



T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİCARİ BİR MOTORDA BENZİN-JP8 KARIŞIMLARININ
MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYONLARINA
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

AHMET DOĞAN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Emrah KANTAROĞLU

KIRIKKALE-2025



T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİCARİ BİR MOTORDA BENZİN-JP8 KARIŞIMLARININ
MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYONLARINA
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

AHMET DOĞAN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Emrah KANTAROĞLU

KIRIKKALE-2025

AHMET DOĞAN tarafından hazırlanan “TİCARİ BİR MOTORDA BENZİN-JP8 KARIŞIMLARININ MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emrah KANTAROĞLU

Makina Mühendisliği
Anabilim Dalı, Kırıkkale
Üniversitesi

İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Fatih AKTAŞ

Makina Mühendisliği
Anabilim Dalı, Gazi
Üniversitesi

İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Fevzi ŞAHİN

Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı,
Ondokuz Mayıs
Üniversitesi

İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 14/07/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet DOĞAN

14.07.2025

ÖZET

TİCARİ BİR MOTORDA BENZİN-JP8 KARIŞIMLARININ MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emrah KANTAROĞLU

Temmuz 2025, 62 sayfa

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, çift bujili ateşleme sistemine sahip ticari bir motor (Honda L13A4 i-DSI) üzerinde benzin ve benzin-JP8 yakıt karışımlarının performans ve emisyonlara olan etkileri motor testi ve 3 boyutlu (3B) silindir içi yanma HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modeli kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada JP8 yakıtı, alışılmışın dışında bir alternatif yakıt olarak benzinle kütleli olarak %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45 ve %50 oranlarında karıştırılarak değerlendirilmiştir. İncelemelerde kritik motor tork devri olan 2800 d/dk'da, toplamda 11 farklı yakıt tipi kullanılmıştır. HAD analizlerinde, testlerden alınan ölçüm ve kontrol parametreleri kullanılmış ve motor 3B olarak modellenerek model dosyası oluşturulmuştur. Tüm analizler tam gaz konumunda (%100) ve sabit 2800 d/dk motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Motor testlerinde; motor performansı olarak tork, güç, özgül yakıt tüketimi (ÖYT), ortalama efektif basınç (OEB) ve hacimsel verim gibi parametreler üzerinden değerlendirilmeler yapılmıştır. HAD analizleri ise motorun bir silindirinin modellenmesiyle Ansys-Forte 22R1 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve indike motor karakteristikleri hesaplanmıştır. 3B modelde ayrıca silindir içi basınç, sıcaklık ve emisyonların krank mili açısına göre değişimleri hesaplanmış, radyal ve eksenel sıcaklık dağılımı konturları oluşturulmuştur. Deneysel olarak egzoz hattından CO, CO₂, HC, NO_x, O₂ ve lambda değerleri ile egzoz gazı sıcaklığı ölçülmüş, sayısal modelde ise bu değerler krank mili açısına bağlı olarak hesaplanmıştır. Motor kataloğunda 2800 d/dk'da ve tam yük koşullarında motor torku 119 Nm'dir. Bu değer motor testlerinde aynı koşullar altında 105,84 Nm olarak ölçülmüş ve aradaki fark %11,059 olarak belirlenmiştir.

Testlerde, JP8 oranının artmasıyla birlikte (sırasıyla %0-5-10-15-20-25-30-35-40-45-50) benzinle karşılaştırıldığında tork, güç ve ortalama basınçta sırasıyla %0,501-%2,731 aralığında artışlar gözlemlenmiştir. Emisyonlar açısından incelendiğinde, CO emisyonları, JP8'in %45 oranında karıştırıldığı yakıtta %53,418 oranında azalmıştır.

CO₂ emisyonları, aynı karışımda %17,53 artmıştır. HC emisyonları, %50 JP8 içeren karışımda %46,392 oranında azalmıştır. NO_x emisyonları, %50 JP8 içeren karışımda %262,493 oranında artış göstermiştir. Performans ve emisyonlardaki bu trend, 3B silindir içi yanma HAD modelinden alınan parametrelerle de teyit edilmiştir. Sonuç olarak, JP8 ilavesinin özellikle düşük ve orta düzey karışım oranlarında motor performansını artırdığı, CO ve HC emisyonlarını azalttığı, ancak yanma sıcaklıklarının artmasına bağlı olarak NO_x ve CO₂ emisyonlarını yükselttiği belirlenmiştir. Bu çalışma, benzin-JP8 karışımlarının ticari benzinli motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilirliğini değerlendiren kapsamlı bir deneysel ve sayısal analiz sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Yanma, içten yanmalı motorlar, havacılık yakıtları, JP-8, motor testi, HAD.



ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF GASOLINE-JP8 MIXTURES ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS IN A COMMERCIAL ENGINE

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Master's Thesis

Supervisor: Assistant Professor Emrah KANTAROĞLU

July 2025, 62 pages

In this master's thesis study, the effects of gasoline and gasoline-JP8 fuel blends on engine performance and emissions were investigated using engine testing and a three-dimensional (3D) in-cylinder combustion CFD (Computational Fluid Dynamics) model on a commercial engine (Honda L13A4 i-DSI) equipped with a dual-spark ignition system. In this study, JP8 fuel was evaluated as an unconventional alternative fuel, blended with gasoline in mass ratios of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, and 50%. A total of 22 different fuel types were examined at the critical engine torque speed of 2800 rpm. For CFD analyses, measurement and control parameters obtained from the tests were used, and a 3D model of the engine was created. All analyses were conducted at wide-open throttle (100%) and a constant engine speed of 2800 rpm. In engine tests, evaluations were made based on key performance indicators such as torque, power, brake specific fuel consumption (BSFC), mean effective pressure (IMEP), and volumetric efficiency. CFD analyses were performed using Ansys-Forte 22R1 software by modeling one cylinder of the engine, and indicated engine characteristics were calculated. In the 3D model, in-cylinder pressure, temperature, and emissions were calculated as a function of crank angle, and radial and axial temperature distribution contours were generated. Experimentally, CO, CO₂, HC, NO_x, O₂, and lambda values, as well as exhaust gas temperature, were measured at the exhaust outlet; these values were also calculated as a function of crank angle in the numerical model. According to the engine catalog, the engine torque at 2800 rpm under full load is 119 Nm. This value was measured as 105.84 Nm under the same conditions in engine tests, with a deviation of 11.059%.

In the tests, as the JP8 ratio increased (i.e., 0–5–10–15–20–25–30–35–40–45–50%), torque, power, and mean pressure increased in the range of 0.501% to 2.731% compared to pure gasoline. In terms of emissions, CO emissions decreased by 53.418% in the blend containing 45% JP8. CO₂ emissions increased by 17.53% in the same blend. HC emissions decreased by 46.392% in the blend containing 50% JP8. NO_x emissions increased by 262.493% in the 50% JP8 blend. These performance and emission trends were also confirmed by the parameters obtained from the 3D in-cylinder combustion CFD model.

As a result, the addition of JP8, especially at low and medium blend ratios, was found to improve engine performance and reduce CO and HC emissions; however, it increased NO_x and CO₂ emissions due to elevated combustion temperatures. This study presents a comprehensive experimental and numerical analysis evaluating the applicability of gasoline-JP8 blends as alternative fuels in commercial gasoline engines.

Keywords: Combustion, internal combustion engines, aviation fuels, JP-8, engine testing, CFD.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince beni her zaman destekleyen, tecrübeleri ile beni yönlendiren ve bu tezin ortaya çıkmasında çok büyük bir emeği olan kıymetli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emrah KANTAROĞLU'na çıkan bu değerli eser için teşekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım. Yüksek lisans tezimin sayısal çalışmalarında gerekli teknik destekleri ve yardımını esirgemeyen ve bu tezin gelişimi için çok büyük bir katkı sağlayan Doç. Dr. Fatih AKTAŞ' a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana destek olarak her türlü maddi ve manevi desteği ve fedakarlığı gösteren sevgili annem ŞERİFE DOĞAN'a ve sevgili babam LATİF DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123M914 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2. Literatür Araştırması	4
2.MOTOR TESTİ.....	9
2.1. Motor Performansı ve Emisyon Ölçümleri	9
2.2. Motor Test Sistemi Belirsizlik Analizi.....	14
3.SİLİNDİR-İÇİ YANMA 3B HAD MODELİ	16
3.1. HAD Modeli Hassasiyet Analizleri.....	25
4.SONUÇLAR.....	28
5.GENEL DEĞERLENDİRMELER.....	40
5.1. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar	41
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

1.1. Yakıt karışım oranları.....	3
2.1 Motor test sistemi ölçüm ve hesaplama parametreleri	10
2.2. Test sistemi kontrol parametreleri	10
2.3. Test sistemi bileşenleri	12
2.4. Motor özellikleri.....	13
2.5. Performans ve emisyon ölçüm cihaz doğrulukları	15
2.6. Motor performansı ölçüm belirsizlikleri.....	15
3.1. Mesh parametreleri	19
3.2. Forte’ de tanımlanan alt modeller.....	22
3.3 Sınır koşul tanımlamaları.....	23
3.4. Yakıt kütleli oranları	23
3.5. Buji tanımlamaları	24
3.6. Simülasyon tanımlamaları	24
4.1. Yakıt özellikleri	28

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

2.1. Motor test sistemi	11
2.2. Test sistemi şeması	12
2.3. Benzin-JP8 yakıt karışımları	13
2.4. Motor test sisteminin çalışması	14
3.1. HAD modeli işlem basamakları	18
3.2. Sınır yüzeyleri	19
3.3. Mesh yapısı	21
3.4. Model hassasiyet analizleri karşılaştırması	27
4.1. Efektif tork-JP8 oranı karşılaştırması	31
4.2. Efektif güç-JP8 oranı karşılaştırması	31
4.3. BMEP-JP8 oranı karşılaştırması	32
4.4. BSFC-JP8 oranı karşılaştırması	33
4.5. CO-JP8 oranı karşılaştırması	34
4.6. CO ₂ -JP8 oranı karşılaştırması	35
4.7. HC-JP8 oranı karşılaştırması	36
4.8. NO _x -JP8 oranı karşılaştırması	37
4.9. Silindir-içi sıcaklık konturları	39

SİMGELER DİZİNİ

λ	Lambda
m_y	Yakıt debisi
n	Devir
P_e	Efektif güç
P_{BMEP}	Ortalama efektif basınç
b_e	Efektif özgül yakıt tüketimi
M	Motor torku
T	Silindir içi sıcaklık
t	Zaman
V_a	Hava debisi
m	Yakıt kütlesi
W_{Pe}	Güç ölçümü belirsizliği
W_{be}	Yakıt tüketimi ölçümü belirsizliği
W_{PBMEP}	Ortalama efektif basınç ölçüm belirsizliği
W_{m_y}	Yakıt debisi ölçüm belirsizliği
W_{η_v}	Volümetrik verim belirsizliği

KISALTMALAR DİZİNİ

3B	Üç boyut
A.Ö.N.	Alt ölü nokta
Ü.Ö.N.	Üst ölü nokta
C	Karbon
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
C ₈ H ₁₈	Benzin
HC	Yanmamış hidrokarbon
H ₂ O	Su buharı
O ₂	Oksijen
NO _x	Azotoksitler
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
i-DSI ignition	Intelligent dual-spark plug sequential
JP8	Jet yakıtı
KMA	Krank mili açısı
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds ortalama Navier-Stokes
LNG	Sıvılaştırılmış doğalgaz
LPG	Likit petrol gazı
BMEP	Ortalama etkin basınç
BSFC	Özgül yakıt tüketimi

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlar, günümüzde başta ulaşım olmak üzere enerji üretimi ve tarım gibi pek çok sektörde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu motorlarda kullanılan fosil yakıtların yanması, uygun motor performansı sunarken, aynı zamanda çeşitli kirlетici emisyonların atmosfere salınmasına da neden olmaktadır (Sinhg ve ark., 2023). Söz konusu emisyonlar; sera etkisi, hava kirliliğı, ozon tabakasının incilmesi ve asit yağmurları gibi çevresel sorunlar oluşturarak, iklim değışikliğine neden olur (Babamohammadi, 2025).

Hidrokarbon bazlı yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan egzoz emisyonları, atmosfer kirliliğinin temel kaynakları arasında yer alır. Bu süreçte çevreye salınan başlıca bileşenler; karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (UHC) ve azot oksitler (NO_x) gibi kirlетicilerdir (Abuşoğlu ve Kanoğlu). Yüksek yanma sıcaklıkları, yanma kararlılığını olumsuz etkileyerek CO salımını ve yakıt tüketimini artırabilirken; eksik yanma koşullarında UHC emisyonları artış gösterebilir. Ayrıca, sıcaklıkla doğrudan ilişkili NO_x ve partikül madde (PM) emisyonları da insan sağlığı üzerinde ciddi riskler oluşturur (Hao ve ark., 2023).

Motor performansını artırırken aynı zamanda emisyonları azaltmak ve kontrol altına almak, hem çevresel sürdürülebilirlik açısından hem de insan sağlığını korumak adına kritik öneme sahiptir (Ekins ve Zenghelis, 2021). Eneji talebinin artmasıyla birlikte azalan petrol rezervleri, yakıt verimliliğinin artırılmasını ve çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu hâle gelmiştir (Osman ve ark., 2023). Bu kapsamda, mevcut motor teknolojilerinin geliştirilmesi, alternatif yakıtların incelenmesi ve yeni ulaşım çözümlerine odaklanması gerekmektedir (Hafis ve ark., 2025). Bununla beraber ulaşımда içten yanmalı motorların yerini giderek elektrikli çözümler almaktadır (Arı, 2020; Alanazi, 2023). 2015 Paris Anlaşması ile birlikte, Avrupa Birliği, ABD, Kanada, Çin ve Hindistan gibi birçok ülke içten yanmalı motorlu araç satışlarını önümüzdeki on yıl içinde kısıtlamayı ya da tamamen sonlandırmayı planlamaktadır (Paris Anlaşması, 2015). Ayrıca, 28. Birleşmiş Milletler İklim Değışikliği Konferansı'nda (COP28), 2050 yılına kadar fosil yakıt kullanımının küresel ölçekte aşamalı olarak sona erdirilmesi hedeflenmiştir (COP, 2023). Ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırılmasına yönelik bu küresel taahhütler, elektrikli araçlar ve bunların bataryaları için pazarlarda durmayan bir büyümeye yol açtı (Niri ve ark., 2024). Bunlara dayanarak elektrikli güç sistemleri devreye alınmaya başlansa da, kararlı menzil ve sürdürülebilirlik bakımından elektrikli otomobil kullanımı mütevazî sayıdadır (Tilly ve ark., 2024).

Yakıt araştırmaları sadece otomotiv sektöru ile sınırlı değildir; deniz ve demir yolarında, roket, füze ve havacılık sektörlerinde yüksek enerji verimliliği ve güvenlik ön plandadır. Bu nedenle, bu sektörlerde yaygın olarak kullanılan özel yakıtların içten yanmalı motorlarla olan etkileşimi, henüz literatürde yeterince ele alınmamıştır.

Bu tez çalışmasında, sivil ve askeri havacılıkta yaygın olarak kullanılan JP8 jet yakıtı ile benzin karışımlarının, buji ateşlemeli bir motor üzerindeki etkileri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Burada amaç, JP8'in benzinle farklı kütle oranlarda benzinle karıştırılmasıyla elde edilen yakıtların motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini belirlemek ve bu karışımların uygulanabilirliğini ortaya koymaktır.

Çalışmada öncelikle yalnızca benzinle motor testi gerçekteştirilerek temel veriler elde edilmiştir. Daha sonra, JP8 yakıtı benzine kütle oran olarak %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45 ve %50 oranlarında ilave edilerek testler yapılmıştır. Bu karışımlar, ticari bir içten yanmalı motorda performans ve egzoz emisyonları açısından değerlendirilmiştir.

Ek olarak, söz konusu yakıtların bir silindiri temsil eden 3B silindir içi yanma HAD modeli ile sayısal analizler gerçekteştirilmiştir. Bu model, motorun emme ve egzoz hatları dâhil olmak üzere tüm silindir geometrisini kapsamaktadır. Tez çalışmasında, sayısal analizler, test verileri ile karışılaştırılmal olarak yürütölmüş ve motor içi basınç, sıcaklık, alev gelişimi gibi parametreler krank mili açısına göre detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Bu sayede silindir içi yanma durumunun hakimiyeti de sağlanmıştır.

Bu çalışmayla birlikte, benzin-JP8 karışımlarının hem otomotiv hem de havacılık sektörlerinde alternatif yakıt olarak uygulanabilirliği araştırılmış ve elde edilen bulgular, literatüre önemli katkılar sunmuştur. Bu yönüyle tez çalışması, yakıt çeşitliliği ve sürdürülebilir motor teknolojileri konularında önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Artan hava kirliliği ve enerji kaynaklarının fiyatlandırmasının getirdiği ekonomik baskılar, enerjinin daha verimli kullanımını zorunlu hâle getirmiştir. Bu kapsamda, içten yanmalı motorlarda hem performansın artırılması hem de emisyonların azaltılması yönündeki araştırmalar, giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışmaların temelinde yanma sürecinin iyileştirilmesi yer almakta olup, bu iyileştirme genellikle alternatif yakıtların kullanımıyla gerçekteştirilmektedir.

Bu tez çalışması, havacılıkta yaygın şekilde kullanılan JP8 tipi askeri jet yakıtının, otomotiv sektöründe buji ateşlemeli bir motorla kullanılması durumunda motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemeyi amaçlamıştır.

Bu doğrultuda seçilen JP8, hem askeri hem de sivil havacılık uygulamalarında kullanılmakta olup, otomotiv sektörü açısından da uygulama potansiyeli taşıyan bir yakıt niteliğindedir.

Çalışma iki ana yöntemle yürütülmüştür:

- Motor testleri (deneysel yöntem)
- 3 boyutlu silindir içi yanma HAD modeli (sayısal yöntem)

İlk aşamada, motor yalnızca benzin yakıtı ile test edilerek referans veriler elde edilmiştir. Ardından, benzine kütleli olarak sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45 ve %50 oranlarında JP8 ilave edilerek karışımlar hazırlanmış ve bu karışımlar ticari bir otomobil motorunda denenmiştir. Testlerin sonucunda motor performansı ve egzoz emisyonlarındaki değişimler izlenmiş, aynı zamanda da HAD modellemesi için gerekli olan giriş parametreleri belirlenmiştir. HAD modellemesi ile de silindir içi değişimler gözlenmiştir.

