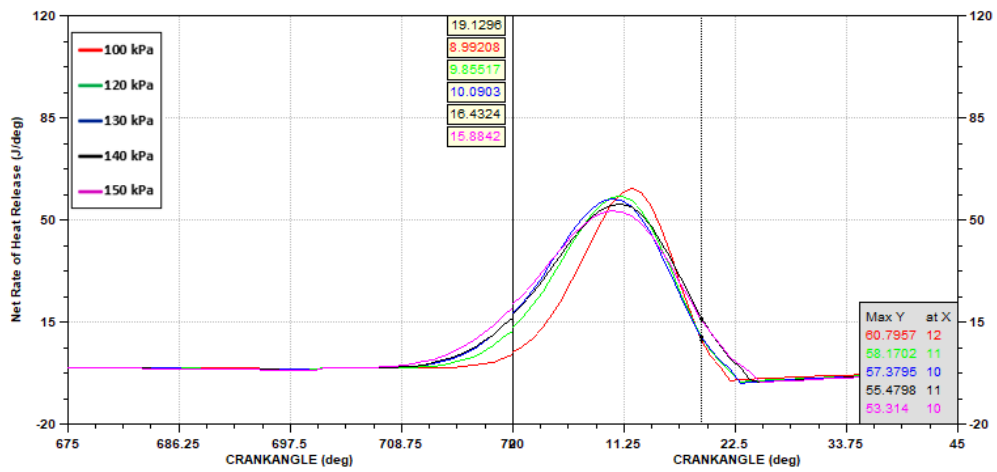
Model çalışma koşulları, 2000 motor devrinde, lambda 1.1 hava-yakıt karışım oranında, 5 farklı manifold basıncında (100kPa-150kPa) koşularak sonuçlar değerlendirilmiştir. 2000 motor devrinde, yanma sonucunda oluşan silindir içi sıcaklık verileri incelendiğinde farklı manifold basınçlarında sıcaklık ortalaması yakın değerler görülmektedir. 100 kPa manifold basıncında silindir içi sıcaklığının maksimum değeri 2731 kelvin mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise silindir içi sıcaklığının maksimum değeri 2678 kelvin mertebelerinde olduğu görülmektedir. 100 kPa manifold basıncında silindir içi basıncın maksimum değeri (PFP) 31.4 bar mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise silindir içi basıncın maksimum değeri 41.2 bar mertebelerinde olduğu görülmektedir. Aynı koşullar altında 100 kPa manifold basıncında görünür ısı salınım oranının maksimum değeri (AHRR) 72.2 J/deg mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise görünür ısı salınım oranının maksimum değeri 63.4 J/deg mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 11 2500 rpm motor devrinde yanma sonucu sıcaklık oluşumu

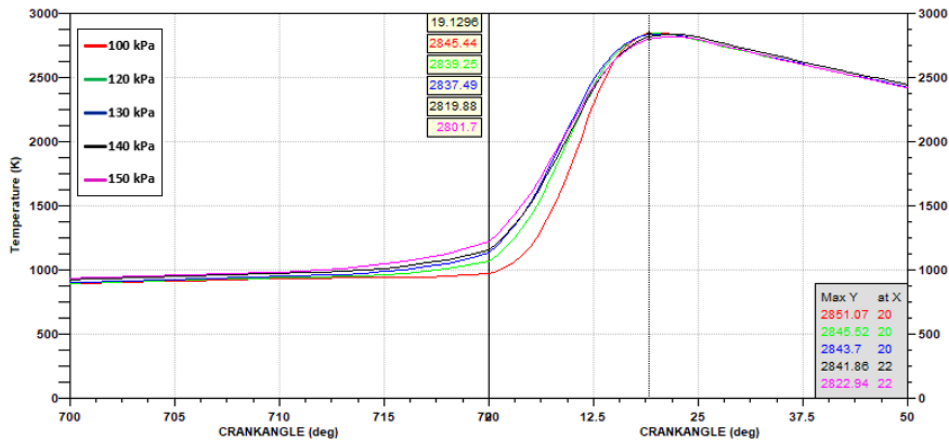


Şekil 3. 12 2500 rpm motor devrinde yanma sonucu silindir içi basınç (PFP) oluşumu

