

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİ YAKITLARINDA HİDROJEN
KATKISININ KULLANIMI; BİR DİZEL
MOTORDAKİ SALIM DEĞERLERİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN ANALİZİ**

Yavuz Ali IŞIK

Ekim, 2020

İZMİR

**GEMİ YAKITLARINDA HİDROJEN
KATKISININ KULLANIMI; BİR DİZEL
MOTORDAKİ SALIM DEĞERLERİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN ANALİZİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı,
Deniz Ulaştırma Sistemleri Mühendisliği Programı**

Yavuz Ali IŞIK

Ekim, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

YAVUZ ALİ IŞIK, tarafından **DR. ÖGR. ÜYESİ BURAK KÖSEOĞLU** yönetiminde hazırlanan “**GEMİ YAKITLARINDA HİDROJEN KATKISININ KULLANIMI; BİR DİZEL MOTORDAKİ SALIM DEĞERLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ANALİZİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Burak KÖSEOĞLU

Yönetici

Prof. Dr. Mustafa DEMİRCİOĞLU

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURAN

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışma kapsamında tüm süreç boyunca benden bilgisini, yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Burak KÖSEOĞLU'na teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Tez çalışmamda dizel motoru modelleyebilmem için gerekli olan her türlü bilgiyi paylaşmaktan çekinmeyen Anadolu Motor çalışanları Ar-Ge Merkez Yöneticisi Zeki AYAZ'a ve Ar-Ge Uzmanı Barış AKAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olduğunu hissettiğim, beni her konuda destekleyen, hayata farklı pencerelerden bakmamı sağlayan, tez sürecinde de hep yanımda olan çok sevdiğim ve saygı duyduğum hayat arkadaşım Aylin KARA IŞIK'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen annem Gülşen KARABINAR, abim Hasan IŞIK ve ablam Goncagül KIVRAK'a;

Tez konusu belirleme sürecinde fikirlerini esirgemeyen arkadaşım Kubilay BAYRAMOĞLU'na, yaptığı deneysel çalışmayla yapmış olduğum çalışmama öncülük eden Yiğit GÜLMEZ'e, teşekkür ederim.

Yavuz Ali IŞIK

GEMİ YAKITLARINDA HİDROJEN KATKISININ KULLANIMI; BİR DİZEL MOTORDAKİ SALIM DEĞERLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ANALİZİ

ÖZ

Uluslararası ticaretin toplam değerinin yüzde yetmişinden fazlası deniz yoluyla karşılanmakta ve denizcilik sektöründe kullanılan akaryakıt dünya üzerindeki akaryakıt tüketiminin yaklaşık olarak yüzde altısını oluşturmaktadır. Durum göz önünde bulundurulduğunda yakılan yakıt kaynaklı zararlı salım değerlerinin de çevre kirliliğine etkisinin büyüklüğünün göz ardı edilemez boyutlarda olduğu da bir gerçektir. Denizcilik sektöründe salım ve enerji verimliliği için getirilen yasal düzenlemeler ve zorunluluklar da göz önünde bulundurulduğunda gemilerden kaynaklı olan çevre etkilerinin düşürülmesi için yapıcı çözümler getirilmesi kaçınılmaz olmuştur. Bu konuda pek çok çalışma arasında yakıt değişikliği ve karışım yakıtların kullanımı olumlu etkilerle sonuçlandırılabilmiştir. Bu bağlamda; yapılan çalışmada gemilerde kullanılan DMA standartlarında olan deniz tipi motorinle çalıştırılan tek silindirli dört zamanlı direkt püskürtmeli bir dizel makine emme havasına belirli oranlarda hidrojen ilavesi yapılarak, performans ve yanma sonrasında oluşan azot oksit, karbon monoksit, karbon dioksit ve hidrokarbon salım etkilerini incelemek için ele alınmıştır. Çalışmada, bahsi geçen dizel motorun modellemesi yapılarak, sadece hidrojen ilavesi değil, aynı zamanda farklı enjektör konik açılarında püskürtüldüğünde oluşan yeni etkiler, yirmiden fazla simülasyon yapılarak incelenmiştir. Literatür kapsamında gelecekte düşünülen alternatif gemi yakıtlarına yer verildiği gibi aynı zamanda, hidrojenin gemide depolanması, gemiye ikmal gibi önemli konulara da değinilmiştir. Sayısal inceleme sonucunda; hidrojen ilavesinin genel olarak yanma verimini arttırdığı, özgül yakıt tüketimini düşürdüğü, yanmamış hidrokarbon ve karbon monoksit salımları üzerinde olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiş olup, karbon dioksit salım değerlerinde gözle görülür bir fark olmamasına karşın azot oksit salım değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif gemi yakıtları, dizel motor, hidrojen katkısı

USE OF HYDROGEN ADDITIVE IN SHIP FUELS; AN ANALYSIS OF THE EFFECT ON EMISSIONS IN A DIESEL ENGINE

ABSTRACT

More than seventy percent of the total value of international trade is met by sea, and the fuel used in the maritime sector accounts for approximately six percent of the fuel consumption in the world. When this situation is taken into consideration, it is a fact that the harmful emission values originating from the fuel burnt are also in a way that cannot be ignored. Considering the legal regulations and obligations introduced for emission and energy efficiency in the maritime sector, it has been inevitable to find constructive solutions to reduce the environmental impacts of ships. Among many studies on this subject, fuel change and blended fuels could result in positive effects. In this context; The study was done to examine the nitrogen oxide, carbon monoxide, carbon dioxide and hydrocarbon emission effects that occur after performance and combustion by adding hydrogen to the intake air of a single cylinder, four-stroke, direct injection diesel engine operated with marine type diesel engine in DMA standards used in ships. In the study, by modeling the mentioned diesel engine, not only the addition of hydrogen, but also the new effects that occur when sprayed at different injector conical angles, more than twenty simulations were made and the results obtained were analyzed numerically. Within the scope of the literature, alternative marine fuels considered in the future are mentioned, as well as important issues such as the storage of hydrogen on board and its supply to the ship are mentioned. As a result of the numerical study; It has been observed that adding hydrogen generally increases the combustion efficiency, decreases the specific fuel consumption, gives positive results on unburned hydrocarbon and carbon monoxide emissions, while there is no noticeable difference in carbon dioxide emission values, it has been observed that nitrogen oxide emission values increase.

Keywords: Alternative marine fuels, diesel engine, hydrogen additive

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
1.1 Dizel Motorlara Hidrojen İlavesi ile İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar	2
1.2 Çalışmanın Gerekliliği	8
BÖLÜM İKİ - GENEL BİLGİLER	10
2.1 Hidrojenin Kullanım Alanları ve Yakıt Olarak Kullanımı	10
2.2 Hidrojenin Üretimi	12
2.2.1 Hidrokarbonlardan Hidrojen Üretimi	12
2.2.2 Nükleer Enerji ile Hidrojen Üretimi	14
2.2.3 Rüzgar Enerjisi ile Hidrojen Üretimi	14
2.2.4 Biyokütleden Hidrojen Üretimi	16
2.2.5 Güneş Enerjisi Kullanarak Hidrojen Üretimi	17
2.3 Hidrojenin Depolanması	17
2.3.1 Alternatif Depolama Yöntemleri	18
2.3.1.1 Organik Kimyasal Hidrit	18
2.3.1.2 Karbon Maddeler	18
2.3.1.3 Silika Mikroküreler	18
2.3.2 Hidrojenin Gemilerde Depolanması	19
2.4 Hidrojen Yakıtının Gemiye İkmali	19

BÖLÜM ÜÇ – GEMİ YAKITLARI VE ALTERNATİF GEMİ YAKITLARI...21

3.1 Gemi Yakıtları ve Sınıflandırmaları.....	21
3.2 Alternatif Gemi Yakıtları.....	24
3.2.1 LNG.....	24
3.2.2 Metanol ve Etanol.....	25
3.2.3 LPG.....	26
3.2.4 Hidrojen.....	26
3.2.5 DME	26
3.2.6 RME (Biyodizel).....	26

BÖLÜM DÖRT – DİZEL MOTORDA YANMA VE SALIMLAR.....28

4.1 Dizel Motorda Yanma	28
4.1.1 Atomizasyon	28
4.1.2 Buharlaşma	29
4.1.3 Tutuşma Gecikmesi	30
4.1.4 Kendiliğinden Tutuşma	30
4.1.5 Yanma	30
4.2 Yanma Kimyası	31
4.2.1 Stokiyometrik Yanma.....	32
4.2.2 Hava-Yakıt Karışım Eşdeğerlik Oranı.....	33
4.3 Yakıtlardan Kaynaklı Salımlar.....	34
4.3.1 Azot Oksitler.....	35
4.3.2 Karbon Monoksit ve Karbon Dioksit	37
4.3.3 Hidrokarbon	37
4.3.4 Kükürt Oksitler	38
4.3.5 Partikül Madde ve Kurum.....	38

BÖLÜM BEŞ – MATERYAL VE YÖNTEM.....40

5.1 Dizel Motor Geometrisinin Modellenmesi	40
--	----

5.2 Ağ Örgüsü	44
5.3 Model Motorun Sınır Değerleri	45
5.4 Yanma Reaksiyonunun Kimyasal Çözümü.....	45
5.4.1 Dizel Yakıtlar İçin İndirgenmiş Mekanizma.....	46
5.5 Türbülanslı Reaksiyona Giren Akış için Korunum Denklemleri.....	48
5.5.1 Tür Kütlesinin Korunumu Denklemi.....	48
5.5.2 Akışkanın Süreklilik Denklemi.....	49
5.5.3 Momentum Korunumu Denklemi.....	49
5.5.4 Enerjinin Korunumu Denklemi.....	50
5.5.5 Gaz Fazın Karışım Hal Denklemi.....	51
5.5.6 RANS RNG k-ε Türbülans Modeli.....	51
5.6 Performans Parametreleri.....	53
5.6.1 Güç Hesaplamaları.....	53
5.6.2 IMEP.....	54
5.6.3 ISFC.....	55
5.6.4 Yanma Verimliliği.....	55
5.6.5 Termal Verimlilik.....	55
BÖLÜM ALTI– YANMANIN SAYISAL ANALİZİ.....	56
6.1 Deneysel Verilerle Sayısal Analizin Kıyaslanması.....	56
6.2 Yakıtta Hidrojen İlavesinin Etkileri.....	64
6.2.1 Hidrojen İlavesinin CO Emisyonuna Etkisi.....	66
6.2.2 Hidrojen İlavesinin CO ₂ Emisyonuna Etkisi.....	67
6.2.3 Hidrojen İlavesinin UHC Emisyonuna Etkisi.....	67
6.2.4 Hidrojen İlavesinin NO _x Emisyonuna Etkisi.....	68
6.3 Püskürtme Açısı Değişiminin Emisyon Değerleri Üzerindeki Etkisi.....	69
6.3.1 %1 Hidrojen İlavesinin Yakıt Püskürtme Açısına Bağlı İncelenmesi.....	69
6.3.2 %2 Hidrojen İlavesinin Yakıt Püskürtme Açısına Bağlı İncelenmesi.....	75
6.3.3 %3 Hidrojen İlavesinin Yakıt Püskürtme Açısına Bağlı İncelenmesi.....	79
BÖLÜM YEDİ– SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	85

KAYNAKLAR.....90



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Hidrojenin motora verilmesi için kullanılan düzeneğin şematik görünümü....	3
Şekil 1.2 Silindir içinden numune almakta kullanılan valf.....	4
Şekil 1.3 Serbest pistonlu motorun yapısı.....	5
Şekil 2.1 Hidrojen üretim sürecini gösteren şema.....	13
Şekil 2.2 Alkalin elektrolitik hücrenin şematik görünümü.....	15
Şekil 2.3 Biyo kütleden hidrojen üretim basamakları.....	16
Şekil 2.4 Hidrojenin karadan gemiye transfer ikmali.....	20
Şekil 3.1 Dünya genelinde toplam tüketilen akaryakıt oranları.....	21
Şekil 4.1 Yakıt damlacığının düşük ve yüksek akış hızındaki durumları.....	29
Şekil 4.2 Yanma sürecini anlatır krank açısına bağlı basınç grafiği.....	31
Şekil 4.3 Yakıt eşdeğerlik oranının yanma verimliliğine etkisi.....	34
Şekil 5.1 90° lik kesit halinde modellenen motorun farklı açılardan görünümü.....	42
Şekil 5.2 Egzoz ve emme valflerinin krank açısına bağlı hareketleri.....	42
Şekil 5.3 Model motorun üstten görünüşünde yakıtın yanma odasına püskürtülmesi.....	43
Şekil 5.4 Kesiti alınmış olan modelde yakıtın yanma odasına püskürtülmesi.....	43
Şekil 5.5 Ağ örgüsündeki eleman sayısına bağlı silindir basınçları.....	44
Şekil 5.6 Model motorun ağ örgüsü ve elemanları.....	45
Şekil 6.1 Deneysel çalışmada ve sayısal analizde elde edilen güç verileri.....	56
Şekil 6.2 Sayısal analiz verileri hata oranları.....	57
Şekil 6.3 Silindir içerisindeki sıcaklık değişimi ($E=10^n$)	58
Şekil 6.4 Yakıt kütle değişim oranı ve yakıt partikül kütle ve sıcaklık değişimi.....	60
Şekil 6.5 Silindir içerisindeki CO kütle değişim oranı ($E=10^n$)	61
Şekil 6.6 Silindir içerisindeki CO ₂ kütle değişim oranı ($E=10^n$)	62
Şekil 6.7 Silindir içerisindeki NO ₂ kütle değişim oranı ($E=10^n$)	63
Şekil 6.8 Hidrojen ilavesine bağlı olarak basınç değişimi.....	65
Şekil 6.9 Hidrojen ilavesinin silindir içi sıcaklığa etkisi ($E=10^n$)	65
Şekil 6.10 Hidrojen ilavesinin CO salımına etkisi.....	66
Şekil 6.11 Hidrojen ilavesinin CO ₂ salımına etkisi.....	67

Şekil 6.12 Hidrojen ilavesinin UHC salımına etkisi.....	68
Şekil 6.13 Hidrojen ilavesinin NO _x salımına etkisi.....	69
Şekil 6.14 Farklı püskürtme açılarındaki basınç değişimleri (99F)	70
Şekil 6.15 Farklı püskürtme açılarındaki basınç ve sıcaklık değişimleri (99F)	71
Şekil 6.16 Farklı püskürtme açılarında yakıt damlacıklarının sıcaklık değişimi (99F)	72
Şekil 6.17 Farklı püskürtme açılarında silindir içi sıcaklık değişimi (99F)	73
Şekil 6.18 Farklı püskürtme açılara bağlı olarak UHC salımı değişimi (99F)	74
Şekil 6.19 Farklı püskürtme açılarında CO ve NO _x salımı değişimi (99F)	74
Şekil 6.20 Farklı püskürtme açılarındaki basınç değişimleri (98F)	76
Şekil 6.21 Farklı püskürtme açılarındaki basınç ve sıcaklık değişimleri (98F)	76
Şekil 6.22 Farklı püskürtme açılarında yakıt damlacıklarının sıcaklık değişimi (98F)	77
Şekil 6.23 Farklı püskürtme açılarında silindir içi sıcaklık değişimi (98F)	78
Şekil 6.24 Farklı püskürtme açılara bağlı olarak UHC salımı değişimi (98F)	79
Şekil 6.25 Farklı püskürtme açılarında CO ve NO _x salımı değişimi (98F)	79
Şekil 6.26 Farklı püskürtme açılarındaki basınç değişimleri (97F)	80
Şekil 6.27 Farklı püskürtme açılarındaki basınç ve sıcaklık değişimleri (97F)	81
Şekil 6.28 Farklı püskürtme açılarında yakıt damlacıklarının sıcaklık değişimi (97F)	82
Şekil 6.29 Farklı püskürtme açılarında silindir içi sıcaklık değişimi (97F)	83
Şekil 6.30 Farklı püskürtme açılara bağlı olarak UHC salımı değişimi (97F)	84
Şekil 6.31 Farklı püskürtme açılarında CO ve NO _x salımı değişimi (97F)	84
Şekil 7.1 Hidrojen ilavesi ve püskürtme açılara bağlı olarak güç ve özgül yakıt tüketiminin değişimi.....	86
Şekil 7.2 Hidrojen ilavesi ve püskürtme açısına bağlı olarak UHC salım değerleri.....	86
Şekil 7.3 Hidrojen ilavesi ve püskürtme açısına bağlı olarak CO ve NO _x salım değerleri değişimi.....	87
Şekil 7.4 Hidrojen ilavesi ve püskürtme açısına bağlı olarak silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri değişimi.....	87

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Hidrojenin genel özellikleri.....	11
Tablo 2.2 Hidrojen ve diğer yakıtların kıyaslanması.....	12
Tablo 2.3 Hidrojen depolanmasında kullanılan en yaygın altı yöntem.....	17
Tablo 3.1 ISO 8217 standartlarında damıtılmış deniz tipi yakıtların bazı özellikleri...22	22
Tablo 3.2 ISO 8217 standartlarında artık deniz tipi yakıtın bazı özellikleri.....	22
Tablo 5.1 Antor 4LD 820 model motora ait özellikler.....	41
Tablo 5.2 Sınır koşul değerleri.....	46
Tablo 5.3 İndirgeme reaksiyonu kinetik sabitleri.....	47
Tablo 5.4 Reaksiyona giren türlerin mol ağırlığı ve atom sayıları.....	48
Tablo 5.5 Standart ve RNG k- ε modellerinde sabitler.....	53
Tablo 6.1 Hidrojen ilavesinin performans değerlerine etkisi.....	64
Tablo 6.2 Hidrojen ilavesinin performans değerlerine etkisi (99F)	70
Tablo 6.3 Hidrojen ilavesinin performans değerlerine etkisi (98F)	75
Tablo 6.4 Hidrojen ilavesinin performans değerlerine etkisi (97F)	80

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Dünya üzerinde enerji ihtiyacının %85 den fazlası gibi büyük bir çoğunluğu fosil yakıt olarak adlandırılan petrol, kömür, doğal gazdan karşılanmaktadır. Her yıl enerji ihtiyacı %2-3 artmakta ve tahminen 2050 yıllarında enerji ihtiyacı 2000 yılına kıyasla iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir. Bu yakıtların yanması sonucunda çevreye CO₂ ve sera gazları gibi zararlı salımlar yayılmakta ve bu gazlar hava kirliliği ve buna bağlı olarak küresel ısınmanın yanı sıra su ve toprağı da doğrudan veya dolaylı olarak kirlenmektedir. Hidrojen, yenilenebilir olması, basit yapısının olması ve çevre etkilerinin minimum olması nedeniyle gelecekteki yakıt olarak düşünülmektedir (Solway, 2008).

2019 yılı sonunda elde edilen verilere göre dünya üzerinde akaryakıt kullanımı 4662,1 milyon ton olarak belirlenmiştir (BP, 2019). Deniz sektöründe ise dizel ve ağır yakıtlar (HFO) toplam 267,3 milyon ton kullanım belirlenmiş olup; %75,5'i ağır yakıtlar (HFO) tarafından karşılanmaktadır %24,5'i ise dizel yakıtlardan karşılanmaktadır (Fuelseurope, 2019). Bu değerler göz önüne alındığında denizcilik alanında kullanılan yakıt tüketiminin önemsenecek boyutta olduğu görülmektedir.

Denizcilik sektöründe kullanılan akaryakıtların dünya üzerindeki akaryakıt tüketiminin yaklaşık olarak %5,7'sini oluşturduğu görülmektedir. Bu değerler göz önüne alındığında denizcilik sektöründe kullanılan yakıt kaynaklı zararlı salımlar ve etkileri de önemsenecek boyutta olduğu, yapılacak yenilikçi çalışmalarla bu etkilerin azaltılması gerekliliği görülmektedir. Uluslararası denizcilik ticareti kaynaklı zararlı salımların ticari ihtiyacın büyümesiyle birlikte artacağı düşünülmektedir. Sadece Baltık denizi, Kuzey denizi, Akdeniz ve Karadeniz'de 2004 yılında belirlenmiş olan deniz ticareti kaynaklı NO_x salım miktarı toplamda 2909 Gg/yıl olarak belirlenmiş olup; 2020 için artarak 3756 Gg/yıl olacağı tahmin edilmektedir. CO, PM ve SO₂ salımları ise 2004 yılında sırasıyla 294 Gg/yıl, 223 Gg/yıl, 2043 Gg/yıl tespit edilmiş ve 2020 için SO₂ salımı dışında tüm salım değerlerinin giderek artması beklenmektedir (Jonson, ve diğer, 2014).

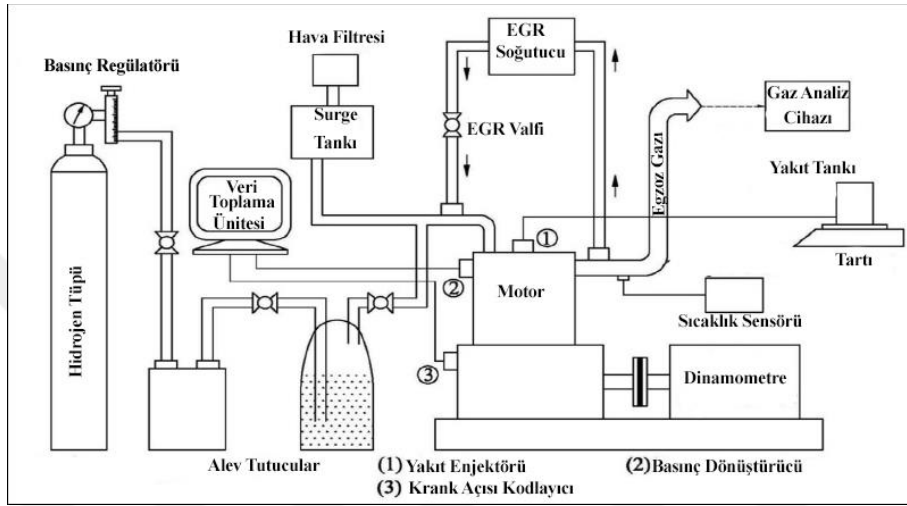
Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) gemilerden kaynaklı hava kirliliğini önlemek için bir dizi önlemler almıştır. Denizcilik yakıtları Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) belirlediği ISO 8217 standardı ile denetim altına alındığı gibi (ISO, 2020), 1973 yılında imzalanan 1978 yılında değişikliğe uğramış olan uluslararası sözleşmesi (MARPOL 73/78) VI. eki ile gemi baca (egzoz) gazlarından çıkan partikül madde (PM), azot oksit (NO_x) ve kükürt oksit (SO_x) içeren emisyonların azaltılmasına yönelik sınırlandırmalar getirilmiştir (UAB, 2020). Ayrıca gemilerde enerji verimliliğini arttırmak için Marpol Ek VI'ya 2013 yılı itibari ile yürürlüğe giren bu madde ile, yeni gemiler için Enerji Verimliliği Tasarım Endeksini (EEDI) zorunluk haline gelmiştir ve Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP) tüm gemiler için bir zorunluluk haline getirilmiştir (IMO, 2020a, 2020b, 2020c).

Bu önlemler kapsamında; zararlı etkileri azaltabilmek için pek çok alternatif yöntem geliştirilmiş ve çalışmaların devam etmekte olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada alternatif yakıt ile çevreye zararlı etkilerin azaltılması üzerine durulmuştur. Alternatif yakıtlarından biri olarak düşünülen hidrojenin günümüzde gemilerde yaygın olarak kullanılan motorin ve deniz tipi standartta olan DMA tipi motorin yakıtına hidrojen ilavesi ile salım değerleri üzerine araştırma yapılmış olup; literatür taramasında emme havasına ilave edilen hidrojenin; genel olarak karbon monoksit, hidrokarbon salımlarında olumlu sonuçlar elde edildiği, egzoz gaz sirkülasyonu (EGR) kullanıldığında da NO_x ve SO_x değerlerinde de düşüşler gözlenmiştir. Dizel motor modellenerek yapılan sayısal analizde CO ve UHC emisyonlarında olan olumlu etkiler umut vermektedir.

1.1 Dizel Motorlara Hidrojen İlavesi ile İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar

Dört zamanlı su soğutmalı tek silindirli bir dizel motor üzerinde Loganathan, Thanigaivelan, Madhavan, Anbarasu ve Velmurugan (2020) yaptıkları deneysel çalışmada; kaju kabuğundan elde ettikleri biyoyakıt ile motoru 1500d/dk sabit devirde çalıştırmışlar ve emme manifoldu üzerinden belli oranlarda hidrojen ilavesi yapmış ve elde ettikleri verileri incelemişlerdir. Hidrojenle zenginleştirilmiş biyoyakıtla çalıştırılan motordaki ısı verimliliğinin biyoyakıt moduna kıyasla %31'den %36,5'e

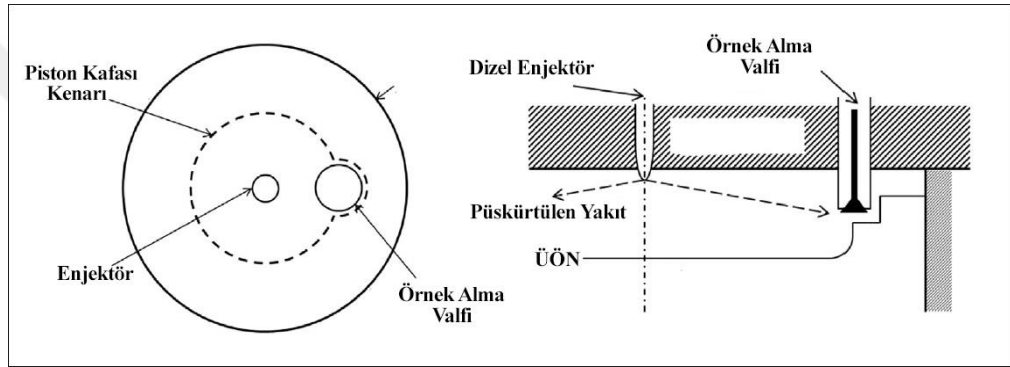
yükseldiğini, ayrıca hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) emisyonları tam yükte sırasıyla %20 ve %10 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Ancak, hidrojenle zenginleştirilmiş biyoyakıtla çalıştırılan motorda azot oksit (NO_x) emisyonunda %40 artış gözlenen, egzoz gazı sirkülasyon modunda (EGR) ise hidrojenle zenginleştirilmiş biyoyakıt ile çalıştırılan motorda %30 azot oksit emisyonu azalması gözlenmiştir. Kullanılan düzenek Şekil 1.1'deki gibidir.



Şekil 1.1 Hidrojenin motora verilmesi için kullanılan düzeneğin şematik görünümü (Loganathan, Thanigaivelan, Madhavan, Anbarasu, ve Velmurugan, 2020)

Verma, Suman, Das, Kaushik, ve Tyagi (2019) tek silindri dört zamanlı bir dizel motor üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada; emme manifoldu üzerinden hidrojen ilavesinin emisyon ve performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Hidrojenin ana yakıt olarak %80,7 ve %24,5 enerji payı oranında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Biyodizel ve dizel yakıtı pilot enjeksiyon için kullandıkları çalışmada hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) emisyonlarında azalma gözlemlediklerini belirtmişlerdir. Egzoz gazı devridaimi (EGR), biyodizel-hidrojen çift yakıtlı motor işlemleri ile de incelenmiştir. EGR'nin çift yakıtlı motorda, özellikle yüksek yüklerde hidrojen kullanımını artırabileceği bulunmuştur. EGR'nin etkisinin çift yakıt motorundan gelen yüksek azot oksit (NO_x) emisyonlarını azalttığı ve fren termal verimliliğinin önemli ölçüde etkilenmediği bulunmuştur.

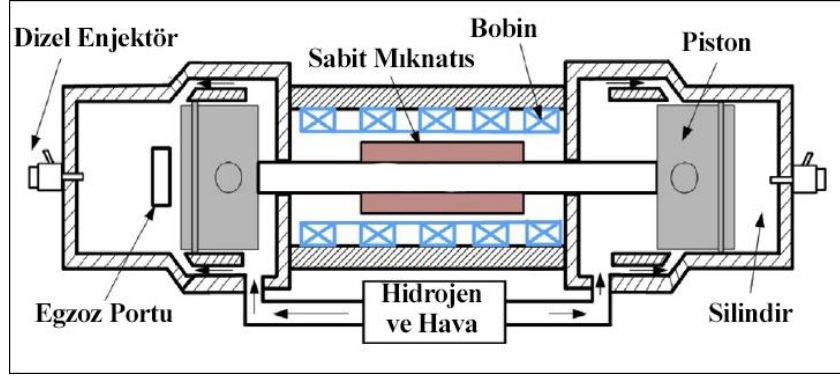
Talibi, Hellier, Balachandran, ve Ladommatos (2014) dört zamanlı dört silindirli dizel motorun emme manifoldu üzerinden hidrojen ilave ederek motor performans ve egzoz emisyon değerleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Silindir kapağına yerleştirdikleri bir egzoz gazı numune alma valfi (Şekil 1.2) ile doğrudan silindir içi gaz değerlerini elde edebildikleri çalışmada; dizel enjeksiyon süresi sabit olmak koşulu ile hidrojen ilavesi ile birlikte hem egzoz hem de silindir içi ölçümlerde karbon dioksit (CO_2) emisyonunun arttığını, azot oksit (NO_x) emisyonunun hızla arttığını tespit etmişlerdir. Düşük güçlerde partikül madde (PM) emisyonunun azaldığını ancak yüksek güçlerde partikül madde (PM) değerinde hafif bir artış gözlemişlerdir.



Şekil 1.2 Silindir içinden numune almakta kullanılan valf (Talibi, Hellier, Balachandran, ve Ladommatos, 2014)

Pan, ve diğer (2014) 12 silindirli iki zamanlı su soğutmalı turboşarjlı düşük kükürtlü dizel yakıtla çalıştırılan deniz tip dizel motorla %0 (rölanti), %25, %75 ve %100 yüklerde yaptıkları çalışmada; elektroliz cihazı ile üretilen hidrojeni emme manifoldu üzerinden ilave ettiklerinde; düşük de olsa CO_2 ve NO_x seviyelerinde düşüş gözlemişlerdir. Rölantide azot oksit (NO_x), artan hidrojen akış hızlarıyla % 28 ve % 41 g/kWh azalırken, partikül madde (PM) % 41 ve % 86 g/kWh artış gözlemişlerdir.