Çizelge 1.1'de görülebileceği üzere, testlerde dört temel parametre yer almakta; bunlardan bazıları bu çalışma kapsamında sabit tutulmuştur. Uygulanan değerler şu şekildedir:

- JP8 kütleli oranı: %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50
- Motor devri: 2800 d/d (sabit)
- Kelebek açıklığı: %100 (tam yük– sabit)

Bu kapsamlı çalışma ile JP8 yakıtının kıvılcım ateşlemeli bir motorla kullanımı detaylı biçimde incelenmiştir. Bu sayede de hem deneysel hem de sayısal veriler üzerinden performans ve emisyon karakteristikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, JP8'in belirli oranlarda benzinle karıştırılarak otomotiv motorlarında kullanılabilirliğine dair önemli bilgiler sunmakta ve havacılıkta kullanılan bu yakıtın otomotiv sektörü için potansiyel bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Çizelge 1. 1. Yakıt karışım oranları

İnceleme Matrisi					
Deney	HAD	Yakıt	Kütleli Oran (%)	Kelebek Açıklığı (%)	Devir (d/dk)
1	1	JP8_0	%100 Benzin + %0 JP8	100	2800
2	2	JP8_5	%95 Benzin + %5 JP8	100	2800
3	3	JP8_10	%90 Benzin + %10 JP8	100	2800
4	4	JP8_15	%85 Benzin + %15 JP8	100	2800
5	5	JP8_20	%80 Benzin + %20 JP8	100	2800
6	6	JP8_25	%75 Benzin + %25 JP8	100	2800
7	7	JP8_30	%70 Benzin + %30 JP8	100	2800
8	8	JP8_35	%65 Benzin + %35 JP8	100	2800
9	9	JP8_40	%60 Benzin + %40 JP8	100	2800
10	10	JP8_45	%55 Benzin + %45 JP8	100	2800
11	11	JP8_50	%50 Benzin + %50 JP8	100	2800

1.2. Literatür Araştırması

Literatürde farklı alternatif yakıtların kullanıldığı oldukça fazla çalışma mevcuttur. Ancak burada sadece bu tez kapsamında kullanılan ve bir havacılık yakıtı olan JP8'in kullanımıyla alakalı olan literatür bilgisi sunulmuştur.

Arkoudeas vd. (2003), çalışmalarında tek silindirli bir dizel test motorunu, biyodizel (ayçiçek yağı ve zeytin yağı)-JP8 karışımları ile test etmişlerdir. Çalışmalarında biyodizele %10, %30 ve %50 oranında JP8 katılmıştır. Test sonuçlarını analiz ettiklerinde JP8 yakıtının ilave edilmesiyle PM (partikül molekül) emisyonlarının azaldığı, ancak HC ve CO emisyonlarının ortalama olarak sabit kaldığını saptamışlardır.

Fernandes vd. (2007), dizel motor üzerinde yaptıkları çalışmalarında, JP8 yakıtı kullanımında daha düşük NOx ve PM emisyonları elde etmişlerdir.

Lee, Oh ve Bea (2012), JP8 ve dizel yakıtın, yüksek basınçlı common-rail enjeksiyon sistemi ile donatılmış, optik olarak erişilebilir tek silindirli ağır hizmet tipi dizel motordaki yanma süreçlerini analiz ettikleri çalışmalarında, dizel yakıtının yanma sırasında JP8'den daha güçlü bir alev parlaklık alanına sahip olduğunu ve görünür alev radyasyon süresinin JP8'den daha uzun olduğunu saptamışlardır.

Yamık vd. (2013), çalışmalarında JP8 yakıtını tek silindirli bir dizel motorunda referans dizel yakıtına hacimsel olarak %5, %10, %25 ve %50 oranlarında ilave ederek performans ve emisyonları incelemişlerdir. Test sonuçlarında, JP8 arttıkça tork ve özgül yakıt tüketiminin azaldığını, NOx' in azaldığını ve CO' nun arttığını gözlemlemişlerdir.

Uymaz vd. (2014), çalışmalarında, tek silindirli, tabii emişli ve direkt enjeksiyonlu dizel motorda biyodizel-JP8 karışımlarını 77,5 Nm, 11,25 Nm, 15 Nm ve 18,75 Nm torklarda ve 2200 d/dk motor hızında test etmişlerdir. Karışımlardaki biyodizel oranının artmasıyla NOx'de artış, CO' da ise azalma gözlemlemişlerdir.

Labeckas ve Slavinskas (2015), çalışmalarında, bir dizel motorunu dizel yakıt, JP8 ve keten tohumu yağı metil esteri karışımları ile 1400d/dk ve 2200d/dk motor hızlarında tam kelebek açıklığında test etmişlerdir.

Biyodizel-JP8 karışımlarında, biyodizel oranının artmasıyla tutuşma gecikmesinin, ısı salınımının, silindir içi maksimum basıncın ve ısı verimin arttığını saptamışlardır.

Aynı zamanda biyodizel oranı arttıkça, NO_x 'de artış, CO ve HC' de azalma gözlemlenmiştir.

Kantaroğlu ve Yontar (2017), çalışmalarında buji ateşlemeli ticari bir motorda, benzin-JP8 karışımlarının performansa ve emisyonlara etkisini deneysel ve sayısal olarak (1 boyutlu motor modelleme) incelemişlerdir. İncelemelerini, tam yükte ve 1000-2000-2800-4000-5000-6000 d/dk motor hızlarında gerçekleştirmişlerdir. İnceleme sonunda maksimum tork devri 2800 d/dk'da gözlemlenirse de yüksek devirlerde JP8 oranının artmasıyla torkta bir artış saptanmıştır.

Ardebili vd. (2022), yaptıkları deneysel ve istatistiksel çalışmada, tek silindirli sıkıştırma ateşlemeli motorda 7.5, 12.5 ve 17.5 Nm motor yüklerinde JP8 ve biyodizel ayçiçek yağı karışımlarının performans ve emisyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerle birlikte, istatistiksel yöntem olarak kullanılan Response Surface Yönteminin tasarımı Design Exper 11 program ortamında Central Composite Design ile gerçekleştirilmiştir. Testlerde, özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, tutuşma gecikmesi, ekivelans oranı, egzoz gazı sıcaklığı, CO ve NO_x emisyon tepki parametreleri değerleri belirlenmiştir. Elde edilen ölçüm parametreleri için varyans analizi yapılarak ikinci dereceden modeller oluşturulmuştur. Optimizasyon sonrasında motor yükünün 14,49 Nm ve JP8 yakıt biyodizel oranının %2,47 olması gerektiği sonucuna varmışlardır. Motorun optimum girdi parametreleri ile çalıştırılması durumunda ortalama efektif basınç değeri 3,71 bar, özgül yakıt tüketimi değeri 193,46 g/kWh, CO değeri 724 ppm ve NO_x değeri 168,62 ppm olarak ölçülmüştür.

Alabaş vd. (2024), çalışmalarında, askeri havacılıkta yaygın olarak kullanılan JP8 yakıtının sabit ısı gücüte çalıştırıldığı bir gaz türbini yanma odasında farklı hava/yakıt oranlarındaki (AFR) kararlı yanma aralıkları ve emisyon değerleri deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde AFR oranları 30/1, 33/1, 36/1, 39/1 ve 42/1 olarak belirlenmiştir. Brülör çıkışına 0.4 swirl sayısına sahip bir türbülans jeneratörü yerleştirilmiş ve bu koşullar altında farklı AFR seviyelerinde dıştan uygulanan akustik frekansların dinamik kararsızlıklar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yanma alevinin uzunluğu ve kalınlığı görüntü işleme teknikleri kullanılarak elde edilen görsellerden sayısal olarak çıkarılmıştır. Ayrıca, AFR değişiminin yanma odası sıcaklığına etkisi analiz edilmiş ve oluşan kirletici emisyonları ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre, en kararlı alevin 155 Hz ve 300 Hz akustik frekanslarda, AFR 33/1 durumunda meydana geldiği görülmüştür.

AFR'nin 42/1'e çıkarılması durumunda ise tüm frekans aralıklarında alev kararsızlıklarının arttığı belirlenmiştir. Yanma odası çıkış sıcaklığı ve CO emisyonları açısından en uygun karışım oranı yine 33/1 olarak belirlenmiştir. Ancak, AFR'nin 39/1'e kadar artırılmasıyla birlikte NO_x emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. Çalışmalarında, JP8 yakıtı kullanılan girdaplı yanma sistemlerinde AFR değişiminin alev kararlılığı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini görüntü işleme teknikleriyle detaylı olarak ortaya koyularak, optimize yanma koşullarının belirlenmesine katkı sağlanmıştır.

Scenna ve Gupta (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, JP8 yakıtının katalizörsüz ve yüksek sıcaklıkta kısmi oksidasyonuna dayalı bir yakıt reforming sistemi geliştirilmiştir. Çalışma, homojen dağıtılmış hacimsel bir reaktör tasarımıyla gerçekleştirilmiş olup, düşük sıcaklıklı reforming sistemlerine kıyasla daha üstün gaz ürünleri elde edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, reforming ürünleri arasında %19,2 hidrojen (H₂) ve %20,8 karbon monoksit (CO) konsantrasyonu gibi yüksek sentez gazı bileşenlerini ortaya koymuştur. Ayrıca, oluşan hidrokarbonlar yalnızca oldukça az miktarlarda (örneğin propan <15 ppm) tespit edilmiştir ve sistem içinde kurum oluşumu gözlemlenmemiştir. Reaktör sıcaklıklarının yükseltilmesiyle birlikte, daha düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbonların (metan, asetilen, etilen) parçalanması teşvik edilmiş ve böylece sentez gazı verimi artırılmıştır. Bu bağlamda, çalışmada elde edilen gaz bileşimi, katalitik reforming sistemlerinden elde edilen değerlere oldukça yakın bulunmuştur. Ayrıca, reaktör sıcaklığının artmasıyla birlikte reaksiyon rejiminin daha az dağılmış hale geldiği ve bu durumun reforming gaz kalitesini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Ancak iyi yalıtılmış reaktör tasarımı sayesinde ısı kayıpları minimuma indirgenmiş ve düşük sıcaklıklı sistemlerle sağlanamayan yüksek verimli reforming koşulları elde edilmiştir.

Kılıçalp ve Demir (2025) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, JP-8, Jet A-1 ve nitrometan içeren benzin bazlı yakıt karışımlarının bir hava soğutmalı, dört zamanlı, tek silindirli benzinli motor üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Motor 2500 d/d sabit devirde, 0–10 Nm arası değişen tork yükleri altında çalıştırılmış; BSFC, termal verimlilik, egzoz sıcaklığı, emisyonlar (CO, CO₂, NO_x, HC, O₂), titreşim ve ses seviyeleri ölçülmüştür. Çalışmada özellikle JP-8 ve nitrometan içeren yakıt karışımlarının yüksek tork koşullarında daha iyi termal verimlilik sağladığı ortaya konmuştur.

Örneğin, 90G5NM5JP8 yakıt karışımı, 10 Nm yükte %18,46 ile en yüksek termal verimliliği göstermiştir (referans yakıt olan G100 için bu değer %16,67'dir). Aynı koşulda bu karışım 458.17 g/kWh ile en düşük BSFC değerine ulaşmıştır. CO ve HC emisyonları artan yükte birlikte azalırken, 90G5NM5JP8 karışımı 3.026% CO ve 76 ppm HC ile en düşük seviyeleri üretmiştir. Öte yandan, NO_x emisyonları artan yükte birlikte yükselmiş; 90G5NM5JP8 karışımı 2000 ppm seviyelerine ulaşarak daha yüksek yanma sıcaklıklarına işaret etmiştir. Jet A-1 ve nitrometan katkılı karışımların CO₂ emisyonlarındaki artış ise daha tamamlanmış bir yanma sürecini yansıtmaktadır. Titreşim ve ses analizleri, motor yükü arttıkça tüm yakıt türlerinde belirgin artış göstermiştir. Saf benzin (G100) için titreşim 33.49 m/s²'den 97.49 m/s²'ye çıkarak %191 oranında artarken, JP-8 ve nitrometan içeren 90G10JP8 karışımı %224 artış göstermiştir. Benzer şekilde, gürültü düzeyleri de artmış; 90G5NM5JP8 karışımı 99.13 dBA ile en yüksek ses seviyesini üretmiştir. Bu sonuçlar, JP-8 ve nitrometan karışımlarının motor performansını ve termal verimliliği iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu, ancak özellikle NO_x emisyonları açısından uygun kontrol stratejilerine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, alternatif yüksek enerjili yakıt karışımlarının özellikle savunma ve havacılık uygulamaları gibi yüksek performans gerektiren senaryolarda pratik kullanım açısından umut vadettiğini göstermektedir.

Thanh Tuan Le vd., (2025) tarafından gerçekleştirilen bu derleme çalışması, özellikle dizel motorlarında ön karışım yüklü sıkıştırma ile ateşleme (PCCI) ve kısmen ön karışım yüklü sıkıştırma ile ateşleme (PPCI) yanma modlarının mevcut araştırma durumunu kapsamlı biçimde incelemektedir. PCCI/PPCI gibi gelişmiş düşük sıcaklıklı yanma (LTC) modları, NO_x ve partikül madde (PM) emisyonlarının aynı anda azaltılmasına olanak tanıyan ileri düzey yanma stratejileri olarak öne çıkmaktadır. Bu modlarda, klasik dizel motorlarından farklı olarak, yanma büyük oranda önceden hazırlanmış, kısmen homojen hava-yakıt karışımının ön karışım fazında gerçekleşmektedir. Çalışmada, enjeksiyon stratejilerinin (enjeksiyon basıncı, zamanlaması, açısı vb.) PCCI/PPCI modları üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ele alınmış; aynı zamanda motor performansı, termal verimlilik ile NO_x salımı arasındaki denge açık şekilde analiz edilmiştir. Hem deneysel hem de sayısal simülasyon temelli araştırmalara dayanan bu çalışmada, özellikle egzoz gazı resirkülasyonu (EGR), motor yükü ve yakıt türünün PCCI/PPCI rejimindeki etkilerine dair kapsamlı değerlendirmeler sunulmuştur.

Elde edilen genel sonuçlar, PCCI/PPCI modlarının uygun motor ve yakıt kontrol stratejileri ile uygulandığında NO_x ve PM emisyonlarını eşzamanlı olarak önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu modlarda HC ve CO emisyonları artma eğilimindedir, bu nedenle gelişmiş yanma sonrası emisyon kontrol sistemlerinin entegrasyonu önerilmektedir. Bu kapsamlı derleme, dizel motorlarda çevresel etkiyi minimize etmek ve sürdürülebilir bir yanma süreci oluşturmak adına, PCCI/PPCI temelli yanma stratejilerinin gerek teorik gerek uygulamalı yönleriyle geliştirilmesi gerektiğini ve bu alanda daha fazla deneysel/doğrulama araştırmasına ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Ardebili vd., (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, JP-8 tipi askeri havacılık yakıtı ile ayçiçek yağı bazlı biyodizel yakıtının farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen yakıtların, tek silindirli bir sıkıştırma ile ateşlemeli motor üzerindeki performans ve emisyon etkileri hem deneysel hem de istatistiksel yöntemlerle detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında motor yükü üç farklı seviyede (7.5, 12.5 ve 17.5 Nm) ayarlanarak testler gerçekleştirilmiş; saf JP-8, saf biyodizel ve üç farklı oranlı karışım yakıtı olmak üzere toplam beş farklı yakıt testi yapılmıştır. Deneysel planlama, yanıt yüzeyi yöntemi (Response Surface Methodology - RSM) ile Design-Expert 11 yazılımı kullanılarak merkezi bileşik tasarım (Central Composite Design - CCD) yaklaşımı ile oluşturulmuş ve 13 farklı test kombinasyonu uygulanmıştır. Elde edilen deneysel verilerden ortalama efektif basınç (IMEP), BSFC, IMEP değişkenlik katsayısı (COVimep), tutuşma gecikmesi, eşdeğerlik oranı, egzoz gazı sıcaklığı, CO ve NO_x emisyonları gibi temel yanıt parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler için varyans analizi (ANOVA) uygulanarak ikinci dereceden (quadratic) regresyon modelleri geliştirilmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre, motorun 14.49 Nm yükte ve %2.47 biyodizel oranına sahip JP-8 karışım yakıtı ile çalıştırıldığında en uygun performans ve emisyon karakteristikleri elde edilmektedir. Bu çalışma sonucunda, söz konusu optimum koşullarda 3.71 bar IMEP, 193.46 g/kWh BSFC, 5.99 bar COVimep, 724 ppm CO ve 168.62 ppm NO_x değeri elde edilmiştir. Sonuçlar, JP-8 oranının artmasının NO_x emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olduğunu, ancak biyodizel oranının artmasının CO emisyonlarını yükselttiğini göstermektedir. Ayrıca, maksimum IMEP değerinin %50 biyodizel içeren karışımda gözlemlenmiş olması, biyodizelin motor yükü altındaki yanma karakteristiklerine olan olumlu katkısını ortaya koymaktadır.

2. MOTOR TESTİ

Belirli koşullar altında motorların performans ve emisyon değerlendirmeleri, modifikasyon prosedürlerinin uygulanması, farklı çalışma parametrelerinin uygulanması gibi durumların nihai etkileri motor testleri ile belirlenir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen performans ve emisyon testleri, motorun verimlilik düzeyinin ve çevresel etkilerinin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır. Bu tür testlerde yaygın olarak kullanılan ekipmanlar arasında motor test dinamometreleri, yakıt ve emme havası için debi ölçüm cihazları, sıcaklık ve basınç izleme sensörleri ile çeşitli emisyon analizörleri yer almaktadır.

2.1. Motor Performansı ve Emisyon Ölçümleri

Motor testleri, Honda L13A4 modeline ait çift bujili i-DSI motorun bir dinamometre sistemine bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, tam gaz konumunda (WOT) ve motorun maksimum tork ürettiği 2800 d/dk motor devrinde uygulanmıştır. Test süresince motor performansına yönelik olarak efektif tork, motor devri, yakıt debisi ve emme havası debisi gibi parametreleri ölçülmüştür. Bu temel ölçümlerden yola çıkılarak, efektif güç (BP), BMEP ve BSFC parametreleri hesaplanmıştır. Aynı anda egzoz gazındaki CO₂, CO, toplam yanmamış hidrokarbonlar (UHC) ve azot oksitler (NO_x) gibi emisyon değerleri de kaydedilmiştir. Ölçülen ve türetilen tüm parametreler Çizelge 2.1’de sunulmuştur.