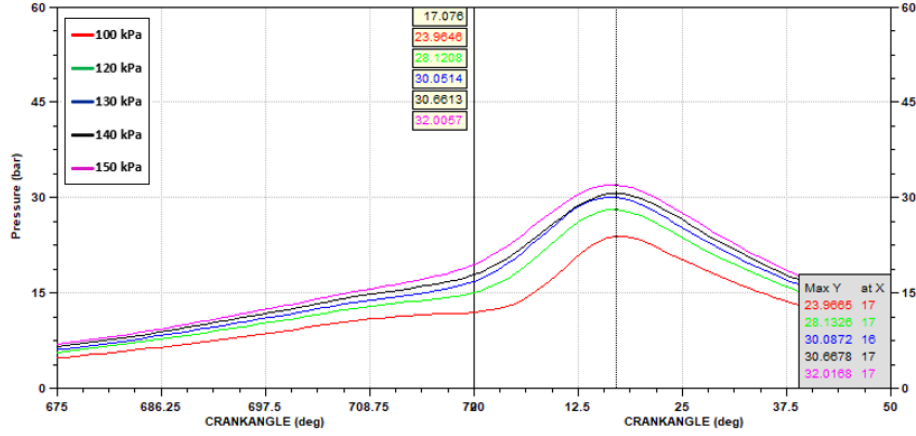


Şekil 3. 13 2500 rpm motor devrinde yanma sonucu görünür ısı salınımı oranı (AHRR)

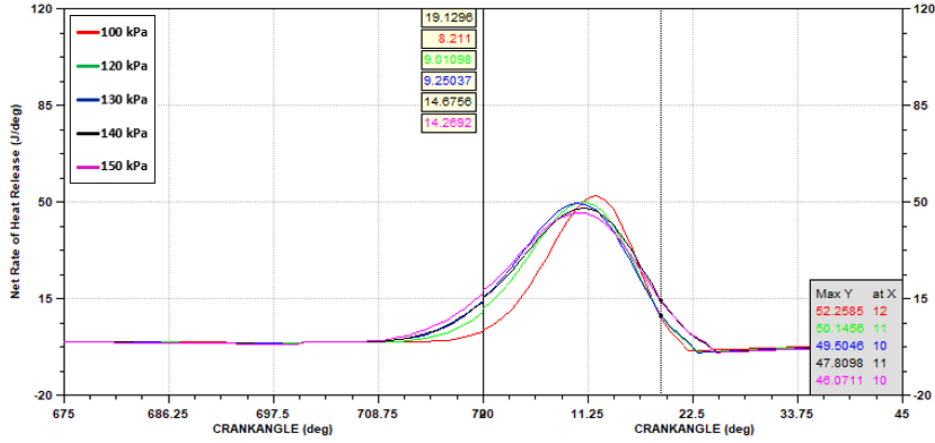
Model çalışma koşulları, 2500 motor devrinde, lambda 1.1 hava-yakıt karışım oranında, 5 farklı manifold basıncında (100kPa-150kPa) koşularak sonuçlar değerlendirilmiştir. 2500 motor devrinde, yanma sonucunda oluşan silindir içi sıcaklık verileri incelendiğinde farklı manifold basınçlarında sıcaklık ortalaması yakın değerler görülmektedir. 100 kPa manifold basıncında silindir içi sıcaklığının maksimum değeri 2796 kelvin mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise silindir içi sıcaklığının maksimum değeri 2754 kelvin mertebelerinde olduğu görülmektedir. 100 kPa manifold basıncında silindir içi basıncın maksimum değeri (PFP) 27.15 bar mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise silindir içi basıncın maksimum değeri 35.9 bar mertebelerinde olduğu görülmektedir. Aynı koşullar altında 100 kPa manifold basıncında görünür ısı salınım oranının maksimum değeri (AHRR) 60.7 J/deg mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise görünür ısı salınım oranının maksimum değeri 53.3 J/deg mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 14 3000 rpm motor devrinde yanma sonucu sıcaklık oluşumu