Yuan, ve diğer (2018) iki karşıt silindirli serbest pistonlu motor (FPS) (Şekil 1.3) matematiksel modelleme ile yaptıkları çalışmada; motor dizel yakıt ile çalıştırılmış 1954 d/dk sabit devirde, hacimsel %23,60 oranında hidrojen ilavesi ile kurum oranını dizel yakıtla çalıştırılmaya göre %24 iyileştirdiğini gözlemişlerdir.



Şekil 1.3 Serbest pistonlu motorun yapısı (Yuan, ve diğer, 2018)

Nag, Sharma, Gupta, ve Dhar (2019) dört zamanlı tek silindirli su soğutmalı 1500d/dk sabit devirli dizel motorunda yaptıkları çalışmada; emme manifoldu üzerinden hidrojenin %0 , %10 ve %30 oranında ilave edilmesiyle egzoz gazı geri dönüşüm oranı (EGR) %0, %5 ve %10, motor %25, %50, %75 ve %100 yüklerinde testler gerçekleştirmişler. %30 hidrojen ilavesi ve %10 EGR ile test ettiklerinde; %38,4 azot oksit (NO_x), %27,4 karbon dioksit (CO_2), %33,4 karbon monoksit (CO), %32,3 toplam hidrokarbon (THC) ve %20 partikül madde (PM) emisyonların iyileştiğini deneyimlemişlerdir.

Karagöz, Güler, Sandalcı, Yüksek, ve Dalkılıç (2016) dört zamanlı tek silindirli dizel yakıt ile çalıştırılan CFR motorunda emme manifoldundan enjektör ile hidrojen ilave ettikleri çalışmada; 1100 d/dk motor devrinde hacimsel olarak %22 ve %53 oranında hidrojen ilavesiyle, karbon monoksit (CO) emisyonlarında sırasıyla %67,3 ve %69,2 oranında iyileşme, yine aynı ilave oranlarında duman emisyonlarında sırasıyla %43,6 ve %53,6 iyileşme gözlemişlerdir. toplam hidrokarbon (TCH) ve azot oksit (NO_x) emisyon değerlerinde hafif artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Miyamoto, ve diğer (2011) tek silindirli common rail enjeksiyon sistemli, dizel yakıtla çalıştırılan bir dizel motorun emme manifoldu üzerinden ilave ettikleri hidrojenin etkilerini inceledikleri çalışmada; karbon monoksit (CO) emisyonlarının motorun orta ve yüksek yüklerinde hacmen %8-10 oranında hidrojen ilavesiyle azaltılabildiğini görmüşlerdir.

Akbalık (2019) dört zamanlı tek silindirli su soğutmalı dizel makine emme manifoldu üzerinden belirli oranlarda su buharı, hidrojen ve su buharı + hidrojen enjektore ederek motor performans ve emisyon değerlerini incelediği çalışmada; genel olarak sabit güç verileri için özgül yakıt tüketiminin düştüğünü, 1500 d/dk sabit devirde hidrojen+motorin karışımı ile elde edilen tork oranının sadece motorinle elde edilen verilere göre % 3,18 oranında artış gösterdiğini, 2000 d/dk da motor gücünün % 3,48 termik verimin % 0,84 artış gösterdiğini tespit etmiştir. CO emisyonunun farklı devirlerde %15.1 ile %67.67 arasında sadece motorinle elde edilen verilere göre artış olduğunu, HC emisyonları da %47 ile %179,05 artış görülürken, NO_x emisyonları %14,59 ile %19,82 oranında düşüş gözlemiştir.

Erman (2007) dört zamanlı üç silindirli su soğutmalı dizel motoruna emme manifoldu üzerinden elektroliz ünitesi ile üretilen hidrojen+oksijen karışımını ilave ederek incelediği çalışmada; elektroliz ünitesinden elde edilen 200-500 m³/dak debiyle sisteme verilen hidrojen+oksijen karışımının motor tork, performans ve emisyon değerlerinde belirgin bir fark elde edememiş ve sonrasında saf hidrojen tüpünden regülatörle sisteme vererek tekrar deney yapmış ve yeni sonuçlar elde etmiştir. Motor sabit devirde iken saf hidrojenin % 0-8,59 oranında değişimlerle sisteme ilave edilmesinin sonucunda; motor güç değeri artarken; karbon monoksit (CO), TCH ve azot oksit (NO_x) emisyonlarının hidrojen miktarının artışına bağlı olarak arttığını gözlemiştir. 3500 m³/dak sabit debi ile verilen hidrojenin; motor devrine (1400-2600 d/dk)bağlı olarak; azot oksit (NO_x) ve TCH emisyon değerlerinde artış, karbon monoksit (CO) emisyon değerlerinde yalnızca motorun 2000 d/dk ve 2500 d/dk devirlerinde düşüş gözlemiştir.

Şahin (2009) dört zamanlı tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motoruna emme manifoldu üzerinden 150 bar basınçlı saf hidrojen ilave ederek; soya biodizeli ile çalıştırdığı motorda; motorun sabit yük ve devirdeki performans ve emisyon değerlerini araştırmıştır. Hidrojen ilave ettiği deneylerde özgül yakıt tüketiminin %25 yükte 1800 d/dak sabit devirle çalıştırılan motorda %28,62 daha düşük, %100 yükte %27,18 daha düşük yakıt tüketimi gerçekleşmiştir. %100 yükte biyodizelle kıyasla biyodizel+ kütlece %6,8 hidrojen karışımının karbon monoksit (CO) emisyonunda

%0,65 dan %0,45 e düştüğünü, karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının ise yaklaşık %25 azaldığını gözlemiştir. Hidrokarbon (HC) emisyonu seviyesinin motor yükünün %25, %50, %75, %100 olduğu ölçümlerde azaldığını ama azot oksit (NO_x) emisyon değerinin arttığını gözlemiştir.

Demirci (2010) tek silindirli hava soğutmalı bir dizel motorun %5, %25, %50, %75 ve %100 yükte emme manifoldundan elektroliz yöntemi ile üretilen hidrojenin dizel dolgusuna ilavesiyle yaptığı çalışmada; hidrojenin dizel yakıtına ilavesinin farklı oranlarda (hacmen %15, %30, %45 ve %60) olması durumunda her koşulda efektif verimin arttığını gözlemiştir. Özgül yakıt tüketimi motor yükünün %50 sine kadar azalmış ama daha yüksek yüklerde az miktarda artma gözlemiştir. Hidrojen ilavesiyle karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂) ve hidro karbon (HC) emisyonlarında azalma görülürken, motorun tam yükte çalışması durumunda azot oksit (NO_x) emisyonunun %2,02 oranında arttığını gözlemiştir.

Baltacıoğlu (2016) dört silindirli dört zamanlı su soğutmalı kanola ve hurma biyodizel yakıt karışımlarıyla çalışan dizel motorun emme manifoldu üzerinden hidrojen veya hidroksi gazı ve CNG ekleyerek elde ettiği sonuçların hepsinde; azot oksit (NO_x) emisyonu hariç tüm emisyonların iyileştiğini gözlemiştir. Hidrojen gazı ilavesi hidroksi gazı ilavesi ile kıyaslandığında; hidrojen gazı ilavesinin karbon monoksit (CO) emisyonunda %5,8, karbon dioksit (CO₂) emisyonunda %8,72, azot oksit (NO_x) emisyonunda %9,70 daha iyileştirici olduğunu; hidroksi gazı ilavesinin daha düşük yakıt tüketimi (% 7,6 g/kWh) ve daha yüksek güç (% 4,33 kW) ve tork (% 2,15 Nm) elde ettiğini gözlemiştir.

Ciniviz ve Köse (2012) dört zamanlı dört silindirli su soğutmalı turbocharge lı 3,9 lt lik dizel yakıt ile çalıştırdıkları motora emme manifoldundan ekledikleri hidrojen ilavesi ile emisyon ve performans değerlerine etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Hacim olarak %2,5, %5 ve %7,5 oranında ilave ettikleri hidrojen ile 1250 d/dk, 2250 d/dk ve 2500 d/dk motor devrinde ve tam yükte yaptıkları çalışmada genel sonuç olarak; hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) emisyonlarında azalma görülürken;

motor tork, güç, termal verimlilik, egzoz sıcaklıkları ve azot oksit (NO_x) emisyonunda artış gözlemlenmiştir.

Aktaş ve Şahin (2009) dört zamanlı hava soğutmalı tek silindirli dizel motorun emme manifoldu üzerinden ilave ettikleri hidrojen ile yaptıkları çalışmada; hacimsel olarak %20 soya dizeli ve %80 dizel yakıt karışımında %25, %50, %75 ve %100 yükte 1800 d/dk sabit devirle çalıştırılan motora hidrojen ilavesinin, her yükte özgül yakıt tüketimini azalttığını gözlemlenmiştir. Hidrojen ilavesi ile hemen hemen doğru orantılı şekilde egzoz gaz sıcaklığının azaldığını gözlemlenmiştir. İS emisyonunun ise %5-6 seviyesinden %2 seviyesinin altına düştüğü gözlenmiştir. %13 hidrojen ilavesi ile 9 ppm olan HC emisyonu 2 ppm e düşmekte ve %0,28 olan CO emisyonu da %0,08 seviyesine düşmektedir. Hacmen %14 hidrojen ilavesi ile NO_x oranları 224 ppm düzeyinden 333 ppm düzeyine yükselmekte, genel olarak hidrojen ilavesi ile NO_x emisyonları da artış göstermektedir.

1.2 Çalışmanın Gerekliliği

Uluslararası ticaretin toplam değerinin %70'inden fazlası deniz yoluyla karşılanmakta ve bu durum tüm kargo hacimlerinin %80'ini oluşturmaktadır. Deniz ticareti akışı, ilgili bölgelerin ekonomik gelişimini etkilediği gibi ekosistemlerini de etkilemektedir (Stamirowska, 2020). Denizcilikte kullanılan yakıtların yanma sonrasında oluşturduğu salımlar özellikle hava kirliliğine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Denizcilik sektöründe kullanılan akaryakıt dünya üzerindeki akaryakıt tüketiminin yaklaşık olarak %5,7'sini oluşturduğu görülmektedir (Fuelseurope, 2019) Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda yakılan yakıt kaynaklı zararlı salım değerlerinin de çevre kirliliğine büyük ölçüde etki edeceği tahmin edilebilmektedir. Uluslararası denizcilik ticareti kaynaklı zararlı salımların ticari ihtiyacın büyümesiyle birlikte artacağı düşünülmektedir. Sadece Baltık denizi, Kuzey denizi, Akdeniz ve Karadeniz'de 2004 yılında belirlenmiş olan deniz ticareti kaynaklı NO_x salım miktarı toplamda 2909 Gg/yıl olarak belirlenmiş olup; 2020 için artarak 3756 Gg/yıl olacağı tahmin edilmektedir. CO, PM ve SO₂ salımları ise 2004 yılında sırasıyla 294 Gg/yıl,

223 Gg/yıl, 2043 Gg/yıl tespit edilmiş ve 2020 için SO₂ salımı dışında tüm salım değerlerinin giderek artması beklenmektedir (Jonson, ve diğer, 2014).

IMO'nun getirmiş olduğu zararlı salımlardaki sınırlamalar ve enerjinin kullanımını azaltmaya yönelik getirmiş olduğu zorunluklarla birlikte; çevre etkilerinin azaltılması ve gemi enerji verimliliğini artırılması için pek çok yöntem geliştirildiği ve çalışmalara devam edildiği bilinmektedir. Yakıtın yanmasından kaynaklı zararlı etkiyi önleyici yöntemlerden olan yakıt içeriğinin veya yakıtın değişmesi üzerinde çalışılan konulardandır. Gelişen teknoloji ile birlikte hidrojenin yakıt olarak kullanılmasındaki riskler gün geçtikçe azalmakta ve güvenilir olması ve yenilenebilir olması sebebiyle geleceğin alternatif yakıtları arasında öncelikli olduğu kabul edilmektedir. Hidrojen gemi yakıtında alternatif bir fikir olup; hidrojen yakıtlı yolcu taşımacılığında kullanılan feribotlar gibi çeşitli gemilerin güvenilir bir şekilde günümüzde kullanılabilir olması (Basille ve Ghasemzadeh 2020) ve gemiye ikmallerinin de yapılabilir olması (Power, 2019) hidrojen ilaveli karışım yakıtlar ve olumlu olabilecek salım etkileri üzerine araştırma gerekliliği düşüncesi oluşturmuştur.

Bu çalışma çevreci yenilebilir alternatif yakıt olan hidrojenin gemilerde kullanılabilirliği, depolama ve ikmal süreçlerine değindiği gibi, hali hazırda işletilen gemilerin çevreci teknolojilerle donatılma sürecinin ekonomik ve fiziksel süreç gerektirdiği bilinmektedir. Bu geçiş süresince kullanılacak olan karışım yakıtlar ve daha çevreci salımlar yapan gemilerin işletilebilmesini öngörebilmek için önemli bir çalışma olduğu gibi bu tip yakıt ile işletilen kara elektrik santralleri veya enerji gemileri için de fikir oluşturabileceği düşünülmektedir. Hidrojen yüksek yanıcılık özelliğine ve çok basit kimyasal yapısıyla ve kolaylıkla içten yanmalı motorlarda kullanılabilir. Bu çalışmada gemi yakıtı olan DMA standardında yakıtta hidrojen ilavesinin etkileri incelenmiştir. Özgül yakıt tüketimlerinin düştüğü, yanma verimliliğinin arttığı, çevreye salınan zararlı emisyon olan UHC ve CO emisyonlarında olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Gemide depolanabilmesi ikmal ve yakıtta çok düşük ilavelerle kayda değer olumlu sonuçlar elde edilebildiği için yapılacak olan çalışmalara katkı sağlayacağı ve yeni fikirler katacağı düşüncesiyle de çalışmanın önemli bir yere sahip olduğu düşünülmektedir.

BÖLÜM İKİ

GENEL BİLGİLER

2.1 Hidrojenin Kullanım Alanları ve Yakıt Olarak Kullanımı

Dünya çapında üretilen hidrojenin büyük kısmı petrokimyasalların işlenmesinde ve amonyak ve metanol üretiminde tüketilir. Elektrolitik hidrojen genellikle daha yüksek saflık gerektiren küçük pazarlarda ve özel uygulamalarda kullanılır. Gıda işlemede, hidrojen, katı ve sıvı yağlardaki doymunluk derecesini arttırmak, erime noktalarını ve oksidasyona karşı direncini arttırmak için kullanılır. Elektronik endüstrisinde, polisilikonun epitaksiyal büyümesinde ve entegre devrelerin üretiminde bir indirgeyici ajan olarak kullanılır. Nükleer endüstride, oksijen izlerini gidermek için bir oksijen tutucu olarak kullanılır, bu da stres korozyon çatlağına neden olabilir. Düz cam üretiminde koruyucu atmosfer olarak kullanılır. İlaç ve plazma endüstrisinde küçük hidrojen miktarları tüketilir. Yüksek ısı iletkenliği nedeniyle, güç istasyonlarındaki elektrik jeneratörleri için bir soğutucu olarak da kullanılır (Gupta, 2009).

Hidrojen, kütle bazında daha yüksek enerji yoğunluğu, daha az çevre kirleticiliği, evrendeki farklı formlarda bol miktarda bulunması ve elektriğe veya faydalı kimyasallara dönüştürülebilmesi nedeniyle geleceğin alternatif enerji taşıyıcısı olarak kabul edilir. Evrende normal koşullar altında tat, renk, koku ve toksik olmayan en hafif element (Pagliaro, Konstandopoulos, Ciriminna, ve Palmisano, 2010; Davis, 2010), olması ayrıca hidrojenin enerji yoğunluğunun HFO'nun enerji yoğunluğunun hemen hemen üç katı olması, liman içerisindeki elektroliz üniteleriyle üretilebildiğinden uzun mesafeli taşıma altyapısı gerekli olmadan gemilere tedarik edilebilmesi sebebiyle gemilerde kullanılabilecek yakıtlar arasında düşünülmektedir (Kim, Koo, ve Joung, 2020).

Hidrojen gaz veya sıvı formda yakıt olarak kullanılmakta ve üretimi için başka bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulduğu için ikincil enerji kaynağı olarak görülmektedir (Davis, 2010). Diğer tüm yakıtlara kıyasla geniş bir yanıcılık aralığına sahiptir. Sonuç olarak hidrojen direkt olarak içten yanmalı motorlarda kullanılabileceği gibi yakıt

hücreleri vasıtasıyla enerjiye dönüştürülebilir (Solway, 2008; Heywood, 2018). Hidrojen çok düşük tutuşma enerjisine sahiptir. Bunun önemli bir avantajı, hidrojenin zayıf bir karışım üzerinde çalışabilmesi ve hızlı ateşleme sağlayabilmesidir. Genel olarak IC motoru zayıf bir karışım ile çalıştığında yakıt ekonomisi daha büyüktür ve yanma reaksiyonu daha eksiksizdir (Heywood, 2018).

Hidrojen atomlarının oluşturdukları küçük boyutlu H₂ olarak gösterilen moleküller havadan 14 kat daha hafif renksiz, kokusuz ve tatsızdır. Soğutulduğunda -253° C de sıvı hale, -259° C de katı hale geçer (Gupta, 2009).

Tablo 2.1 Hidrojenin genel özellikleri (Gupta, 2009)

Hidrojenin Genel Özellikleri	Değer
Molekül ağırlığı	2,01594
Gaz yoğunluğu (0°C - 1 atm)	0,08987 kg/m ³
Katı yoğunluğu -259°C	858 kg/m ³
Sıvı yoğunluğu -253°C	708 kg/m ³
Erime sıcaklığı	-259°C
Kaynama sıcaklığı (1atm)	-253°C
Kritik Sıcaklık	-240°C
Kritik Basınç	12,8 atm
Kritik yoğunluk	31,2 kg/m ³
Erime ısısı (-259°C)	58 kJ/kg
Buharlaşma ısısı (-253°C)	447 kJ/kg
Termal iletkenlik (25°C)	0,019 kJ/(m.s°C)
Vizkozite (25°C)	0,00892 cp
Isı kapasitesi (gaz 25°C)	14,3 kJ/(kg°C)
Isı kapasitesi (katı -256°C)	8,1 kJ/(kg°C)
Isı kapasitesi (sıvı -259,8°C)	2,63 kJ/(kg°C)

Yüksek yayılma gücü, düşük viskozite ve kimyasal özelliği sebebiyle hidrojenin yanma etkisi diğer yakıtlardan farklıdır (Gupta, 2009)

Tablo 2.2 Hidrojen ve diğer yakıtların kıyaslanması (Gupta, 2009)

Yakıt	LHV (Mj/kg)	HHV (Mj/kg)	Stokiyometrik Hava/Yakıt Oran (kg)	Alev Sıcaklığı (°C)	Min. Tutuşma Enerjisi (Mj)	Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (°C)
Metan	50,0	55,5	17,2	1914	0,30	540-630
Propan	45,6	50,3	15,6	1925	0,30	450
Oktan	47,9	52,1	15,1	1980	0,26	415
Metanol	18,0	22,7	6,5	1870	0,14	460
Hidrojen	119,9	141,6	34,3	2207	0,017	585
Benzin	44,5	47,3	14,6	2307	0,29	260-460
Dizel	42,5	44,8	14,5	2327		180-320

2.2 Hidrojenin Üretimi

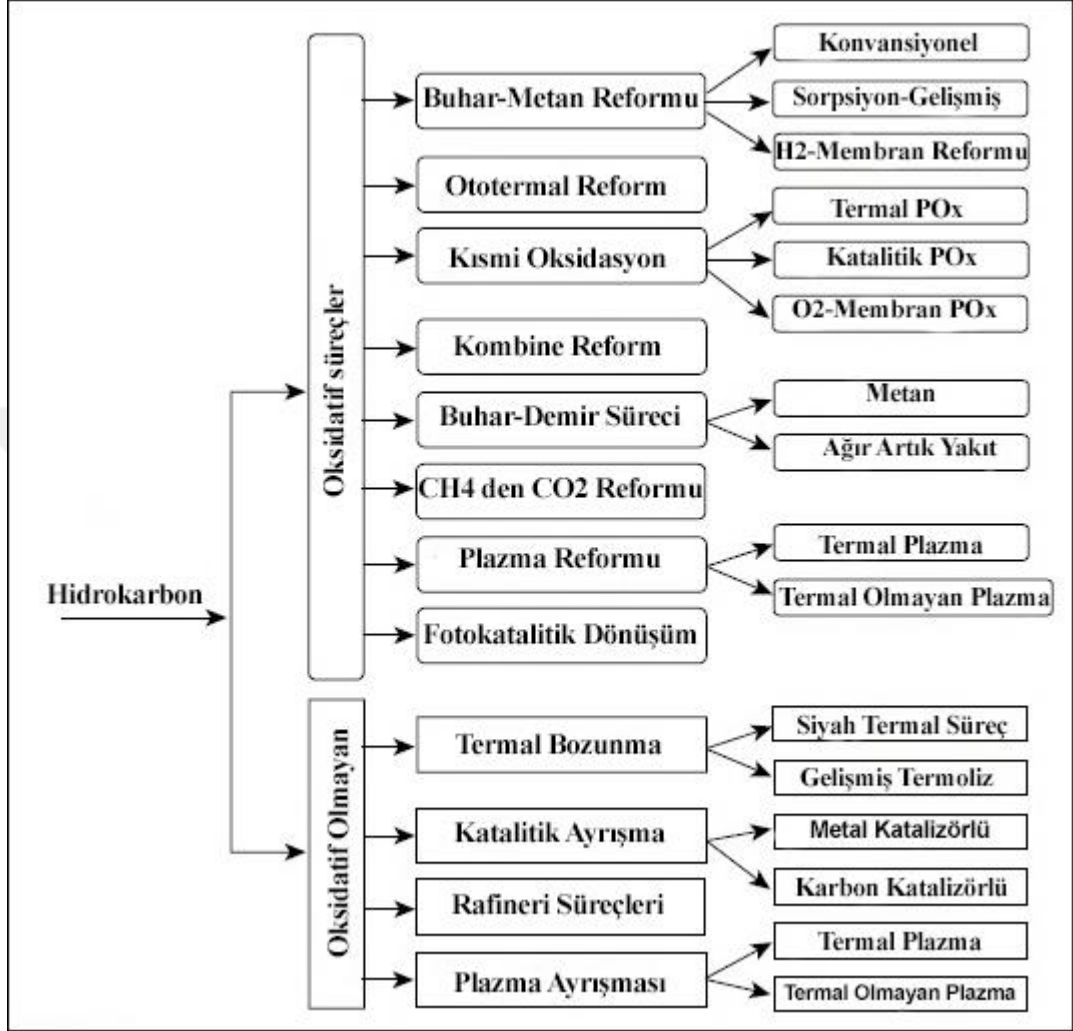
Hidrojen fosil (Jamal ve Wyszynski, 1994) veya fosil olmayan kaynaklardan (Winter ve Nitsch, 1988) oluşturulabileceği için neredeyse mükemmel bir enerji depolama ortamı olarak kabul edilir. Doğal gaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlardan, esas olarak buharla reforme edilerek veya kısmi oksidasyon yoluyla üretilir. (Karim, 2012). Yakıt olarak kullanılan kömür veya hidrokarbon yakıtlar gibi doğada kendi halinde bulunamayan hidrojen; oluşturduğu bileşiklerden ayrılabilmesi ve yakıt olarak kullanılabilmesi için birtakım ayırma işlemlerine ihtiyaç duyulur (Gupta, 2009).

Hidrojen termokimyasal, elektrokimyasal ve biyolojik vb. yöntemlerle; güneş, rüzgar gibi yenilenebilir temiz enerji kaynaklarından üretilbildiği gibi, nükleer ve fosil yakıtlardan da üretilmektedir. Çalışmada hidrokarbonlardan üretimine ve alternatif yöntemlere değinilmiştir.

2.2.1 Hidrokarbonlardan Hidrojen Üretimi

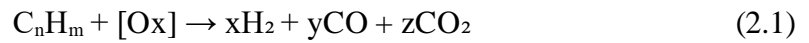
Hidrokarbonlardan hidrojen üretim farklı teknoloji ve yöntemlerle gerçekleştirilmektedir (Davis, 2010). Süreç, yöntemin kimyasındaki farklılıkları, enerji girdisinin tipini, katalizörlerin rolünü ve çevresel etkilerini en iyi şekilde gösterebilecek şekilde sınıflandırılmıştır. Oksidatif ve oksidatif olmayan yöntemler ve

bu yöntemlerin çeşitliliği ile pek çok hidrokarbondan hidrojen üretim yolu kullanılmaktadır (Şekil 2.1) (Gupta, 2009).



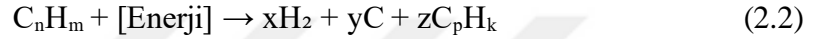
Şekil 2.1 Hidrojen üretim sürecini gösteren şema (Gupta, 2009)

Hidrokarbonların hidrojene oksidasyon süreci oksijen, karbon dioksit, su buharı gibi oksitleyici maddelerle tepkimeye girmesi ile gerçekleşir. Endüstriyel hidrojen üretimi için yaygın olarak; buhar metan reformu (SMR), kısmi oksidasyon (PO_x), ototermal reform (ATR), buhar-demir prosesi (SIP), yöntemleri kullanılır Genel olarak şu denklemlerle ifade edilebilir (Gupta, 2009);



Denklemden C_nH_m bir hidrokarbon ($n \geq 1$ ve $m \geq n$) ve (Ox) O_2 , H_2O ve CO_2 gibi bir yükseltgeni temsil eder. Oksidana göre oksidatif süreç endotermik ya da ekzotermik olabilir (Gupta, 2009).

Oksidatif olmayan süreçte hidrojen üretiminde; oksidasyon için oksitleyicilere ihtiyaç duyulmaz. Isı, plazma, radyasyon gibi bir enerjiye maruz bırakılan hidrokarbonlardan C ve H bağlarının bölünmesiyle gerçekleştirilir. Hidrokarbonların hidrojene oksidatif olmayan süreçle dönüşmesi aşağıdaki denklemle gösterilebilir (Gupta, 2009);



Denklemden C_nH_m hidrokarbon stoğu ($n \geq 1$ ve $m \geq n$), C_pH_k ise tepkime sonrasında ortaya çıkan nispeten kararlı ürünleri temsil eder. Genellikle C_pH_k , CH_4 veya C_2H_2 olarak açığa çıkar. Enerji ise termal, elektrik, plazma, radyasyon gibi bir enerji girdisidir (Gupta, 2009).

2.2.2 Nükleer Enerji İle Hidrojen Üretimi

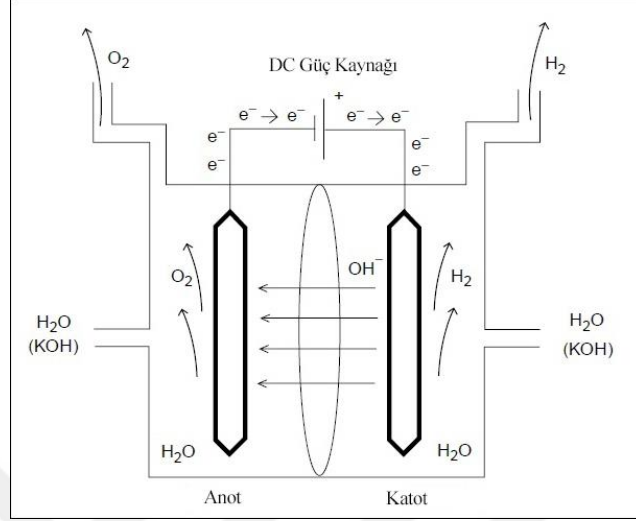
Yüksek sıcaklık elektroliz yöntemi; katı-oksit yakıt hücresinin (SOFC) ters reaksiyonu ile gerçekleşir. Bir oksijen iyonik iletken genellikle bir katı oksit elektroliti olarak kullanılır. Buhar (H_2O), katotta katot yüzeyinde oluşan hidrojen molekülleri (H_2) olarak ayrıştırılır. İki elektrot üzerindeki reaksiyonlar ise aşağıda gösterildiği şekilde ifade edilir (Gupta, 2009);



2.2.3 Rüzgar Enerjisi İle Hidrojen Üretimi

Rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi ve üretilmiş olan elektrik enerjisinin elektroliz için kullanılması yöntemine dayanan hidrojen üretim yöntemlerinden, çevreci olanıdır.

Elektrokimyasal olarak suyun bileşenlerine ayırma işlemi olan elektrolizde endüstride en çok kullanılan alkalin elektrolit tipi Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Gupta, 2009).