Testlerin doğruluğunu sağlamak ve dış etkenlerin sonuçlar üzerindeki etkisini minimize etmek amacıyla ortam koşulları da izlenmiştir. Bu kapsamda emme havasının sıcaklığı, basıncı ve bağıl neminin yanı sıra PM2.5, formaldehit (HCHO), toplam uçucu organik bileşikler (TVOC) ve ortam CO₂ seviyeleri gibi hava kalitesi göstergeleri ölçülerek deney ortamı sürekli kontrol altında tutulmuştur. Emme havasının fiziksel koşulları kadar, motorun termal durumunun da test performansını etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle motor bloğu, egzoz manifoldu ve soğutma suyuna ait sıcaklıklar da anlık olarak izlenmiş ve sabit sınırlar içinde kalması sağlanmıştır. Bu çevresel ve yapısal kontrol parametreleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Tüm bu test verileri, 3B silindir içi yanma HAD modelinin sınır şartlarını tanımlamada kullanılmıştır. Aynı zamanda, deneysel ölçüm sonuçları HAD analizlerinin çıktılarıyla karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmıştır.

Çizelge 2.1. Motor test sistemi ölçüm ve hesaplama parametreleri

Ölçülen parametre	Hesaplanan parametre
Devir	BP
Tork	Volümetrik verim
Yakıt kütleli debisi	BMEP
Emme havası debisi	BSFC
Egzoz gazı sıcaklığı	Lambda
Ortam basıncı	
Ortam sıcaklığı	
Motor suyu sıcaklığı	
Motor blok sıcaklığı	
CO ₂	
CO	
UHC	
NO _x	

Çizelge 2.2. Test sistemi kontrol parametreleri

Kontrol parametresi	Hava kalitesi parametreleri	Yakıt parametreleri
Motor devri	Ortam basıncı	Yoğunluk
Gaz kolu keleşbeği	Ortam sıcaklığı	Kütle
Motor blok sıcaklığı	Ortam nemi	Sıcaklık
Motor suyu giriş çıkış sıcaklıkları	PM _{2.5}	Basıncı
Radyatör fanı hava hızı	HCHO	
	TVOC	
	CO ₂	

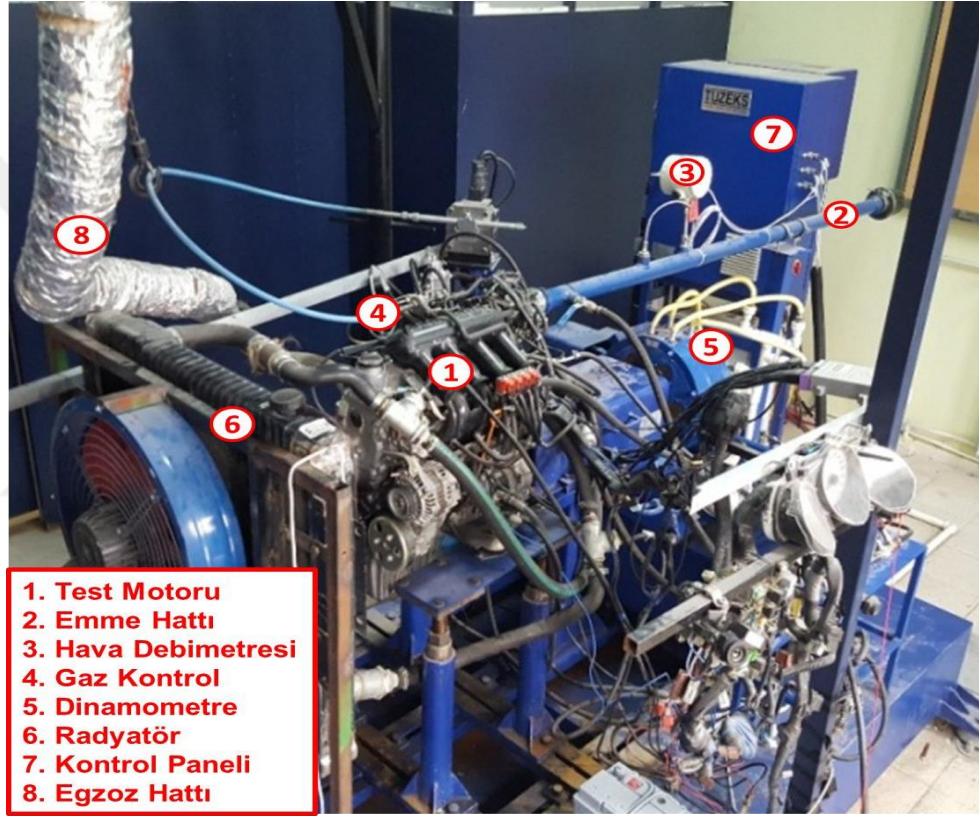
Motor performansına ilişkin ölçümler, bilgisayar kontrollü ve eddy-current prensibiyle çalışan bir dinamometre yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yakıt ve hava sistemlerine ait akışkan debileri ile sıcaklık ölçümleri, test sistemine entegre edilmiş hassas debimetreler ve sıcaklık sensörleri aracılığıyla elde edilmiştir. Egzoz emisyon değerleri ise, ayrı bir bilgisayar sistemine bağlı olarak çalışan, çok parametrelili bir emisyon ölçüm cihazı ile tespit edilmiştir.

Yakıtın kütleli debisi, başlangıç kütleli bilinen bir yakıt tankında test süresi boyunca meydana gelen kütle azalmasının hesaplanması yoluyla belirlenmiştir. Ayrıca, motorun hacimsel verimini hesaplamak amacıyla emme havasının hacimsel debisi, emme sistemine yerleştirilen debimetre ile ölçülmüştür.

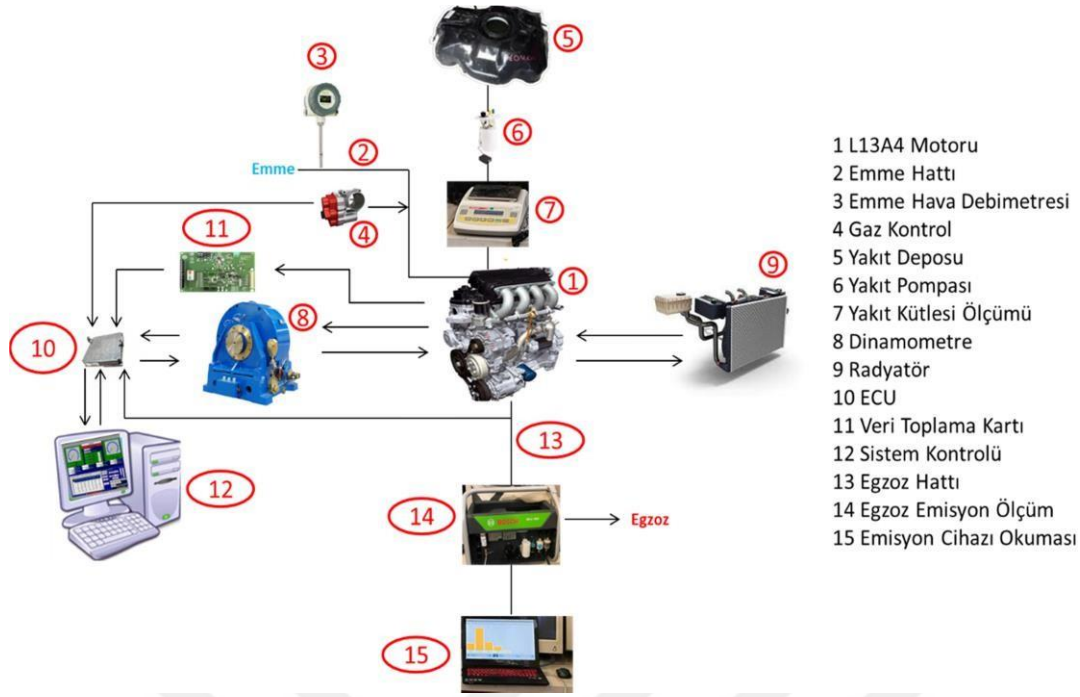
Motor testleri sırasında, test hücresi içerisindeki ortam havasına ait basınç, sıcaklık, bağlı nem ve hava kalitesi gibi çevresel parametreler de test sürekliliği için izlenmiştir.

Bunlara ek olarak, yakıt sıcaklığı, motor soğutma sıvısının giriş ve çıkış sıcaklıkları, dinamometrenin yağ basıncı ve sıcaklığı ile motor bloğu sıcaklığı gibi parametreler test süresince takip edilmiştir. Bu kontrol önlemleri sayesinde, tüm testler mümkün olan en eşit şartlar altında gerçekleştirilmiştir.

Test sisteminin genel görünümü ile kullanılan temel ölçüm cihazları Şekil 2.1’de, sistemin çalışma prensibini gösteren şematik akış diyagramı ise Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Motor test sistemi



Şekil 2.2. Test sistemi şeması (Kantaroğlu ve Doğan, 2024)

Motor test sistemine ait Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de gösterilen düzeneğe ait; motorun çalışması sırasında izlenen kontrol parametreleri ile performans ve emisyon ölçümlerinin gerçekleştirildiği cihazlara ait marka ve model bilgileri, Çizelge 2.3’te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.3. Test sistemi bileşenleri

Test ekipmanları	Marka/Model
i-DSI Motor	Honda Jazz L13A4
Dinamometre	Tuzeks TUD 100
Dinamometre kontrol yazılımı	Tuzeks MOTEST
Emisyon ölçüm cihazı (CO, CO ₂ , HC, NO _x)	BOSCH BEA 060
Emisyon ölçüm cihazı (Soot)	BOSCH BEA 070

Motor testlerinde kullanılan ve aynı zamanda 3B silindir-içi yanma HAD modeli ile analiz edilen test motoru, literatürde benzer yakıtlarla yürütülen çalışmalarda kullanılan motorlara kıyasla ileri düzey teknik özelliklere sahiptir. Söz konusu motor, Honda’nın VTEC (Değişken Supap Zamanlaması ve Supap Açıklığı Kontrolü) ve VVT (Değişken Supap Zamanlaması) teknolojileriyle donatılmıştır. Ayrıca motor silindir kapağında, karşılıklı konumlandırılmış çift buji ve emme/egzoz portları yer almaktadır.

Emme portu, yüksek swirl (girdap) oranı (1.10–1.36) ve güçlü türbülans oluşumları sağlayan yüksek tumble (takla) oranı (1.30–1.58) ile dikkat çekmektedir (Migita et al., 2002).

Bu gelişmiş yanma odası geometrisi ve hava hareketi özellikleri sayesinde motor, 10.8:1 gibi yüksek bir sıkıştırma oranına sahiptir. Testlerde kullanılan motorun teknik özellikleri detaylı şekilde Çizelge 2.4’te sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Motor özellikleri (Migita vd., 2002)

Özellik	Parametre
Motor	Honda L13A4
Strok hacmi, cm ³	1339
Sıkıştırma oranı	10.8:1
Çap x Strok, mm	73 x 80
Maks. Güç, kW (5700 d/d için)	63
Maks. Tork, Nm (2800 d/d için)	119

Şekil 2.3’ te test öncesinde hazır olan yakıtlar gösterilmiştir. Şekil 2.4’ te ise testler sırasında, motor test hücresinde çekilmiş fotoğraflar yer almaktadır.



Şekil 2.3. Benzin-JP8 yakıt karışımları



Şekil 2.4. Motor test sisteminin çalışması

2.2. Motor Test Sistemi Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmalarda bağımsız değişkenler kullanılarak hesaplanan bağımlı değişkenlerin hata oranlarının belirlenmesi oldukça önem arz eder. Motor test sisteminde gerçekleştirilen ölçümlerde, çeşitli belirsizlik kaynakları test sonuçlarının doğruluğunu etkilemektedir. Bu nedenle sonuçlar değerlendirilirken, hem ölçüm cihazlarının hassasiyetinden kaynaklanan sistematik hatalar hem de kullanıcıdan kaynaklanan uygulama hataları dikkate alınarak değerlendirme yapılması gerekmektedir. Motor testlerinde, ölçüm sistemlerinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, motor ve tüm ölçüm cihazları mümkün olan en kararlı ve stabil koşullarda çalıştırılmıştır. Bu bağlamda, mekanik titreşimlerden kaynaklanan motor üzerindeki dikey ve yanal parazit yükler ve termal genleşmelerden doğan sürtünme etkileri gibi dış etkenlerden uzak durulmuş, böylece uygulamaya bağlı hata payları asgariye indirilmeye çalışılmıştır. Ancak, cihazların kendi yapısal doğruluk sınırlarından kaynaklanan belirsizliklerin tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir.

Bu çalışmada, motor performans testlerine ilişkin ölçüm belirsizlikleri hesaplanmıştır. Bu kapsamda, motor devri, tork, yakıt kütlesi ve emme havası debisi gibi performansa ilişkin temel bağımsız parametreler dikkate alınmıştır. Ayrıca CO, CO₂, UHC ve NO_x gibi egzoz emisyon bileşenlerinin ölçümünde kullanılan emisyon analiz cihazının doğruluk değerleri de emisyonlar değerlendirilirken dikkate alınmıştır.

Ölçüm cihazlarının etiket veya kataloglarından alınan ölçüm doğrulukları Çizelge 2.5'te sunulmaktadır. Belirsizlik analizleri, tam gaz açıklığı (%100 kelebek konumu), 2800 d/dk motor devri ve yalnızca benzinli yakıt koşulları için, Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır (Brettschneider, 1997).

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} * W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} * W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} * W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Çizelge 2.5. Performans ve emisyon ölçüm cihaz doğrulukları

	Parametreler	Sembol	Birim	Doğruluk
Performans	1 Motor devri	n	rpm	±1.00
	2 Tork	M	Nm	%±0.25
	3 Zaman	t	s	±0.01
	4 Yakıt kütlesi	m	g	±0.10
	5 Hava debisi	V _a	m ³ h ⁻¹	%±1.50
Emisyon	6 Karbonmonoksit	CO	%vol.	±0.001%
	7 Karbondioksit	CO ₂	%vol.	±0.01%
	8 Yanmamış hidrokarbonlar	UHC	ppmvol.	±1
	9 Azotoksitler	NO _x	ppmvol.	±1
	10 Lambda	λ	-	±0.001
	11 İs	C _{black}	%	±0.1%

Çizelge 2.5' deki bu doğruluk değerleri ile, motor test sisteminde 2800d/dk ve tam yükte benzin için yapılan ölçüm sonuçları kullanılarak Çizelge 2.6' daki belirsizlik hesapları yapılmıştır. Buradan görüldüğü gibi test cihazlarının ölçüm doğrulukları oldukça düşüktür. Bu da cihazların hassas ölçümler yapabildiğini göstermektedir. Dolayısıyla hata değerleri de buna bağlı olarak düşüktür.

Çizelge 2.6. Motor performans ölçüm belirsizlikleri

Sıra	Parametre	Sembol	Belirsizlik (%)
1	Efektif güç	W _{Pe}	0.250
2	Ortalama efektif basınç	W _{BMEP}	0.320
3	Yakıt debisi	W _{my}	0.069
4	Özgül yakıt tüketimi	W _{be}	0.260
5	Volümetrik verim	W _{ηv}	1.530

3. SİLİNDİR-İÇİ YANMA 3B HAD MODELİ

Bu tez çalışmasının bir diğer inceleme yöntemi de 3B silindir-içi yanma HAD analizleridir. Motor testlerinde kullanılan Honda L13A4 tipi çift bujili i-DSI motorunun bir silindirine ait olan silindir-içi birçok parametre bu yöntem sayesinde karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, benzin ve benzin-JP8 karışımlarının i-DSI motordaki yanma özellikleri, Ansys-Forte 22.R1 yazılımı kullanılarak geliştirilen 3B silindir-içi yanma modeliyle analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen motor testlerinden elde edilen ölçüm verileri, 3B silindir-içi yanma HAD modeli için hem giriş parametresi hem de doğrulama verisi olarak kullanılmıştır. Modelleme sürecinde, test ortamında ölçülen motor devri, basınç, sıcaklık ve debi gibi kontrol parametreleri kullanılarak fiziksel sınır şartları tanımlanmıştır.

Modelleme süreci; ön işlem (pre-processing), çözümleme (solver) ve son işlem (post-processing) adımlarını içerecek şekilde yapılandırılmıştır. Simülasyonlar, zamana bağlı ve basınca dayalı çözüm teknikleriyle yürütülmüş; ayrıca adaptif ve dinamik ağ (mesh) yapıları kullanılarak yanma fiziği detaylı biçimde temsil edilmiştir.

Yürütülen analizlerde, motor performansı açısından indike tork, indike güç, IMEP ve indike özgül yakıt tüketimi (ISFC) gibi parametreler hesaplanmıştır. Emisyon çıktısı olarak ise CO₂, CO, UHC ve özgül NO_x emisyonu (EINO_x) değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada uygulanan sayısal modelleme sürecinde, Ansys-Forte yazılımı içerisinde türbülanslı akış rejimleri için Navier-Stokes denklemleri çözülmektedir. Bu çözüm sürecinde kullanılan temel kabuller; ideal gaz yasası, Fick'in kütle difüzyonu yasası ve Fourier'in ısı iletim yasasıdır.

Ansys-Forte kuramsal dokümantasyonuna (Theory Manual) göre, kullanılan kütle, momentum ve enerji korunumu denklemleri Denklem 2 altında verilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_k \bar{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot [\bar{\rho} D \nabla \bar{y}_k] + \nabla \cdot \Phi + \bar{p}^c \quad 2$$

Denklem 3'de basınç kuvveti, viskoz kuvvetler ve türbülans etkilerinin olduğu momentum korunum denklemi verilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{P} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}} - \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\Gamma}} + \bar{\rho} \bar{\mathbf{g}} \quad 3$$

Denklem 4'de enerjinin korunumu denklemi verilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{\mathbf{I}}) = -\bar{\rho} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \mathbf{J} - \nabla \cdot \mathbf{H} + \bar{\rho} \tilde{\epsilon} + \tilde{Q}^c \quad 4$$

RANS modeli, anlık akış değişkenlerini kararlı ve kararsız bileşenlerine ayırır. Hem gelişmiş RNG (Yeniden Normalize Grup Teorisi) k-ε modeli hem de standart k-ε modeli formülasyonları değerlendirildiğinde, bu yaklaşımlar ε-denklemindeki hız dilatasyonu ve jet akışı nedeniyle oluşan kaynak terimlerini dikkate alır. RANS RNG k-epsilon türbülans model denklemi, Denklem 5’te verilmiştir.

$$\Gamma = -\bar{\rho} v_T \left[\nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T - \frac{2}{3} (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{I}} \right] + \frac{2}{3} \bar{\rho} k \tilde{\mathbf{I}} \quad 5$$

Γ Reynolds stres tensörüdür. v_T türbülanslı kinematik viskozite ve k türbülanslı kinetik enerjidir. $\tilde{\epsilon}$ daha önce de bahsedildiği gibi türbülanslı kinetik enerjinin dağılıma oranıdır. c_μ , türbülans modeli formülasyonları ile ilgili bir model sabitidir. RANS RNG ε-epsilon türbülans model denklemi, Denklem 6’da verilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\epsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{\epsilon}) = - \left(\frac{2}{3} c_{\epsilon 1} - c_{\epsilon 3} \right) \bar{\rho} \tilde{\epsilon} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} + \nabla \cdot \left[\frac{(v+v_T)}{\text{Pr}_\epsilon} \nabla \tilde{\epsilon} \right] - \frac{\tilde{\epsilon}}{\tilde{k}} \left[c_{\epsilon 1} (\boldsymbol{\sigma} - \Gamma) : \nabla \tilde{\mathbf{u}} - c_{\epsilon 2} \bar{\rho} \tilde{\epsilon} \right] - \bar{\rho} R \quad 6$$

Denklem 7’de çekirdek parçacıklarının hareketlerinden yararlanılarak, çekirdek büyüme oranının hesaplanması gösterilmiştir.

$$\frac{\partial \Gamma_k}{\partial t} = \frac{\rho_u}{\rho_k} (S_{\text{plazma}} + S_T) \quad 7$$

Denklem 8’de plazma hızının hesaplanması gösterilmiştir.