Şekil 3. 15 3000 rpm motor devrinde yanma sonucu silindir içi basınç (PFP) oluşumu



Şekil 3. 16 3000 rpm motor devrinde yanma sonucu görünür ısı salınımı oranı (AHRR)

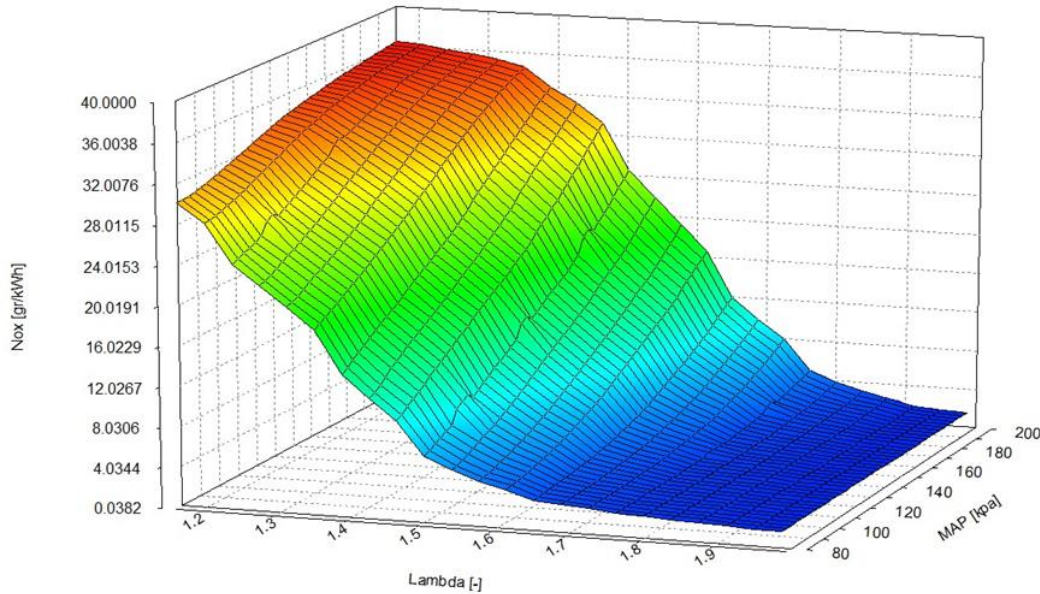
Model çalışma koşulları, 3000 motor devrinde, lambda 1.1 hava-yakıt karışım oranında, 5 farklı manifold basıncında (100kPa-150kPa) koşularak sonuçlar değerlendirilmiştir. 3000 motor devrinde, yanma sonucunda oluşan silindir içi sıcaklık verileri incelendiğinde farklı manifold basınçlarında sıcaklık ortalaması yakın değerler görülmektedir. 100 kPa manifold basıncında silindir içi sıcaklığının maksimum değeri 2851 kelvin mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise silindir içi sıcaklığının maksimum değeri 2822 kelvin mertebelerinde olduğu görülmektedir. 100 kPa manifold basıncında silindir içi basıncın maksimum değeri (PFP) 23.9 bar mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise silindir içi basıncın maksimum değeri 32 bar mertebelerinde olduğu görülmektedir. Aynı koşullar altında 100 kPa manifold basıncında görünür ısı salınım oranının

maksimum değeri (AHRR) 52.2 J/deg mertebelerine ulaşmıştır. 150 kPa manifold basıncında ise görünür ısı salınım oranının maksimum değeri 46 J/deg mertebelerinde olduğu görülmektedir.

Farklı motor çalışma koşullarında, 150 kPa basınç altında motor hızının 1500 devirden 3000 devire yükseltildiğinde yanma sonucu silindir içi oluşan sıcaklık değeri 2620 Kelvin mertebelerinden, 2822 Kelvin mertebelerine çıkmıştır. Aynı çalışma koşullarında, silindir için basınç değerleri 48.9 bar mertebesinden, 32 bar mertebelerine düşmüştür. Sabit lambda oranlarında motor devrinin arttırılması silindir için basıncının azalmasına neden olmuştur.