Şekil 2.2 Alkalin elektrolitik hücrenin şematik görünümü (Gupta, 2009)

Elektroliz hücresinde gerçekleşen reaksiyonların basit bir şekilde gösterimi şu şekildedir;

Elektrot üzerinde;



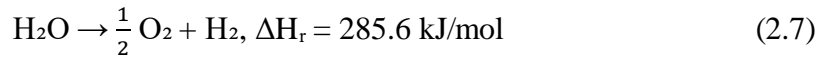
Katot üzerinde;



Anot üzerinde;



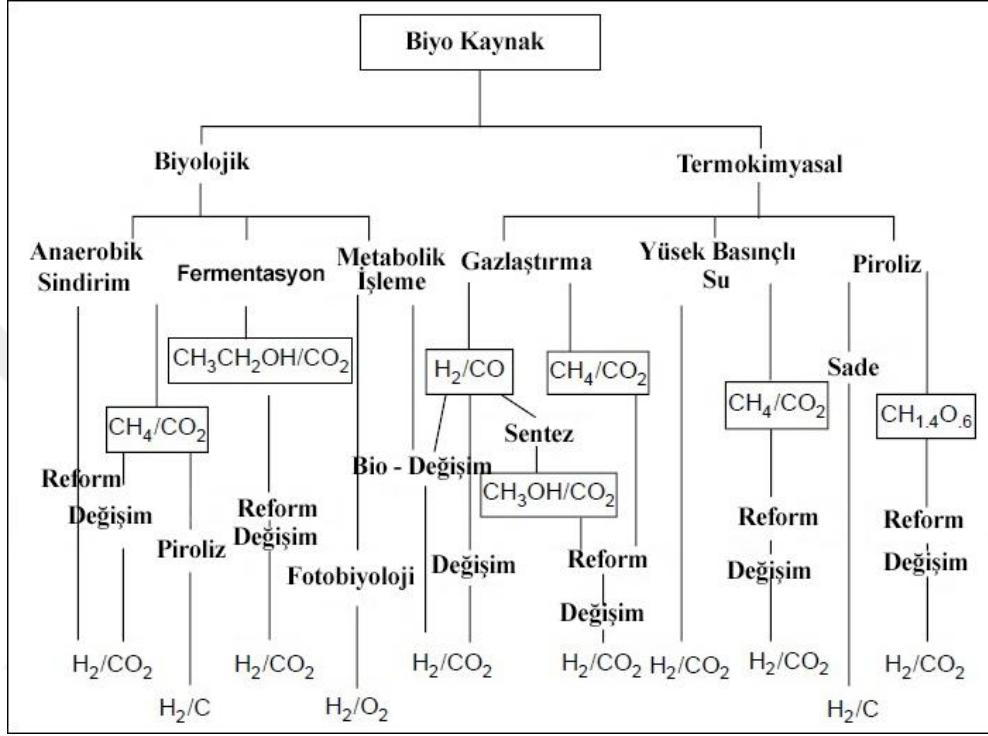
Toplamda;



ΔH_r reaksiyon entalpisini göstermektedir.

2.2.4 Biyokütleden Hidrojen Üretimi

Biyokütleden biyolojik veya termokimyasal yöntemlerle hidrojen üretilebilir. Şekil 2.3'de üretim süreci gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Biyo kütleden hidrojen üretim basamakları (Gupta, 2009)

Buğday samanı, hayvan atıkları, orman artıkları gibi organik malzemeler ve enerji kaynağı olarak kullanılmak üzere yetiştirilen şalt çimi veya söğüt ağaçları gibi özel ürünleri içeriğinde bulunduran biyokütle, yenilenebilir bir alternatif olduğu gibi gazlaştırma işlemi ile hidrojen üretiminde de kullanılabilir (Davis, 2010).

2.2.5 Güneş Enerjisi Kullanılarak Hidrojen Üretimi

Güneş enerjisinden yararlanılarak; elektroliz yöntemiyle birlikte kullanılan fotovoltaiik (PV), yapay fotosentez yöntemini (Solway, 2008) de içeren fotokimyasal yöntem, yeşil algler ve bakterilerin doğal fotosentetik aktivite özelliği kullanılan fotobiyolojiksel yöntem, suyun 1500° C ve üzerinde ısıtılmasıyla hidrojen elde etme

yöntemi olan güneş termal enerji yöntemleri ile hidrojen elde edilebilmektedir. (Özdemir ve Mutlubaş, 2019; Gupta, 2009).

2.3 Hidrojenin Depolanması

Hidrojen, genellikle sıkıştırılmış gaz veya sıvı olarak depolanır. Nakliyede, yakıt depolama hacmini en aza indirerek yakıt olarak kullanılabilmesi için hidrojen, yüksek oranda sıkıştırılmalıdır. Genellikle depolama basınçları 130 ila 350 bar'dır. Mevcut hidrojen üretim teknolojileri tipik olarak atmosfer basıncında 25 bar'a kadar hidrojen gazı üretir. Gaz basıncını neredeyse tüm uygulamalar için gerekli seviyelere çıkarmak için mekanik sıkıştırma gereklidir. Basıncı gaz halinde hidrojen depolamaya iki alternatif mevcuttur: -253 ° C'de soğutulmuş elde edilen sıvılaştırılmış hidrojen ve metal hidritlerdir (Grimes, Varghese, ve Ranjan, 2008). Ayrıca hidrojen; NaBH₄ çözeltileri, şarj edilebilir organik sıvılar veya susuz amonyak NH₃ gibi diğer sıvılar içinde bir bileşen olarak saklanarak depolanabilir (Ley, Jepsen, Lee, ve Cho, 2014).

Metaller, metaller arası bileşikler ve alaşımlar genellikle hidrojen ile reaksiyona girer ve esas olarak katı metal-hidrojen bileşiklerini oluştururlar. Hidrojen, yükseltilmiş sıcaklıkta birçok geçiş metali ve bunların alaşımları ile hidritler oluşturmak üzere reaksiyona girer. Metal hidritlerden farklı olarak hafif elementler (örn. Li, Mg, B, Al) çok çeşitli metal-hidrojen kompleksleri oluşturur. (Züttel, 2004).

Tablo 2.3 Hidrojen depolanmasında kullanılan en yaygın beş yöntem (Züttel, 2004)

Yöntem	Kütlece Yoğunluk (kütle%)	Hacimce Yoğunluk (kg H ₂ m ⁻³)	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Basınç (bar)
Yüksek basınçlı silindirik tüpler	13	<40	Oda Sıcaklığı	800
Sıvı halde kriyojenik tanklar	≈2 (Boyuta bağlı)	(20) - (70,8)	(-80) - (-252)	1-100
Metalde emilim	≈2	150	Oda Sıcaklığı	1
Karmaşık bileşikler	<18	150	>100	1
Metaller ve su ile oluşturdukları bileşikler	>40	<150	Oda Sıcaklığı	1

2.3.1 Alternatif Depolama Yöntemleri

2.3.1.1 Organik Kimyasal Hidrit

Organik bileşiklerin hidrojenasyonu ve dehidrojenasyon ile hidrojen depolanabilmektedir. Yüksek kütlece hem de hacimsel hidrojen yoğunlukları sağladığı ve normal ortam basıncı altında sıvı halde depolanması ve taşınabilmesi sebebiyle oluşabilecek riskleri en aza indiren yöntemlerden birisidir. Ayrıca, hidrojen depolama ve taşınmanın geleneksel bir petrokimya ürünü olarak gerçekleştirilmesi avantajına da sahip olması avantajlı bir yöntem olarak görülmesini sağlamıştır (Okada, Sasaki, Watanabe, Hyodo, ve Nishijima, 2006). Dekalin dehidrojenasyonu, naftalen hidrojenasyonu gibi organik kimyasal hidritler olarak bulunabilir. Sağlık için güvenle kullanılabilmesi düşünülen ve yakıt istasyonları için öngörülen organik kimyasal hidritler alternatif depolama çözümlerindedir. Dekalin ağırlıkça %7,2 oranında yani 64,8 kg H₂ / m³ hidrojen depolayabilmektedir (Gupta, 2009).

2.3.1.2 Karbon Maddeler

Alternatif hidrojen depolama yöntemleri arasında; grafit gibi yüksek yüzey alanına sahip aktif karbon gibi çeşitli karbon formları dikkat çekmektedir. Maksimum depolama kapasitesi, nanotüplerin içindeki H₂ molekülleri ile H₂ molekülleri ve tüp duvarı arasındakiler arasındaki itici enerjilerle sınırlı olduğu gözlemlenmiş olan (Lee ve Lee, 2000) tek duvarlı karbon nanotüpler ağırlıkça % 2,5-3 hidrojen içerir (Gupta, 2009).

2.3.1.3 Silika Mikroküreler

Harici bir depolama kabına gereksinim duymadan; hidrojen içi boş silis mikrokürelerde depolanabilmektedir. 500° C gibi yüksek sıcaklıklarda küre duvarı hidrojenin geçmesine izin verirken; normal koşullarda geçirmez olarak güvenli depolama sağlanabilmektedir (Gupta, 2009). Dışı nikel kaplı silika mikroküreler elde

edilerek yüksek H₂ salımı yapabilen ve mıknatıs yardımı ile yeniden depolama özelliği kazandırılan farklı yöntem de geliştirilmiştir (Yoo, Kim, Kang, Lee, ve Hur, 2014).

2.3.2 Hidrojenin Gemilerde Depolanması

Gerekli enerji yoğunluğu, depolanacak miktar, istenen depolama süresi ve maliyet limiti faktörleri göz önünde bulundurularak uygun olan depolama biçimi seçilmelidir. Sıkıştırılmış gaz veya sıvı halde ya da metal hidrür seçenekler arasındadır (Seddiek, Elgohary, ve Ammar, 2015; Power, 2019).

Gemilerde kullanım için; uzun depolama süresine ek olarak büyük miktarlarda yakıtın gerekli olduğu düşünüldüğünde hidrojenin sıvı halde depolanması en iyi depolama şekli olarak görünebilir. Sıvı hidrojen birçok avantaj sağlayabilmesine rağmen, mevcut geleneksel yöntemlerle hidrojenin sıvılaştırılması büyük miktarda ısı tüketir. Pratik olarak, sıkıştırılmış hidrojen deposu kısa doldurma süresine ve uzun depolama süresine sahipken, bir sıvı hidrojen tankı kısa doldurma süresine ve kısa depolama süresine sahiptir. Ayrıca, uzun depolama süresi boyunca kaynama kayıplarını en aza indirmek ve kontrol etmek için, ilave maliyetler gerektiren sıvı azot gibi başka bir ortam kullanılarak kalıcı soğutma gereklidir, ama sürekli soğutma ile maliyet düşürülebilir (Seddiek, Elgohary, ve Ammar, 2015).

2.4 Hidrojen Yakıtının Gemiye İkmali

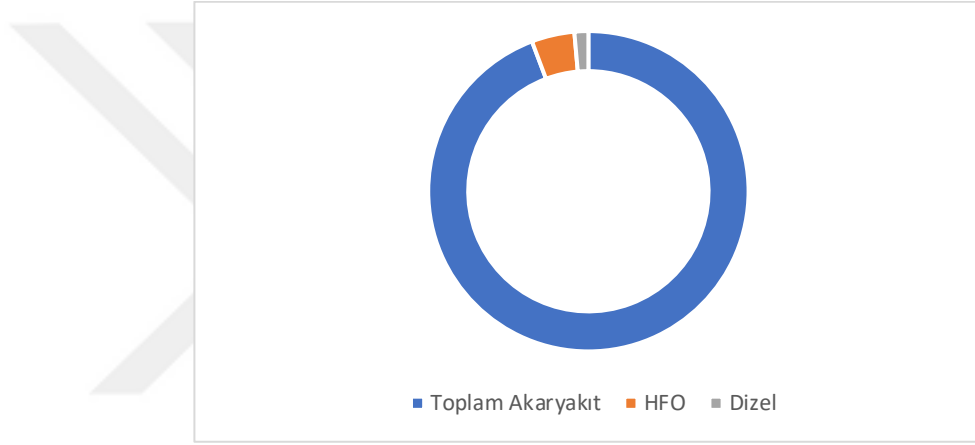
Hidrojen yakıtı yeni bir konu olduğu için depolanması ve ikmali ile alakalı ayrıntılı standartlar tam anlamıyla belirlenmemiştir. Yakıt hücresi veya içten yanmalı makinede kullanılması depolama ve ikmal sürecini etkileyen faktörlerdendir. Gaz halindeki hidrojenin gemiye ikmali için; 350-500 bar gibi yüksek basınçta limanda depolanmış gaz hidrojenin, gemideki tüpe doğrudan aktarılması veya 20 bar gibi düşük basınçta limanda depolanmış olan hidrojenin gemi içerisindeki tanklarda özel ekipmanlarla basıncı arttırılarak ikmal edilme yöntemleri kullanılabilir. Sıvı haldeki hidrojenin gemiye ikmali için ise; limanda hidrojen sıvı olarak depolanır ve kriyojenik pompalar kullanılarak gemi tanklarına aktarılır. Bu yöntem LNG den de alışı olunan

BÖLÜM ÜÇ

GEMİ YAKITLARI VE ALTERNATİF GEMİ YAKITLARI

3.1 Gemi Yakıtları ve Sınıflandırılmaları

Dünya üzerinde akaryakıt kullanımı 4662,1 milyon ton olarak belirlenmiştir (BP, 2019). Deniz sektöründe ise dizel ve ağır yakıtlar (HFO) toplam 267,3 milyon ton kullanım belirlenmiş olup %75,5'i ağır yakıtlar (HFO) tarafından karşılanmakta olup %24,5'i ise dizel yakıtlardan karşılanmaktadır (Şekil 3.1) (Fuelseurope, 2019).



Şekil 3.1 Dünya genelinde toplam tüketilen akaryakıt oranları (Fuelseurope, 2019)

Denizcilik sektöründe kullanılan akaryakıt dünya üzerindeki akaryakıt tüketiminin yaklaşık olarak %5,7'sini temsil etmekte ve çevreye etkileri göz ardı edilemeyecek seviyelerde olması görülebilir. Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) gemilerden kaynaklı hava kirliliğini önlemek için bir dizi önlemler almıştır. 1973 yılında imzalanan 1978 yılında değişikliğe uğramış olan uluslararası sözleşmesi (MARPOL 73/78) VI.eki ile gemi baca (egzoz) gazlarından çıkan partikül madde (PM), azot oksit (NO_x) ve kükürt oksit (SO_x) içeren emisyonların azaltılmasına yönelik sınırlandırmalar getirilmiştir (UAB, 2020).

Denizcilik yakıtları IMO tarafından belirlenmiş olan ISO 8217 standardı ile ele alınmıştır. ISO 8217: 2017, biri acil durum amaçlı kullanılan dizel motorlar için olmak

üzere yedi kategoride damıtılmış yakıt kategorisi ve ayrıca altı kategoride artık yakıt parametrelerini belirtmektedir (ISO, 2020).

Tablo 3.1 ISO 8217 standartlarında damıtılmış deniz tipi yakıtların bazı özellikleri (Unioil Supply, 2020)

Parametreler	Birim	LIMIT	DMX	DMA	DFA	DMZ	DFZ	DMB	DFB
Kinematik viskozite 40°C'de	mm ² /s	Max	5,50	6,00		6,00		11,00	
		Min	1,40	2,00		3,00		2,00	
Yoğunluk 15°C'de	kg/m ³	Max		890,00		890,00		900,00	
Hesaplanan setan indeksi		Min	45,00	40,00		40,00		35,00	
Sülfür	kütle %	Max	1,00	1,00		1,00		1,50	
Parlama noktası	°C	Min	43,00	60,00		60,00		60,00	
Hidrojen sülfür	mg/kg	Max	2,00	2,00		2,00		2,00	
Asit numarası	mg KOH/g	Max	0,50	0,50		0,50		0,50	
Su	hacim %	Max						0,30	
Kül	kütle %	Max	0,01	0,01		0,01		0,01	

Tablo 3.2 ISO 8217 standartlarında artık deniz tipi yakıtın bazı özellikleri (Unioil Supply, 2020)

Parametreler	Birim	Limit	RMA	RMB	RMD	RME	RMG				RMK		
			10	30	80	180	180	380	500	700	380	500	700
Kinematik viskozite 50°C'de	mm ² /s	Max	10	30	80	180	180	380	500	700	380	500	700
Yoğunluk 15°C'de	kg/m ³	Max	920	960	975	991	991				1.010,00		
Parlama noktası	°C	Min	60										
Hidrojen Sülfür	mg/kg	Max	2										
Asit Sayısı	mg KOH/g	Max	2,5										
Mikro karbon kalıntısı (% m/m)	Kütle %	Max	2,5	10	14	15	18				20		
Su	Hacim %	Max	0,3	0,5									
Kül	Kütle %	Max	0,04	0,07			0,1				0,15		
Vanadyum	mg/kg	Max	50	150			350				450		
Sodyum	mg/kg	Max	50	100		50	100				100		

ISO 8217'ye uygun çeşitli deniz yakıtları, rafinerilerde fraksiyonel damıtma yoluyla ham petrolden üretilmektedir. Gaz fazına geçmeyen fraksiyonel damıtmada kalan artık, artık yakıt veya ağır akaryakıt olarak adlandırılır. ISO 8217 uyarınca,

kalıntı yakıtlar viskozitelerine (kinematik viskozite) bağı olarak RMA, RMB, RMD, RME, RMG ve RMK olarak altı yakıt tipine ayrılır. Artık denizcilik yakıtları (RMFO) 50 °C deki vizkozite değerleriyle belirtilirler (Exxon Mobile, 2020). Örnek olarak; RME180 50 °C 'de 180 cst (Tüpraş, 2020b), RMG380 50 °C 'de 380 cstdir (Tüpraş, 2020a). Kinematik viskozite değeri ne kadar düşük olursa yakıt o kadar ince olur. Genel bir kural olarak, viskozite ne kadar ince olursa, deniz yakıtının kalitesi de o kadar yüksek olur. Artık yakıtlar büyük, orta ve yavaş hızlı deniz motorlarında kullanılır. Geminin özel emisyon kısıtlamaları olmayan bölgelerde genellikle RMG 380 veya RMK 380 olan bir ara yakıt yağı (IFO) 380 deniz yakıt tipi kullanılmaktadır (Marquard, 2020).

Ağır gemi yakıtları (HFO) gibi yüksek kıvamlı yakıtları yakabilen dizel makinelerin gelişimi; silindir içerisinde ağır yakıtı bağı asit seviyelerini normale indirgeyebilen silindir yağlarının geliştirilmesiyle birlikte 1950 yıllarının ortalarından sonra gerçekleşmiştir (Woodyard, 2009).

ISO 8217 uyarınca, damıtılmış yakıtlar yedi sınıfa ayrılır: DMX, DMA, DFA, DMZ, DFZ, DMB ve DFB. Yüksek uçuculukta bir damıtma ürünü olan DMX, yüksek ve süper yüksek devirli dizel makinelerde kullanılan bir yakıttır. Orta uçuculukta, parlak ve temiz bir damıtma ürünü olan DMA, genel olarak gemi yakıtı 'MGO yani Marine Diesel Oil' olarak isimlendiriliyor. DMB ise alçak uçuculukta ve DMA'ya benzerlik gösteren bir damıtma ürünü, fakat az miktarda artık yakıt içerdiğinden siyah renkli görünebiliyor. DMB den daha yüksek oranda artık yakıt içeren DMC yakıtı ise diğerlerine göre daha çok karbon artığı, tortu miktarı, alüminyum + silikon ve vanadyum miktarı kapsıyor (Arkas Bunker, 2020).

Bunlarla birlikte içerdiği kükürt oranına göre de isimlendirilirler. Yüksek kükürtlü 'HSFO', düşük kükürtlü 'LSFO', ultra düşük kükürtlü %0,1 kükürt oranıyla 'ULSFO' veya çok düşük kükürtlü %0,5 kükürt oranıyla 'VLSFO' yakıtları da yeni gelen regülasyonlara uyum sağlamak amacıyla üretilen yakıtlardır (Shell, 2020a).

Karbon dioksit (CO₂) ve kükürt oksit (SO_x) emisyon değerleri; %2,6 kükürt oranına sahip IFO380 ve %2,4 kükürt içerikli IFO180 tipi yakıtlarda daha yüksek olurken, sırasıyla %0,35, %0,55 ve %0,75 kükürt içeriğine sahip DMA, DMB ve DMC gibi damıtılmış yakıtlarda daha düşük miktarlarda gözlenmiştir (Corbett ve Winebrake, 2012).

3.2 Alternatif Gemi Yakıtları

Uluslararası MARPOL 73/78 sözleşmesi Ek VI düzenlemesiyle IMO tarafından belirlenen kükürt oksit (SO_x) azot oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) emisyon değerlerinin iyileştirilmesine yönelik 2010 yılından itibaren getirmiş olduğu sınırlamaların (IMO, 2020a, 2020c), ayrıca 1 Ocak 2020 itibariyle emisyon kontrol bölgelerinde (ECA) (IMO, 2020b) yakıttaki kükürt oranının kütlece %0,5 m/m üst sınır belirlenmesi emisyon değerlerinin düşürme amaçlı egzoz yıkama sistem, atık ısı geri kazanım sistemi (WHR), egzoz gazı temizleme (SCR) sistemleri gibi yeni teknolojilerin önünü açtığı gibi alternatif yakıt arayışlarını beraberinde getirdiği söylenebilir. Emisyon azaltıcı çalışmalar halen yapılmakta hangisinin daha uygulanabilir olduğu ve daha ekonomik olduğu ile ilgili çalışmalar sürmektedir.

Alternatif yakıtlar eski gemi makineleri üzerinde birtakım fiziksel değişikliklerle kullanılabilirdiği gibi yeni inşa edilen gemiler için LNG, LPG, metanol gibi yakıtları yakabilen deniz tipi gaz enjeksiyonlu MAN ME-GI, likit gaz enjeksiyonlu ME-LGI makineleri üretilmiş ve çevreci çözümler düşünülmüştür (MAN, 2020b).

3.2.1 LNG

Likit doğal gazın (LNG) dünya çapında bulunabilir olması, düşük emisyon değerleri sağlaması, hali hazırda uygun depolama limanlarının da bulunması, çift yakıtlı (DF) iki ve dört zamanlı motorlarda rahatlıkla uygulanabilir olması depolanma maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen gemilerde alternatif yakıt olarak düşünülmektedir (Herdzik, 2011).

Motorun LNG yakıt sistemine geçiş maliyetlerde göz önüne alındığında; CO₂ taşıyıcı bir gemi üzerinde yapılan bir araştırmada; deniz yakıtına (MGO) kıyasla LNG ile çalıştırılan motorun daha düşük işletim maliyeti ve daha düşük emisyon değeri gözlenmiş olması LNG'nin gemi yakıtı için alternatif olma umudu vermiştir (Yoo, 2017).

Günümüzde LNG yakıtlı yolcu, konteyner, ro-ro gibi pek çok gemi yapılmış olmakla birlikte, yakıt ikmal (Bunker) operasyonları da güvenle yürütülmektedir. Sadece Shell firmasının dünyanın farklı bölgelerinde işletilmekte olan 33 yakıt ikmal istasyonu bulunmakla birlikte 108 potansiyel ikmal istasyonu düşünülmüştür (Shell, 2020b).

3.2.2 Metanol ve Etanol

Gemi yakıtı olarak alternatifler arasında olan Metanol (CH₃OH) ve Etanol (C₂H₅OH), tarım ürünleri ve odunun yıkıcı damıtılması ve büyük miktarlarda doğal gaz ve kömür gazından reformasyon işlemi ile, yenilenebilir kaynaklardan üretilen çeşitli alkollerdir (Deniz ve Zincir, 2016).

Çevresel etki göz önünde bulundurulduğunda metanol alternatif yakıt olarak düşünülmektedir. Dizel motorlar üzerinde bazı fiziksel değişikliklerle hayata geçebilir olması da avantajları arasındadır. Çift yakıtlı (DF) motorundaki gaz valfi metanol enjektörüyle değiştirilerek, önceden karıştırılmış metanol ve hava, küçük bir pilot yakıt dizel spreyi ile ateşlenebilir. Başka bir modifikasyon yöntemi ise metanol yüksek basınçla enjekte edilerek pilot dizel ile tutuşması sağlanır (Brynolf, Fridell, ve Andersson, 2014).

Denizcilik sektörüne de makine üreten MAN firması LNG ve Metanol yakabilen ME-LGI model iki zamanlı gemi makinesini üretmiştir ve yeni inşa gemiler için alternatif sumaktadır (MAN, 2020a).

3.2.3 LPG

Normal sıcaklıkta orta basınç altında sıvılaştırılabilen, ancak normal atmosfer koşullarında gaz halinde olan hafif hidrokarbon karışımı olan sıvılaştırılmış petrol gazının (LPG) ana bileşenleri, herhangi bir oranda veya hava ile karıştırılmış propan (C_3H_8) ve bütandır (C_4H_{10}). HFO'ya göre çok daha düşük emisyon değerleri veren yakıt kısa sefer yapan feribotlarda kullanılmakta ancak, yük gemilerinde gaz yakıt makineleri tarafından yakılabilmektedir (Kjartansson, 2011).

3.2.4 Hidrojen

Genel kimyasal ve yanma özellikleri Bölüm 2'de verilmiş olan hidrojen yakıtının hidrokarbon yakıtlara göre çok daha düşük kütlelerinin olması sebebiyle gemilerde taşınabilecek faydalı yükün artırması mümkün olduğu düşünülmektedir. Gaz türbini ile tahrik edilen 600 TEU kapasiteli gemide sıvı hidrojen (LH_2) yakıtının uygulanabilirliği araştırmalar sonucu gösterilmiştir (Veldhuis, Richardson, ve Stone, 2007).

3.2.5 DME

Dimetil eter normal sıcaklıkta gaz halde bulunan, kimyasal yapısı (CH_3OCH_3) ile gösterilen hidrojen açısından zengin olan en küçük eter bileşimidir. Yenilenebilir malzemeler (biyokütle, atık ve tarım ürünleri) veya fosil yakıtlar (doğal gaz ve kömür) gibi birçok kaynaktan elde edilebilir olması ve $20\text{ }^\circ\text{C}$ ve 6 bar koşullarında rahatlıkla sıvılaştırılır olması, alternatif yakıtlar arasında gösterilme sebeplerinden bazılarıdır (Ryu ve Dan, 2012). Ayrıca dizel yakıtla kıyasla CO_2 emisyonları üretmesi de avantajları arasındadır (Crookes ve Bob-Manuel, 2007).

3.2.6 RME (Biyodizel)

Yağ tohumlarının hekzan gibi bir çözücü ile mekanik olarak preslenmesi veya yıkanmasıyla üretilen bitkisel yağların tutuşma kalitesini arttırmak için, yapısını

trigliseritlerin dallı yapısından fosil dizele benzer daha küçük düz zincirli metil esterlere dönüştürmek için trans-esterleştirilir. Bu durumda trans-esterleştirme reaksiyonu, katalizör (tipik olarak güçlü bir asit veya baz) varlığında gerçekleştirilir. Üretilen metil ester, kolza tohumu metil ester (RME) olarak adlandırılır (Fahim, Alsahhaf, ve Elkilani, 2009). Dizel yakıtı göre daha viskoz, sülfür içermeyen berrak sarı renkli bir yakıt türüdür (Chong ve Bridgwater, 2016).

Gemi makinelerinde ek maliyet gerektiren modifikasyon olmaksızın biyodizelin kullanılabilmesi, diğer petrol ürünleri ile kolaylıkla karışım halinde de kullanılabilmesi gibi olumlu yönleriyle gemilerde yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabileceği düşünülmektedir (Nuran, 2014).

BÖLÜM DÖRT

DİZEL MOTORDA YANMA VE SALIMLAR

4.1 Dizel Motorlarda Yanma

Yanma olayı, çoğunlukla hidrokarbonlardan oluşan yakıt bazlı kimyasal enerjiyi ısıya dönüştürmek için yanma havasındaki oksijenin de işleme katılarak yüksek sıcaklıkla birlikte ortam basıncını yükseltip ve genişlemesinden faydalanarak piston hareketine ve dolayısıyla mekanik çalışmaya dönüştürme işlemidir (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010).

Motorlarda yanma havası; kuru hava, hacimce %20,95 oksijen, %78,09 azot, %0.93 argon ve eser miktarda karbon dioksit, neon, helyum, metan ve diğer gazların temsili bir bileşimine sahip bir gaz karışımıdır. Yanma olayı sıkıştırılarak sıcaklığı artan yanma havası içerisine enjektör vasıtasıyla püskürtülen ve buharlaşan yakıtın tutuşmasıyla başlayan süreçtir ve bu alev difüzyon alevi olarak isimlendirilir (Heywood, 2018).

Yanma süreci; yakıtın enjektörden çıktığı atomizasyon süreciyle başlayarak; yüksek oranlarda (12-24) sıkıştırılmış ve sıcaklığı yükselmiş emme havası içerisinde yakıtın buharlaşması sürecinden sonra, hava ve yakıtın karışması, kendiliğinden tutuşma ve son olarak yanma ile devam eder (Pulkrabek, 1997).

4.1.1 Atomizasyon

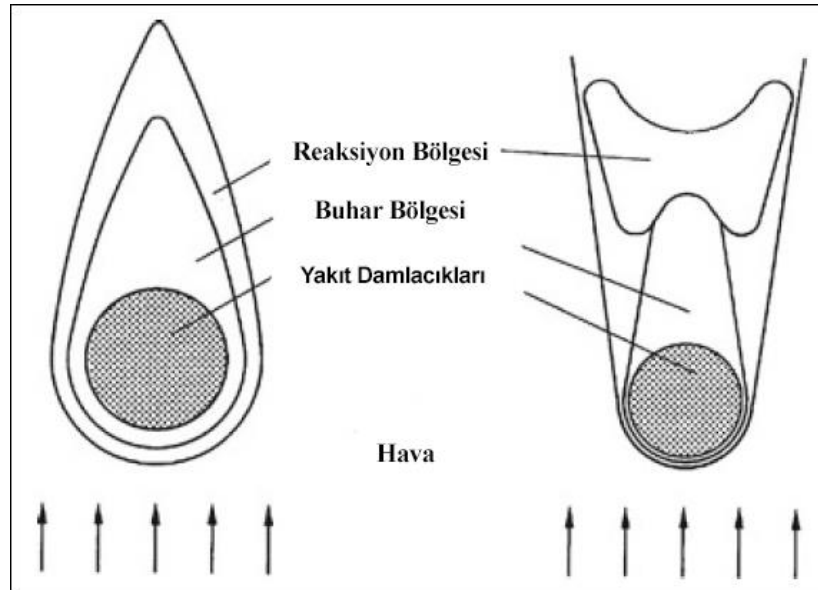
Yakıt enjektör vasıtasıyla motor büyüklük ve yanma odası çeşitlerine göre 50,5 bar ile 101 bar basınca yükseltilmiş silindir içi basıncında, 202 bar ile 1722 bar aralığında silindir içerisine püskürtülür (Heywood, 2018). Genellikle 0,2 mm ile 1 mm çapındaki nozul içerisinden püskürtülen yakıt çok küçük parçacıklar halinde reaksiyon bölgesine gönderilmiş olur. Bu süreç püskürtme atomizasyon süreci olarak tanımlanır (Pulkrabek, 1997).