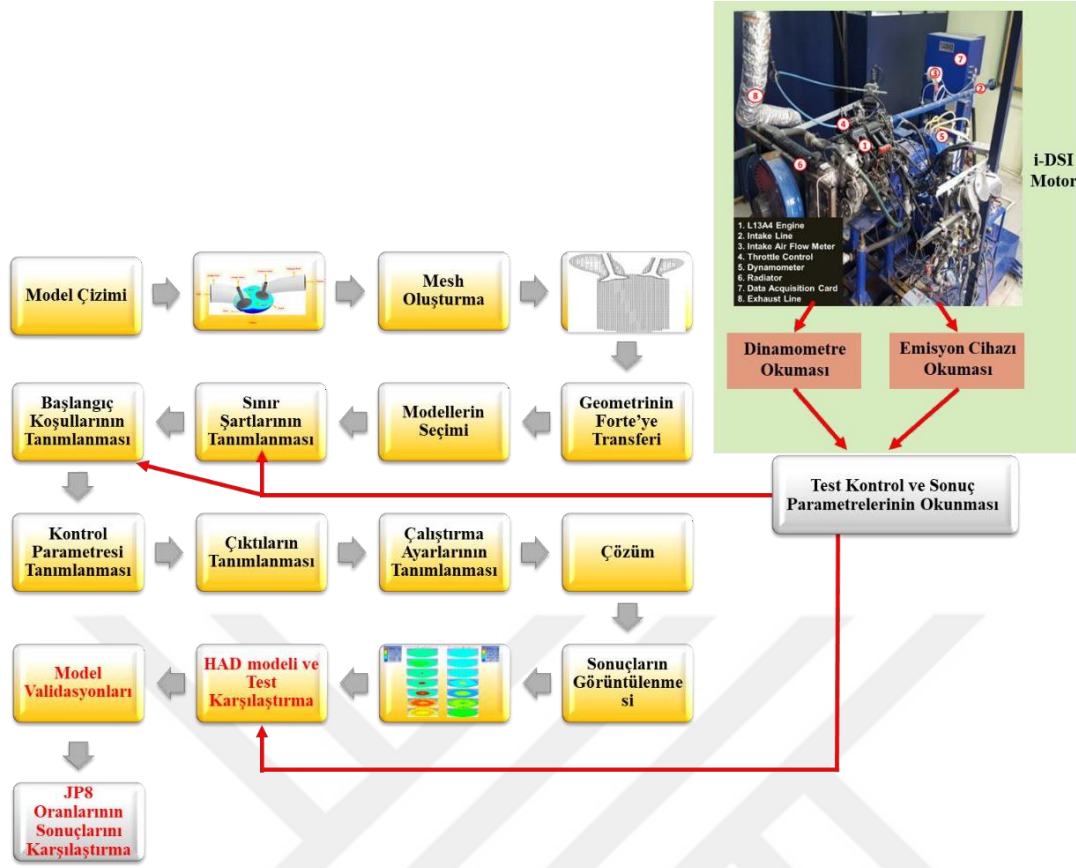
$$S_{\text{plazma}} = \frac{\dot{Q}_{\text{spk}} \eta_{\text{eff}}}{4\pi r_k^2 [\rho_u (u_k - h_u)] + p \frac{\rho_u}{\rho_k}} \quad 8$$

G-equation yanma modeli denklem setleri Denklem 9 ve Denklem 10’da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \rightarrow - \tilde{\mathbf{u}}_{\text{vertex}}) \cdot \nabla G = \frac{\bar{\rho}_u}{\bar{\rho}_b} S_0^0 |\nabla G| - D_T K |\nabla G| \quad 9$$

$$\frac{\partial \tilde{G}^2}{\partial t} + \tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla \tilde{G}^2 = \nabla \cdot \left(\frac{\bar{\rho}_u}{\bar{\rho}_b} D_T \nabla_{\parallel} G'' \right) + 2 D_T (\nabla G)^2 - c_s \frac{\tilde{S}}{k} \tilde{G}'' \quad 10$$

Motorun bir silindiri için yapılan silindir-içi yanma HAD analizi işlem basamakları Şekil 3.1’de yer almaktadır.

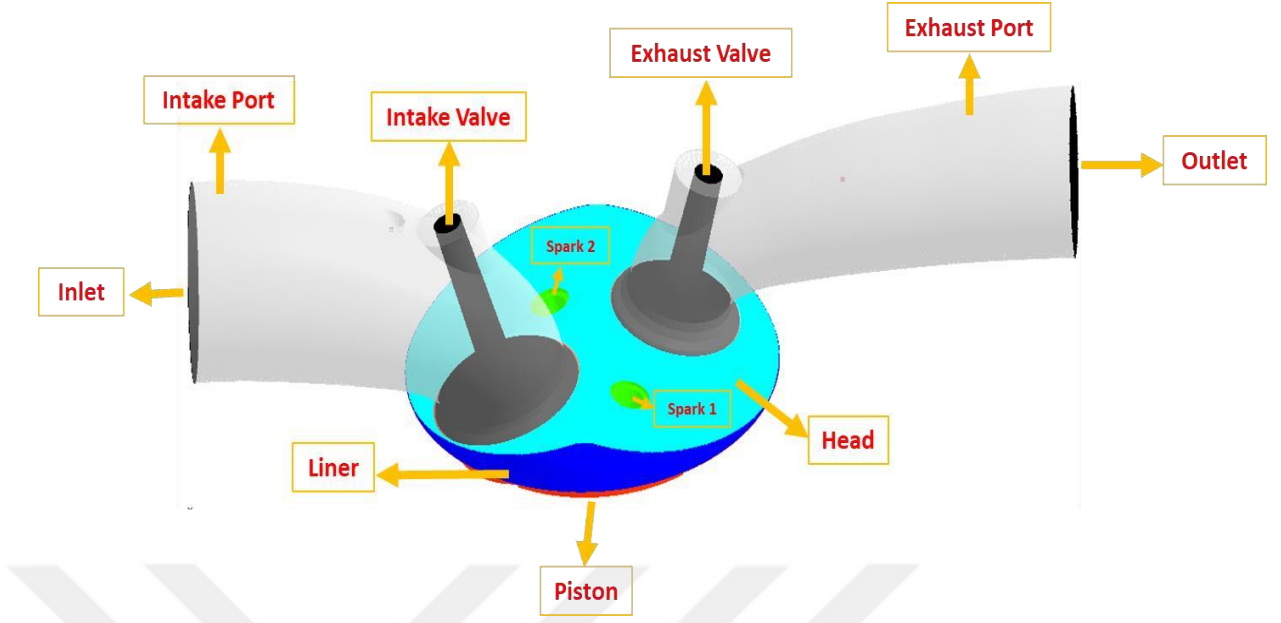


Şekil 3.1. HAD modeli işlem basamakları

Modellemenin ilk aşamasında, motor testlerinde kullanılan ve teknik özellikleri Çizelge 2.4’te ayrıntılı biçimde sunulan Honda L13A4 tipi, ardışık çift buji ateşlemeli ticari motorun bir silindiri temel alınarak 3B geometrik model oluşturulmuştur. Silindir-içi HAD modelinin geometrisi, emme manifoldundan egzoz manifolduna kadar olan tüm akış ve yanma alanlarını kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamda, motorun gerçek çalışma koşulları ve geometrik detayları mümkün olduğunca modelde temsil edilmiştir.

Katı modelleme işlemleri SolidWorks 2023 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, modelleme sırasında pistonun üst ölü noktada (ÜÖN) bulunduğu konum referans alınmıştır. Oluşturulan katı model, Ansys-Forte analiz ortamına aktarılırken akış hacmi tanımla ile dönüştürülmüş ve analizde kullanılacak akışkan alanlar bu doğrultuda belirlenmiştir.

Simülasyonlarda kullanılmak üzere, pistonun ÜÖN konumundaki geometri üzerinde belirlenen sınır yüzeyleri, analizde fiziksel koşulların tanımlanabilmesi için ayrı ayrı isimlendirilmiştir. Bu yüzey tanımlamaları ve ilgili model bileşenleri Şekil 3.2’de görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 3.2. Sınır yüzeyleri (Kantaroğlu 2022)

Bu çalışmada geliştirilen üç boyutlu silindir-içi yanma HAD modelinin ağ (mesh) yapısı, Ansys Workbench arayüzü kullanılarak oluşturulmuştur. Hazırlanan mesh yapısı, sayısal akışkanlar dinamiği analizlerinde kabul gören tüm temel kalite kriterlerini karşılamaktadır. Ayrıca, çözüm hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsız olduğunu göstermek amacıyla mesh bağımsızlık analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır.

Modelin mesh yapısına ilişkin tüm karakteristik metrikleri içeren detaylı veriler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Mesh parametreleri

Dinamik mesh parametreleri	Değerler
Eleman boyutu, mm	0.7
Mesh sayısı	637038-1891748
Topoloji	Hexahedral and Polyhedral
En-boy oranı	1-2
Çarpılma	0.2-0.36
Kalite	Orthogonal quality

Bu çalışmada geliştirilen 3B silindir-içi yanma HAD modelinde, mesh yapısı zamana bağlı olarak dinamik biçimde değişmektedir. Mesh sayısı, KMA’ ya göre doğrusal olarak hareket eden piston ve supap konumlarına bağlı olarak sürekli adaptif şekilde değişmektedir.

Çizelge 3.6'da gösterildiği üzere, simülasyon 320 KMA'dan başlamakta olup, bu nokta emme zamanının başlamasından yaklaşık 40 KMA önceye karşılık gelmektedir. Bu andan itibaren belirli bir KMA'dan sonra, emme supabı (343 KMA'da) açılmaya, egzoz supabı ise 348 KMA'da kapanmaya başlamaktadır. Simülasyonun başlangıç açısı olan 320 KMA'da hücre sayısı 231769'dur. Pistonun Üst Ölü Nokta'ya (ÜÖN) doğru ilerlediği 320–360 KMA aralığında, emme ve egzoz supaplarının açılma miktarının artmasıyla birlikte, mesh sayısı da yükselerek 355 KMA'da 787528'e ulaşmaktadır. Pistonun ÜÖN'ye ulaştığı 360 KMA'da ise silindir içi hacim minimuma inerken, mesh sayısı 637038 olarak hesaplanmıştır. Ancak bu noktada supaplar henüz tamamen kapanmamıştır.

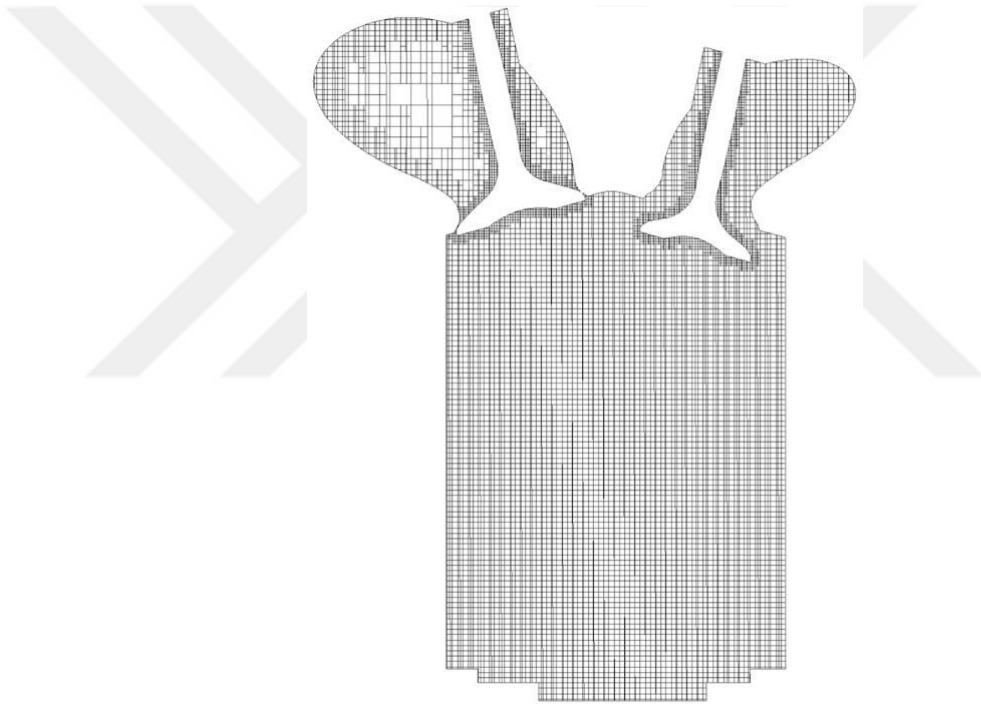
Emme zamanının sonunda, pistonun AÖN'ye ulaştığı 540 KMA'da, silindir hacmi maksimum seviyeye çıkar ve emme supabı açık kalır. Bu noktada mesh sayısı 837564'tür. 540 KMA'dan itibaren başlayan sıkıştırma zamanında, emme supabı 598 KMA'da tamamen kapanır. Bu anın hemen öncesinde, 580 KMA'da supap hareketi devam ettiğinden, hacim azalmasına rağmen geçici olarak mesh sayısı artar ve 580 KMA'da maksimum 1891748 mesh sayısına ulaşılır.

Yanma başlangıcı için bujiler, 1. buji için 690 KMA ve 2. buji için 695 KMA'da ateşlenir. Pistonun 720 KMA'da ÜÖN'ye tekrar ulaşmasıyla birlikte, silindir içi hacim en düşük seviyeye inerken, supaplar tamamen kapalı konumdadır ve mesh sayısı 258.164'e kadar düşer. Güç zamanının başladığı bu noktadan itibaren piston AÖN'ye doğru ilerlerken, hem hacim hem de mesh sayısı yeniden artar. Egzoz zamanının başlamasından hemen önce ise, önce egzoz supabı AÖN'den 42 KMA önce, yani 858 KMA'da açılmaya başlar. Bu esnada mesh sayısı geçici olarak 1754145'e yükselir. Pistonun 900 KMA'da AÖN'ye ulaşmasıyla birlikte, mesh sayısı 894754 olarak ölçülür. Egzoz zamanının sonlarına doğru, emme supabı 1063 KMA'da açılmaya ve egzoz supabı 1068 KMA'da kapanmaya başlar. Bu aralıktaki valf hareketleri nedeniyle mesh sayısı 1076 KMA'da 1821254'e kadar çıkar. Simülasyon döngüsü, pistonun tekrar ÜÖN'ye ulaştığı 1080 KMA'da sona erer. Bu noktadaki mesh sayısı ise 588845 olarak hesaplanmıştır.

3B silindir içi yanma HAD modelinin bir özelliği olarak bir diğer tanımlama da adaptif mesh tanımlamalarıdır. Bu yöntemle dinamik mesh yapısının hassasiyeti artırılır. Bu tanımlamalara Solution Adaptive Mesh (SAM) özelliği denir. Programda, SAM ayarları aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- Tüm duvarlar, giriş/çıkış kesitleri ve portlar için size fraction değeri 1/4 olup, 320–1080 KMA aralığında aktiftir.
- Emme ve egzoz supapları için size fraction değeri 1/8 olarak tanımlanmış ve 343–1080 KMA arasında etkinleştirilmiştir.
- SAM-Temperature tanımlaması, 690–800 KMA aralığında geçerli olup, size fraction değeri 1/4'tür.
- SAM-Velocity tanımı ise tüm döngü boyunca (320–1080 KMA) geçerli olup, yine 1/4 değerindedir.

Modelde kullanılan mesh yapısının ÜÖN konumundaki görünümü Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3 Mesh yapısı

Motorun geometrisiyle uyumlu olarak modelde, yakıt emme portunda valf arkasından hava üzerinde püskürtülür. Buradaki yanma pre-mixed (ön karışım) yanmayı ifade etmektedir. Bu nedenle, yanma olayı ön karışımli türbülansli yanma karakteristiği göstermektedir. Yapılan sayısal analizlerde, bu tür ön karışımli türbülansli yanmayı temsil edebilmek amacıyla G-denklemleri (G-equation) esasına dayalı bir yanma modeli benimsenmiştir. Bu model, Favre ortalama Navier-Stokes denklemlerine dayalı olarak geliştirilmiş olup, tam gelişmiş türbülansli alev cephelerinin ilerlemesini izlemeye yönelik olarak yapılandırılmıştır (Kantaroğlu, 2022).

G-denklemleri tabanlı modelde, türbülanslı akış alanında kimyasal türlerin ayrıştırılması sağlanarak yanmış ve yanmamış bölgeler ayırt edilmekte, bu bölgelerin sınırları boyunca alev cepheleri tanımlanmaktadır. Yanmanın çözümünde kullanılan türbülans modeli ise RNG (Renormalization Group) k-ε modeli olup, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) yaklaşımı çerçevesinde formüle edilmiştir. RANS modeli, türbülanslı akışların zamana göre ortalama özelliklerini ele alarak çözümler üretmektedir (Ansys-Forte Theory Manual, 2022).