3.3 Farklı Aşırı Doldurma Basınçları ve Farklı Hava-Yakıt Oranlarında Gerçekleştirilen Simülasyon Sonuçları

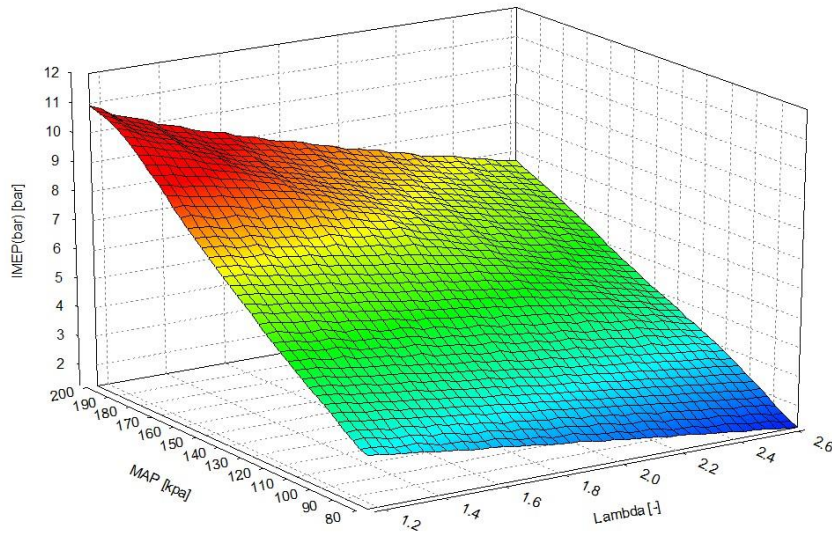
Model çalışma koşulları, motor devri 1600 rpm, hava-yakıt oranı 1.6 (lambda), %100 açık gaz kelebeği konumunda, 5 farklı manifold hava basıncıyla (100 kPa-150 kPa) oluşturulmuştur. Basıncın artmasıyla birlikte uzayan yanma süreleriyle birlikte karışım dolgusunun ateşleme avansı daha öne çekilmiştir.



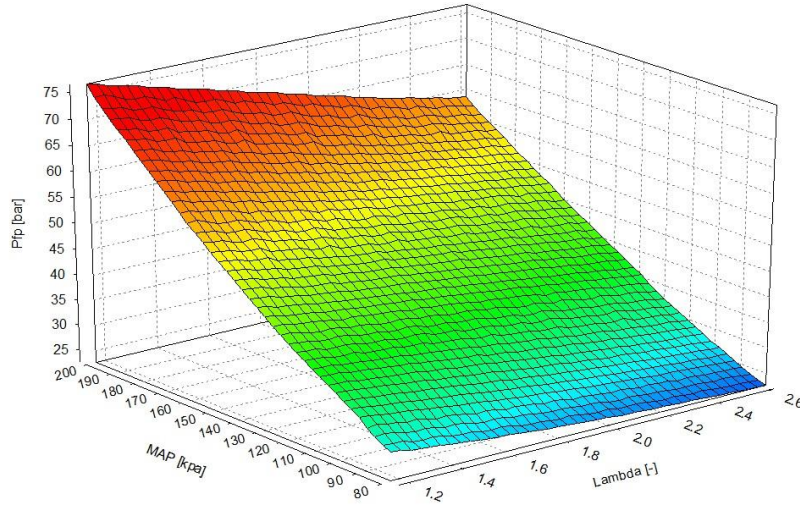
Şekil 3. 17 Farklı lambda ve manifold hava basınçları değerlerinde yanma sonucu oluşan azot oksit (NOx) değişimi

Hava-yakıt enjeksiyon oranı ile manifold aşırı doldurma basınçlarının (MAP) belirli aralıklarında, azot oksit emisyonlarındaki (NOx) konsantrasyonda ciddi değişimler olduğu Şekil 3.5'te görülmektedir. NOx emisyonlarının üretimi, yakıtça fakir yanma ile önemli ölçüde azaltılabildiği bilinmektedir ($\lambda > 1.8$). Öte yandan, takviye basıncının artırılması azot oksit (NOx) emisyonlarını önemli ölçüde artırmaktadır.