Püskürtme basıncının artması ile birlikte damlacıklar daha dar bir bölgeye yayılarak çaplarında daha az değişiklik olur, nozuldan uzaklaştıkça çaplarının büyüdüğü gözlemlendiği üzere püskürtme basıncının artırılması ile yakıt parçacıklarının boyutları %50 oranında düşebilmektedir (Chen, Wang, Roberts, ve Fang, 2013).

4.1.2 Buharlaşma

Yüksek oranda sıkıştırılmış olan emme havası sıcaklığının yüksek olması sebebiyle reaksiyon bölgesine enjekte edilen çok küçük parçacıklar halindeki yakıtın 9:10 kısmı yaklaşık saniyenin binde biri gibi kısa bir sürede buharlaşır (Pulkrabek, 1997).

Silindir içerisindeki havanın girdap ve türbülanslı olmasıyla ve enjektörden püskürtülen yakıtın yüksek hızda olmasıyla birlikte emme havası ve yakıt belirli bir eşdeğerlik oranında yanıcı bir karışım oluşturur (Pulkrabek, 1997). Yakıt parçacıklarının ortama giriş hızları buharlaşma sürecinde ve reaksiyona girme sürecinde önemli rol oynar. Yakıt damlacığının buharlaşma durumu Şekil 4.1’de solda düşük ve sağda yüksek akış hızındaki gibidir. Buharlaşan yakıt ile oluşan hava-yakıt karışımını $0,3 < \lambda < 1,5$ olduğunda yanma gerçekleşir (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010).



Şekil 4.1 Yakıt damlacığının düşük ve yüksek akış hızındaki durumları (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010)

4.1.3 Tutuşma Gecikmesi

Yakıtın püskürtülmesi sonrasında reaksiyona girmesiyle tutuşması arasındaki süreç tutuşma gecikmesi olarak belirtilir. Bu zaman aralığı verimlilik, emisyon değerleri oluşumu, yanma gürültüsü gibi etkenler için önemlidir (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010).

Silindir içerisindeki ortam gaz sıcaklığının arttırılması, yakıt püskürtme basıncının arttırılması, yakıt miktarı değiştirilmeden enjektör nozul çapı veya sayısının arttırılması tutuşma gecikmesini kısaltmaktadır. Ayrıca yakıt içeriğindeki setan sayısının artışı da tutuşma gecikmesini olumlu yönde etkileyen faktörlerdendir (Kobori, Kamimoto, ve Aradi, 2000).

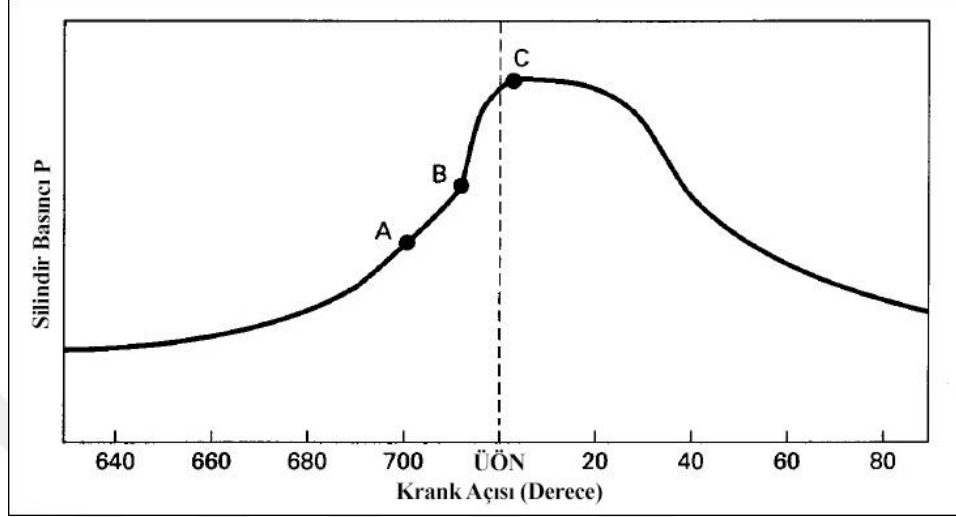
4.1.4 Kendiliğinden Tutuşma

Yakıtın püskürtülmesinden yaklaşık olarak krank açısıyla 6-8° sonrasında, piston üst ölü noktaya (ÜÖN) gelmeden 8° öncesinde yakıt-hava karışımı kendiliğinden tutuşmaya başlar. Gerçek yanma gerçekleşmeden ikincil reaksiyonlar olan; hidrokarbon moleküllerinin daha küçük türlere dönüşmesi ve oksidasyon meydana gelir. Gerçekleşen ekzotermik reaksiyonlar ile sıcaklığı daha da artan hava ile yanma süreci başlamış olur (Pulkrabek, 1997).

4.1.5 Yanma

Kendiliğinden tutuşma süreciyle; hava-yakıt eşdeğerlik oranının (λ) yaklaşık 1 ve 1,5 olduğu farklı bölgelerde yanma cepheleri oluşarak, silindir içerisinde %75 ile %90 buharlaşmış halde bulunan yakıtı, kendiliğinden tutuşma gerçekleşmemiş olsa bile hızla yayılarak sıcaklık ve basıncın artışına sebebiyet verir. İlk yanma gerçekleştikten sonra silindir içerisine yakıt püskürtülmeye devam eder. İlk yanmada gerçekleşen yüksek sıcaklık ve basınç, püskürtülmeye devam eden yakıt parçacıkları için buharlaşma süresini ve ateşleme gecikme süresini azaltır ve yanma sürecini daha da arttıracak olan yeni kendi kendine tutuşma cepheleri oluşturur. Yanma hızı reaksiyon

hızına bağlıdır ve ilk yüksek basınç artışı giderek azalır. Yakıt damlacıklarının bir kısmının yanıcı karışım oluşturması uzun sürer ve yaklaşık olarak 20° yakıt enjeksiyonuyla 40-50° lik bir yanma gerçekleşir (Pulkrabek, 1997).



Şekil 4.2 Yanma sürecini anlatan krank açısına bağlı basınç grafiği (Pulkrabek, 1997)

Şekil 4.2’de; sıkıştırmadan başlayarak yanma sürecini krank açısı ve basınç grafiği ile ele alınmıştır. A noktasında yakıt püskürtülmeye başlar ve A ve B arasındaki süreç tutuşma gecikmesini gösterir. Yakıt, C noktasına ulaşana değin silindir içerisine püskürtülmeye devam eder. Tutuşma gecikmesinden dolayı B noktasına ulaşana kadar devam eden yakıt püskürtme işlemi sonucu olarak B noktası sonrası ani basınç değişikliği de grafikten gözlemlenebilir (Pulkrabek, 1997).

4.2 Yanma Kimyası

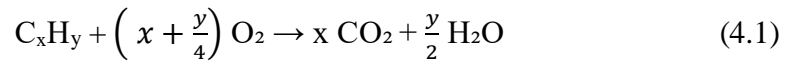
Çoğu içten yanmalı motor iş enerjisini, yakıtın kimyasal enerjisini motor içindeki gazlardaki iç enerjiye dönüştürmesiyle yani hidrokarbon yakıtın hava ile yanmasından elde eder. Yakıt stokiyometrik (ideal) miktarda oksijenle reaksiyona girdiğinde; tüm karbonu CO₂’ye ve tüm hidrojeni H₂O’ye dönüştürerek geride hiç oksijen bırakmaz (Pulkrabek, 1997).

Dizel motorlarda doğrudan yakıtın enjekte edilmesi ve yakıtın enjeksiyon zamanına bağlı olarak ideal olmayan karışımlar da oluşabilir (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010).

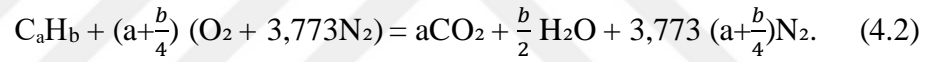
4.2.1 Stokiyometrik Yanma

Yanma stokiyometrisi kütle korunumu yasasına bağlı olarak; yanma işlemi sonrasında yakıtın tamamının oksitlenmesi ve yanma sonrası sadece karbondioksit ve suyun açığa çıktığı ideal yanmayı tanımlar (Heywood, 2018).

Hem dizel yakıt, hem de benzin ampirik formül C_xH_y ile belirtilebilir. İdeal bir stokiyometrik yanma işlemi; (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010).

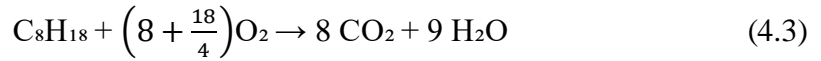


Yanma havası azot içermekte ve düşük yanma sıcaklıklarında reaksiyon sırasında çok etkilenmez. Azotun da yanma havasında bulunduğu toplam yanma denklemi şu şekilde olur; (Heywood, 2018).



Bu denklem ideal yanmada yakıt hava oranlarını tanımlar; yani, tüm yakıtın tamamen oksitlenmiş ürünlere dönüştürülmesi için yeterli oksijen olduğu düşünülmelidir.

Buradan izooktan (C_8H_{18}) için ideal yanma;



Buradan;



Hava-yakıt oranını hesaplamak için atom ağırlıkları;

Karbon : 12,011 g/mol

Hidrojen: 1,008 g/mol

Oksijen: 15,999 g/mol

1 mol izooaktan yakıt kütlesi;

$$M_f = (8 \times 12,011) + (18 \times 1,008) \rightarrow 114,232 \text{ gr} \quad (4.5)$$

Her biri 2 oksijen atomundan oluşan 12,5 molen oluşan oksijen kütlesi;

$$M_o = 12,5 \times 15,999 \times 2 \rightarrow 399,975 \text{ gr} \quad (4.6)$$

Havanın yaklaşık% 21 oksijen içerdiğini varsayarak; gerekli hava kütlesi;

$$M_h = \frac{100}{21} \times M_o \rightarrow 1904,643 \text{ gr} \quad (4.7)$$

Stokiyometrik yani ideal hava-yakıt karışım oranı ise;

$$HYO = \frac{M_h}{M_f} \rightarrow 16,673 \quad (4.8)$$

4.2.2 Hava-Yakıt Karışım Eşdeğerlik Oranı

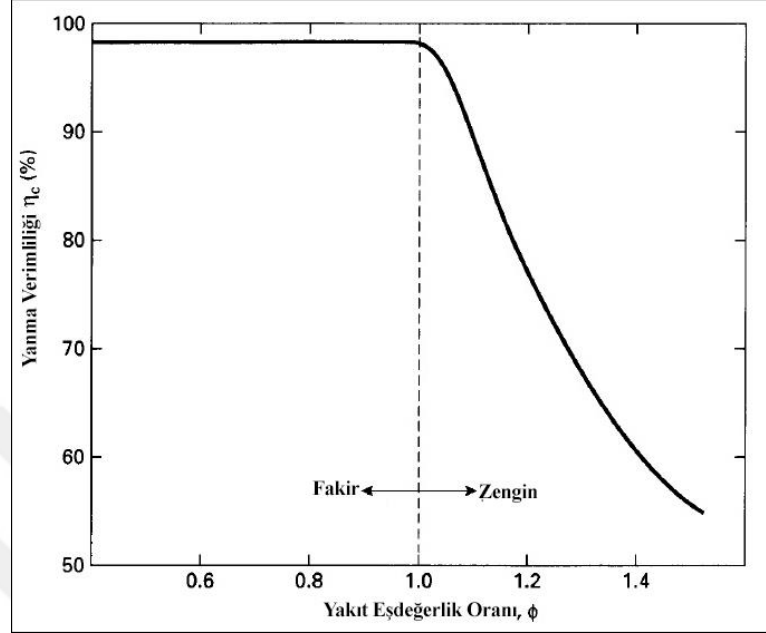
Dizel motorlar gerçekte tam olarak ideal hava-yakıt karışımı oranı ile değil, ideale yakın değerlerle çalışır. Karışım oranları fakir karışım, stokiyometrik yani ideal karışım veya zengin karışım olarak isimlendirilirler. Gerçek hava-yakıt oranı (H/Y)_g ile stokiyometrik hava-yakıt oranı (H/Y)_s arasındaki oran, eşdeğer hava-yakıt oranı fi (Φ) veya lamda (λ) olarak ifade edilir (Heywood, 2018; Pulkrabek, 1997).

$$\lambda = \frac{1}{\Phi} = \frac{(H/Y)_g}{(H/Y)_s} \quad (4.9)$$

Fakir karışım için; $\lambda > 1$, $\Phi < 1$

Stokiyometrik ideal karışım için; $\lambda = 1, \Phi = 1$

Zengin karışım için; $\lambda < 1, \Phi > 1$



Şekil 4.3 Yakıt eşdeğerlik oranının yanma verimliliğine etkisi (Pulkrabek, 1997)

Şekil 4.3’de gösterildiği gibi fakir karışımla çalışan motorların verimliliği genellikle %98 düzeyindedir. Yakıt açısından zengin olan zengin karışım oranında çalıştığında, tüm yakıtla reaksiyona girecek kadar oksijen olmaz ve yanma verimliliği düşer (Pulkrabek, 1997).

Hava yakıt oranının değiştirilmesiyle çevreye daha duyarlı yanma süreçleri oluşturulabilir. Yanma sonrası açığa çıkan hidrokarbon emisyonları ve organik asit egzoz emisyonlarını düşürebilir (Zervas, Montagne, ve Lahaye, 2001).

4.3 Yakıtlardan Kaynaklı Salımlar

Dizel motorlar yanma işlemi sonrasında egzoz gazı ile birlikte çevreye karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), partikül madde (PM), hidrokarbon (HC), Kükürt oksit (SO_x) ve azot oksit (NO_x) emisyonları vermektedirler (Alozie ve Ganippa, 2020).

Dizel motorların egzoz emisyonlarıyla birlikte sera gazı etkileriyle çevreye olumsuz etkileri (Petzold, ve diğer, 2011) ve insan sağlığına kötü etkileri bulunmaktadır. Sydbom, ve diğer (2001) yapmış oldukları araştırmada hava kirliliği ile; astım, kronik bronşit, solunum yolu enfeksiyonları, kalp hastalığı ve inme gibi çeşitli sağlık sonuçları arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Burun ve gözlerde tahriş, akciğer fonksiyon değişiklikleri, solunum değişiklikleri, baş ağrısı, yorgunluk ve bulantı gibi etkileri de bulunmaktadır. Akciğer kanseri gibi solunum yolu hastalıklarına sebebiyet verdiği düşünülmektedir (Morgan, Reger, ve Tucker, 1997).

4.3.1 Azot Oksitler

Dizel motorlarda yanma sonrasında açığa çıkan emisyonlarından olan azot oksitler; azot oksit (NO) ve azot dioksittir (NO₂). Nitröz oksit (N₂O) düzenlenmiş bir emisyon değildir; genel olarak azot oksitler (NO_x) olarak tanımlanmışlardır. Yanma sırasında çoğunlukta NO yayılır ve daha fazla oksidasyonun bir sonucu olarak NO₂ oluşur. Ultraviyole ışığın varlığında NO₂, metan olmayan hidrokarbonlu bir fotokimyasal duman oluşturur. Ana oksidan, teknik olarak yanma esnasında yakıtla tepkimeye girmeyen azotla birlikte emme manifoldundan içeriye alınan oksijendir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda, azot oksijen ile reaksiyona girer (Alozie ve Ganippa, 2020; Hawley, Brace, ve Wallace, 1998). Dizel motoru, bol oksijen ve azot bulunan yanma odasında yüksek alev sıcaklıkları (1500 °C ve üzeri) nedeniyle büyük miktarda NO_x üretir (Agarwal, Sinha, ve Agarwal, 2006).

Yanma esnasında ortaya çıkan N ve C sonrasında oksijen ile reaksiyona girerek de azot oksitleri oluşturabilir veya azot içeren yakıtlar yanma esnasında oksitlenerek azot oksitleri oluşturabilirler. Enjeksiyon zamanlaması, ateşleme gecikmesi, adyabatik alev sıcaklığı, radyasyon ısı kaybı ve diğer yanma olayları üzerindeki etkilerin bir miktar rol oynadığını gösteren çalışmalar vardır. Motor üzerinde; enjeksiyon zamanlamasını geciktirerek ve egzoz gazı devridaimini (EGR) artırarak azaltılabilmektedir (Hoekman ve Robbins, 2012).

NO oluşum mekanizmaları ise: geniş eşdeğer oranlarda yüksek sıcaklıkta yanmada baskın olan termal veya Zeldovich mekanizması (Drake ve Blint, 1991), zengin yakıt karışımının yanmasında baskın olan Fenimore veya Prompt mekanizması, N₂O-ara mekanizması ve düşük sıcaklıkta yanma ile NO oluşum mekanizmalarına yeni bir giriş olan NNH mekanizması olarak bilinirler (Alozie ve Ganippa, 2020).

Termal ve Zeldovich reaksiyonu;



Fenimore reaksiyonu;



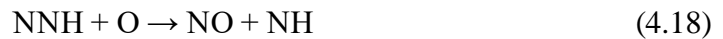
N₂O intermediate reaksiyonu;



NNH reaksiyonu;



Ve;



4.3.2 Karbon Monoksit ve Karbon Dioksit

Karbon monoksit, oksidasyon işleminin tamamen gerçekleşmediği eksik yanma sebebiyle oluşan emisyonudur. Dizel motorlarda yüksek yakıt hava karışımında yanma gerçekleştiği için genel olarak CO emisyonu olmaz. Yanma odasında yeterli olmayan hava girdabı karbon monoksit oluşumuna (CO) sebebiyet verir (Reşitoğlu, Altınışık, ve Keskin, 2015; Alozie ve Ganippa, 2020). Bununla birlikte CO emisyonu salındığında CO₂'ye kolayca oksitlenir (Alozie ve Ganippa, 2020).

4.3.3 Hidrokarbon

Dizel motorlarda normal şartlarda çok yüksek seviyelerde olmayan hidrokarbon emisyonu, hava-yakıt karışımı oranları, sıkıştırma oranı, hava giriş sıcaklığı, yakıt içeriği, enjektör açma zamanı ve basıncı yağlama yağı, gibi pek çok etkene bağlı olarak yakıtın tam olarak yanamaması ve egzoz gazına karışmasıyla ortaya çıkmaktadır (Greeves, Khan, Wang, ve Fenne, 1977).

Egzoz borusunda sıcaklığın 600 °C ve üzeri olduğu durumlarda oksijen olması halinde tepkimeye girerek oranı azalır. Ayrıca motorda yanma esnasında, silindir gömleğindeki sıcaklık, merkezde oluşan sıcaklıktan oldukça düşüktür ve yakıtın bu bölgelerde tamamen yanamamasından dolayı silindirin bu bölümünde UHC meydana gelir. (Reşitoğlu, Altınışık, ve Keskin, 2015). Yanma için dizayn edilmiş olan limitlerin üzerindeki hava-yakıt karışımı, hava-yakıt karışımının zengin olması ve tamamının yakılamaması, enjektörden yakıt sızması da hidrokarbon oluşumu nedenleri arasındadır (Hawley, Brace, ve Wallace, 1998).

Motor emisyonundan bahsederken yanmamış hidrokarbonlar (UHC) basitçe 'hidrokarbonlar' (HC) olarak adlandırılır. Emisyonları birkaç bileşik içerir, motor çalışma faktörleri farklılaştıkça ve değiştikçe, çeşitlilik ve konsantrasyonlar farklılık gösterir. Toplam yanmamış hidrokarbonların küçük kısımları, yanma sırasında oksidasyondan kurtulan orijinal püskürtülmüş yakıt olarak ortaya çıkarken, yakıt ve yağlayıcıların pirolizi ve kısmi oksidasyonu nedeniyle daha yüksek oranlar farklı ara

maddeler olarak ortaya çıkar. Çeşitlilik alkanlar, alken, alkinler ve aromatiklerdir, yani HC emisyonları aromatiklerde olduğu gibi düz ve dallı zincirler veya halkalı zincir yapısında; tek, çift ve üçlü bağlar halinde veya kombinasyonlarda meydana gelir (Alozie ve Ganippa, 2020).

4.3.4 Kükürt Oksitler

Genel olarak SO_x , kükürt monoksit (SO), kükürt dioksit (SO_2) ve kükürt trioksit (SO_3) içerir. SO hızla oda sıcaklığında atmosferik basınç altında ayrıştırılmaz bir şekilde SO_2 'ye oksitlenir. SO_2 gaz veya molekül olarak, SO_3 PM olarak gözlenir. Yakıtta bulunan kükürt içeriğiyle doğrudan ilişkili olan kükürt oksitler (SO_x), ön yanma olayında kükürtün, oksijen ile oksidasyon yoluyla kükürt dioksitleri (SO_2) oluşturmasıyla ortaya çıkan emisyonlardır (Okubo ve Kuwahara, 2020; Mylona, 1996).

4.3.5 Partikül Madde ve Kurum

Partikül madde; egzoz gazları $52\text{ }^\circ\text{C}$ ve alt sıcaklıklara soğutulduğunda bir filtre kağıdında takılabilen herhangi bir maddeyi tanımlamak için kullanılır. Sülfatlar, nitratlar, organik maddeler, katı siyah karbon partikülleri (kurum) ve kül gibi maddelerdir. Buhar durumundan çekilmesi ile ortaya çıkan en küçük parçacıklar, genellikle üzerine katı uçucu parçacıkların yoğunlaştığı katı karbonlu çekirdek olarak oluşan parçacıklar ve duvarlarda biriken ve daha sonra aerosol yığın akımına geri taşınan parçacıklar olarak üç grupta boyutlandırılmışlardır (Alozie ve Ganippa, 2020).

15-40 nm çapında küreler şeklinde olan partikül maddeler; yanma ve genişleme süreci, yakıt kükürt ve kül içeriği, yağlama yağı kalitesi ve tüketimi, yanma sıcaklığı, egzoz gazı soğutması gibi birçok faktöre bağlıdır. Dizel partikül madde (PM) emisyonu ile; kurum, kurum üzerinde yoğunlaşan ve absorbe edilen çözünür organik fraksiyon (SOF) ve inorganik fraksiyon (IF) bileşenleri ortaya çıkar. Siyah duman olarak gözüken kurum bu bileşenlerin yarısını fazlasını oluşturur (Reşitoğlu, Altınışık, ve Keskin, 2015).

Dizel motorun yanma aşamasında yüksek alev bölgesinde meydana gelen is veya duman emisyonu, büyük hidrokarbon yakıt moleküllerinin termal çatlamaıyla açığa çıkan karbon parçacıklarından oluşur. Duman parçacıklarının bazıları reaksiyonun zayıf tarafına ulaştıklarında oksitlenir ve genişleme stroku sırasında daha fazla oksitlenir. Yüksek sıcaklıklarda ve yüksek eşdeğerlik oranlarında duman üretimi artar. Duman üretimi, yakıt ve havanın daha hızlı karıştırılmasını, yani girdabı arttırmak veya enjeksiyon oranını arttırmak ve daha ince bir sprey kullanarak başarılabilir (Hawley, Brace, ve Wallace, 1998).



BÖLÜM BEŞ

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmalar matematiksel model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Anadolu Motor firmasının üretmiş olduğu tek silindirli dört zamanlı hava soğutmalı direkt püskürtmeli dizel bir motor olan Antor 4LD 820 motorunun modellenmesi yapılmıştır. Ansys Forte programı kullanılarak yanmaya bağlı olarak performans ve sonrasında oluşan çevreye zararlı emisyon oluşumları incelenmiştir.

İçten yanmalı motorlarda yanmanın analiz edilebilmesinde gerçekçi yakıt etkileri oluşturabilmesi, diferansiyel denklemler gerektiren kapsamlı kimyasal kinetik, hesaplamalar gereklidir. Ansys Forte’de, geliştirilen seyrek-matris çözüm metodolojisi ile birlikte; dinamik uyarlamalı kimya (DAC), dinamik hücre kümeleme (DCC) yöntemlerini içeren (Ansys, 2020c) çözümlene yöntemleri kullanarak, kısa sürede simülasyon yapılabilir. Kolay modelleme ve mesh oluşturma, pratik kullanıma sahip arayüzü ile Ansys Forte programı tercih nedeni olmuştur.

Model motor ile 1200 ile 3000 devir/dk aralığında elde edilen 10 farklı performans verileri ile DMA standartlarındaki denizcilik yakıtı ile yapılmış olan deneysel çalışmada elde edilen veriler kıyaslanarak doğruluğu sınanmıştır. Sonrasında emme havası içerisine belirli oranlarda hidrojen ilave edilerek, yakıtın farklı enjektör püskürtme açılarında yanma odasına gönderilerek ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir. Bölüm 6’da ayrıntılı olarak değinilmiştir.

5.1 Dizel Motor Geometrisinin Modellenmesi

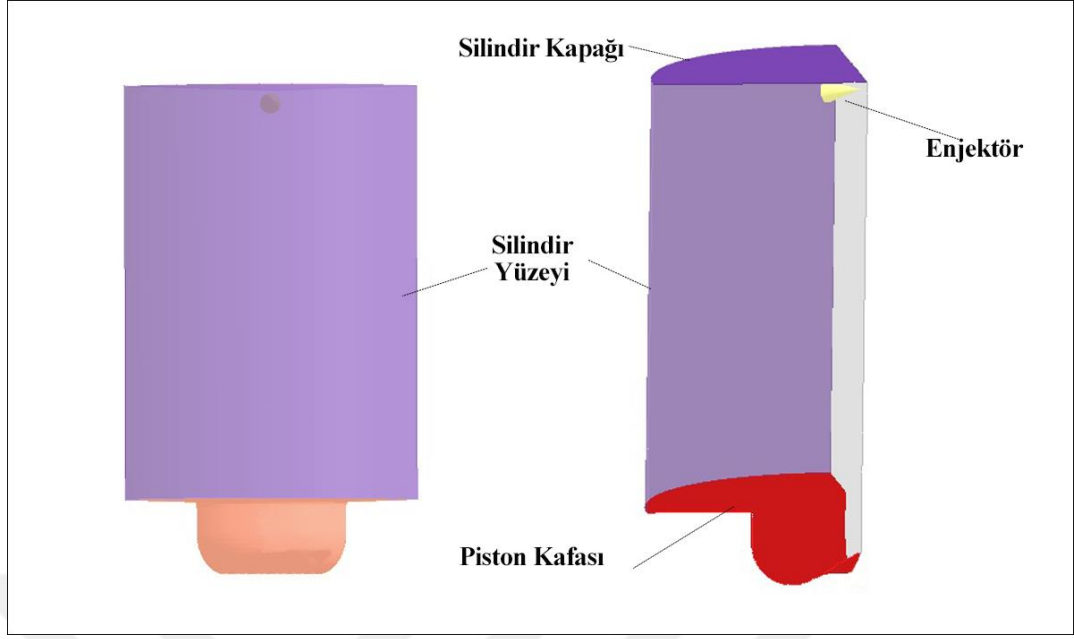
Motor geometrisi yanma ve emisyon değerleri üzerinde öneme sahiptir. Farklı yanma odaları geometrilerinde aynı motor üzerinde yapılmış olan araştırmalarda azot oksit (NO_x), karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyon değerlerinde olumlu etkiler sonuçlandırılabilmiştir (Park, 2012).

Motor geometrisi analiz süresini azaltabilmek amacıyla simetrik olarak modellenen motorun özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Özelliklerin çoğunluğu katalog broşüründen, ayrıntı veriler ise Anadolu Motor ar-ge çalışanlarından mail yolu ile elde edilmiştir.

Tablo 5.1 Antor 4LD 820 model motora ait özellikler (Antor, 2020)

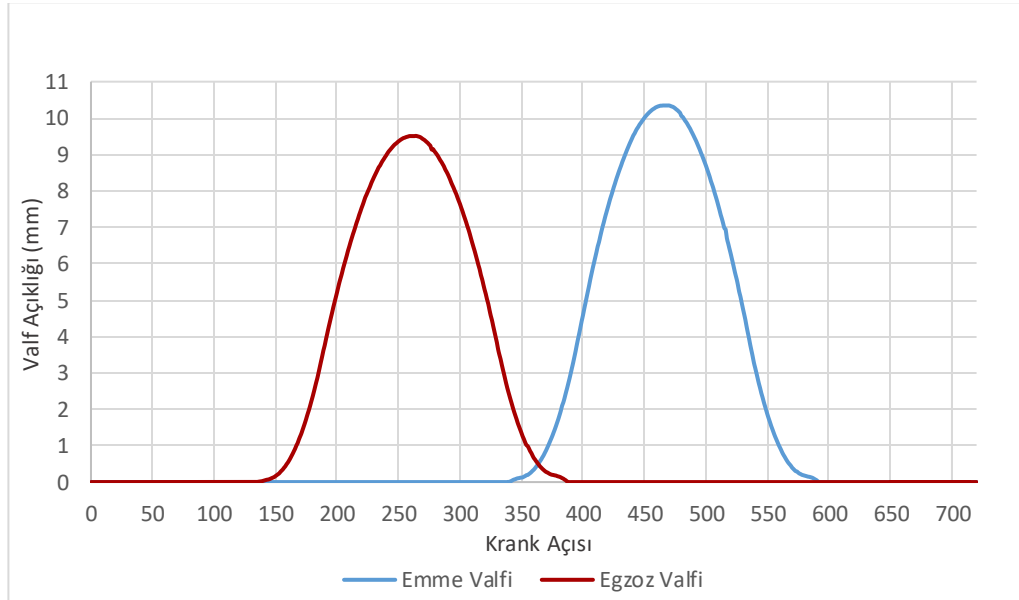
Model	4 LD 820
Silindir sayısı	1
Silindir Hacmi	817 cm ³
Silindir çapı	102 mm
Strok uzunluğu	100 mm
Çalışma prensibi	4 Zamanlı
Sıkıştırma oranı	17:01
Maksimum motor hızı	3000 rpm
Maksimum motor gücü	13 kW
Maksimum tork	48Nm @ 1600 rpm
Soğutma Tipi	Hava
Yakıt Püskürtme Şekli	Direkt
Yakıt Püskürtme Süresi	20° KA
Yakıt püskürtme Avansı	26° ÖÜÖN
Enjektör Nozul Delik Sayısı	4
Enjektör Püskürtme Açısı (Cone Angle)	160°
Özgül Yakıt Tüketimi	255 g/kWh

Silindir içerisine püskürtülen yakıt dört delikli bir enjektörden sağlandığı için modelleme 90°lik bir kesitle ayrılarak analiz süresi minimuma düşürülmüştür. Şekil 5.1’de motorun yanma odası kesiti ve enjektörün konumu verilmiştir.