Modellemelerde, yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerini temsil eden yakıt kütüphanesi olarak Ansys-ChemkinPro yazılımı kullanılarak Gasoline_1comp_49sp seçilmiştir. Bu kütüphanede benzin ve kerosen türlerinin yanında hava ve egzoz gazı türleri de indirgenmiş reaksiyonlar içinde yer almaktadır. Laminer alev hızı değerleri, önceden oluşturulmuş tablo verilerine dayanan Table Library modeli ile elde edilmiştir (Kantaroğlu, 2022). Türbülansın alev yayılımı üzerindeki etkisini dikkate alabilmek amacıyla, türbülanslı yanma hızı için Clavin-Williams modeli kullanılmıştır. Bu model, laminer yanma hızına türbülans katkısını dahil ederek alev cephelerinin gelişimini daha doğru şekilde temsil etmeyi amaçlamaktadır (Clavin & Williams, 1982). 3B silindir-içi yanma HAD modelinin tanımlanmasında, kaynak terimlerin model dışında bırakılmaması için ilgili kaynak terimi modelleri aktif hâle getirilmiştir. Bu sayede enerji, tür yoğunlukları ve momentum gibi alanlara ait etkileşimler doğru şekilde modellenmiştir. Simülasyonda kullanılan tüm model seçimleri ve tanımlamalara ilişkin bilgiler Çizelge 3.2’de detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Forte’ de tanımlanan alt modeller

Uygulanma Yeri	Modeller
Yanma rejimi	Premixed Turbulent Combustion
Türbülans modeli	RANS RNG k-ε
Yanma modeli	G-Equation
Laminer alev hızı modeli	Table Library
Türbülanslı yanma alev hızı modeli	Clavin-Williams
Yakıt kütüphanesi	Gasoline_1comp_49sp.cks
Kaynak terim modeli	Species, Momentum, Energy Sources

Daha önce Çizelge 2.2’de sunulan, test sistemi üzerinden elde edilen kontrol parametreleri, 3B silindir-içi yanma HAD modelinin sınır şartlarının tanımlanmasında temel alınmıştır. Bu parametreler; sıcaklık, basınç, debi gibi motor işletme koşullarını temsil etmektedir. Bu nedenle, model doğruluğunu artırmak amacıyla doğrudan deneysel verilerle uyumlu şekilde sisteme entegre edilmiştir.

Ancak, silindir içi basınç ve sıcaklıklarla, yanma odasını çevreleyen duvarların sıcaklıkları deneysel sistemden doğrudan ölçülememiştir. Yanma odasını çevreleyen duvarların sıcaklıkları, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan güvenilir bir kaynak olan Mahle GmbH (2012) tarafından önerilen sıcaklık değerleri ile aynı olarak Kabul edilmiştir. Modelde kullanılan tüm sınır şartları ayrıntılı olarak Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Sınır koşul tanımlamaları

Sınır koşulları	Momentum	Sıcaklık, K	Basınç, Pa	Temin edilme şekli
Inlet	Sabit Yüzey	325	98,750.00	Test parametresi
Intake Port	Sabit Yüzey	343	-	Test parametresi
Intake Valve	Hareketli Yüzey	343	-	Test parametresi
Outlet	Sabit Yüzey	858	95,000.00	Test parametresi
Exhaust Port	Sabit Yüzey	450	-	Test parametresi
Exhaust Valve	Hareketli Yüzey	500	-	Test parametresi
Head	Sabit Yüzey	575	-	Test parametresi
Liner	Sabit Yüzey	540	-	(Mahle, 2012)
Piston	Hareketli Yüzey	500	-	(Mahle, 2012)
Spark-1	Sabit Yüzey	600	-	(Mahle, 2012)
Spark-2	Sabit Yüzey	600	-	(Mahle, 2012)

3B silindir-içi yanma HAD modeli tanımlamaları sırasında, giriş/çıkış sınır şartı olarak verilen sıcaklık, basınç ve akışkan kompozisyonları, aynı zamanda simülasyon öncesi başlangıç şartı olarak da tanımlanmıştır. Bu amaçla, Benzin-JP8 karışımlarının ön karışımli yanmaya uygun olarak emme havası ile karıştırılmış halinin kütleli oranları girenler ve ürünler cinsinden Çizelge 3.4' de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Yakıt kütleli oranları

		Girenler				Ürünler			
	Karışım	Benzin	JP8	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	
	JP8_5	%95 Benzin + %5 JP8	0,0615	0,0032	0,2178	0,7174	0,1919	0,0916	0,7165
	JP8_10	%90 Benzin + %10 JP8	0,0606	0,0068	0,2172	0,7154	0,1915	0,0951	0,7135
	JP8_15	%85 Benzin + %15 JP8	0,0596	0,0105	0,2166	0,7133	0,1910	0,0987	0,7103
	JP8_20	%80 Benzin + %20 JP8	0,0583	0,0153	0,2158	0,7106	0,1905	0,1033	0,7063
	JP8_25	%75 Benzin + %25 JP8	0,0574	0,0188	0,2152	0,7086	0,1901	0,1065	0,7034
	JP8_30	%70 Benzin + %30 JP8	0,0561	0,0236	0,2143	0,7059	0,1896	0,1111	0,6993
	JP8_35	%65 Benzin + %35 JP8	0,0541	0,0314	0,2130	0,7015	0,1887	0,1184	0,6929
	JP8_40	%60 Benzin + %40 JP8	0,0530	0,0355	0,2123	0,6992	0,1882	0,1223	0,6894
	JP8_45	%55 Benzin + %45 JP8	0,0515	0,0413	0,2113	0,6959	0,1876	0,1278	0,6846
	JP8_50	%50 Benzin + %50 JP8	0,0494	0,0491	0,2100	0,6915	0,1867	0,1350	0,6782

Kullanılan test motorunda, her bir silindir için iki adet çapraz konumlandırılmış buji bulunmaktadır. Bujiler, belirli motor devirlerinde 2° - 5° KMA arasında değişen bir ateşleme zamanlaması farkıyla çalışmaktadır.

Motorun maksimum tork devri olan 2800 d/dk motor devrinde, elektronik kontrol ünitesi (ECU) tarafından bujiler arasında 5° KMA'lık sıralı bir ateşleme farkı tanımlanmaktadır (Nakayama et al., 2001).

Modelleme çalışmalarında kullanılan buji konumlarına ve ateşleme zamanlamalarına ilişkin detaylı tanımlamalar Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.5. Buji tanımlamaları

	Başlangıç zamanı, KMA	Ateşleme süresi, KMA	Başlangıç çekirdek alevi, mm	Enerji salınım oranı, J.s ⁻¹	G-equation Switch Constant	Partikül sayısı
Buji-1	690	10	1	30	2	3000
Buji-2	695	10	1	30	2	3000

Çizelge 3.6'da, analizi gerçekleşen tam bir çevrimin başlangıç ve bitiş açıları sunulmaktadır. Bunun yanında simülasyonların zamana bağlı olmasından dolayı zaman adımı başlangıç değeri tanımlaması yapılmış ve 5.05×10^{-5} s olarak tanımlanmıştır. Simülasyonda kullanılan maksimum zaman adımı ise 1.0×10^{-5} s olarak sınırlandırılmıştır. Ayrıca çözümleme sırasında krank mili açısı bazlı zaman çözünürlüğü maksimum 1.1 KMA olacak şekilde ayarlanmıştır. Sayısal çözüm algoritması olarak, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritması tercih edilmiştir (Kantaroglu, 2022). Bu algoritma, özellikle basınca bağlı denklemlerin çözümünde yarı kapalı yapı sunarak, türbülanslı akış ve ısı transferi içeren HAD problemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 3.6. Simülasyon tanımlamaları

Kontrol ve çözüm tanımlamaları	Değer
Simülasyon aralığı, KMA	320-1080
Zaman aralığı, KMA	360-1080
Motor hızı, d/d	2800
Başlangıç zaman adımı, s	5.05×10^{-5}
Maksimum zaman adımı, s	1.00×10^{-5}
Çözüm algoritması	SIMPLE

3.1.3B Silindir-içi Yanma HAD Modeli Hassasiyet Analizleri

Motor testlerinin sonunda, motor performans çıktılarına ilişkin parametreler olan tork, BP, BMEP ve BSFC değerleri, HAD modeli ile elde edilen indike silindir-içi parametrelerle kıyaslanarak modelin geçerliliği test edilmiştir. Bu sayede seçilen modellerin veya alt modellerin, deneysel verilerle uyum sağlayabilmesi açısından HAD modelinden elde edilen çıktıların, deneysel verilerle karşılaştırılması yoluyla modelin doğruluk değerlendirmesi yapılmıştır. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, silindir içi yanma HAD modelinde analiz doğruluğunu etkileyen çeşitli model ve parametre konfigürasyonları bulunmaktadır. HAD simülasyonlarının doğruluğunu artırmak amacıyla yapılan bir diğer işlem de kullanılan alt modeller (yanma, türbülans, ısı geçişi vb.) ve tanımlamalarının hassasiyet analizleridir. Bu tez çalışmasında, mesh sayısı, türbülans modeli, alev hızı modeli ve zaman adımı gibi seçimler için hassasiyet analizleri yapılmıştır.

Şekil 3.4' de gösterilen 3B yanma HAD modeli buraya kadar yapılan bütün tanımlamaları ve model seçimlerini ifade eden ana modeldir.

Hassasiyet anaizlerinin ilki, kullanılan mesh sayısının sonuçlara olan etkisini değerlendirmek amacıyla dört farklı ağ çözünürlüğünde (131620, 289560, 637038 ve 1401480 mesh) yapılmıştır. Şekil 3.4' deki termal verim grafiğine bakıldığında mesh sayısı 637038 (3B yanma HAD modeli)' e kadar arttıkça termal verim artmış ancak 637038 ve 1401480 mesh sayıları arasında termal verim değerlerinin sabit kaldığı ve bu sayının üstündeki çözünürlüklerin ek bir iyileştirme sağlamadığı görülmüştür. Bu nedenle, HAD analizlerinde kullanılan 3B silindire içi yanma HAD modeli için 637038 mesh sayısı referans alınmıştır.

Türbülans modeli için yapılan hassasiyet analizlerinde ise RANS RNG k- ϵ (3B yanma HAD modeli), RANS Standart k- ϵ , LES Dynamic ve LES Dynamic Structure olmak üzere dört farklı model test edilmiştir. LES modelleri, büyük ölçekli türbülans yapılarını çözümleyebilme kabiliyetleri nedeniyle daha yüksek doğruluk sağlayabilse de mevcut ağ çözünürlüğünde bu modellerin termal verim tahmin performansı yetersiz kalmıştır. RANS RNG k- ϵ modeli, deneysel olarak ölçülen %40'lık termal verim değerine en yakın sonucu (%43) vermiştir.

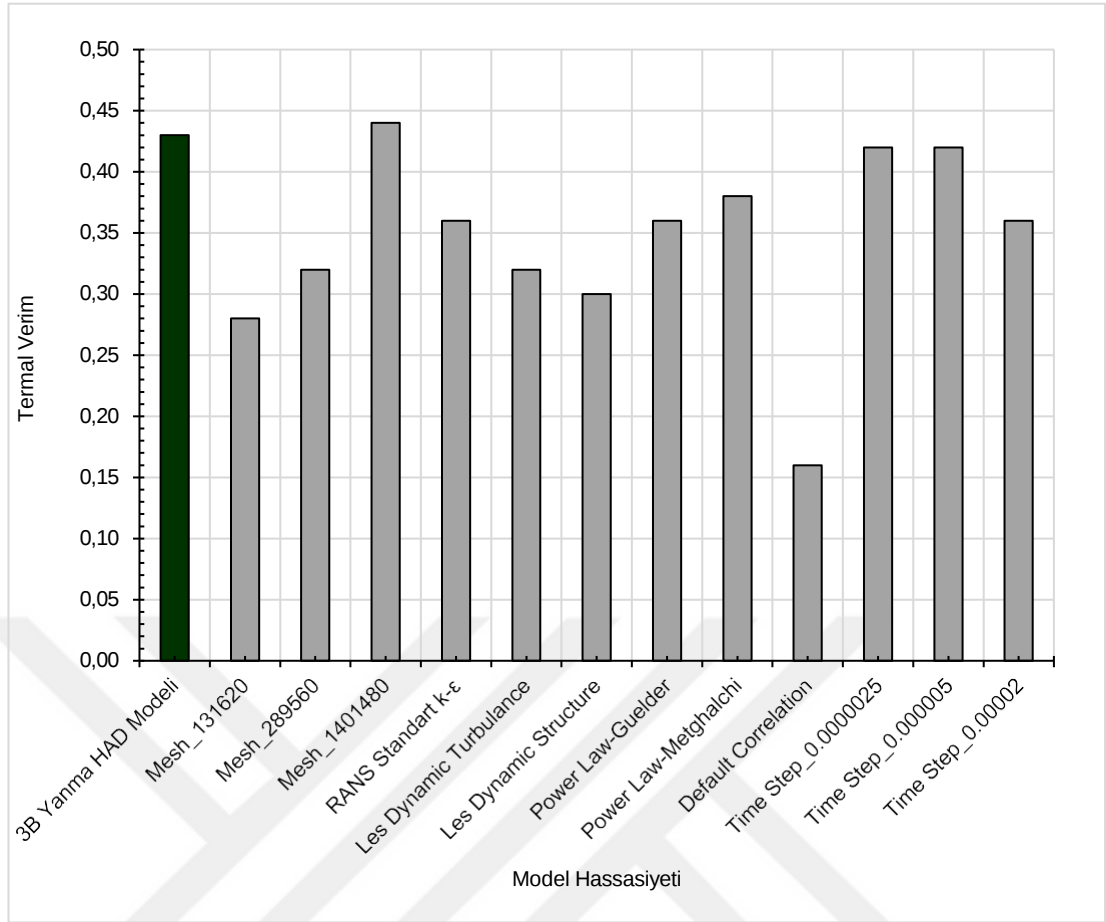
Literatürle uyumlu olarak, ağ hassasiyeti sınırlı olduğunda RANS modellerinin daha tutarlı sonuçlar verdiği kabul edilerek, analizlerin kalanında bu model kullanılmıştır (Kantaroğlu, 2022).

Laminer alev hızı modellemesi için üç farklı model karşılaştırılmıştır. Bu modeller, Table Library, Power Law-Gülder ve Power Law-Metghalchi şeklindedir. Çalışmanın genelinde yakıt karşılaştırmalarında Table Library (3B yanma HAD modeli) tercih edilmiştir. Bu modelde alev hızı sadece seçilen türlere bağlı olarak kütüphane verisinden çekilmektedir. Gülder ve Metghalchi modelleri ise Power Law yaklaşımına dayalı olup, laminar alev hızını empirik olarak hesaplamaktadır.

Türbülanslı alev hızı modeli için yapılan hassasiyet analizlerinde Clavin-Williams modeli (3B yanma HAD modeli) ve Ansys-Forte içinde varsayılan olarak gelen Default Correlation modeli test edilmiştir. Clavin-Williams modeli %43 termal verim değeri verirken, Default Correlation modeli yalnızca %16 termal verim değeri ile önemli ölçüde sapma göstermiştir. Clavin-Williams modeli ön-karışımli yanma durumları için daha basit ve geçerli çözümler sunduğundan tercih edilmiştir.

Zaman adımı duyarlılığı değerlendirmesinde sırasıyla 2,50E-06 s, 5,00E-06 s, 1,00E-05 s (3B yanma HAD modeli) ve 2,00E-05 s değerleri test edilmiştir. Simülasyon süresini azaltmak amacıyla zaman adımı artırıldığında, belirli bir eşiğe kadar sonuçlarda önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu nedenle, yakıt karşılaştırmalarında en büyük zaman adımı olan 1,00E-05 s tercih edilmiştir.

Sonuç olarak, model doğrulaması kapsamında yapılan hassasiyet analizleri; mesh çözünürlüğü (4 farklı model), türbülans modeli (4 farklı model), laminar alev hızı modeli (3 farklı model), türbülanslı alev hızı modeli (2 farklı model) ve zaman adımı (4 farklı değer) üzerinden gerçekleştirilmiş ve nihai termal verim değerleri Şekil 3.4'te sunulmuştur. Bu haliyle 3B yanma HAD modeli üzerinde tanımlanan parametreler ve seçilen modellerin test verisine daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 3.4 Model hassasiyet analizleri

4. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, çift bujili ticari bir motor olarak halen otomobillerde kullanılan Honda L13A4 i-DSI motorunda, benzine kütleli olarak %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45 ve %50 oranlarında JP8 yakıtı katılmış karışımın kullanılmasının etkileri deneysel ve sayısal yöntemlerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İncelemelerde motor hızı 2800 d/dk'da ve gaz kolu kelebek açıklığı da %100' de sabit tutulmuştur. Motorun performans ve emisyonları her iki yöntemle de karşılaştırılmış, ek olarak sayısal yöntemde silindir içi yanma ve basınç parametreleri de incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan yakıt karışım oranları ile deney ve simülasyon planlaması Çizelge 1.1'de detaylı olarak daha önce sunulmuştur. Çizelge 1.1'de belirtildiği üzere benzin dahil toplam 11 farklı yakıt karışımı için çalışma gerçekleştirilmiştir.

Söz konusu çalışma hem otomotiv hem de havacılık uygulamaları açısından dikkat çeken bu yakıt karışımlarının içten yanmalı bir motordaki davranışlarını ilk kez kapsamlı biçimde ele almaktadır. Kullanılan yakıtların davranışlarının daha iyi açıklanabilmesi için fiziksel ve kimyasal özellikleri bu bölümde Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Yakıt özellikleri

Yakıt	Benzin	JP8
Kimyasal formül	C_8H_{18}	$C_{10.17}H_{19.91}$
Yoğunluk (15 °C), g/L	649,267	775
Molar C/H oranı	0,44	0,51
Parlama noktası, °C	15,6	40
Alt ısı değeri, Mj/kg	44-46	43-44
Oktan sayısı	95	25-30
Enerji yoğunluğu, Mj/L	34,20	34,62

Bu tez çalışması kapsamında Çizelge 1.1' deki bütün testler gerçekleştirilmiştir.

Motor testlerinde, tüm yakıt karışım oranları için motor performansına ilişkin temel parametreler olan motor devri, tork, yakıt kütlesi, yakıtın ölçüm süresi ve emme hava debisi ölçülmüş; bu verilere bağlı olarak yakıt debisi, efektif motor gücü, BSFC ve BMEP hesaplanmıştır.

Motor testlerinde ölçülen performans parametreleri efektif parametrelerdir.

3B silindir-içi yanma HAD modelinden ölçülen parametreler de mekanik kayıpların dahil olmadığı ve direkt olarak tek bir silindirin içerisinde hesaplanan performans parametreleridir. Her iki inceleme yönteminin de birbirine göre eşit tabanda karşılaştırılması, yöntemlerin tutarlılığı için önem taşımaktadır. Bu nedene doğrulamalar ve yöntem kıyaslaması için mekanik kayıpların hesaplanması gereklidir. Efektif ve indike karakteristik geçişinin sağlanabilmesi için motorun mekanik verimi, test ölçüm sonuçlarına dayanarak Willans Line yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Willans Line yöntemi, içten yanmalı motorların mekanik verimliliğini tahmin etmek için kullanılan ampirik bir yaklaşımdır. Bu yöntem, motorun net gücü ile sürtünmeden kaynaklanan güç kaybı arasındaki ilişkiyi inceler (Sorrentino ve ark., 2015). Bu yöntemle göre, motorun mekanik verimi, motorda üretilen gücün sürtünme kayıplarına oranı alınarak 0,77 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamayla birlikte grafiklerde yer alan test verileri efektif olarak kalırken, HAD modelinden hesaplanan indike karakteristikler mekanik verimle çarpılarak efektif karakteristiklere çevrilerek sunulmuştur.