NOx emisyonu λ 1.6 bölgesinde 100 kPa takviye basıncında çalışırken 4.2 g/kWh civarında, 150 kPa takviye basıncında çalışırken ise emisyon 11.4 g/kWh mertebelerine çıkmaktadır. Takviye basıncının 1.5 kat artırılmasının, yakıt enjeksiyon noktasında λ 1.6 olarak ölçülen azot oksit (NOx) emisyonlarında yaklaşık 2.7 kat artmasına neden olduğu gösterilmiştir. Düşük takviye basıncı çalışma noktasında (100 kPa civarı) λ 1.1 değerinde azot oksit (NOx) emisyonlarının 30.2 g/kWh olduğu, λ 2.0 değerine çıkarıldığında ise azot oksit (NOx) emisyonlarının 0.05 g/kWh değerlerine düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 18 Farklı λ ve manifold hava basınçları değerlerinde indike efektif ortalama basınç (IMEP) değişimi



Şekil 3. 19 Farklı lambda ve manifold hava basınçları değerlerinde silindir içi yanma basıncı (PFP) değişimi

Şekil 3.19 ile hidrojen motorunun farklı lambda ve manifold hava basıncına karşı indike efektif ortalama basınç (IMEP) değişimini göstermektedir. İndike efektif ortalama basınç (IMEP) değerleri artan manifold hava basıncı (MAP) ile doğru orantıyla artmaktadır. Aşırı doldurma basıncı arttıkça silindire hava girişi artmakta ve yanma süresi uzamaktadır. Manifold hava basıncının (MAP) 100 kPa mertebelerinde oluşan indike ortalama efektif basınç (IMEP) 6.5 bar seviyelerinden, yakıt fakir çalışma koşullarına doğru gidildikçe 2.9 bar seviyelerine düşmektedir. Yakıt açısından zengin karışım konsantrasyonunda lambda 1.1 iken, manifold hava basınç (MAP) değeri 100 kPa mertebelerinden 150 kPa seviyelerine yükseldikçe belirtilen indike ortalama efektif basınç (IMEP) değeri yaklaşık olarak 2 kat artmıştır.

Hidrojen motorunun farklı manifold basınçları ile farklı lambda değerlerinde silindir içi basınç (PFP) değişimi Şekil 3.7 ile gösterilmektedir. İndike ortalama efektif basınç ile benzer davranış gösteren silindir içi basıncı (PFP) lambdanın artması ve manifold basıncın azalmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. 100 kPa'lık manifold basınç (MAP) değerinde, silindir içi basınç (PFP) 36.2 bar mertebelerinde ve yakıt fakir çalışma koşullarına doğru gidildiğinde 23.1 bar seviyelerine düşmektedir.

Bu çalışmada, içten yanmalı motorların artan hava kirletici faktörlerine çözüm olarak hidrojen yanmalı motorların birçok uygulama için bir alternatif olup olmayacağına dair 1-d model tabanlı değerlendirmesi yürütülmüştür.

Günümüz konvansiyonel motorları, hidrojen yakıtıyla çalışacak şekilde modifiye edilebilirken harici karışım oluşumu (PFI) veya dahili karışım oluşumu (DI) gibi uygulamalarla donatılarak endüstriyel gereksinimleri karşılayabilme potansiyeline sahiptir. Gelişmekte olan H₂ teknolojilerine hızlı adaptasyon sağlayabilen benzinli motor yanma stratejisinin, hidrojen yanmasıyla karakterizasyonunu sağlanarak konsept çalışmalarını yapılabilir.