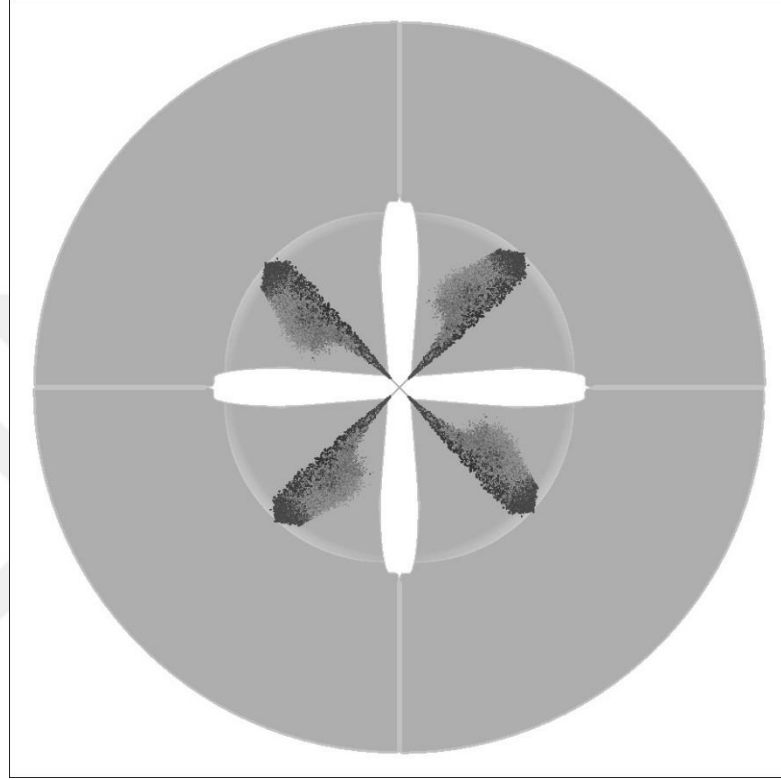
Şekil 5.1 90° lik kesit halinde modellenen motorun farklı açılardan görünümü

Motorun valf hareket şekli ve açıklık mesafeleri Şekil 5.2’de gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Emme valfi 339° krank açısında açılır, 592° krank açısında kapanır. Egzoz valfi ise 135° ve 389° krank açısı aralığında açık kalır. Çalışmada yapılan analizler emme valfinin kapandığı, egzoz valfinin açıldığı süre arasında yapılmıştır.

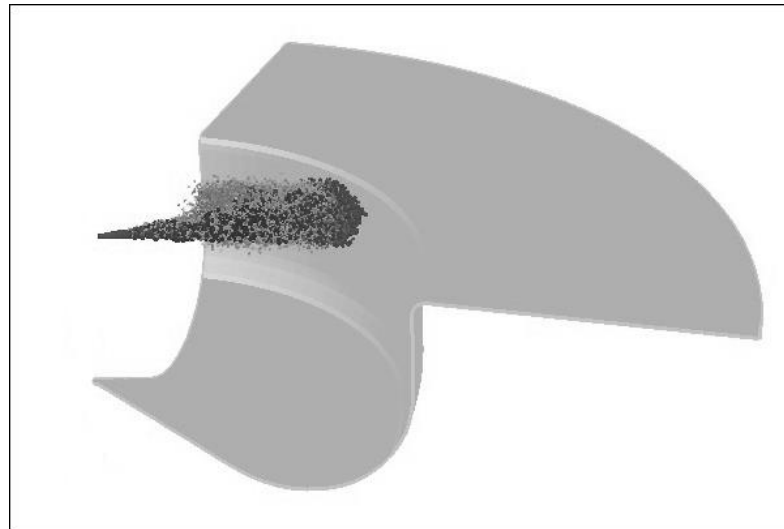


Şekil 5.2 Egzoz ve emme valflerinin krank açısına bağlı hareketleri

Yakıtın püskürtme şekli parabolik olarak belirlenmiş olup; piston 707° krank açısında iken alınan anlık görüntüde yanma odası içerisine püskürtme durumu gözlemlenebilir (Şekil 5.3). Simulasyon çalışmasında Şekil 5.4'te gösterildiği şekildeki dörtte birlik simetrik kesit kullanılmıştır.



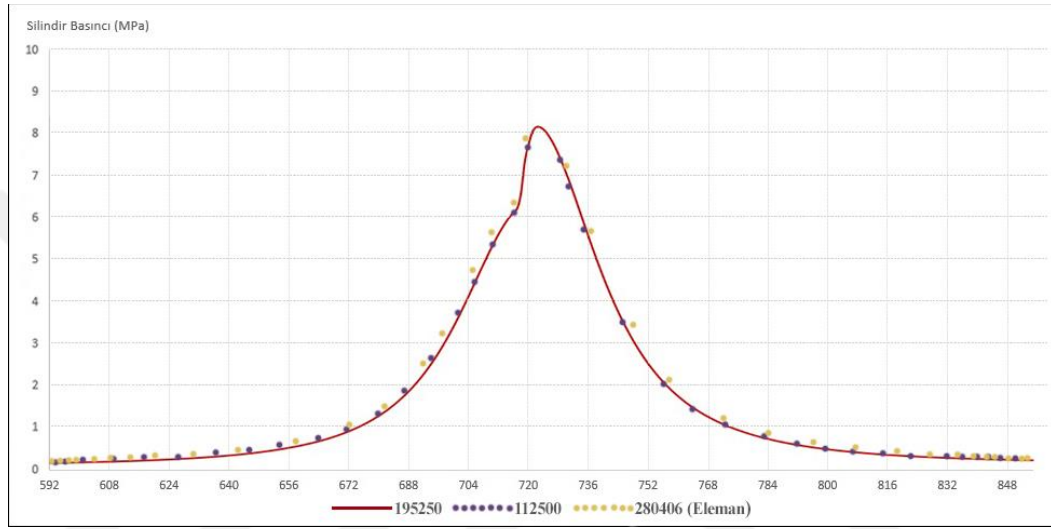
Şekil 5.3 Model motorun üstten görünüşünde yakıtın yanma odasına püskürtülmesi



Şekil 5.4 Kesiti alınmış olan modelde yakıtın yanma odasına püskürtülmesi

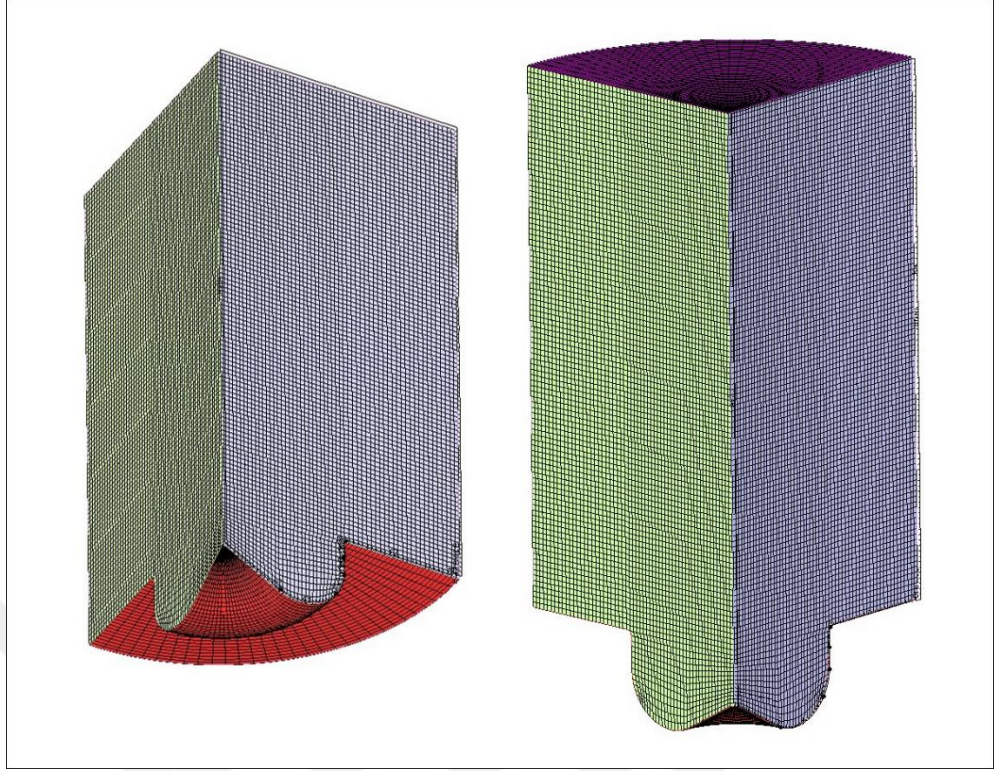
5.2 Ağ Örgüsü

Birçok uygulamada analiz matematiksel hesaplama gerektirir. Bu hesaplamaların yapılabilmesi karmaşık geometrideki şekillerin ağ örgüsüne dönüştürülmesi ile gerçekleşir, çoğunlukla otomatik ağ örgüsü seçeneğiyle en doğru bölümlendirme gerçekleştirilir (Anderson, Gropp, Kaushik, Keyes, ve Smith, 1999).



Şekil 5.5 Ağ örgüsündeki eleman sayısına bağlı silindir basınçları

Bu analizde modellenen motorun ağ örgüsü Ansys programının otomatik mesh tekniği ile gerçekleştirildi. 90° lik kesit halinde modellenen motor 112500, 195250 ve 280406 elemanlı (mesh tekniği ile model motorun 3 boyutlu olarak bölündüğünde oluşan parçalar) ağ örgüsü ile analiz edilmiştir (Şekil 5.6). Analizler Intel® Core™ İ5 7500 CPU @ 3,40 GHz işlemcili 8,00 GB Ram donanım özelliklerine sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Simülasyon analiz süreleri ortalama olarak eleman sayılarına göre sırasıyla; 721, 1240, 3682 dakika sürmüş olup, Şekil 5.5’de gösterilen krank açısına bağlı basınç grafiğinden yola çıkılarak daha çabuk sonuçlar elde edilmesi bakımından 195250 elemanlı ağ örgüsü tercih edilerek analizler yapılmıştır.



Şekil 5.6 Model motorun ağ örgüsü ve elemanları

5.3 Model Motorun Sınır Değerleri

Model motorda kullanılan sınır koşul değerleri Tablo 5.2’de gösterildiği şekilde girilerek yanma analizi yapılmıştır. n-Heptane C_7H_{16} türü yakıtı için yakıt alt ısı değeri (L.V.H) 44,923 kJ ve H_2 için yakıt alt ısı değeri 119,69 kJ olarak hesaplamalarda değerlendirilmiştir.

5.4 Yanma Reaksiyonunun Kimyasal Çözümü

Tasarlanan model için çok sayıda tür ve reaksiyon içeren gerçekçi yakıt yanma mekanizmalarını işleyebilen program bunu uygun simülasyon zamanlamaları içerisinde gerçekleştirmektedir.

Yakıtın yanmasını modellemek için kullanılan kapsamlı kimyasal kinetik, diferansiyel denklemleri gerektirmekte ve CPU hızına bağlı olarak uzun süreli işlemler gerektirmektedir. Ancak programda farklı çözüm yöntemleriyle bu sürelerin

kısaltıldığından söz edilmektedir. Geliştirilen seyrek-matris çözüm metodolojisi ile birlikte; dinamik uyarlamalı kimya (DAC), dinamik hücre kümeleme (DCC) yöntemlerini içeren çözümlene yöntemleri kullanılmaktadır (Ansys, 2020c).

Tablo 5.2 Sınır koşul değerleri

Sınır Şartları	Değer
Piston Sıcaklığı (K)	500
Silindir Yüzey Sıcaklığı (K)	420
Silindir Kapak Sıcaklığı (K)	470
Emme Hava Basıncı (Bar)	1,013
Yakıt Tipi	n-Heptane C_7H_{16}
Yakıt tüketimi (g/strok)	0,035
Yakıt Sıcaklığı (K)	320
Motor Hızı (rpm)	2000
Nozul Sayısı	4
Nozul Çapı (mm)	0,28
Enjektör Püskürtme açısı (Cone Angle)	160°
Yakıt Püskürtme Süresi (KA)	20°
Yakıt püskürtme Avansı (KA)	26° ÖÜÖN
Türbülans Modeli	RANS RNG k- ϵ
Valf Zamanlaması	Emme Valfi Açılma 339° KA
	Emme Valfi Kapanma 592° KA
	Egzoz Valfi Açılma 135° KA
	Egzoz Valfi Kapanma 389° KA

5.4.1 Dizel Yakıtlar İçin İndirgenmiş Mekanizma

İçten yanmalı motorlar için kullanılabilen çeşitli mekanizma modelleri geliştirilmiştir. Bunların bir tanesi doğalgaz ve sıvı yakıtla çalıştırılan bir motor için geliştirilmiş olan mekanizma barındırmaktadır. Bu model yakıtlar; daha çevreci yanma süreçlerini ele alarak çözüm aramak için kurulan Model Fuels Consortium tarafından desteklenmektedir. Altmıştan fazla çeşit ve alternatif yakıtları içeren model yakıtlar gerçek verilerle doğrulanmışlardır (Ansys, 2020c).

Bu çalışmada kullanılan Diesel_1comp_35sp mekanizması Wisconsin Üniversitesi Motor Araştırma Merkezi'nde geliştirilerek doğrulaması yapılan güvenilir sonuçlar verebilen bir mekanizmadır. Toplamda h, c, o, n olmak üzere 4 element ve bu elementlerden oluşan 35 farklı türün reaksiyonlarını içerir. Tablo 5.3 ve Tablo 5.4 de reaksiyonların bir kısmı ve mekanizmaya ait sabitler gösterilmiştir. Denklemi ise 5.1'de gösterildiği gibidir. Hız sabiti k, R gaz sabiti, A frekans faktörü, sıcaklık T, sıcaklık değişkeni b ve reaksiyonu aktive eden enerji ise E ile gösterilmiştir (Patel, Kong, ve Reitz, 2004).

$$k = (AT^b)^{-E/RT} \quad (5.1)$$

Tablo 5.3 İndirgeme reaksiyonu kinetik sabitleri (Patel, Kong, ve Reitz, 2004)

Reaksiyon	A (mole-cm-sn-K)	b	E (cal/mole)
nc7h16+h=c7h15-2+H ₂	4,38E+07	2,0	4760,0
nc7h16+oh=c7h15-2+H ₂ O	9,70E+09	1,3	1690,0
nc7h16+hO ₂ =c7h15-2+H ₂ O ₂	1,65E+13	0,0	16950,0
nc7h16+O ₂ =c7h15-2+hO ₂	2,00E+15	0,0	47380,0
c7h15-2+O ₂ =c7h15O ₂	1,56E+12	0,0	0,0
c7h15O ₂ +O ₂ =c7ket12+oh	4,50E+14	0,0	18232,7
c7ket12=c5h11co+cH ₂ O+oh	9,53E+14	0,0	41100,0
c5h11co=c2h4+c3h7+co	9,84E+15	0,0	40200,0
c7h15-2=c2h5+c2h4+c3h6	7,04E+14	0,0	34600,0
c3h7=c2h4+ch3	9,60E+13	0,0	30950,0
c3h4+oh=c2h4+hco	1,00E+12	0,0	0,0
ch3+ho2=ch3o+oh	5,00E+01	0,0	0,0
ch3+oh=ch2+h2o	7,50E+06	2,0	5000,0
ch2+oh=ch2o+h	2,50E+13	0,0	0,0
ch2+o2=hco+oh	4,30E+10	0,0	-500,0
ch2+o2=co2+h2	6,90E+11	0,0	500,0
ch2+o2=co+h2o	2,00E+10	0,0	-1000,0
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-

Tablo 5.4 Reaksiyona giren türlerin mol ağırlığı ve atom sayıları (Patel, Kong, ve Reitz, 2004)

Tür	Mol Ağırlığı	h	c	o	n
nc7h16	1,00E+06	16	7	0	0
O ₂	3,20E+05	0	0	2	0
n ₂	2,80E+05	0	0	0	2
cO ₂	4,40E+05	0	1	2	0
H ₂ O	1,80E+05	2	0	1	0
co	2,80E+05	0	1	1	0
H ₂	2,02E+04	2	0	0	0
h	1,01E+04	1	0	0	0
n	1,40E+05	0	0	0	1
nO ₂	4,60E+05	0	0	2	1
nox	3,00E+05	0	0	1	1
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

5.5 Türbülanslı Reaksiyona Giren Akış için Korunum Denklemleri

İçten yanmalı motorlarda yanma öncesindeki yakıt-hava karışımları ve yanma sonrasında açığa çıkan yanmış ürünler çalışma akışkanları olarak nitelendirilirler. Sıvı akışları türbülanslı çok fazlı ve reaktiftirler. Forte uygulamasında simülasyon modellemesi Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) denklemleri tarafından yönetilir. Gaz fazlı akışkanlar için kullanılan kütle, enerji, momentum korunumu, ideal gaz yasası denklemleri çözümlenmede kullanılır. Ayrıca yakıt enjeksiyonunu simüle etmek için akışa sıvı yakıt enjekte edildiğinde, gaz fazı ile sıvı damlacıklar arasındaki etkileşimi hesaba katmak için değişim fonksiyonlarından da yararlanır (Ansys, 2020b).

Yanma simülasyonlarında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, reaksiyon yollarını ve tür konsantrasyonlarında değişikliğe yol açan ilişkili reaksiyon hızlarını tanımlamak için kullanılan kimyasal kinetik mekanizmalar da simülasyon uygulamasında kullanılmaktadır.

5.5.1 Tür Kütlesinin Korunumu Denklemi

İçten yanmalı motordaki gaz fazı çalışma sıvıları, ayrı ayrı gaz bileşenlerinin veya türlerinin bir karışımı olarak modellenir ve bu bileşim, akış konveksiyonu, moleküler difüzyon, türbülanslı taşıma, yakıt spreyleri ile etkileşimler ve yanma nedeniyle motor çevrimi sırasında değişir (Ansys, 2020b). Tür kütlesi için korunum denklemi ise;

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \tilde{u}) = \nabla \cdot \left[\rho D_t \nabla \left(\frac{\rho_k}{\rho} \right) \right] + \rho_k^k + \rho_k^s \quad (k=1, \dots, K) \quad (5.2)$$

Yoğunluk ρ , alt simge k tür endeksi, K toplam tür sayısı, \tilde{u} akış hızı vektörü, D_t Fick'in difüzyon yasasının uygulanmasına bağlı olarak karışım ortalama moleküler difüzyon katsayısı, ρ_k^k ve ρ_k^s kimyasal reaksiyon ve spray buharlaşmasının kaynak terimleridir.

5.5.2 Akışkanın Süreklilik Denklemi

Tüm türler üzerindeki yukarıdaki denklemin toplamı, toplam gaz fazı sıvısı için süreklilik denklemini ifade eder (Ansys, 2020b);

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u}) = \rho^s \quad (5.3)$$

5.5.3 Momentum Korunumu Denklemi

$$\frac{\partial \rho \tilde{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u} \tilde{u}) = -\nabla p + \nabla \sigma - \frac{2}{3} \rho k I + F + pg \quad (5.4)$$

Burada p , basınçtır, σ , tarafından verilen toplam viskoz gerilim tensörüdür (laminer artı türbülans)

$$\sigma = (\mu + \mu_T) \left[\nabla \tilde{u} + \nabla \tilde{u}^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{u}) I \right] \quad (5.5)$$

Laminer dinamik vizkozite μ , μ_T türbülanslı dinamik viskozite, üst simge T vektör transpoze anlamına gelir, k türbülans kinetik enerjidir.

$$\mu_T = \frac{C\mu\rho k^{-2}}{\varepsilon} \quad (5.6)$$

Burada $C\mu$, farklı türbülans modeli formülasyonlarında değişen bir model sabitidir. Tanım olarak μ_T , türbülanslı termal yayılımı α_T ve kütle yayılımı D_T ile ilişkilidir

$$\alpha_T = \frac{V_T}{Pr_T} = \frac{\mu_T}{\rho Pr_T} \quad (5.7)$$

$$D_T = \frac{V_T}{Sc_T} = \frac{\mu_T}{\rho Sc_T} \quad (5.8)$$

V_T türbülanslı kinematik viskozite, Pr_T ve Sc_T sırasıyla türbülanslı Prandtl ve Schmidt sayılarıdır.

Denklem (5.5)'e göre, Reynolds gerilim tensörü T olarak adlandırılan türbülans kaynaklı gerilim katkısı şu şekilde tanımlanır (Ansys, 2020b);

$$\mathbf{T} = -\rho \mathbf{u}^N \mathbf{u}^N = \mu_T \left[\nabla \tilde{\mathbf{u}} + \nabla \tilde{\mathbf{u}}^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}) \mathbf{I} \right] - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \quad (5.9)$$

5.5.4 Enerjinin Korunumu Denklemi

İç enerjinin taşınım denklemi (Ansys, 2020b);

$$\frac{\partial \rho I}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{\mathbf{u}} I) = \rho V \cdot \tilde{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \mathbf{J} + \rho \varepsilon + Q^c + Q^s \quad (5.10)$$

I özgül iç enerji, J ısı iletimi ve entalpi difüzyonundan kaynaklanan katkıları hesaplayan ısı akısı vektörüdür,

$$J = \lambda \nabla T - \rho D_T \sum h_k \nabla \left(\frac{\rho_k}{\rho} \right) \quad (5.11)$$

λ türbülanslı termal iletkenlik, T sıvı sıcaklığı ve h_k , k türünün özgül entalpisidir. Q_c ve Q_s sırasıyla kimyasal ısı salınımı ve spray etkileşimlerinden kaynaklanan kaynak terimlerdir. λ , türbülanslı termal yayılımı α_t ve ısı kapasitesi c_p ile ilişkilidir

$$\lambda = \rho \cdot c_p \cdot \alpha_t \quad (5.12)$$

5.5.5 Gaz Fazın Karışım Hal denklemleri

Dizel motorlarda yanma reaksiyonunu oluşturan oksijen, azot, karbondioksit, su buharı, yakıt buharı gibi gaz türleri ideal gaz olarak değerlendirilebilirler ve termodinamik özellikleri ve karışımları arasındaki ilişkiler birtakım denklemler ile bulunabilir (Heywood, 2018). Gaz-faz karışımı için durum ilişkilerinin ideal gaz yasasına uyduğu varsayılır (Ansys, 2020b);

$$\rho = R_u T \sum_k \left(\frac{\rho_k}{W_k} \right) \quad (5.13)$$

Burada R_u evrensel gaz sabiti ve W_k , k türünün moleküler ağırlığıdır.

5.5.6 RANS RNG k-ε Türbülans Modeli

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisinde reaksiyona giren akışlar türbülanslıdır ve kullanılan Ansys uygulamasında farklı türbülans seçenekleri mevcut olup; çalışmada RANS RNG k-ε modeli kullanılmıştır.

Standart Favre-averaged denklemleri k ve ε için;

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u} k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \tilde{u} + \sigma: \nabla \tilde{u} + \nabla \cdot \left[\frac{(\mu + \mu_T)}{\text{Pr}_k} \nabla k \right] - \rho \varepsilon + w^s \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u} \varepsilon) = & - \left(\frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 3} \right) \rho \varepsilon \nabla \cdot \tilde{u} + \nabla \cdot \left[\frac{(\mu + \mu_T)}{\text{Pr}_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] \\ & + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} \sigma : \nabla \tilde{u} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_s W^S) \end{aligned} \quad (5.15)$$

Önceki denklemlerde belirtilen sembollerin dışında; W damlacık olasılık dağılım fonksiyonuna göre hesaplanır. Fiziksel olarak W türbülans girdaplarının sprey damlacıklarını dağıtmada iş yaptığı oranın negatifidir. $C_s = 1,5$ sprey / türbülans etkileşimlerinde uzunluk ölçeğinin korunması varsayımından yola çıkılmıştır (Ansys, 2020b).

RNG teorisinden türetilmiş olan k- ε modeli, modelin RNG versiyonundaki k denklemini standart versiyonla aynıdır, ancak ε denklemini ampirik olarak türetilmiş sabitler yerine titiz matematiksel türetmeye dayanmaktadır. RNG ε denklemini şu şekilde yazılır;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u} \varepsilon) = & - \left(\frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 3} \right) \rho \varepsilon \nabla \cdot \tilde{u} + \nabla \cdot \left[\frac{(\mu + \mu_T)}{\text{Pr}_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] \\ & + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} \sigma : \nabla \tilde{u} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_s W^S) - \rho R \end{aligned} \quad (5.16)$$

Denklemdaki R ise;

$$R = \frac{C_\mu (l)^3 \left(1 - \frac{l}{l_0}\right) \varepsilon^2}{1 + \beta l^3} \frac{1}{k} \quad (5.17)$$

ile;

$$l = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (5.18)$$

$$S = (2\bar{S} : \bar{S})^{\frac{1}{2}} \quad (5.19)$$

\bar{S}^- ; gerinim tensörünü belirtir ve şu denklem ile ifade edilir;

$$\bar{S} = \frac{1}{2} (\nabla \tilde{u} + \nabla \tilde{u}^T) \quad (5.20)$$

Standart ϵ denklemi ile karşılaştırıldığında, RNG modeli izotropik olmayan türbülansı açıklayan bir ekstra terime sahiptir. RNG k- ϵ modelinde $C \epsilon 3$ için Tablo 5.5’de belirtildiği gibi standart olmayıp şu formülle ifade edilir (Ansys, 2020b).

$$C\epsilon_3 = [-1 + 2C\epsilon_2 - 3m(n - 1) + (-1)^\beta \sqrt{6C\mu C\eta n}]/3 \quad (5.21)$$

İdeal gaz için $m=0,5$ $n=1,4$ olmak üzere;

$$c\eta = \left[\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \right] / [1 + \beta \eta^3] \quad (5.22)$$

İle;

$$\delta = \{1, \text{eğer } \nabla \tilde{u} < 0; \text{ ve } 0, \text{eğer } \nabla \tilde{u} > 0\} \quad (5.23)$$

Bu yaklaşımla $C \epsilon_3$ -0,9 ile 1,726 arasında bir değer olur. Standart k- ϵ türbülans yaklaşımına kıyasla RNG k- ϵ modeli daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Ansys, 2020).

Tablo 5.5 Standart ve RNG k- ϵ modellerinde sabitler (Ansys, 2020b)

	$C\mu$	$C\epsilon_1$	$C\epsilon_2$	$C\epsilon_3$	$1/Pr_k$	$1/Pr_\epsilon$	η_0	B
Standart k- ϵ	0,09	1,44	1,92	-1	0,769			
RNG k- ϵ	0,0845	1,42	1,68	Denklem (5.21)	1,39	1,39	4,38	0,012

5.6 Performans Parametreleri

Modellenen motorun performans değerleri Ansys programı kullanıcı kitapçığında belirlendiği şekilde hesaplanmaktadır (Ansys, 2020a).

5.6.1 Güç Hesaplamaları

Güç hesaplaması PV diyagramı yardımıyla hesaplanmaktadır. Piston ÜÖN ya gelmeden 180° öncesinden yani sıkıştırma strokundan başlayarak, iş (genişleme) stroku sonuna AÖN konumuna kadar kabul edilir (Ansys, 2020a).

ÜÖN 0° olarak kabul edildiğinde;

$$W = W_{-180\text{ATDC to IVC}} = P_{\text{IVC}} \times V_{\text{IVC}} - V_{\text{BDC}}$$
$$W_{\text{EVO to 180 ATDC}} = 0,5 \times P_{\text{IVC}} + P_{\text{EVO}} \times V_{\text{BDC}} - V_{\text{EVO}} \quad (5.24)$$

Emme valfinin kapandığı andaki basınç (P_{IVC}) ve hacim (V_{IVC}), pistonun AÖN daki hacmi (V_{BDC}), egzoz valfinin açıldığı andaki anlık basınç (P_{EVO}) verileriyle hesaplanır. Toplamda;

$$W = W_{-180\text{ATDC to IVC}} + W_{\text{IVC to EVO}} + W_{\text{EVO to 180 ATDC}}$$
$$P = W \times \text{RPM} / (60 \times N_{\text{rv}}) \quad (5.25)$$

formülüyle güç hesaplanır. (N_{rev}) dört zamanlı makine için 2 kabul edilir. 60 ise dakikanın saniye cinsinden yazılmasıdır (60sn/dk) (Ansys, 2020a).

5.6.2 IMEP

Indicated mean effective pressure (IMEP) yani belirtilen ortalama etkili basınç (MPa) hesabı;

$$IMEP = \frac{W}{V_h} \quad (5.26)$$

formülü kullanılır. W iş, V_h yer değiştirme hacmini betimler (Ansys, 2020).

$$V_h = \frac{\pi \times \text{Silindir Çap}^2}{4} \times \text{Strok} \quad (5.27)$$

5.6.3 ISFC

Indicated specific fuel consumption (ISFC) yani özgül yakıt tüketimi (g/kWh), yakıt kütlesi ve güç verileri kullanılarak elde edilir.

$$ISFC = [m(\text{yakıt}) \times \frac{RPM \times 60}{N_{rv}}] / P \quad (5.28)$$

formülü ile hesaplanır. Çevrim başına silindir içerisine püskürtülen yakıtın kütlesi $m(\text{yakıt})$ (g), dakikadaki devir sayısı RPM, 60 (60 dak/saat), motor çevrim başına devir sayısı N_{rv} , P güç (kW) sembolleri ile belirtilir (Ansys, 2020b).

5.6.4 Yanma Verimliliği

Yanma verimliliği η_{γ} ; toplam kimyasal enerji $Q(\text{kmy})$ (J), toplamda püskürtülen yakıtın kütlesi $m(\text{yakıt})$ yakıtın alt ısı değeri $LVH(\text{yakıt})$ olmak üzere hesaplanır (Ansys, 2020b).

$$\eta_{\gamma} = \frac{Q(\text{kmy})}{m(\text{yakıt}) \times LVH(\text{yakıt})} \quad (5.29)$$

5.6.5 Termal Verimlilik

İş (W), toplamda püskürtülen yakıtın kütlesi $m(\text{yakıt})$, yakıtın alt ısı değeri $LHV(\text{yakıt})$ olmak üzere hesaplanır (Ansys, 2020b).