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’ da karışım oranlarına karşılık sırasıyla motor torku, efektif motor gücü ve BMEP parametreleri verilmektedir. Bu üç parametre de birinin fonksiyonu olduğu için sadece tork üzerinden yorumlanmıştır. Test motorunun üretici verilerine göre maksimum tork değeri 2800 d/dk’de 119 Nm olarak belirtilmiştir (Migita et al., 2002; HondaFitJazz, 2022). Ancak test koşulları altında, benzinli durumda elde edilen maksimum tork benzin için 105,84 Nm olarak ölçülmüş ve bu, katalog değerine göre %11,059 oranında düşük bulunmuştur. Bu fark, kullanılan yakıt bileşimi, çevresel koşullar ve motorun mekanik durumuyla ilişkilendirilmektedir.

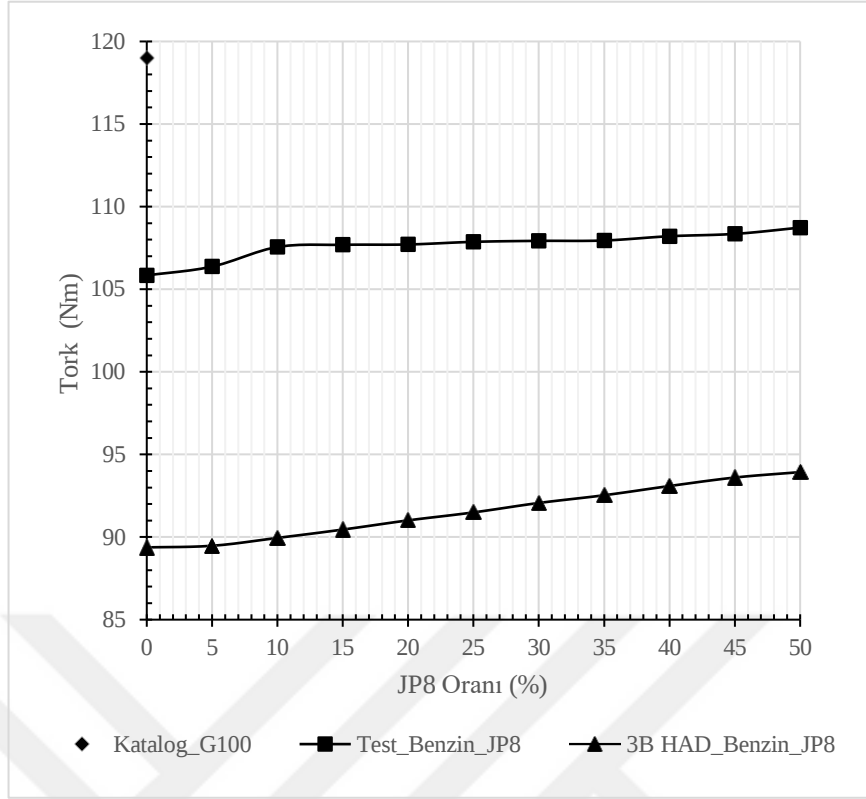
JP8 içeren karışımlar için 3B modelde hesaplanan tork değerlerinin, karşılık gelen deneysel torklardan genellikle daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın nedeni, deneysel ortamda meydana gelen ancak simülasyon modeline tam olarak yansıtılamayan ısı kayıpları, mekanik sürtünme ve yardımcı sistemlerden kaynaklanan enerji tüketimleri gibi etkilerin model dışında bırakılmış olmasıdır. Bu durum, daha önce benzinli test sonuçlarının değerlendirilmesinde de vurgulandığı üzere, gerçek sistemde oluşan tüm kayıpların modele doğrudan dahil edilememesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.1 incelendiğinde, JP8’in artan karışım oranlarına bağlı olarak motor performansında iyileşmeler gözlenmiştir.

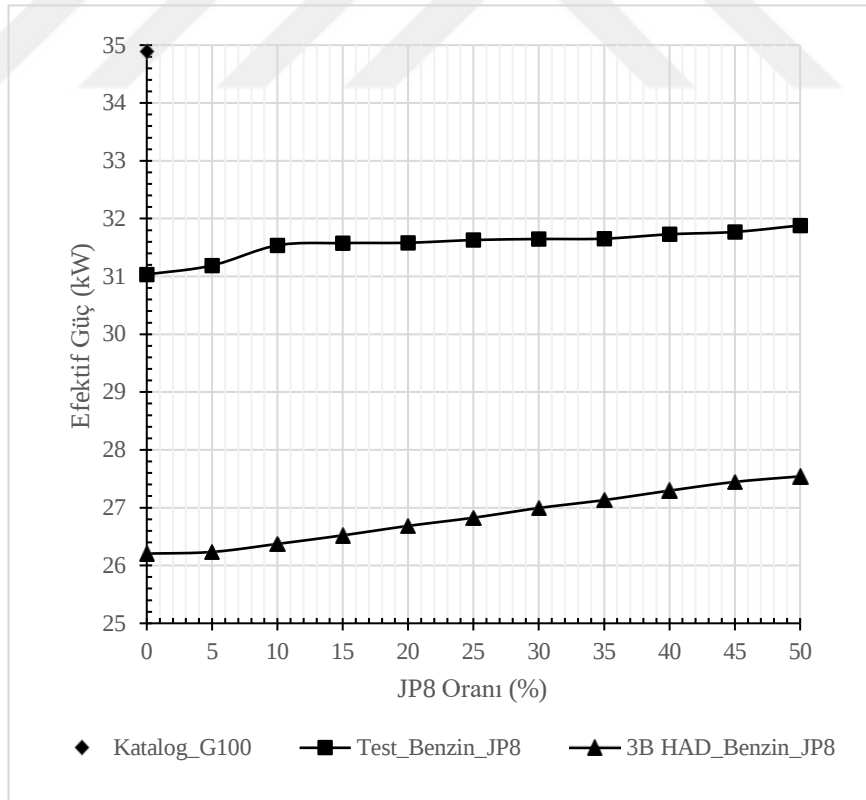
Testte, JP8 ilavesiyle %5' den %50' ye sırasıyla %0,50 ila %2,73 arasında değişen oranlarda tork, güç ve BMEP artışı sağlanmıştır. HAD modelinde ise, bu değerler belirli bir oranda teste göre daha yüksek ve sırasıyla %0.11 ila %5.10 arasında daha yüksek hesaplanmıştır. Literatürde genellikle JP8'in dizel karışımlarıyla kullanıldığı görülse de, bu çalışmada benzinle karıştırılarak kullanıldığında da performans iyileştirmeleri sağladığı belirlenmiştir (Labeckas ve Slavinskas, 2015).

Bu performans artışları, JP8 yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. JP8, benzine kıyasla daha yüksek yoğunluğa ve özgül enerjiye sahip olması nedeniyle birim hacimde daha fazla enerji taşır. Bu sayede, motor silindirine aynı miktarda yakıt alındığında daha fazla enerji salınımı gerçekleşir. Özellikle yüksek yük koşullarında bu durum, silindir içi basınç ve sıcaklık değerlerinin artmasına, dolayısıyla üretilen tork ve gücün yükselmesine neden olur. Ayrıca, JP8'in daha yavaş buharlaşma eğiliminde olması ve viskozitesinin uygun seviyede bulunması, hava-yakıt karışımının daha homojen dağılmasını kolaylaştırır ve bu da daha verimli bir yanma süreciyle sonuçlanır.

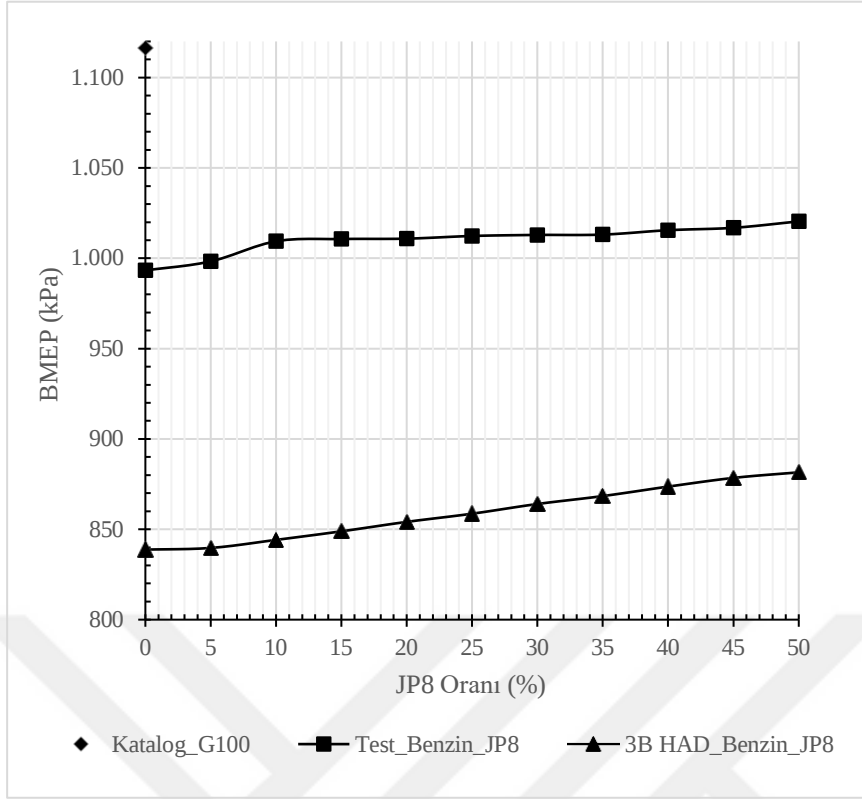
Sayısal analizlerde bu etkiler daha net gözlemlenmiştir. Üç boyutlu CFD simülasyonlarında kullanılan gelişmiş yanma ve türbülans modelleri, JP8'in silindir içindeki davranışını gerçekçi şekilde temsil etmiş ve deneysel verilere kıyasla daha yüksek tork ve BMEP değerleri hesaplanmasına neden olmuştur. Özellikle üst ölü noktaya yakın konumlarda gerçekleşen hızlı ve yoğun enerji salınımı, JP8'in yüksek enerji potansiyelini ön plana çıkarmıştır. Tüm bu değerlendirmeler, JP8'in benzinli motorlarda alternatif yakıt katkısı olarak kullanıldığında performansı artırıcı etki gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.1. Efektif tork-JP8 oranı karşılaştırması

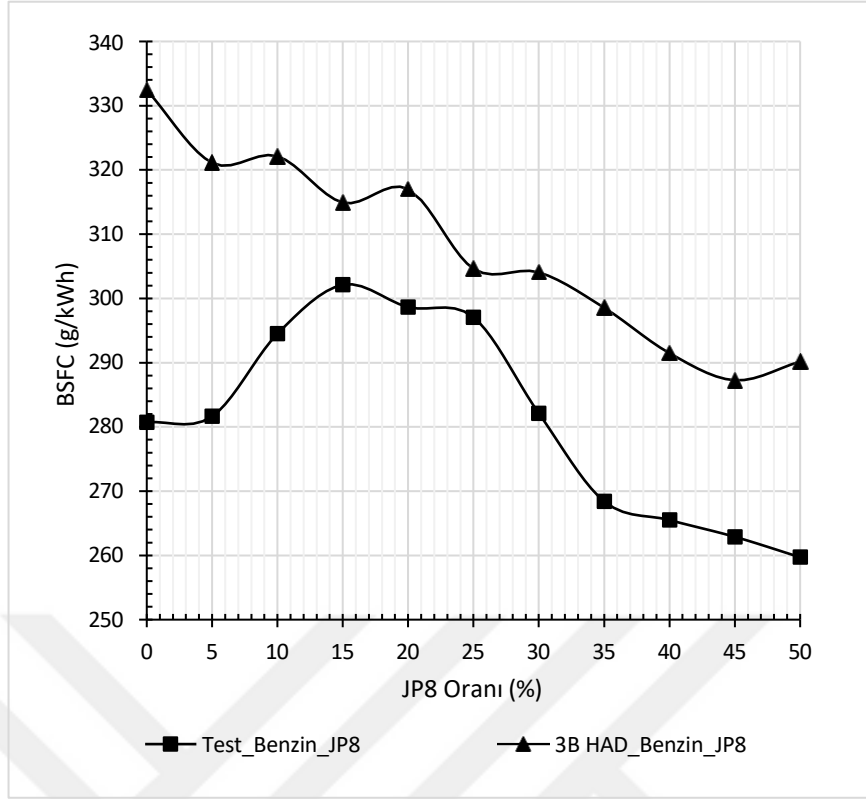


Şekil 4.2. Efektif güç-JP8 oranı karşılaştırması



Şekil 4.3. BMEP-JP8 oranı karşılaştırması

Şekil 4.4’ de BSFC açısından değerlendirildiğinde, testlerde JP8 oranının %0–30 aralığında artış eğiliminde olduğu, ancak %35 ve üzeri karışımlarda düşüş gösterdiği görülmektedir. HAD analizlerinde ise karışım oranlarının genelinde BSFC azalma trendinde görülmüştür. Bu durum, JP8’in benzine göre daha düşük alt ısı değerine sahip olması nedeniyle başlangıçta birim enerji başına daha fazla yakıt tüketimiyle açıklanabilir. Ancak belirli bir oran aşıldığında, artan enerji yoğunluğu sayesinde güç üretimi daha verimli hale gelmekte ve BSFC düşmektedir.



Şekil 4.4. BSFC-JP8 oranı karşılaştırması

Benzin-JP8 karışımlarının emisyon karakteristikleri de dikkat çekici farklılıklar göstermektedir. Yapılan testlerde tüm yakıt karışımlarında ortalama lambda değeri yaklaşık 0,95 olarak ölçülmüş, bu da tüm karışımların yakıtça zengin bölgede çalıştığını göstermektedir.

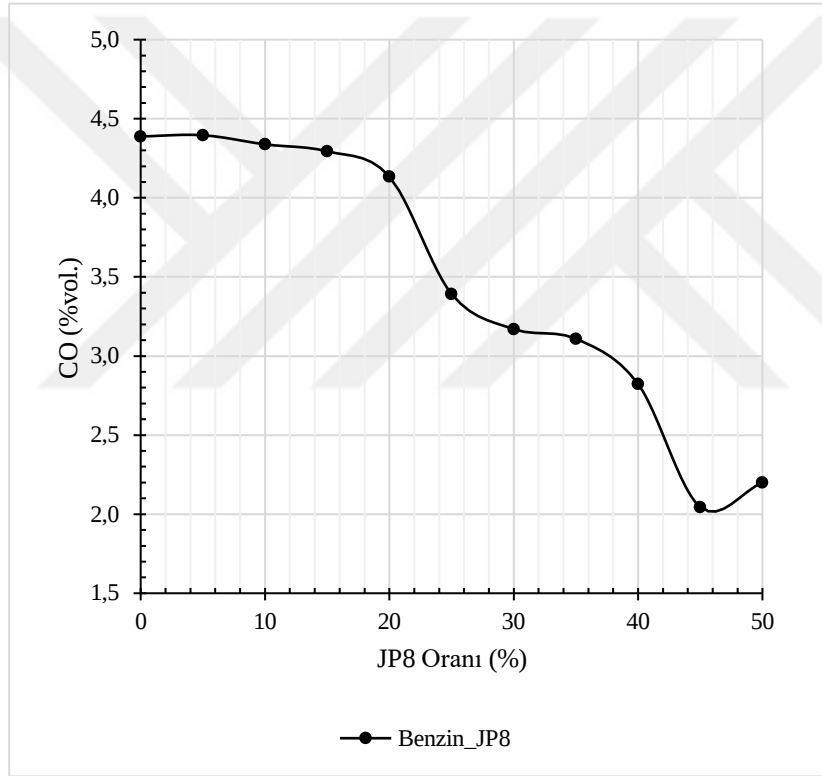
Şekil 4.5’ de, artan JP8 oranıyla birlikte CO emisyonları başlangıçta hafif artış gösterse de, özellikle %15 karışım oranından itibaren belirgin azalmalar gözlenmiştir. %45 JP8 içeren karışımda CO emisyonu %53,418 oranında azalmıştır. Bu durum, JP8’in daha verimli yanması ve yanma tamamlanma derecesinin artmasıyla ilişkilendirilmektedir.

Bu eğilimin temel nedeni, JP8 yakıtının yanma karakteristiklerinin benzine kıyasla farklılık göstermesidir. JP8, daha yüksek setan sayısına ve daha uzun zincirli hidrokarbon yapısına sahip olduğu için, ateşleme gecikmesi daha kısa olup, yanma daha hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleşmektedir.

Ayrıca, JP8’in daha yüksek kaynama noktalarına sahip bileşenler içermesi, buharlaşma sürecinin motorun çalışma sıcaklıklarında daha kontrollü şekilde gerçekleşmesini sağlar. Bu kontrollü buharlaşma, yakıtın hava ile daha homojen bir şekilde karışmasına yardımcı olur.

Homojen karışımlar ise silindir içerisinde daha verimli bir yanma ortamı oluşturarak, eksik yanmadan kaynaklanan CO oluşumunu azaltır.