Tek silindirli bir motorun farklı devirler aralığında, farklı hava-yakıt oranlarında ve farklı aşırı doldurma basınçlarında hidrojen uygulaması üzerindeki fenomenleri incelenmiştir. Azot oksit (NO_x) emisyonlarını iyileştirmek için bir hidrojen motorun port yakıt enjeksiyon yöntemi ile harici süper şarj uygulaması araştırılmıştır.

1. Minimum azot oksit (NO_x) emisyonu için lambda aralığının 1.8-2.0 mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Lambda 1.8-2.0 değerlerinin üzerinde, yakıtça fakirleşen stratejilerde azot oksit (NO_x) emisyonları ihmal edilebilir seviyeye düşmesinden dolayı, bu çalışma koşulları altında son işlem sistemlerinin nitrojen oksit indirgeyicilerin kullanılmasını gerektirmediğini göstermiştir.
2. Zengin yakıt karışım oranlarında azot oksit (NO_x) emisyonlarının ihmal edilebilir aralıkta veya düşük seviyelerde kalması için daha yüksek aşırı doldurma talebi gerektiğinden yüksek performanslı turbo şarjlı sistemler gerektirmektedir.
3. Zengin yakıt karışım altında çalışan doğal emişli (hava basıncı 100 kPa) H₂ICE ile aynı performansı elde etmek amacıyla aynı koşullar altında çalışan turbo şarjlı H₂ICE motorunda daha yüksek emme kütle akışını telafi etmek için takviye basıncı artırılmıştır.

4. Yakıt açısından zengin bir bölgede çalışmak, geri tepme riskini artırır ve yüksek sıcaklıktaki egzozun geri akışına neden olmaktadır. Her ne kadar yüksek silindir içi basınç (PFP) değerleri tercih edilse de klasik çevrimde azot oksit (NOx) miktarlarında ciddi artışlar olduğu için lambdanın yüksek olduğu ortamlarda çalışabilmek için azot oksit (NOx) oranının düşürülmesi gerekmektedir.



- [1] J. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, New York: NY: McGraw-Hill, 1988.
- [2] L. M. Das, «Hydrogen engine: research and development (R&D) programmer in Indian Institute of Technology (IIT),» *International Journal of Hydrogen Energy*, cilt 27, no. 9, 1 Eylül 2002.
- [3] Y. Kim, J. T. Lee ve J. Caton, «The Development of a Dual-Injection Hydrogen-Fueled Engine With High Power and High Efficiency,» *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006.
- [4] J. Heffel, M. N. McClanahan ve J. Norbeck, «Electronic Fuel Injection for Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines,» *SAE Transactions - Journal of Fuels and Lubricants*, pp. 1-11, 11 Ağustos 1998.
- [5] J. M. Kim, Y. T. Kim, J. T. Lee ve S. Y. Lee, «Performance Characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct Injection and Spark Ignition System,» *SAE International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition*, p. 11, 1995.
- [6] R. Jorach, C. Enderle ve R. Decker, «Development of a low-nox truck hydrogen engine with high specific power output,» *International Journal of Hydrogen Energy*, cilt 22, no. 4, Nisan 1997.
- [7] H. Gurbuz ve I. H. Akcay, «Evaluating the effects of boosting intake-air pressure on the performance and environmental-economic indicators in a hydrogen-fueled SI engine,» *International Journal of Hydrogen Energy*, cilt 46, no. 56, pp. 1-10, 13 Ağustos 2021.
- [8] H. Gurbuz, «Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Hidrojen Motorunda Yanma Optimizasyonu,» Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2010.
- [9] O. Deniz, «İçten Yanmalı Motorlar Ders Kitabı,» Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2008.
- [10] *Advanced Simulation Technologies Software Documentation AVL Boost User Manuel*, Graz, Avusturya,: AVL List GmbH, 2020.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. E. Emlek, «İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojen Kullanımının Nümerik İncelenmesi ve Optimizasyonu,» *4. Uluslararası Lisansüstü Çalışmalar Kongresi*, İstanbul, 5 Haziran 2024.