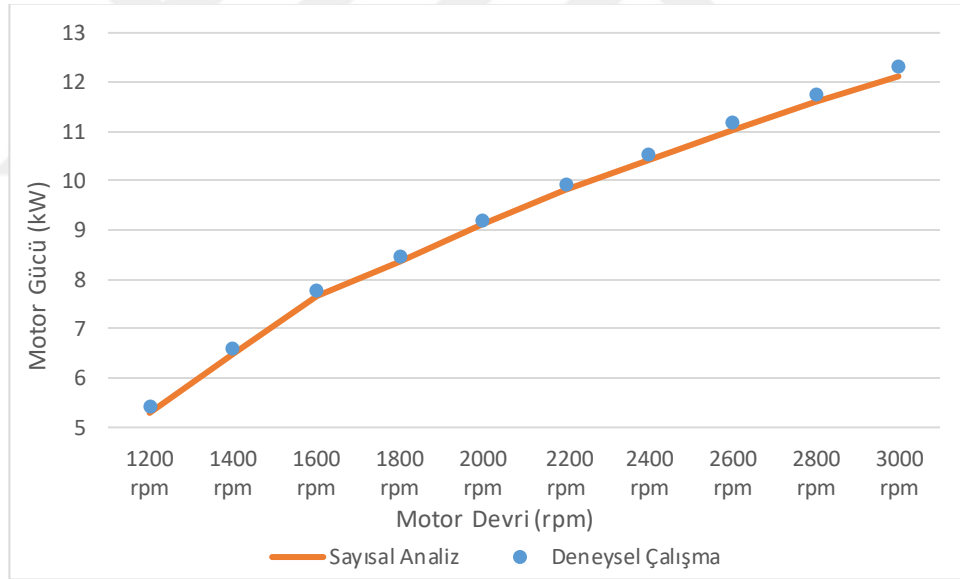
$$\eta_{th} = \frac{W}{m(\text{yakıt}) \times LHV(\text{yakıt})} \quad (5.30)$$

BÖLÜM ALTI

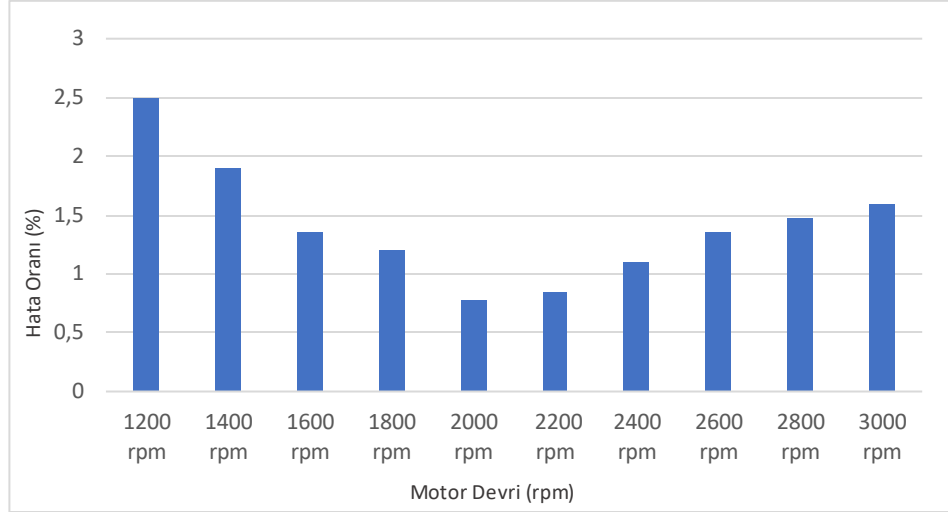
YANMANIN SAYISAL ANALİZİ

6.1 Deneysel Verilerle Sayısal Analizin Kıyaslanması

Antor 4LD 820 model DMA standartlarındaki gemi yakıtı ile (Gülmez, 2017) yaptığı çalışmada elde edilen güç verileri ile sayısal analizde elde edilen veriler kıyaslandı. Motor 1200 ile 3000 rpm aralıklarında çalıştırılarak elde edilen güç (kW) verilerine bakılmıştır. Model motor ile yapılan sayısal analizin deneysel çalışmada elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiş, en iyi sonucun %0,77 hatayla 2000 rpm ile gerçekleştiğini ve en hatalı sonucun ise %2,5 hata oranıyla 1200 rpm ile elde edilen veriler olduğu tespit edilmiş (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2) ve yapılan tüm çalışma en düşük hatalı sonuç olan 2000 rpm ile gerçekleştirilmiştir.

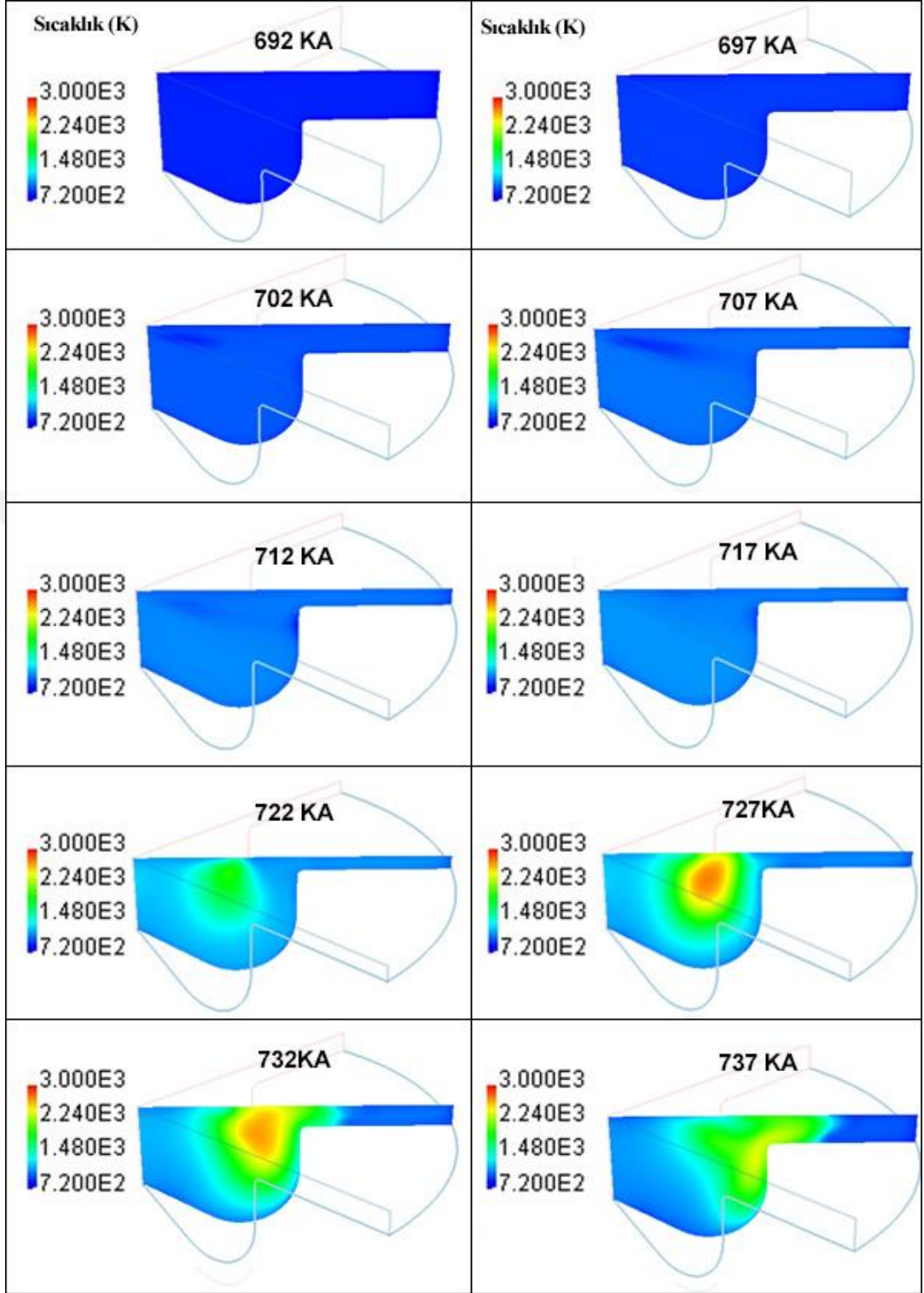


Şekil 6.1 Deneysel çalışmada ve sayısal analizde elde edilen güç verileri



Şekil 6.2 Sayısal analiz verileri hata oranları

Yanma esnasında silindir içerisindeki sıcaklık değişimi her 5'er derecelik krank açısı aralıklarla Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Piston 28 KA ÖÜÖN da iken henüz yakıt silindir içerisine püskürtülmemiş ve silindir içerisi sıcaklığının tutuşma için yeterli olan sıcaklığın (850 K) üzerinde olduğu gözlemlenmektedir. 320 K sıcaklığında olan yakıt, 694° krank açısında silindir içerisine enjekte edilmeye başlar ve sonraki 20° KA boyunca devam eder. Bu aralıkta silindir içerisinde sıcaklığın bölgesel düşüşü gözlemlenmektedir. 722° krank açısında tutuşmaya bağlı olarak sıcaklık artış göstermektedir. Anlık ve bölgesel olarak sıcaklık; piston 732° krank açısında iken maksimum 2700 K civarına yükselmekte ve yanma sonuna kadar düşerek azalmaktadır.

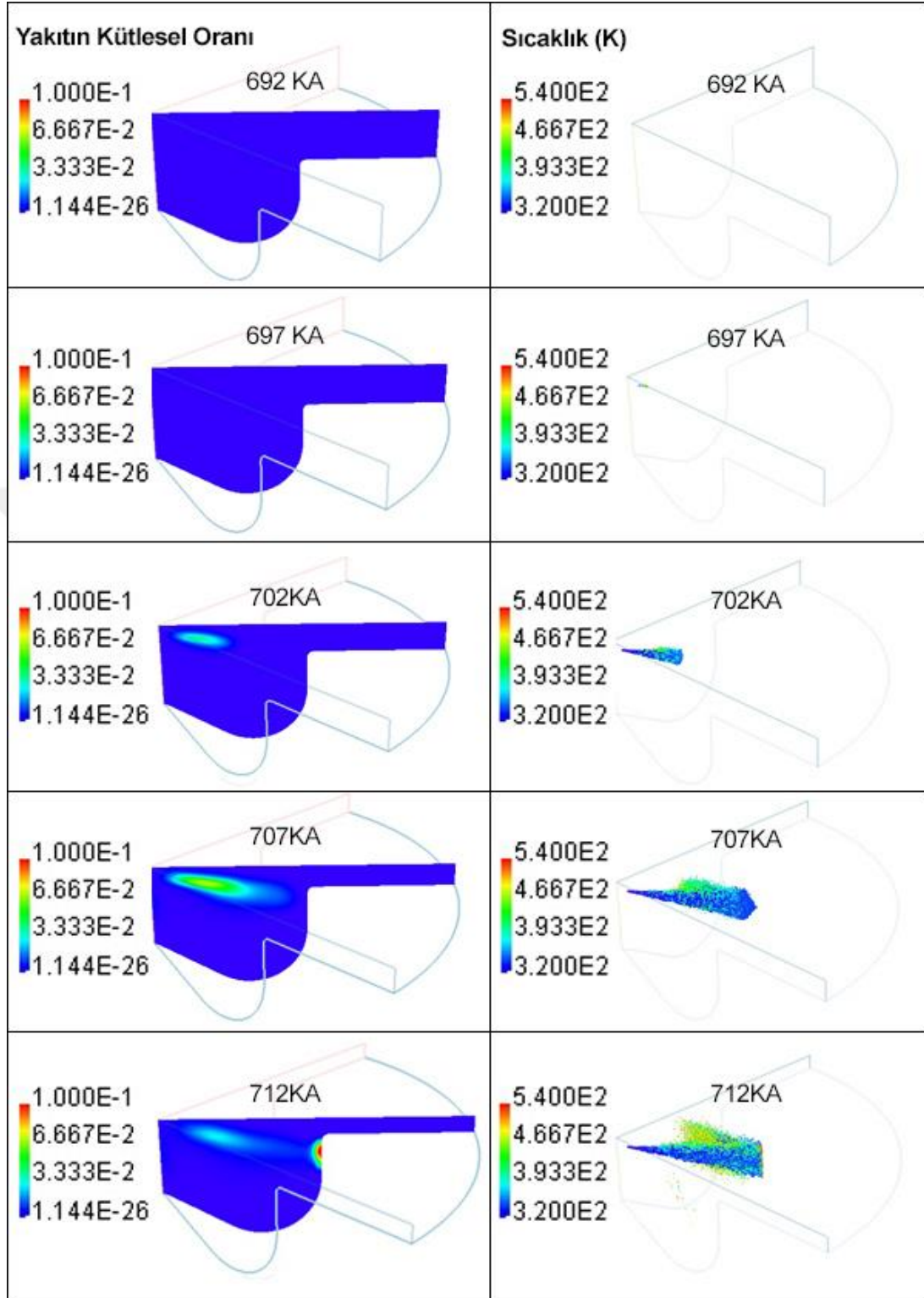


Şekil 6.3 Silindir içerisindeki sıcaklık değişimi ($E=10^n$)

Sıkıştırılarak sıcaklığı yükseltilmiş silindir havası içerisine 320 K sıcaklığındaki yakıt enjekte edildiğinde yakıt parçacıkları enjekte edilme hızı ve silindir havasıyla temasıyla buharlaşıp yakıt buharı haline gelerek gaz karışımını oluştururlar. Piston 28°

ÖÜÖN dan 712° krank açısına kadar gerçekleşmiş olan süreç incelenmiş ve yakıt kütle değişimi ile enjektörden püskürtülen yakıtın partikül boyutu ve sıcaklığındaki değişim gözlenmiştir. Şekil 6.4'te 692° krank açısından 712° krank açısına kadar olan süreç gösterilmiş olup; sol tarafta yakıt kütle değişimi kesit düzlem üzerinde oluşan etkisi, sağ tarafta partikül parçacıklar halindeki yakıtın sıcaklık ve boyut değişimi gözlemlenmektedir. 20° boyunca enjekte edile yakıt yoğunluğunun ÜÖN ya yakınlaştıkça arttığı, parçacıkların ulaştığı maksimum sıcaklığın 537 C° ye ulaştığı görülmekte. 712° krank açısından itibaren kütle azaldığı, yanma sonu olan 855° krank açısında çok az miktarda tepkimeye giremeyen yakıt parçacıkları olduğu gözlenmiştir.

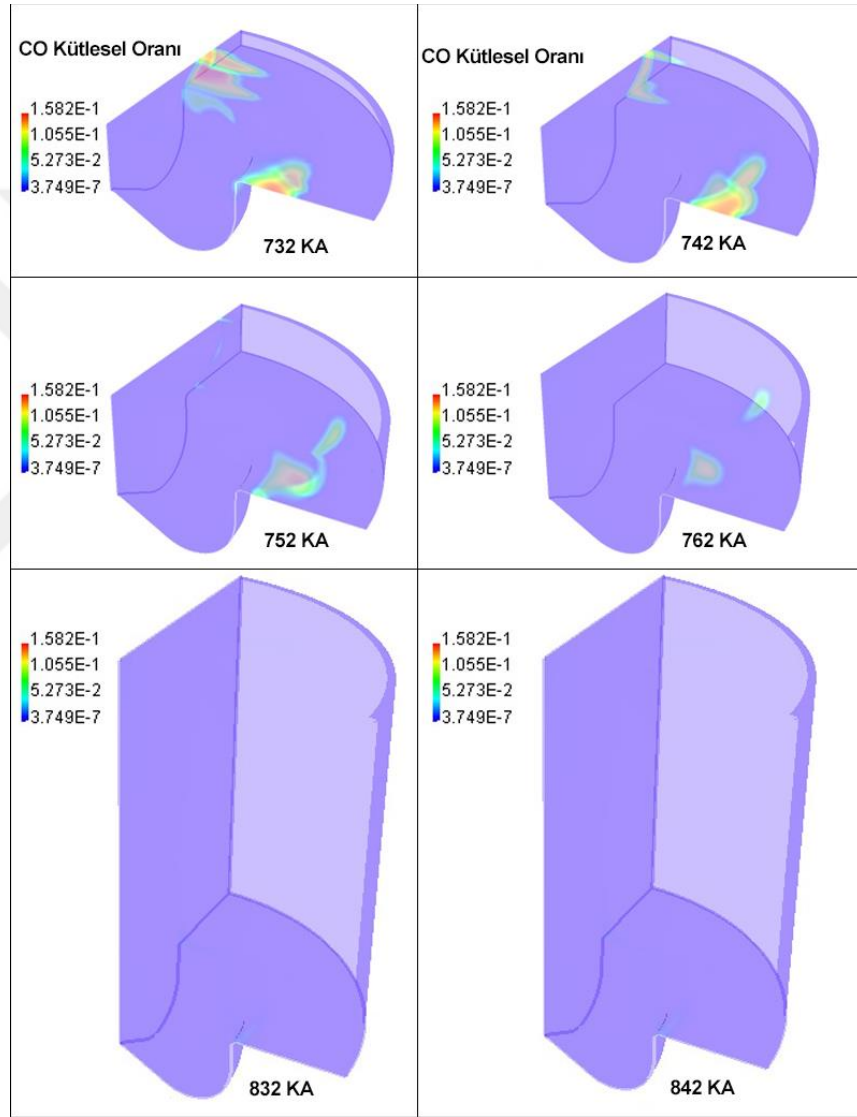




Şekil 6.4 Yakıt kütle değişim oranı ve yakıt partikülkütle ve sıcaklık değişimi

Şekil 6.5'te krank açısına bağlı olarak karbon monoksit (CO) kütle değişikliği gösterilmiştir. Eksik yanma sonucunda oluşan karbon monoksit (CO) değişimini

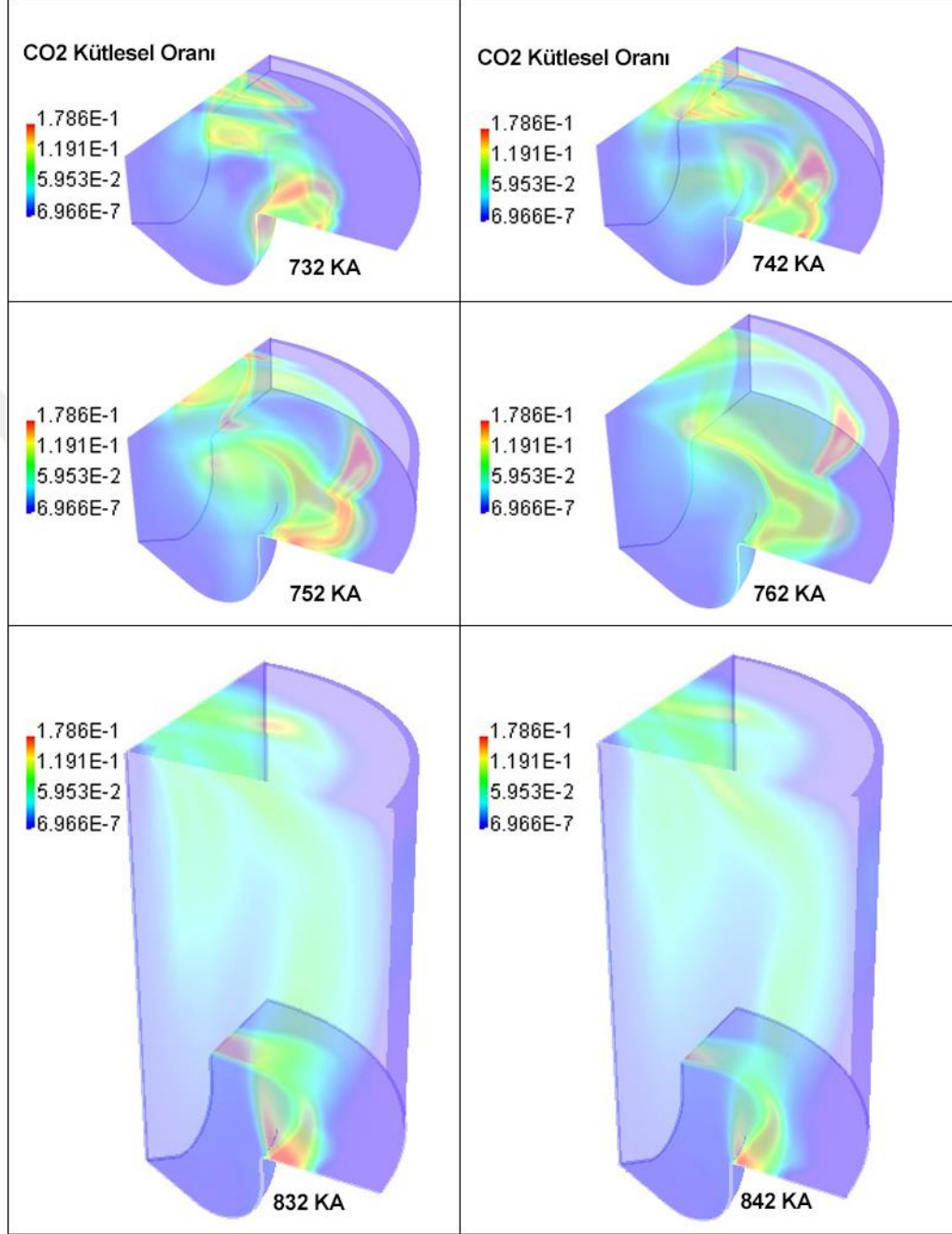
gözlemleyebilmek için 732° krank açısı ile 842° krank açısı arasında farklı krank açılarında anlık görüntüler alınmıştır. Yanma odası kıvrım bölümlerine doğru yoğunluk oluşturmuş ve yanma işleminin devamını takip eden süreçte giderek kütesinin azaldığı gözlenmiştir. 762° krank açısından sonra 842° krank açısına kadar bir miktar daha azalmış ve egzoz valfinin açılmasına değin sabit kalarak sonrasında atmosfere atılmıştır.



Şekil 6.5 Silindir içerisindeki CO kütle değişim oranı ($E=10^n$)

Salınan karbon monoksit oksitlenerek karbon dioksit (CO_2) oluşumuna neden olur. Şekil 6.6'da krank açısına bağlı olarak karbon dioksit (CO_2) kütle değişimi

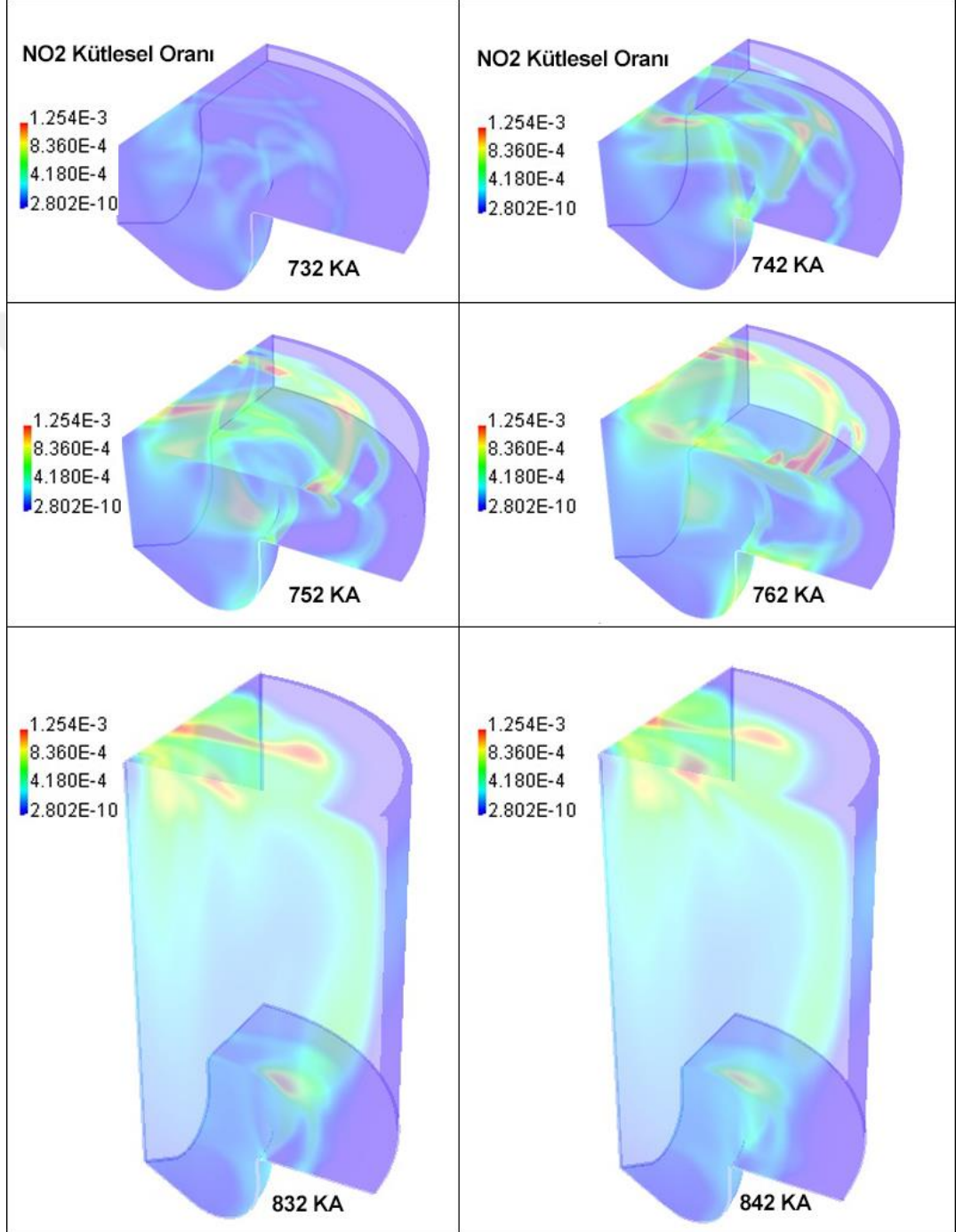
gösterilmiştir. 732° krank açısı ile 842° krank açısı aralığında farklı krank açılarında anlık görüntüler alınmıştır.



Şekil 6.6 Silindir içerisindeki CO₂ kütle değişim oranı (E=10ⁿ)

Yanmayla birlikte ortaya çıkan azot monoksit (NO) oksitlenerek NO₂ oluşumuna sebebiyet verir. Model motorun yanma süreci incelenerek; Şekil 6.7'de 732° krank açısı ile 842° krank açısı arasında farklı krank açılarında silindir içerisindeki NO₂ kütle

değişim oranı anlık görüntülerle gösterilmiştir. 732° krank açısı ile 832° krank açısı arasında hızla yükselen NO₂ kütlesi, sonraki krank açılarında 855° krank açısına kadar çok daha hafif bir artışla atmosfere verilmiştir.



Şekil 6.7 Silindir içerisindeki NO₂ kütle değişim oranı (E=10ⁿ)

6.2 Yakıtta Hidrojen İlavesinin Etkileri

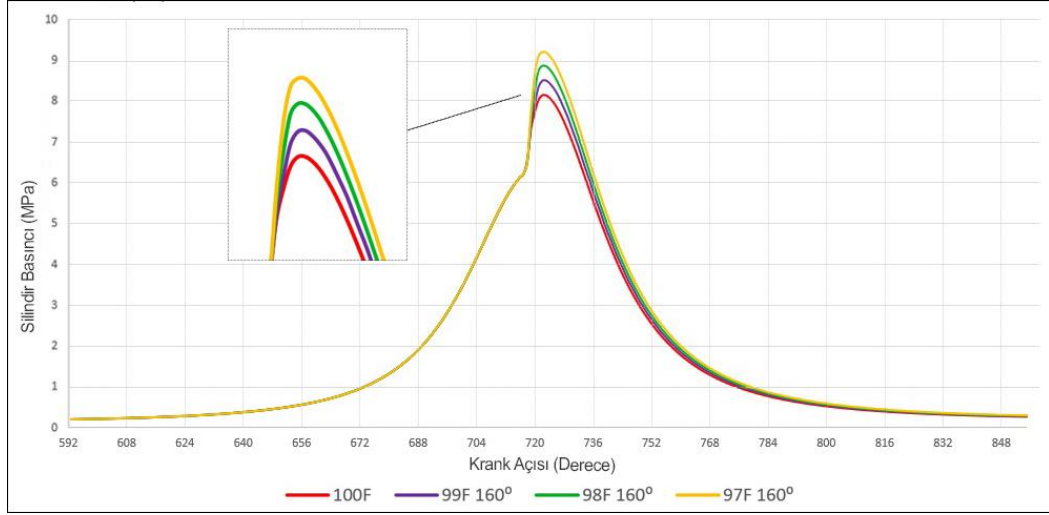
Bölüm 5’de açıklanan sınır koşulları ile çalıştırılan motorun emme havası içerisine %1, %2 ve %3 mol oranında hidrojen eklenmesi ile elde edilen emisyon sonuçları incelenerek bulgular ortaya çıkarılmıştır.

Hidrojen ilavesi ile yanma verimin ve güç değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Özgül yakıt tüketiminin 230,1 g/kWh değerinden 202,7 g/kWh değerine, kadar düştüğü tespit edilmiştir. Tablo 6.1’de emme havası sınır başlangıç koşulları ile performans verilerine dair sonuçlar verilmiştir.