Yanma sürecinin ilerleyen aşamalarında, sıcaklık seviyesi ve oksijen mevcudiyeti yeterli olduğunda, karbon monoksit gazı oksidasyona uğrayarak karbondioksit dönüşür. JP8 ile zenginleştirilen karışımlarda, yanma sıcaklığının artması ve oksijenle daha etkin teması olarak sağlanması, bu dönüşümün daha ileri düzeyde gerçekleşmesine olanak tanımaktadır. Bu fiziksel ve kimyasal etkenler bir araya geldiğinde, JP8'in artan oranlarıyla birlikte daha yüksek yanma verimliliği sağlanmakta ve bu da CO emisyonlarının önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.5. CO-JP8 oranı karşılaştırması

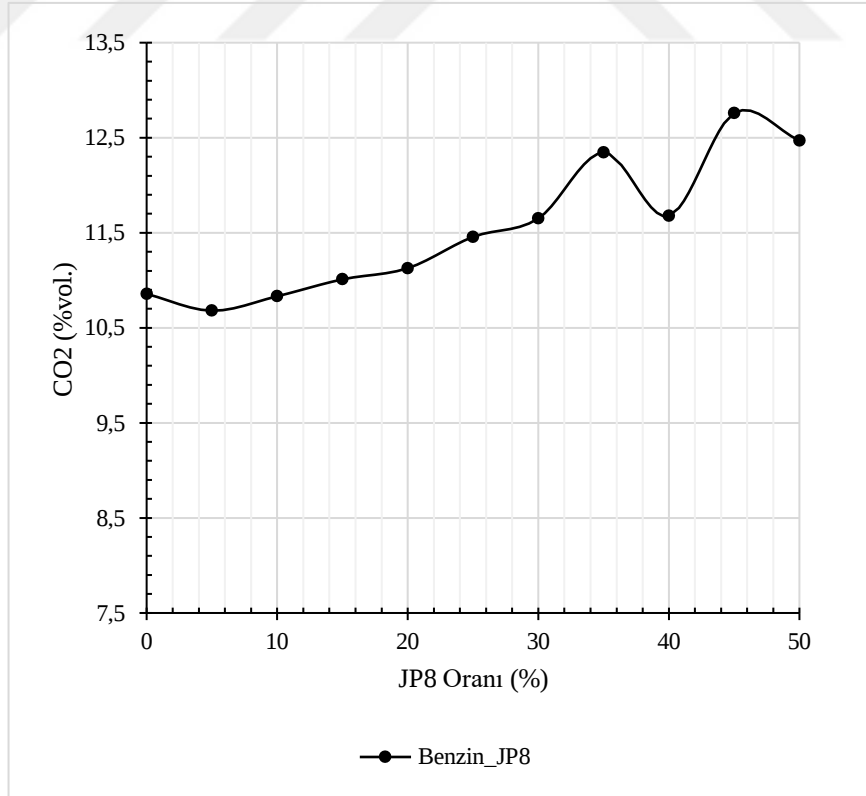
Şekil 4.6' ya bakıldığında, CO₂ emisyonları ise genel olarak artış eğilimindedir; bu da yanmanın daha etkin gerçekleştiğini ve karbonun CO yerine CO₂'ye dönüştüğünü göstermektedir.

Bu eğilim, yanma sürecinin daha etkili ve tamamlanmış şekilde gerçekleştiğine işaret etmektedir. İçten yanmalı motorlarda, karbon içeren yakıt bileşenleri yeterli oksijenle ve uygun sıcaklık koşullarında tamamen yandığında, ortaya çıkan başlıca karbonlu yanma ürünü CO₂ 'dir.

Bu bağlamda, CO₂ emisyonundaki artış, eksik yanmanın bir ürünü olan karbon monoksitin (CO) daha ileri oksidasyona uğrayarak CO₂'ye dönüştüğünü göstermektedir.

JP8'in kimyasal yapısı, aromatik içeriği düşük ve parafinik bileşenler açısından zengin olması sayesinde, oksijenle daha kolay tepkimeye girerek daha düzgün ve sürekli bir yanma süreci sağlar. Ayrıca, JP8'in daha yüksek setan sayısı nedeniyle yanma gecikmesi azalır ve bu da daha hızlı ve etkin bir enerji salınımı ile sonuçlanır. Bu durum, silindir içi sıcaklıkların yükselmesine neden olarak, karbon monoksitin tam oksidasyonla CO₂'ye dönüşmesini kolaylaştırır.

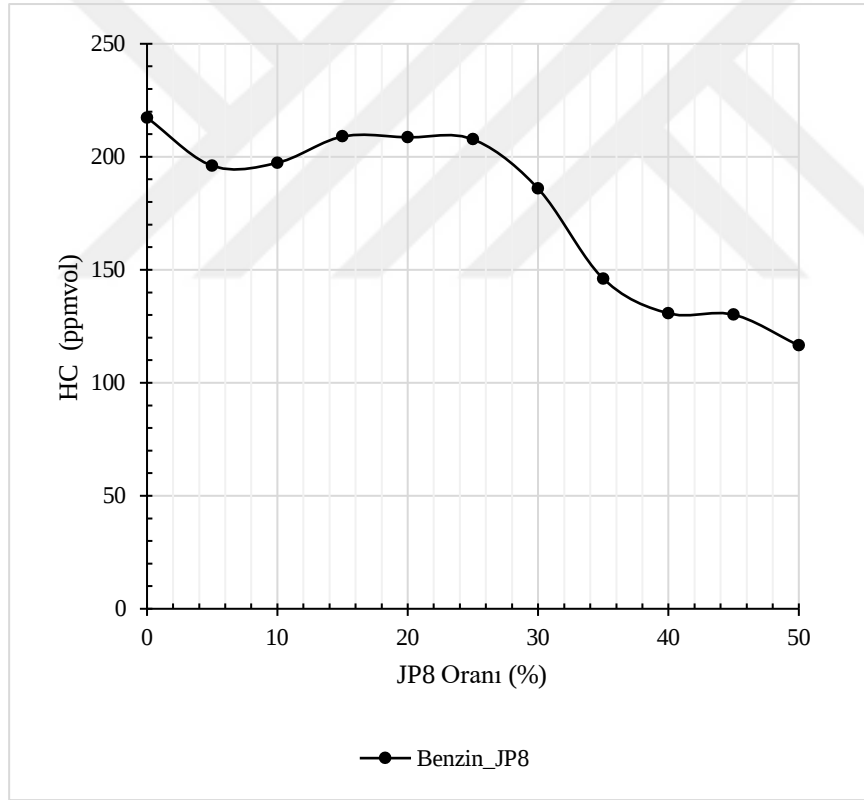
Özetle, CO₂ emisyonlarındaki artış; JP8'in yanma sürecinde daha fazla karbon atomunun tam yanmaya katıldığını ve bu süreçte karbonun daha yüksek oranda CO₂ formunda atmosfere salındığını göstermektedir. Bu da, Şekil 4.5' de verilen CO emisyonlarında görülen azalmayla birlikte değerlendirildiğinde, JP8 katkısının yanma kalitesini artırdığını ve daha temiz bir yanma gerçekleştiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. CO₂-JP8 oranı karşılaştırması

Şekil 4.7’de sunulan veriler, JP8 oranındaki artışın yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları üzerinde önemli bir azaltıcı etki oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek karışım oranlarında HC emisyonlarının ciddi oranda düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, yanma odasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonların daha verimli ilerlediğini ve karışımdaki yakıtın daha büyük bir kısmının tamamen oksitlendiğini göstermektedir.

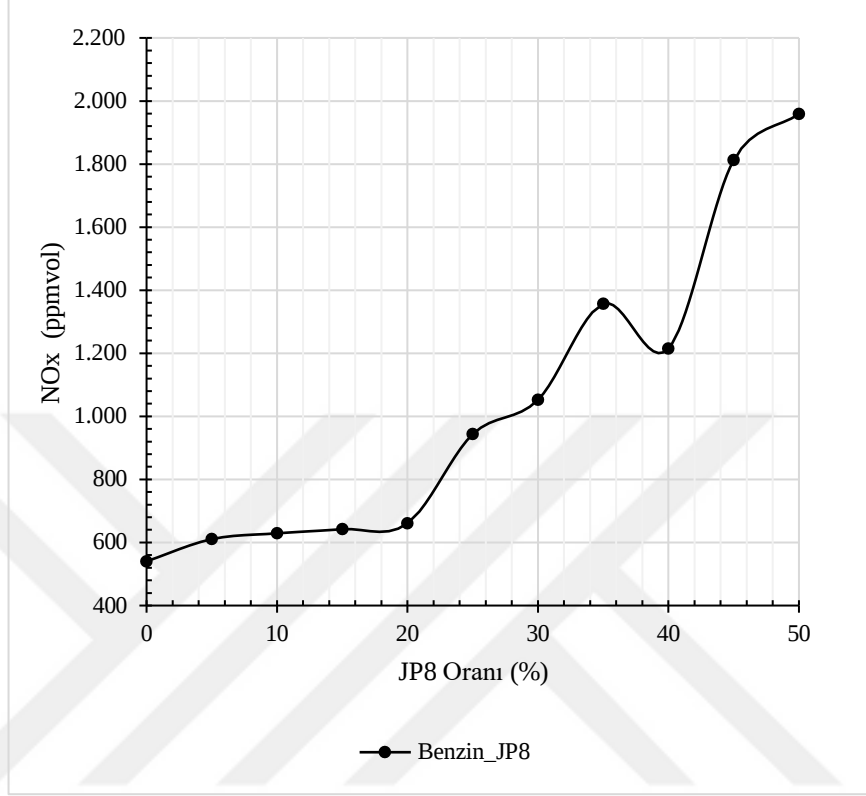
Yanmış gazlar içerisinde yer alan HC bileşenleri, esas olarak alevin ulaşamadığı bölgelerde kalan yakıtın buharlaşarak yanmadan dışarı atılması sonucu oluşur. JP8 ilavesi, bu eksik yanma bölgelerinde daha etkin bir alev yayılımı sağlayarak alevin sınır tabaka bölgelerine ulaşmasını kolaylaştırmakta ve böylece bu tür atık bileşiklerin oluşumunu azaltmaktadır.



Şekil 4.7. HC-JP8 oranı karşılaştırması

Şekil 4.8’ de görüldüğü gibi, NO_x emisyonları, JP8 oranının artmasıyla birlikte ciddi bir yükseliş göstermiştir. Özellikle %40 ve üzeri karışımlarda bu artış %200’ün üzerine çıkmıştır. Bu durum, JP8 kullanımının silindir içi yanma sıcaklıklarını artırması ve dolayısıyla azot oksit oluşumunu tetiklemesi ile açıklanabilir.

Smith ve Johnson (2018) ile Jones ve Brown (2020) gibi araştırmacılar da benzer şekilde, JP8 kullanımının NO_x emisyonlarını artırdığını vurgulamışlardır.



Şekil 4.8. NO_x -JP8 oranı karşılaştırması

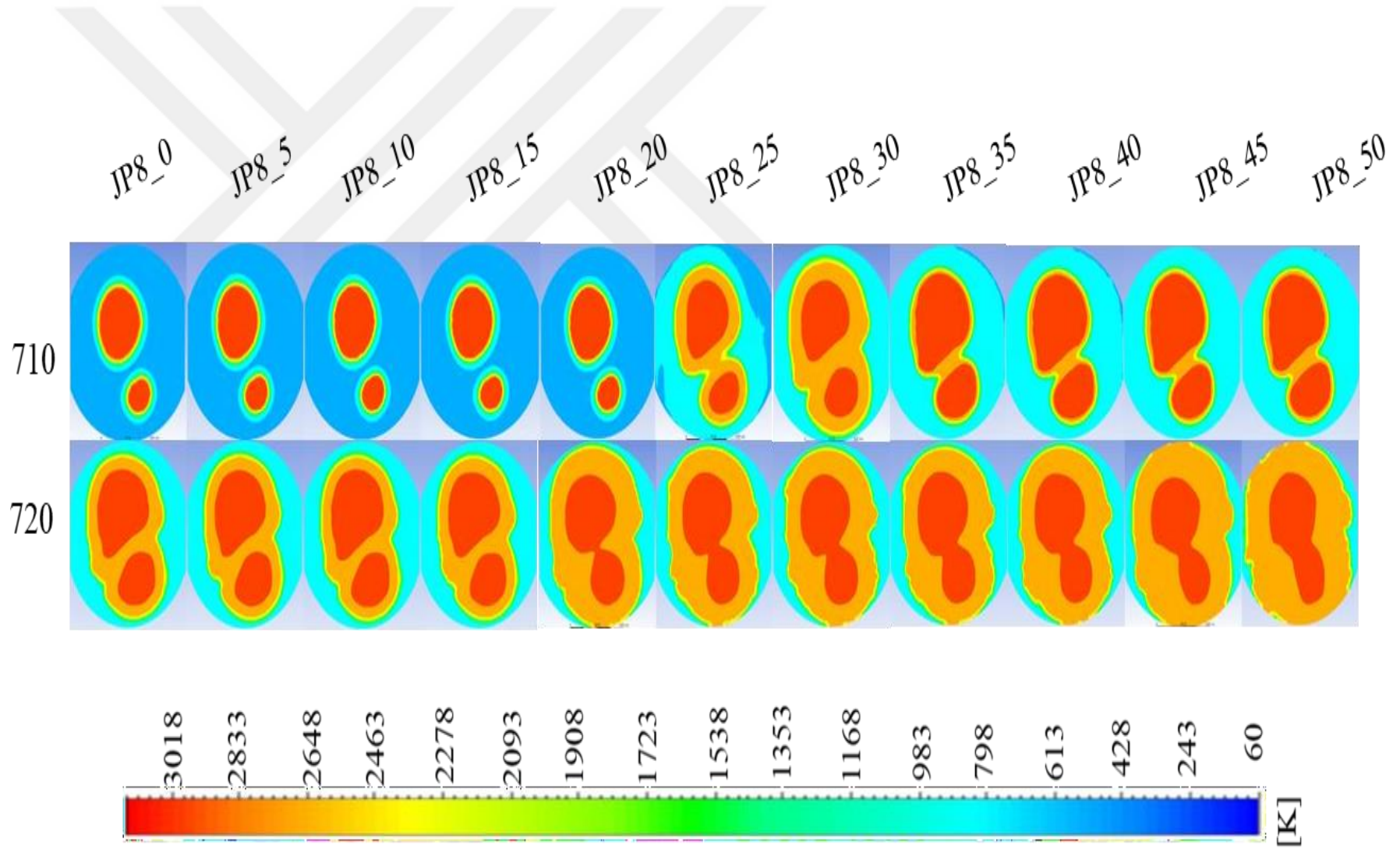
Sonuç olarak, benzin-JP8 karışımları motor performansında genel olarak iyileştirme sağlarken, emisyonlar açısından CO ve HC gibi yanma verimini temsil eden gazlarda azalma, NO_x emisyonlarında ise artış meydana gelmiştir. Bu durum, JP8'in yakıt olarak içten yanmalı motorlar açısından potansiyel sunduğunu, ancak emisyon kontrol stratejileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu tez kapsamında geliştirilen 3B silindir-içi yanma HAD modeli, Ansys-Forte v22 R1 yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve modelin sınır koşulları deneysel verilerden elde edilen parametrelere dayandırılmıştır. Şekil 4.9'da, silindir içi sıcaklık dağılımı, radyal eksende bujilerin uç noktasından alınan düzlemsel kesit üzerinde zamanla değişen yanma sürecini temsil etmektedir. Burada, JP8 katkı oranının artmasıyla birlikte silindir içerisinde meydana gelen ısı yayılımı ve yanmanın ilerlemesi değerlendirilmektedir.

Şekil 4.9' da, hem 710 KMA hem de 720 KMA' da, JP8 oranı arttıkça, yanma bölgesinin daha sınırlı bir alandan daha geniş bir alana yayıldığı ve yüksek sıcaklık bölgelerinin silindirin merkezine yakın noktalarda yoğunlaştığını görülmektedir. Burada JP8 etkisiyle, alev simetrik olarak genişlemiş ve sıcaklar daha düzenli dağılmıştır. BU durum da yanma verimini arttırmıştır.

Ayrıca JP8 etkisiyle bereber, alev cephelerinin sınırlarının daha yumuşak geçişlerle ilerlediği ve daha az keskin değişim gösterdiği gözlenmektedir. Bu, türbülansın etkili bir biçimde yakıt buharı ile etkileşerek yanmanın düşük sıcaklıklı bölgelerde dahi tamamlanmasını sağladığını işaret etmektedir.

Genel olarak bakılırsa, Şekil 4.6'daki silindir içi sıcaklık konturları, JP8 katkısının artmasıyla birlikte alev yayılımının hem hızlandığını hem de daha homojen hale geldiğini, bu sayede daha yüksek ve dengeli bir sıcaklık alanı oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu da doğrudan CO₂ artışı ve CO ile HC emisyonlarının azalması gibi önceki şekillerde gözlemlenen sonuçlarla tutarlıdır. Elde edilen bu sıcaklık profilleri, yanma verimliliğinin artışı ve yakıtın daha tam bir şekilde oksitlendiğini fiziksel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 4.9. 3B HAD Modeli silindir-içi sıcaklık konturları

5. GENEL DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışmasında, havacılık ve otomotiv sektörlerinde potansiyel kullanım alanı bulunan, konvansiyonel sınırların dışında değerlendirilebilecek benzin-JP8 yakıt karışımlarının, motor performansı ve emisyon karakteristiklerine etkisi hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan motor, ticari bir araçta yer alan çift bujili ateşleme sistemine sahip Honda L13A4 i-DSI benzinli motordur. Bu motorun tercih edilmesinde, simetrik yanma bölgesi oluşturma kabiliyeti ve gerçek motor şartlarına uygunluğu etkili olmuştur.

Analizler, sabit 2800 d/dk motor devri ve tam gaz koşullarında gerçekleştirilmiş; 11 farklı JP8 karışım oranı ile hem motor testleri hem de 3B silindir içi yanma HAD modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Sayısal analizler, Ansys-Forte 22R1 yazılımı ile yürütülmüş ve kullanılan HAD modelinin doğrulaması, deneysel verilerle kıyaslanarak yapılmıştır. Belirsizlik analizleriyle deneysel verilerin güvenilirliği desteklenmiştir.

Motor performansı açısından elde edilen bulgular: JP8 oranının artmasıyla birlikte tork, güç ve BMEP parametrelerinde belirgin iyileşmeler yaşandığını ortaya koymuştur. %0-50 JP8 karışımları arasında bu parametrelerde %0,50 ila %2,73 arasında artışlar elde edilmiştir. Bu artışlar, JP8'in daha yüksek yoğunluk ve enerji içeriği gibi fiziksel özelliklerine dayandırılmıştır. Ayrıca, JP8'in düşük buharlaşma sıcaklığı sayesinde daha homojen hava-yakıt karışımı olduğu, bu durumun da yanma kalitesini olumlu etkilediği düşünülmektedir. Literatürde dizel-JP8 kombinasyonlarının genellikle performans kaybı ile ilişkilendirilmesine karşın, bu çalışmada benzin-JP8 karışımlarında performans iyileşmeleri raporlanmıştır.

Emisyon değerleri açısından yapılan değerlendirmelerde ise farklı bir tablo gözlenmiştir. Özellikle;

- CO emisyonları, JP8'in %15 oranının üzerine çıkılmasıyla birlikte düşüş trendine girmiş ve %45 JP8 oranında %53,42 oranında azalma göstermiştir. Bu, JP8 ile daha tamamlanmış bir yanma gerçekleştiğini göstermektedir.

- CO₂ emisyonları, daha verimli yanmanın doğal sonucu olarak artış eğilimi göstermiş, %45 JP8 karışımında %12,76 artış ölçülmüştür. Karbonun CO yerine CO₂'ye dönüşmesi, yanma tamamlanma derecesinin yüksek olduğunu göstermektedir.
- HC emisyonları, düşük buharlaşma sıcaklığı ve iyi atomizasyon sayesinde karışımın daha etkili yanmasını sağlayarak, %50 JP8 oranında %46,39 azalmıştır.
- NO_x emisyonları, özellikle yüksek sıcaklık oluşumuna bağlı olarak %50 JP8 içeren karışımında %262,49 oranında artış göstermiştir. Bu durum, JP8'in daha yüksek alev sıcaklıklarına neden olmasıyla açıklanabilir.