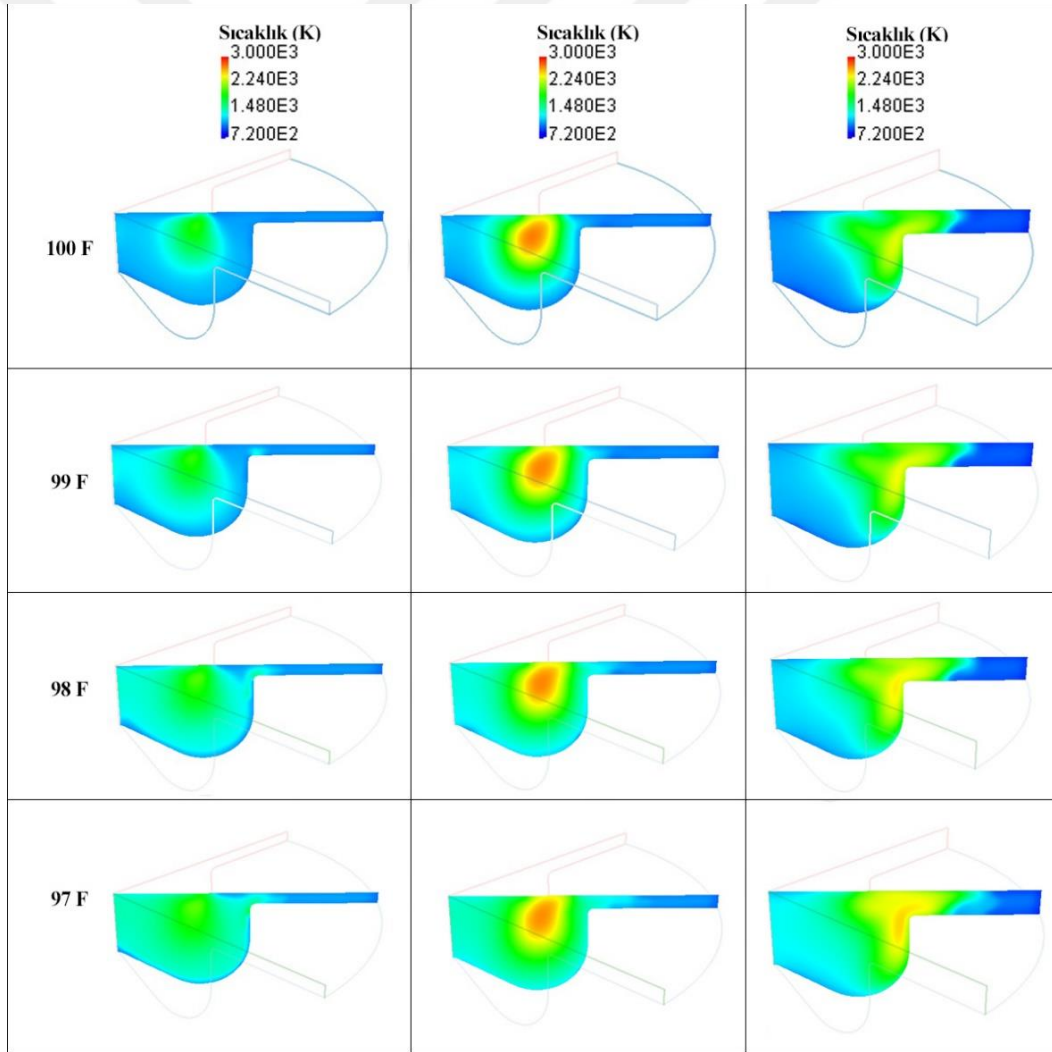
Tablo 6.1 Hidrojen ilavesinin performans değerlerine etkisi

Yakıt	100F	99F	98F	97F
Güç (kW)	9,124	9,575	9,980	10,359
ISFC (g/kWh)	230,165	219,316	210,418	202,721
Yanma Verimi (η)	0,672	0,748	0,825	0,914
IMEP	0,670	0,703	0,733	0,761
Emme Havası (mol%)	$o_2 = 0,218$	$o_2 = 0,21582$	$o_2 = 0,21364$	$o_2 = 0,21146$
	$n_2 = 0,782$	$n_2 = 0,77418$	$n_2 = 0,76636$	$n_2 = 0,75854$
	$h_2 = 0$	$h_2 = 0,01$	$h_2 = 0,02$	$h_2 = 0,03$

Hidrojen ilavesi ile yanmanın değişimine bağlı olarak silindir içerisindeki maksimum sıcaklık hidrojen ilave edilmemiş olan yakıtla çalıştırılan motora kıyasla sırasıyla %4,54, %9,29 ve %13,75 oranında yükselirken; silindir içi maksimum basınç %4,44, %8,88 ve %13,03 oranında artmıştır. Krank açısına bağlı olarak anlık basınç değişimleri Şekil 6.8’de gösterilmektedir.



Şekil 6.8 Hidrojen ilavesine bağlı olarak basınç değişimi

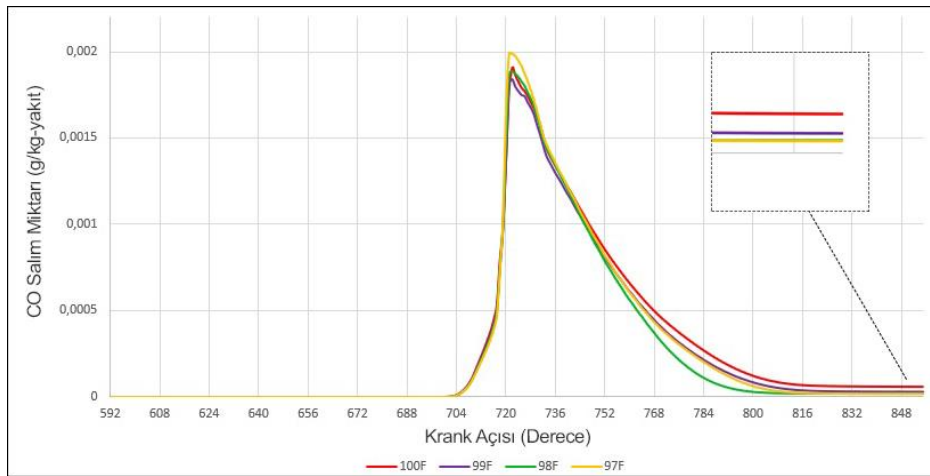


Şekil 6.9 Hidrojen ilavesinin silindir içi sıcaklığa etkisi ($E=10^n$)

Şekil 6.9’da belirli krank açılarında alınan kesitlerde hidrojen ilavesine bağlı olarak anlık sıcaklık değişimleri gözlenebilmektedir. %1, %2 ve %3 hidrojen ilavesi ile çalıştırılan dizel motorunun silindir içerisinden belirli aralıklarda alınmış olan anlık görüntülerinden de görülebileceği üzere; %1 hidrojen ilavesi ile yakıtın tutuşma anının bir kısmını yansıtan 722° krank açısındaki silindir içi kesit sıcaklığı, hidrojen ilavesiz yakıtla çalıştırılan motora göre daha yüksek olmuştur. Hidrojen oranını arttırdıkça silindir içi sıcaklığı artmaktadır. %2 ve %3 oranlarında ilave edilmiş olan hidrojenin %1 oranında ilave edilen hidrojen oranına kıyasla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 727° krank açısında yine 722° krank açısında olduğu gibi hidrojen ilavesine bağlı olarak silindir içerisindeki sıcaklık artışı olduğu gözlenmiştir. 737° krank açısında ise özellikle %3 hidrojen ilavesinin alev sıcaklığına ve yayılma hızına etkisine olan etkisi gözle görülecek fark oluşturmuştur. Alev sıcaklığı bölgesel olarak daha büyük bir alana yayılmıştır.

6.2.1 Hidrojen İlavesinin CO Emisyonuna Etkisi

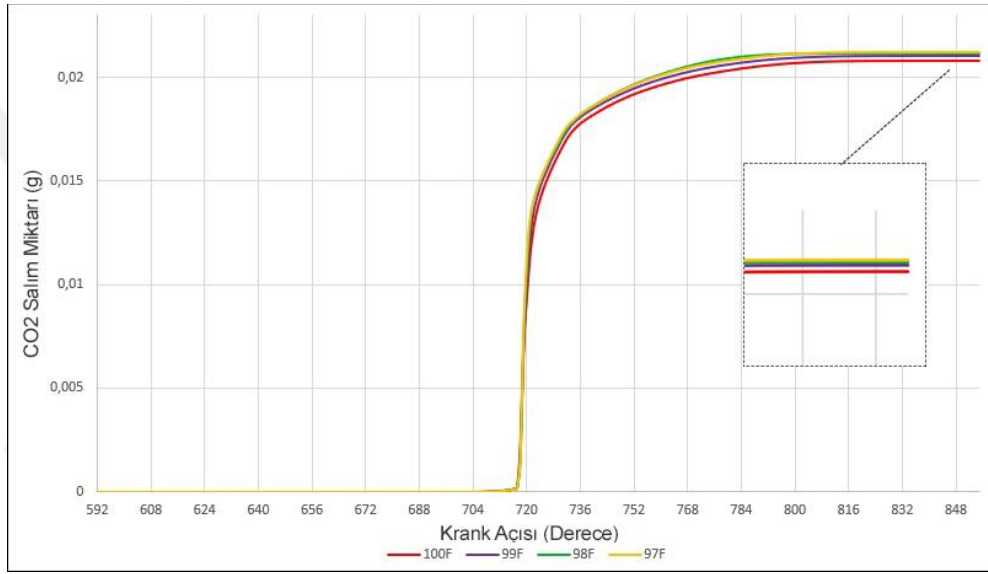
2000 d/dk sabit devirde dönen motora emme havasına mol oranında %1, %2 ve %3 oranında hidrojen ilave edilerek CO etkileri araştırılmıştır. Şekil 6.10’da krank açısına bağlı olarak karbon monoksit (CO) emisyonu değişimi gösterilmektedir. Emme havasına herhangi bir hidrojen H₂ ilavesi yapılmadan elde edilen sonuçla kıyaslandığında; %1, %2 ve %3 H₂ ilavesi ile sırasıyla %52,04, %70,41 ve %73,30 (g) oranında CO emisyonlarının iyileştiği gözlenmiştir.



Şekil 6.10 Hidrojen ilavesinin CO salımına etkisi

6.2.2 Hidrojen İlavesinin CO₂ Emisyonuna Etkisi

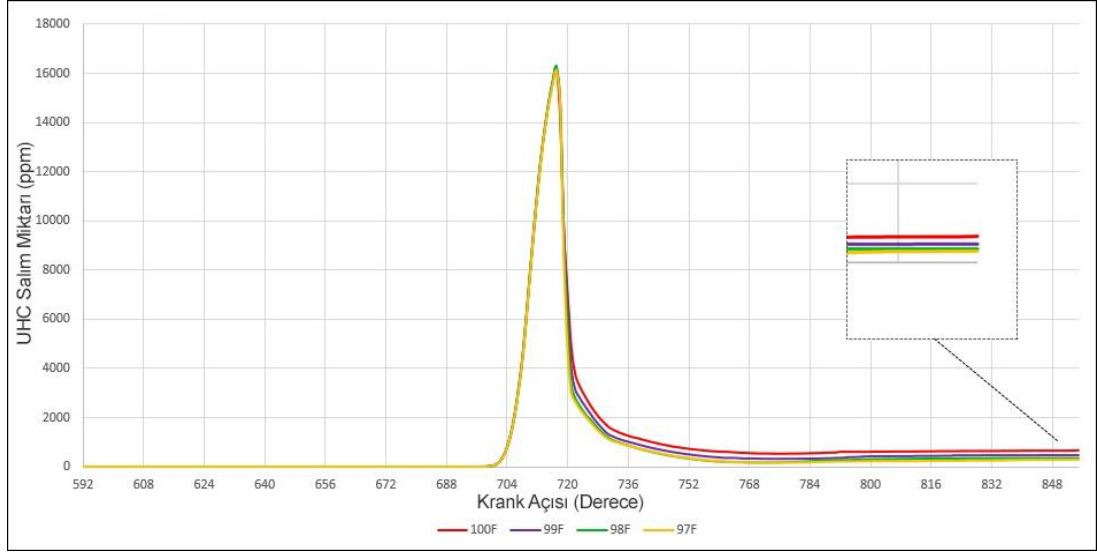
2000 d/dk sabit devirde dönen motora emme havasına molce %1, %2 ve %3 oranında hidrojen ilave edilerek CO₂ etkileri araştırılmıştır. Şekil 6.11’de krank açısına bağlı olarak karbon dioksit CO₂ emisyonu gram cinsinden gösterilmiştir. Hidrojen ilave edilmemiş yakıtı ile elde edilen sonuca kıyasla sabit devirde döndürülen motora %1, %2 ve %3 hidrojen ilavesi ile ihmal edilebilir boyutta (%1,15-1,98 g) artış gözlenmiştir.



Şekil 6.11 Hidrojen ilavesinin CO₂ salımına etkisi

6.2.3 Hidrojen İlavesinin Yanmamış Hidrokarbon Emisyonuna Etkisi

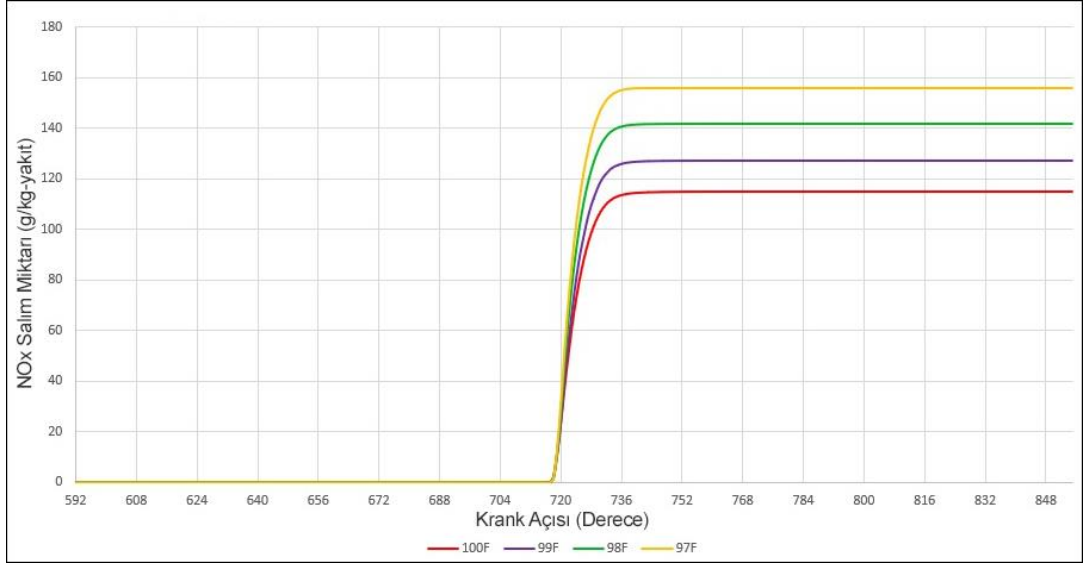
Şekil 6.12’de krank açısına bağlı olarak yanmamış hidrokarbon (UHC) emisyonu gösterilmektedir. %1, %2 ve %3 oranında emme havasına hidrojen ilavesi ile hidrojen ilave edilmemiş emme havasıyla çalıştırılan motor emisyon verisine oranla; sırasıyla %30,10, %48,56 ve %57,23 (ppm) oranında UHC emisyonlarında azalma olduğu gözlenmektedir. Silindir içerisindeki sıcaklığın hidrojen ilavesine bağlı olarak artması ve böylelikle yakıtın yanmasının iyileşmesine bağlı olduğu tahmin edilebilir.



Şekil 6.12 Hidrojen ilavesinin UHC salımına etkisi

6.2.4 Hidrojen İlavesinin NO_x Emisyonuna Etkisi

Hidrojen ilavesi ile; hidrojen ilavesiz emme havası ile çalıştırılan motorda oluşan azot oksit (NO_x) emisyonuna kıyasla hızla arttığı gözlenmiştir. Şekil 6.13'de görüleceği üzere %1 hidrojen ilavesi ile hidrojen ilavesiz emme havası ile çalıştırılan motor emisyonuna kıyasla %7,96, %2 hidrojen ilavesi ile %20,35, %3 hidrojen ilavesi ile %32,38 oranında artış olduğu gözlenmiştir. Silindir içi sıcaklığın 1500 K ve üzeri olması NO_x oluşumunu hızlandırmakta olduğu bilinmekte; hidrojen ilavesi ile artan silindir içi sıcaklığı NO_x emisyonlarında artışa sebebiyet verdiği tahmin edilmektedir. Motor üzerinde; enjeksiyon zamanlamasını geciktirerek ve egzoz gazı devridaimini (EGR) artırarak azaltılabilmektedir (Hoekman ve Robbins, 2012).



Şekil 6.13 Hidrojen ilavesinin NO_x salımına etkisi

6.3 Püskürtme Açısının Değişimi ve Hidrojen İlavesinin Emisyon Değerleri Üzerindeki Etkisi

Model motor üzerinde normalinde 160° olan püskürtme açısını; 140° ve 120° olacak şekilde değişik püskürtme açılarının emisyon değerlerine etkisi araştırılmıştır. İncelemeler %1, %2 ve %3 hidrojen ilavelerine ek olarak püskürtme açılarının değişimlerine bağlı emisyon sonuçları ayrı, ayrı gözlenmiştir.

6.3.1 %1 Hidrojen İlavesinin Yakıt Püskürtme Açısına Bağlı İncelenmesi

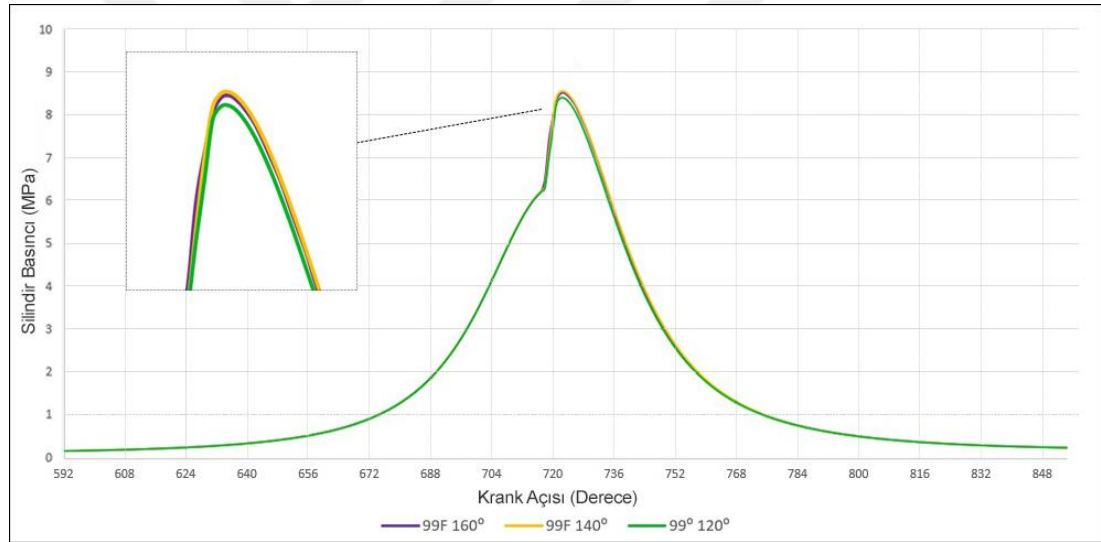
%1 oranında hidrojen ilave edilmiş emme havası içerisine 160°, 140° ve 120° enjektör açılarıyla püskürtülen yakıtın yanma sonucu oluşan emisyon değerlerine etkisi araştırılmıştır.

Hidrojen ilavesi ile püskürtme açısının değiştirilmesine bağlı olarak; en iyi yanma verimi yakıtın 140° ile püskürtülmesinde tespit edilmiştir. Yine en yüksek güç de bu püskürtme açısında gözlenmiştir. Tablo 6.2'de emme havası sınır başlangıç koşulları ile performans sonuçlarına dair bilgiler verilmiştir.

Tablo 6.2 Hidrojen ilavesinin performans değerlerine etkisi (99F)

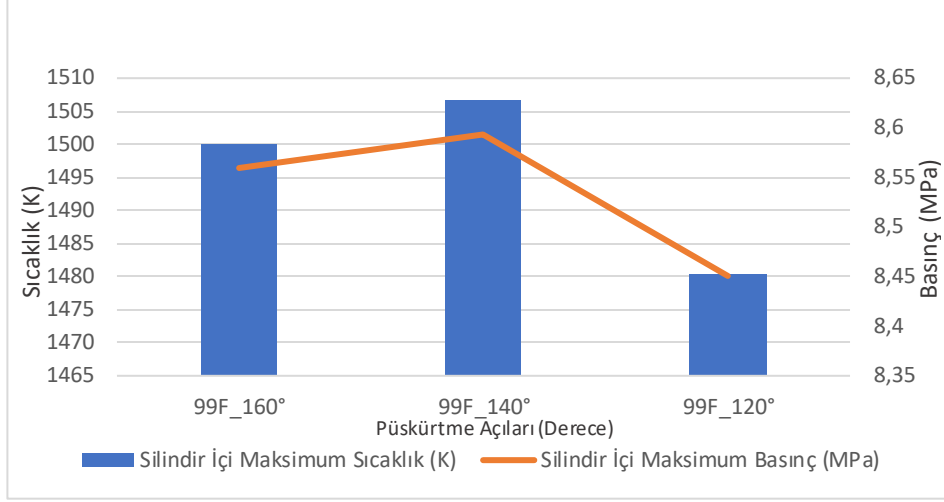
Yakıt - Püskürtme Açısı	99F 160°	99F 140°	99F 120°
Güç (kW)	9,575	9,614	9,455
ISFC (g/kWh)	219,316	218,433	222,103
Yanma Verimi (η)	0,748	0,749	0,742
IMEP	0,703	0,706	0,694
Emme Havası (mol %)	$o_2 = 0,21582$	$o_2 = 0,21582$	$o_2 = 0,21582$
	$n_2 = 0,77418$	$n_2 = 0,77418$	$n_2 = 0,77418$
	$h_2 = 0,01$	$h_2 = 0,01$	$h_2 = 0,01$

Yakıt silindir içerisine 140° açı ile püskürtüldüğünde 160° ile püskürtme ile kıyaslandığında; silindir içi maksimum basıncın %0,40 oranında ve silindir içi sıcaklığın %0,44 oranında artış gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 6.14 ve Şekil 6.15).



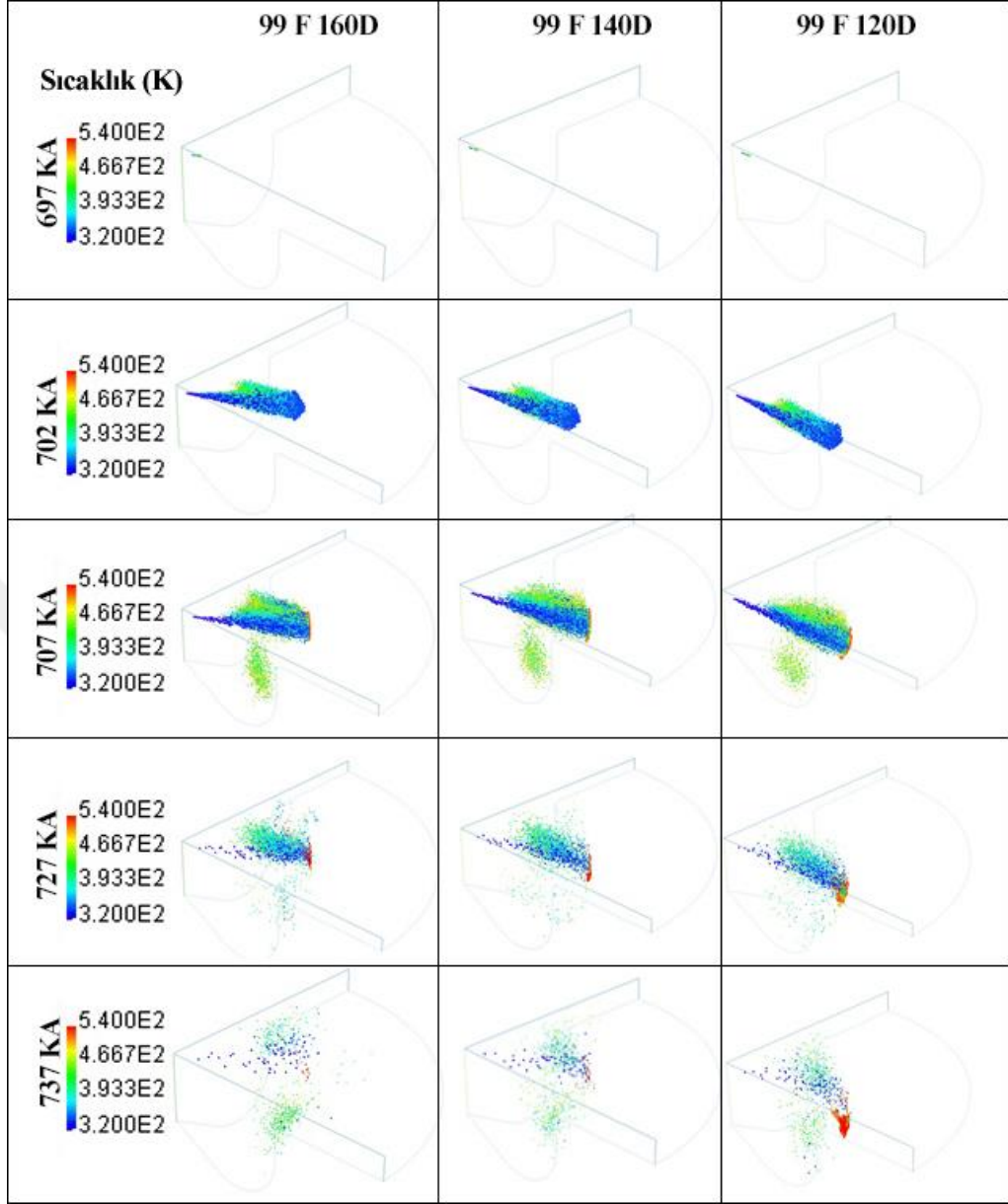
Şekil 6.14 Farklı püskürtme açılarındaki basınç değişimleri (99F)

Yakıtın silindir içerisine 120° açı ile püskürtüldüğünde ise 160° ile püskürtme sonucunda oluşan değerlere kıyasla; silindir içi maksimum basıncın %1,26 ve silindir içi sıcaklığın ise %1,29 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 6.14 ve Şekil 6.15).



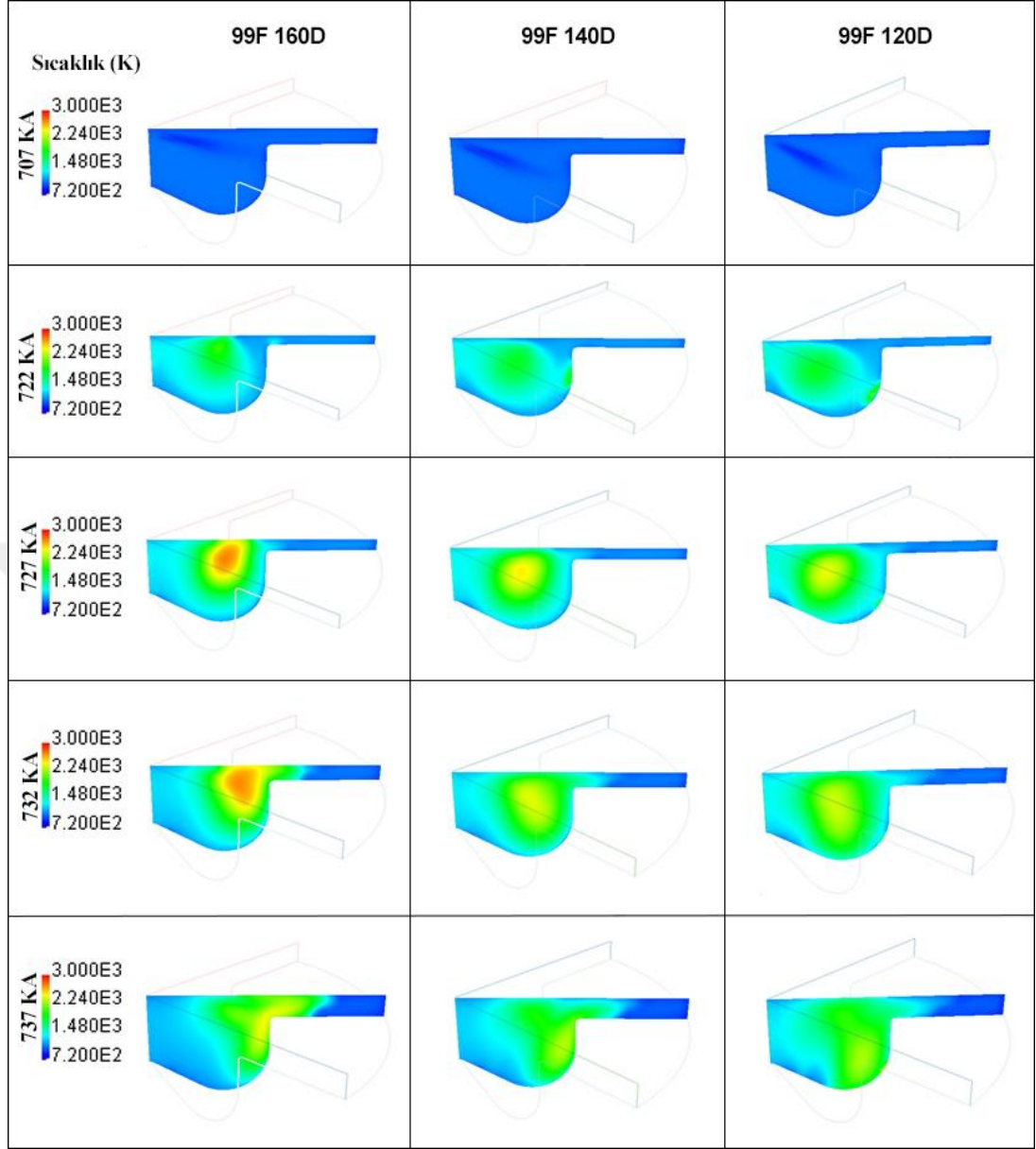
Şekil 6.15 Farklı püskürtme açılarındaki basınç ve sıcaklık değişimleri (99F)

Şekil 6.16'da yakıtın krank açısına bağlı olarak; belirlenen püskürtme açısı değerlerindeki kütleli değişim ve sıcaklık değişimi gösterilmiştir. 707° krank açısında 140° ile püskürtme sonrası yakıt parçacıklarının 160° ile püskürtme durumu ile kıyaslandığında daha çok parçacığın yüksek sıcaklık değerler verdiği gözlenmiştir. 732° ve sonrası krank açısında daha az buharlaşmayan yakıt parçacığı olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık 120° ile püskürtülen yakıt yüzeye çarpmasıyla daha yüksek sıcaklıklara ulaşmış olsa da özellikle 732° krank açısı ve sonrasında buharlaşmamış yakıt parçacıkları sayısının 160° ve 140° püskürtme açılarıyla elde edilen sonuca göre çok daha fazla olduğu gözlenmiştir.