Lambda değeri ortalama olarak 0,95 seviyesinde bulunmuş, bu da testlerin yakıtça zengin ($\lambda < 1$) gerçekleştirildiğini göstermektedir. Buna rağmen CO ve HC gibi eksik yanma göstergelerinde gözlenen azalmalar, JP8 katkısının yanma verimini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

CFD analizlerinde elde edilen sıcaklık dağılımları: JP8 katkısının alev yayılımını homojenleştirdiğini, yüksek sıcaklık alanlarını daha düzenli bir şekilde silindir içerisine yaydığını ve bu sayede yanma sürecinin daha tamamlanmış hale geldiğini ortaya koymuştur. Özellikle bujilere yakın bölgelerde başlayan yanmanın, JP8 katkısı ile daha simetrik ve daha geniş hacme yayıldığı görülmüştür. Bu durum, emisyon bulgularıyla da doğrudan ilişkilidir.

5.1. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, JP8 yakıtının ticari benzinli motorlarda alternatif bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini, özellikle %15–30 arası karışım oranlarında hem performans hem de egzoz emisyonları açısından olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ancak NO_x emisyonlarındaki artış, çevresel sürdürülebilirlik açısından dikkate alınması gereken bir durumdur.

Gelecek çalışmalarda;

- EGR (Egzoz Gazı Devridaimi) ve ateşleme zamanlaması optimizasyonu gibi yöntemlerle NO_x emisyonlarının kontrol altına alınması hedeflenebilir.

- JP8'in biyobenzin, etanol, metanol gibi farklı alternatif yakıtlarla karıştırılarak sinerjik etkilerinin araştırılması değerlendirilebilir.
- Farklı motor yüklerinde (kısmi yükler, değişken gaz keleşbeği açıklıkları) JP8 etkisinin araştırılması, daha geniş çalışma koşullarına dair bilgi sağlayabilir.

Bu bağlamda, JP8'in içten yanmalı motorlarda yalnızca havacılıkta değil, kara taşıtlarında da alternatif yakıt teknolojilerinde değerlendirilebileceği; özellikle performans artışı hedeflenen durumlarda önemli avantajlar sunabileceği sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Acaroğlu, M., Aydoğan, H., & Özçellik, A. E. (2018). *Yakıtlar ve Yanma* (2. bs). Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmalık.
- Aköz, M. S., Soydan, N. G., & Şimşek, O. (2016). kritik üstü açık kanal akımının detached eddy ve large eddy simülasyon ile sayısal modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji*, 4(4), 213-224.
- Alabaş, B., Taştan, M., Arenillas, I. A., Özcan, A. (2024). Experimental investigation of the effect of air/fuel ratio change on JP8 swirl flame characteristics with image processing methods, *Case Studies in Thermal Engineering*, 59, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104529>.
- Alahmer, A. (2018). Performance and emission assessments for different acetone gasoline blends powered spark ignition engine. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 10(2), 127-132. <https://doi.org/10.4273/ijvss.10.2.10>
- Alanazi, F. (2023). Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. *Applied Sciences*, 13(10), 6016. <https://doi.org/10.3390/app13106016>
- Altın, İ., & Bilgin, A. (2015). Quasi-dimensional modeling of a fast-burn combustion dual-plug spark-ignition engine with complex combustion chamber geometries. *Applied Thermal Engineering*, 87, 678-687. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.054>
- Ansys-Forte Theory Manual Version 22.1.* (2022). Ansys.
- Ardebili, S. M. S., Kocakulak, T., Aytav, E., Calam, A. (2022). Investigation of the effect of JP-8 fuel and biodiesel fuel mixture on engine performance and emissions by experimental and statistical methods, *Energy*, 254 Part A, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124155>.
- Babamohammadi, S., Birss, A. R., Pouran, H., Pandhal, J., Borhani, T. N. (2025). Emission control and carbon capture from diesel generators and engines: A decade-long perspective. *Carbon Capture Science & Technology*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100379>.
- Brettschneider, J. (1997). Extension of the Equation for Calculation of the Air-Fuel Equivalence Ratio. *Preparing Mixtures for Diesel and SI Engines*, 972989. <https://doi.org/10.4271/972989>
- Cheng, W. K., Hamrin, D., Heywood, J. B., Hochgreb, S., Min, K., & Norris, M. (1993). *An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark-Ignition Engines*. 932708. <https://doi.org/10.4271/932708>
- Çakmak, A., & Özcan, H. (2018). Benzin için oksijenli yakıt katkıları. *Journal of Polytechnic*, 21(4), 831-840. <https://doi.org/10.2339/politeknik.457956>
- Doğu, Y., Yontar, A. A., & Kantaroğlu, E. (2020). Experimental investigation of effects of single and mixed alternative fuels (gasoline, CNG, LPG, acetone, naphthalene, and boron derivatives) on a commercial i-DSI engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1800864>

E. Richard Cohen, Tomislav Cvitaš, Jeremy G. Frey, Bertil Holmström, Kozo Kuchitsu, Roberto Marquardt, Ian Mills, Franco Pavese, Martin Quack, Jürgen Stohner, Herbert L. Strauss, Michio Takami, & Anders J Thor. (2006). *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry, Third Edition* (3. bs, C. 28). RSC Publishing. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ci.2006.28.1.28a/html>

Ekins, P., Zenghelis, D. (2021) The costs and benefits of environmental sustainability. *Sustain Sci* 16. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00910-5>.

Elfasakhany, A. (2016). Performance and emissions analysis on using acetone–gasoline fuel blends in spark-ignition engine. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3), 1224-1232. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.02.002>

Elfasakhany, A. (2017). Investigations on performance and pollutant emissions of spark-ignition engines fueled with n -butanol–, isobutanol–, ethanol–, methanol–, and acetone–gasoline blends: A comparative study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 404-413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.070>

Fenimore, C. P. (1971). Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. *Symposium (International) on Combustion*, 13(1), 373-380. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1)

Fu, X.-Q., He, B.-Q., Li, H.-T., Chen, T., Xu, S.-P., & Zhao, H. (2017). Effect of direct injection dimethyl ether on the micro-flame ignited (MFI) hybrid combustion and emission characteristics of a 4-stroke gasoline engine. *Fuel Processing Technology*, 167, 555-562. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.08.001>

Ghojel, J. I. (2010). Review of the development and applications of the Wiebe function: A tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research. *International Journal of Engine Research*, 11(4), 297-312. <https://doi.org/10.1243/14680874JER06510>

Hafis, M, Balaji, K., Tamilarasan, N., Senthilkumar, D., Sakthivel, R. (2025). A review on alternative fuels: Spray characteristics, engine performance and emissions effect, *Sustainable Futures*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100456>

He, B.-Q., Xu, S.-P., Fu, X.-Q., & Zhao, H. (2020). Combustion and emission characteristics of an ultra-lean burn gasoline engine with dimethyl ether auto-ignition. *Energy*, 209, 118437. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118437>

Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.

[Http://creckmodeling.chem.polimi.it/](http://creckmodeling.chem.polimi.it/). (2022).

[Https://mgm.gov.tr/](https://mgm.gov.tr/). (2018). Meteoroloji Genel Müdürlüğü.

[Https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acetone](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acetone). (2018a). National Library of Medicine National Center for Biotechnology Information.

[Https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Dimethyl-ether](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Dimethyl-ether). (2018b). National Library of Medicine National Center for Biotechnology Information.

[Https://www.tuik.gov.tr/](https://www.tuik.gov.tr/). (2022). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK).

[Http://www.hondafitjazz.com/](http://www.hondafitjazz.com/). (2022). Honda Jazz 1.4 CVT Making Comfortable.

Ivan Wiebe. (1956). Semi-empirical expression for combustion rate in engines. *In Proceedings of Conference on piston engines*, 185-191.

- Ji, C., Liang, C., & Wang, S. (2011). Investigation on combustion and emissions of DME/gasoline mixtures in a spark-ignition engine. *Fuel*, 90(3), 1133-1138. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.033>
- Ji, C., Shi, L., Wang, S., Cong, X., Su, T., & Yu, M. (2017). Investigation on performance of a spark-ignition engine fueled with dimethyl ether and gasoline mixtures under idle and stoichiometric conditions. *Energy*, 126, 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.045>
- Johansson, B. (2020). *Path to High Efficiency Gasoline Engine*. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f8/deer10_johansson.pdf
- Johansson, B. (2022). *Path to High Efficiency Gasoline Engine*. 102.
- Kajitani, S., Chen, C. L., Oguma, M., Alam, M., & Rhee, K. T. (1998). *Direct Injection Diesel Engine Operated with Propane—DME Blended Fuel*. 13. <https://doi.org/10.4271/982536>
- Kantaroğlu, E. (2022). *Buji ateşlemeli motorda benzin-aseton ve benzin-dimetil eter karışımlarının motor performansına ve emisyonlarına etkilerinin sayısal ve deneysel incelemesi* [Doktora Tezi]. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kantaroğlu, E., Yontar, A. A., & Doğu, Y. (2022). Influence of acetone addition into gasoline for i-DSI engine. *Sādhanā*, 47(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01788-w>
- Kılıçalp, M. İ., and Demir, U. (2025). Performance, emission, vibration and noise characteristics of gasoline-based fuel blends with JP-8, Jet A-1, and nitromethane mixtures in a single-cylinder gasoline engine, *Fuel*, 393, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135034>.
- Kim, H. J., Park, S. W., & Lee, C. S. (2012). Numerical and experimental study on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether (DME) fueled compression ignition engine. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 67(3), 479-489. <https://doi.org/10.2516/ogst/2011130>
- Kirkpatrick, A. T. (2020). *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences* (4. bs). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119454564>
- Kline, S. J., & McClintock, F. A. (1953). Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3-8.
- Le, T. T., Balasubramanian, D., Le, A. N., Cao, D. N. Chen, W. H. Venugopal, I. P., Ağbulut, Ü., Truong, T. H., Nguyen, X. P., Bui, V. G., Hoang A. H. (2025). Partially-charged advanced low-temperature combustion in diesel engine: Progress and prospects, *Alexandria Engineering Journal*, 129 <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.06.021>.
- Lee, S., Oh, S., & Choi, Y. (2009). Performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME blended LPG fuel. *Fuel*, 88(6), 1009-1015. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.12.016>
- Li, Y., Meng, X., Nithyanandan, K., Lee, C.-F., & Ning, Z. (2017). *Effect of acetone-gasoline blend ratio on combustion and emissions characteristics in a spark-ignition engine*. 2017-01-0870. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0870>
- Li, Y., Nithyanandan, K., Meng, X., Lee, T. H., Li, Y., Lee, C. F., & Ning, Z. (2017). Experimental study on combustion and emission performance of a spark-ignition engine fueled with water containing acetone-gasoline blends. *Fuel*, 210, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.058>

- Mahle GmbH (Ed.). (2012). *Pistons and engine testing* (1st ed). Vieweg + Teubner.
- Makoś, P., Słupek, E., Sobczak, J., Zabrocki, D., Hupka, J., & Rogala, A. (2019). *Dimethyl ether (DME) as potential environmental friendly fuel* (M. A. Sayegh, J. Danielewicz, H. Jouhara, B. Kaźmierczak, M. Kutylowska, & K. Piekarska, Ed.; C. 116, s. 8). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600048>
- Mert, H. H., Mert, M. S., Naz, B., Uykun, N., & Kanli, Z. (2019). Dimetil eter üretim prosesinin simülasyonu ve analizi: örnek bir çalışma. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(1), 13-18.
- Migita, H., Amemiya, T., Yokoo, K., & Iizuka, Y. (2002). The new 1.3-liter 2-plug engine for the 2002 Honda Fit. *JSAE Review*, 23(4), 507-511. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(02\)00235-7](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(02)00235-7)
- Nakayama, Y., Suzuki, M., Iwata, Y., & Yamano, J. (2001). Development of a 1.3L 2-Plug Engine for the 2002 Model 'Fit'. *Honda R&D Technical Review*, 13(2), 43-52.
- Newhall, H. K. (1969). Kinetics of engine-generated nitrogen oxides and carbon monoxide. *Symposium (International) on Combustion*, 12(1), 603-613. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(69\)80441-8](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(69)80441-8)
- Niri, A. J., Poelzer, G. A., Zhang, S.E., Rosenkranz, J., Pettersson, M., Ghorbani, Y. (2024). Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114176>
- Osman, A.I., Chen, L., Yang, M. et al. (2023). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environ. Chem. Lett.*, 21, 741–764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
- Park, S. H., & Lee, C. S. (2013). Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(1), 147-168. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.10.002>
- Pipitone, E. (2009). *A New Simple Friction Model for S. I. Engine*. 2009-01-1984. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1984>
- Rahman, K. M. (2018). *Experimental investigation and cfd simulation of mixture formation and combustion in hydrogen direct injection spark-ignition engine* [PhD Thesis]. Okayama University.
- Richard Stone. (1992). *Introduction to Internal Combustion Engines* (2. bs).
- Salazar, F. (1998). *Internal Combustion Engines*. Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame Notre Dame, IN 46556.
- Scenna, R., and Gupta, A. K. (2016). Partial oxidation of JP8 in a well-insulated distributed reactor, *Fuel Processing Technology*, 142, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.10.014>.
- Semelsberger, T. A., Borup, R. L., & Greene, H. L. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *Journal of Power Sources*, 156(2), 497-511. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.082>
- Shen, Y., Shuai, S., Wang, J., & Xiao, J. (2009). Optimization of gasoline hydrocarbon compositions for reducing exhaust emissions. *Journal of Environmental Sciences*, 21(9), 1208-1213. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62405-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62405-5)

- Shi, L., Ji, C., Wang, S., Cong, X., Su, T., & Wang, D. (2018). Combustion and emissions characteristics of a S.I. engine fueled with gasoline-DME blends under different spark timings. *Fuel*, 211, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.019>
- Shi, L., Ji, C., Wang, S., Su, T., Cong, X., Wang, D., & Tang, C. (2019). Effects of second injection timing on combustion characteristics of the spark ignition direct injection gasoline engines with dimethyl ether enrichment in the intake port. *Energy*, 180, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.056>
- Singh, S., Rao, D. G., Dixit, M. (2023). Future of Transportation- A Comparison between Internal Combustion Engine, Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 11(1), 13 - 23. <https://doi.org/10.13189/ujme.2023.110102>.
- Singer, B. C., Harley, R. A., Littlejohn, D., Ho, J., & Vo, T. (1998). Scaling of infrared remote sensor hydrocarbon measurements for motor vehicle emission inventory calculations. *Environmental Science & Technology*, 32(21), 3241-3248. <https://doi.org/10.1021/es980392y>
- Sorrentino, M., ve ark. (2015). Application of Willans Line method for internal combustion engines scalability towards the design and optimization of eco-innovation solutions, *SAE Tech. Pap.*, 2015-24-2397.
- Teng, H., Mccandless, J. C., & Schneyer, J. B. (2001). *Thermochemical characteristics of dimethyl ether—an alternative fuel for compression-ignition engines*. 2001-01-0154. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0154>
- Tilly, N., Yigitcanlar, T., Degirmenci, K., Paz, A. (2024). How sustainable is electric vehicle adoption? Insights from a PRISMA review, *Sustainable Cities and Society*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105950>
- Torok, A., Zoldy, M., & Csefalvay, E. (2018). Effects of renewable energy sources on air-fuel ratio. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 25(3), 473-477. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.4370>
- Türkmen, U. B. (2020). *Alternatif yakıt olarak benzine lpg katkısının motor karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Wang, Y., Zhao, Y., Xiao, F., & Li, D. (2014). Combustion and emission characteristics of a diesel engine with DME as port premixing fuel under different injection timing. *Energy Conversion and Management*, 77, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.011>
- Willard W. Pulkrabek. (2003). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine* (C. 1-2).
- Woschni, G. (1967). *A Universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine*. 670931. <https://doi.org/10.4271/670931>
- Yalçinkaya, A. (2020). *Ticari bir otomobil motorunda benzine cng katkısının motor performansına ve emisyonlarına etkisinin had analizi ile incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ying, W., Genbao, L., Wei, Z., & Longbao, Z. (2008). Study on the application of DME/diesel blends in a diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1272-1280. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.023>
- Yontar, A. A. (2016). *Buji ateşlemeli motorda saf ve karışımli alternatif yakıtların motor performansına ve emisyonlarına etkilerinin sayısal ve deneysel incelemesi* [Doktora Tezi]. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Ahmet DOĞAN

Doğum Tarihi:

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim Durumu: Makine Mühendisi

Lisans: Kırıkkale Üniversitesi, Makina Mühendisliği, 2014

Çalıştığı Kurum/Kurumlar, Yıl/Yıllar ve Görevi:

2020-2023-PM Proje - Borulama Mühendisi

2023-2024-Ahlatçı Holding – Ekipman Mühendisi

2024-2025 Prokon Mühendislik & Müşavirlik A.Ş. – Borulama Mühendisi

2025- N22 Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. – Borulama Mühendisi

Projeler :

•TÜBİTAK-1002, Çift Buji Ateşlemeli Ticari Bir Otomobil Motorunda Benzin-JP8-Amorf Elementel Bor Karışımlarının Motor Performansına ve Emisyonlarına Etkilerinin DeneySEL ve Sayısal Olarak İncelenmesi

•Barut Fabrikası Yapımı – Çorum (Ahlatçı)

•Hidrojen Enerjisiyle Çalışan Demir Çelik Tesisi – İsveç (IDOM)

•Karada Gemi Motorlu Enerji Santrali – Bahamalar (N22 Mühendislik)

Kullanılan Bilgisayar Programları:

Ms Office, Autocad, Inventor, Plant3D, SmartPlant, Aveva E3D, Caesar II, PV Elite, AMETank, Pipeflow

Yayınları (Diğer):

•Kantaroğlu, E. & Doğan, A. (2025). experimental investigation of the effects of JP8 and amorphous elemental boron additives on combustion characteristics for i-DSI engine, *International Journal of Engine Research*, 26(6), 885-902. <https://dx.doi.org/10.1177/14680874251320458>

•Kantaroğlu, E., & Doğan, A. (2024). Ticari buji ateşlemeli bir motorda JP8 askeri jet yakıtı ve amorf elementel bor yakıtlarının kullanımının NOx emisyonlarına etkisinin deneySEL incelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri Ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 7(1), 49-57.

•Kantaroğlu, E., & Doğan, A. (2024). Ticari pistonlu bir motorda benzin-elementel bor karışimli yakıtının performansa etkisinin deneySEL incelenmesi. 8. *Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu, Zonguldak*.