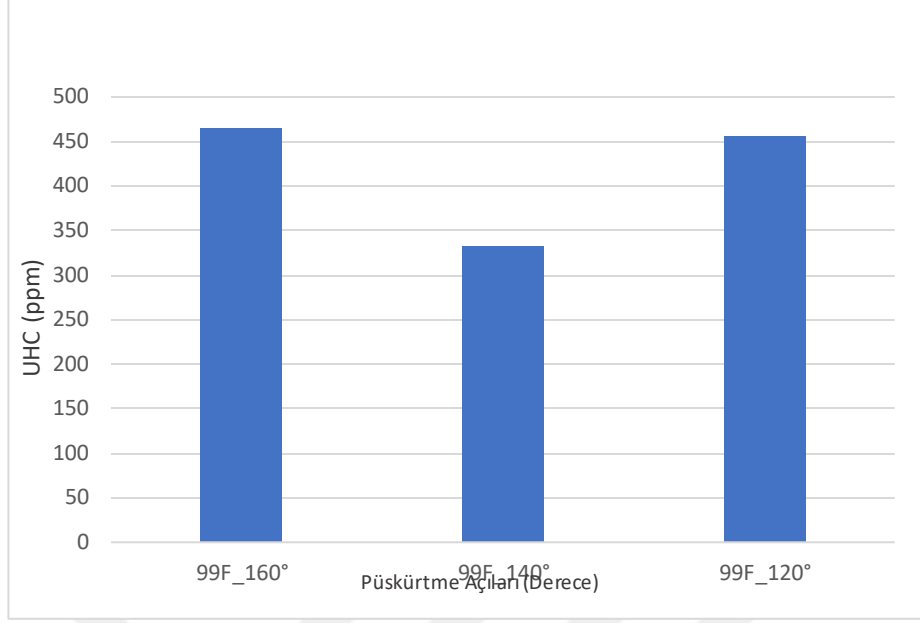
Şekil 6.16 Farklı püskürtme açılarında yakıt damlacıklarının sıcaklık değişimi (99F)

Şekil 6.17’de kesiti alınan yanma odasının belirli krank açılarındaki sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



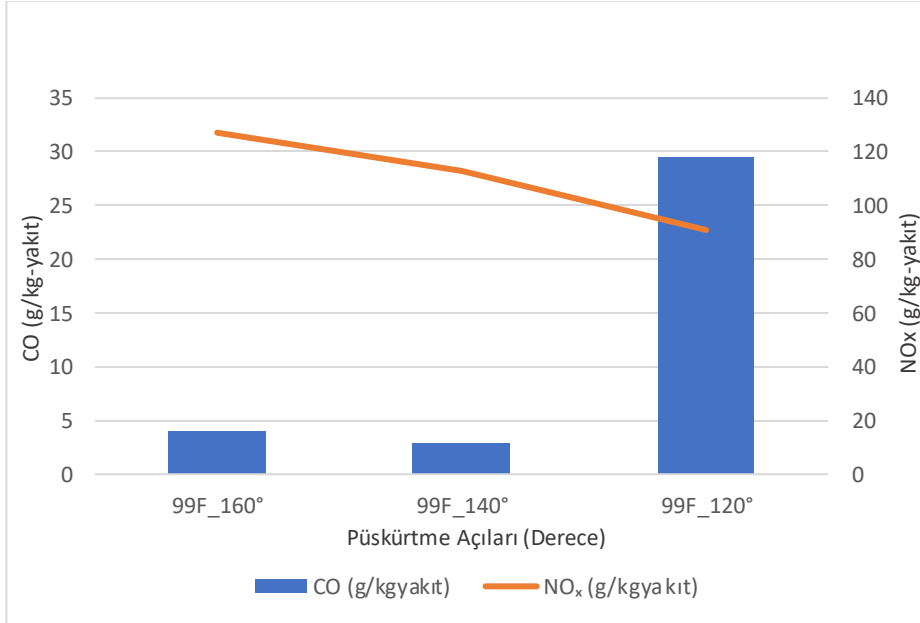
Şekil 6.17 Farklı püskürtme açılara bağlı olarak silindir içi sıcaklık değişimi (99F)

140° açılı püskürtülen yakıt ile çalıştırılan motorda; 160° açılı püskürtülen yakıt ile elde edilen değerlerle kıyaslandığında karbon monoksit CO, NO_x ve UHC emisyonlarında olumlu yönde değişim gösterdiği tespit edilmiştir. CO emisyonunda %26,16, NO_x emisyonunda %3,80, yanmamış hidrokarbon UHC emisyonunda ise %28,32 oranlarında düşüş olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.18 ve Şekil 6.19).



Şekil 6.18 Farklı püskürtme açılarına bağlı olarak UHC salımı değişimi (99F)

120° açı ile püskürtüldüğünde ise; UHC emisyonu, NO_x emisyonları 160° püskürtme açısıyla çalıştırılan motorun emisyon oranlarına kıyasla sırasıyla %1,88 ve %28,47 oranlarında iyileşme gözlenmiş olup, CO emisyonu değer olarak 7,32 kat artarak olumsuz yönde değişmiştir (Şekil 6.18 ve Şekil 6.19).



Şekil 6.19 Farklı püskürtme açılarında CO ve NO_x salımı değişimi (99F)

6.3.2 %2 Hidrojen İlavesinin Yakıt Püskürtme Açısına Bağlı İncelenmesi

%2 oranında hidrojen ilave edilmiş emme havası içerisine 160°, 140° ve 120° enjektör açılarıyla püskürtülen yakıtın yanma sonucu oluşan emisyon değerlerine etkisi araştırılmıştır.

Hidrojen ilavesi ile püskürtme açısının değiştirilmesine bağlı olarak; en iyi yanma veriminin yakıtın 160° ile püskürtülmesinde tespit edilmiştir. Yine en yüksek güç de bu püskürtme açısında gözlenmiştir. Tablo 6.3'de emme havası sınır başlangıç koşulları ile performans verilerine dair bilgiler verilmiştir.

Tablo 6.3 Hidrojen ilavesinin performans değerlerine etkisi (98F)

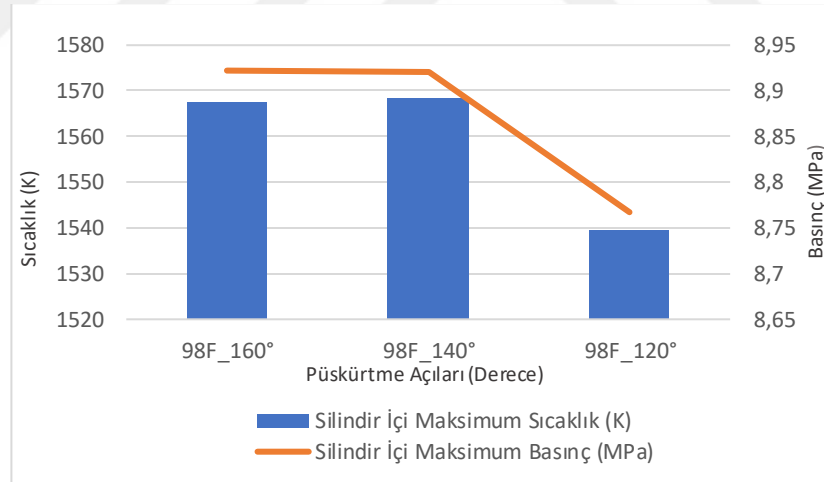
Yakıt - Püskürtme Açısı	98F 160°	98F 140°	98F 120°
Güç (kW)	9,980	9,978	9,808
ISFC (g/kWh)	210,418	210,471	214,119
Yanma Verimi (η)	0,825	0,824	0,809
IMEP	0,733	0,733	0,720
Emme Havası (mol%)	$o_2 = 0,21364$	$o_2 = 0,21364$	$o_2 = 0,21364$
	$n_2 = 0,76636$	$n_2 = 0,76636$	$n_2 = 0,76636$
	$h_2 = 0,02$	$h_2 = 0,02$	$h_2 = 0,02$

Yakıt silindir içerisine 140° açı ile püskürtüldüğünde 160° ile püskürtme ile kıyaslandığında; silindir içi maksimum basıncı %0,02 oranında azalırken, silindir içi sıcaklığın %0,06 oranında arttığı gözlenmiştir (Şekil 6.20 ve Şekil 6.21).



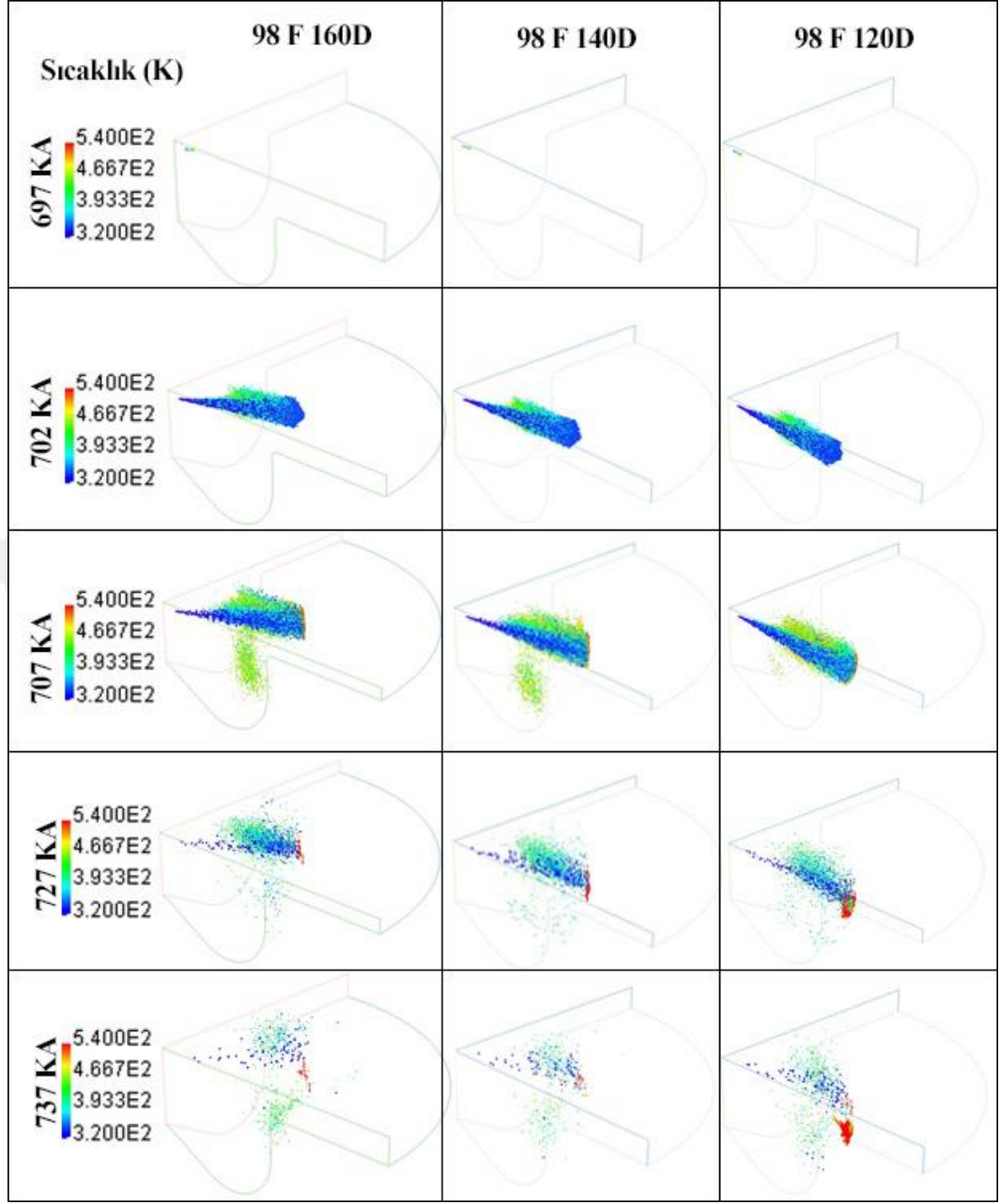
Şekil 6.20 Farklı püskürtme açılarındaki basınç değişimleri (98F)

Yakıtın silindir içerisine 120° açı ile püskürtüldüğünde ise 160° ile püskürtme sonucunda oluşan değerlere kıyasla; silindir içi maksimum basıncın %1,73 ve silindir içi sıcaklığın ise %1,76 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 6.20 ve Şekil 6.21).



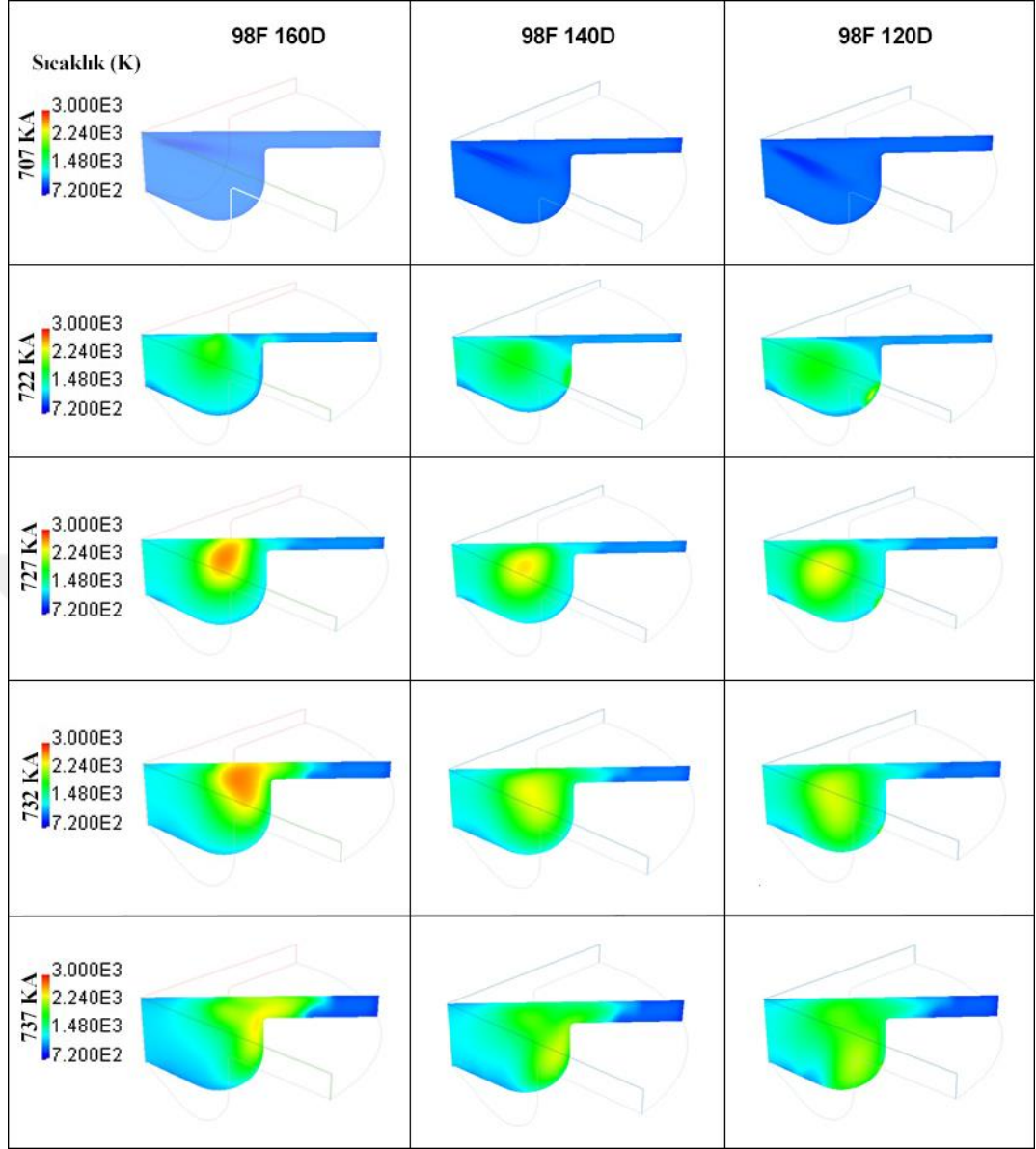
Şekil 6.21 Farklı püskürtme açılarındaki basınç ve sıcaklık değişimleri (98F)

Şekil 6.22’de yakıtın krank açısına bağlı olarak; belirlenen püskürtme açısı değerlerindeki kütleli değişim ve sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



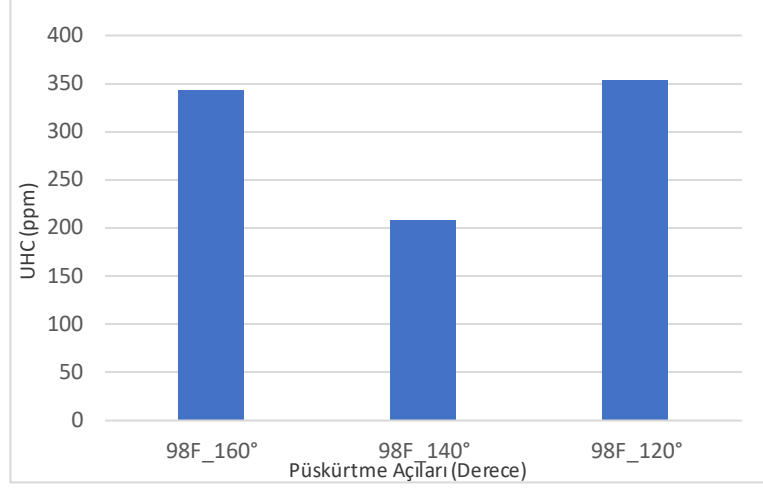
Şekil 6.22 Farklı püskürtme açılarında yakıt damlacıklarının sıcaklık değişimi (98F)

Şekil 6.23’de kesiti alınan yanma odasının belirli krank açılarındaki sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



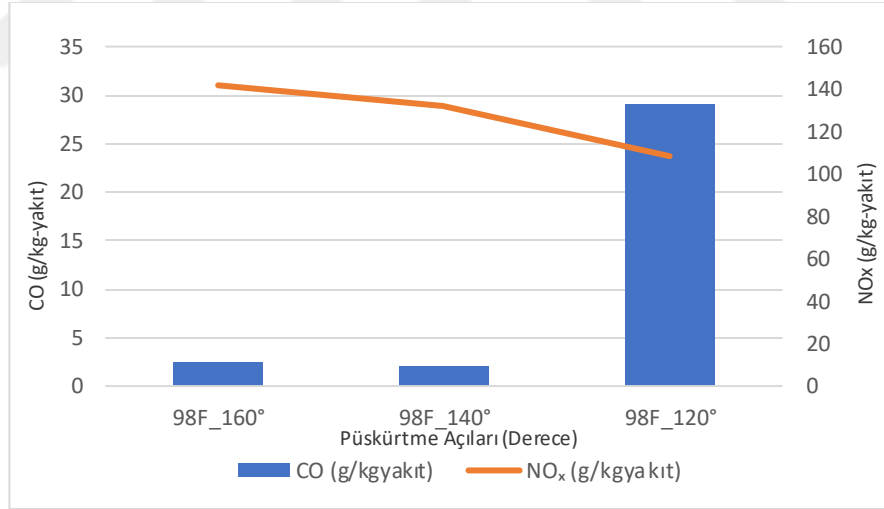
Şekil 6.23 Farklı püskürtme açılarında silindir içi sıcaklık değişimi (98F)

140° açı ile püskürtülen yakıt ile çalıştırılan motorda; 160° açı ile püskürtülen yakıt ile elde edilen değerlerle kıyaslandığında CO, NO_x ve UHC emisyonlarında olumlu yönde değişim gösterdiği tespit edilmiştir. CO emisyonunda %17,17, NO_x emisyonunda %6,88, yanmamış hidrokarbon UHC emisyonunda ise %38,84 oranlarında düşüş olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.24 Farklı püskürtme açılarına bağlı olarak UHC salımı değişimi (98F)

120° açı ile püskürtüldüğünde ise; NO_x emisyonları 160° püskürtme açısıyla çalıştırılan motorun emisyon oranlarına kıyasla %23,55 oranında iyileşme gözlenmiş olup, UHC emisyonunda %3,30 artış gözlemlenirken (Şekil 6.24), CO emisyonu değer olarak 11,68 kat artarak olumsuz yönde değişmiştir (Şekil 6.25).



Şekil 6.25 Farklı püskürtme açılarında CO ve NO_x salımı değişimi (98F)

6.3.3 %3 Hidrojen İlavesinin Yakıt Püskürtme Açısına Bağlı İncelenmesi

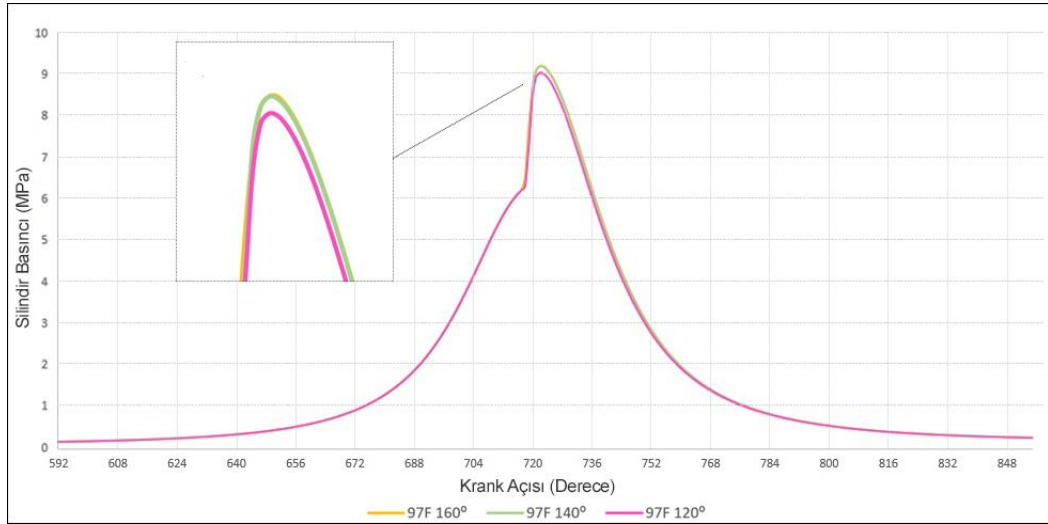
%3 oranında hidrojen ilave edilmiş emme havası içerisine 160°, 140° ve 120° enjektör açılarıyla püskürtülen yakıtın yanma sonucu oluşan emisyon değerlerine etkisi araştırılmıştır.

Hidrojen ilavesi ile püskürtme açısının değiştirilmesine bağlı olarak; en iyi yanma veriminin yakıtın 160° ile püskürtülmesinde tespit edilmiştir. Yine en yüksek güç de bu püskürtme açısında gözlenmiştir. Tablo 6.4’de emme havası sınır başlangıç koşulları ile performans verilerine dair bilgiler verilmiştir.

Tablo 6.4 Hidrojen ilavesinin performans değerlerine etkisi (97F)

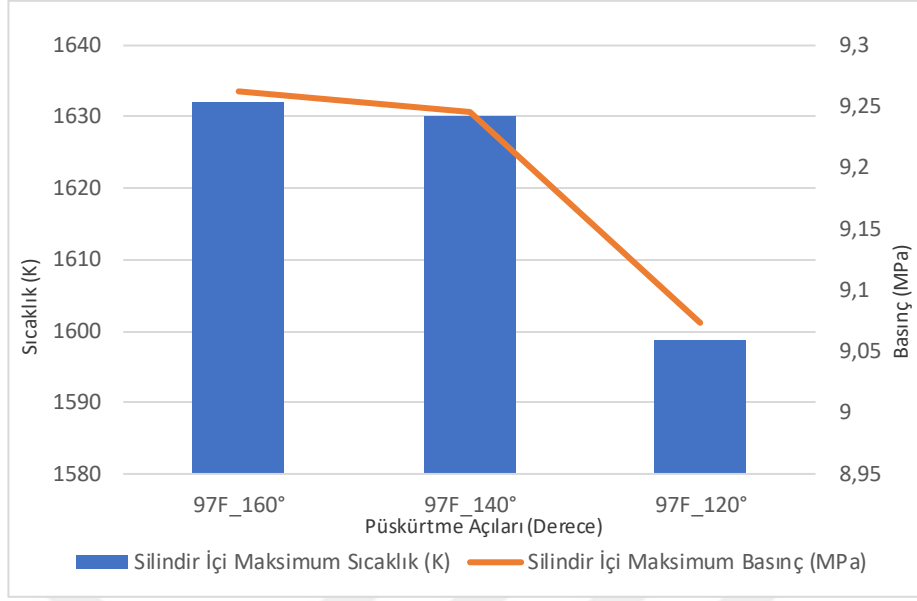
Yakıt - Püskürtme Açısı	97F 160°	97F 140°	97F 120°
Güç (kW)	10,359	10,340	10,149
ISFC (g/kWh)	202,721	203,100	206,925
Yanma Verimi (η)	0,914	0,910	0,890
IMEP	0,761	0,759	0,745
Emme Havası (mol%)	$o_2 = 0,21146$	$o_2 = 0,21146$	$o_2 = 0,21146$
	$n_2 = 0,75854$	$n_2 = 0,75854$	$n_2 = 0,75854$
	$h_2 = 0,03$	$h_2 = 0,03$	$h_2 = 0,03$

Yakıt silindir içerisine 140° açı ile püskürtüldüğünde 160° ile püskürtme ile kıyaslandığında; silindir içi maksimum basıncın %0,19 oranında ve silindir içi sıcaklığın %0,13 oranında artış gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 6.26 ve Şekil 6.27).



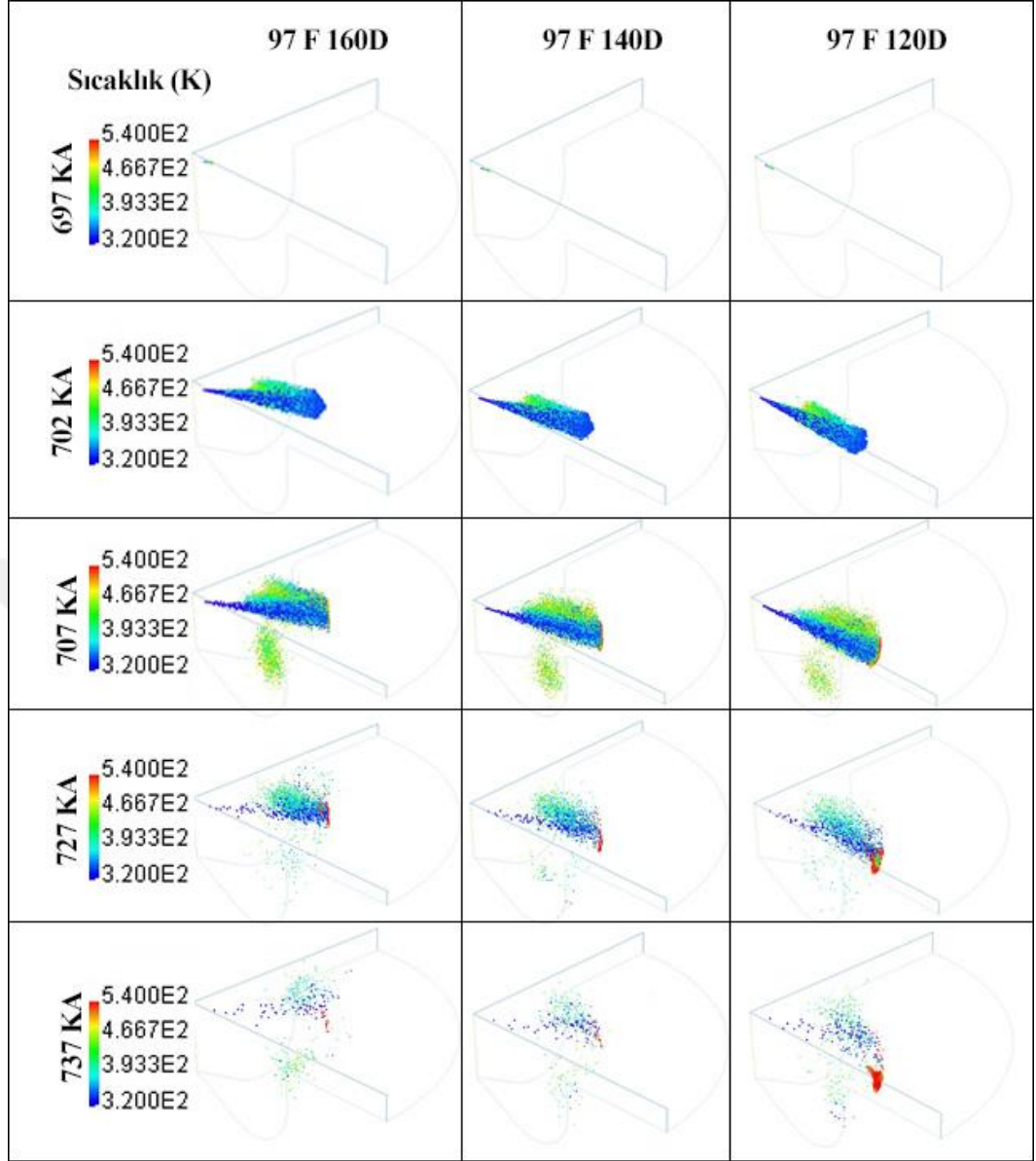
Şekil 6.26 Farklı püskürtme açılarındaki basınç değişimleri (97F)

Yakıtın silindir içerisine 120° açı ile püskürtüldüğünde ise 160° ile püskürtme sonucunda oluşan değerlere kıyasla; silindir içi maksimum basıncın %2,04 ve silindir içi sıcaklığın ise %2,03 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 6.26 ve Şekil 6.27).



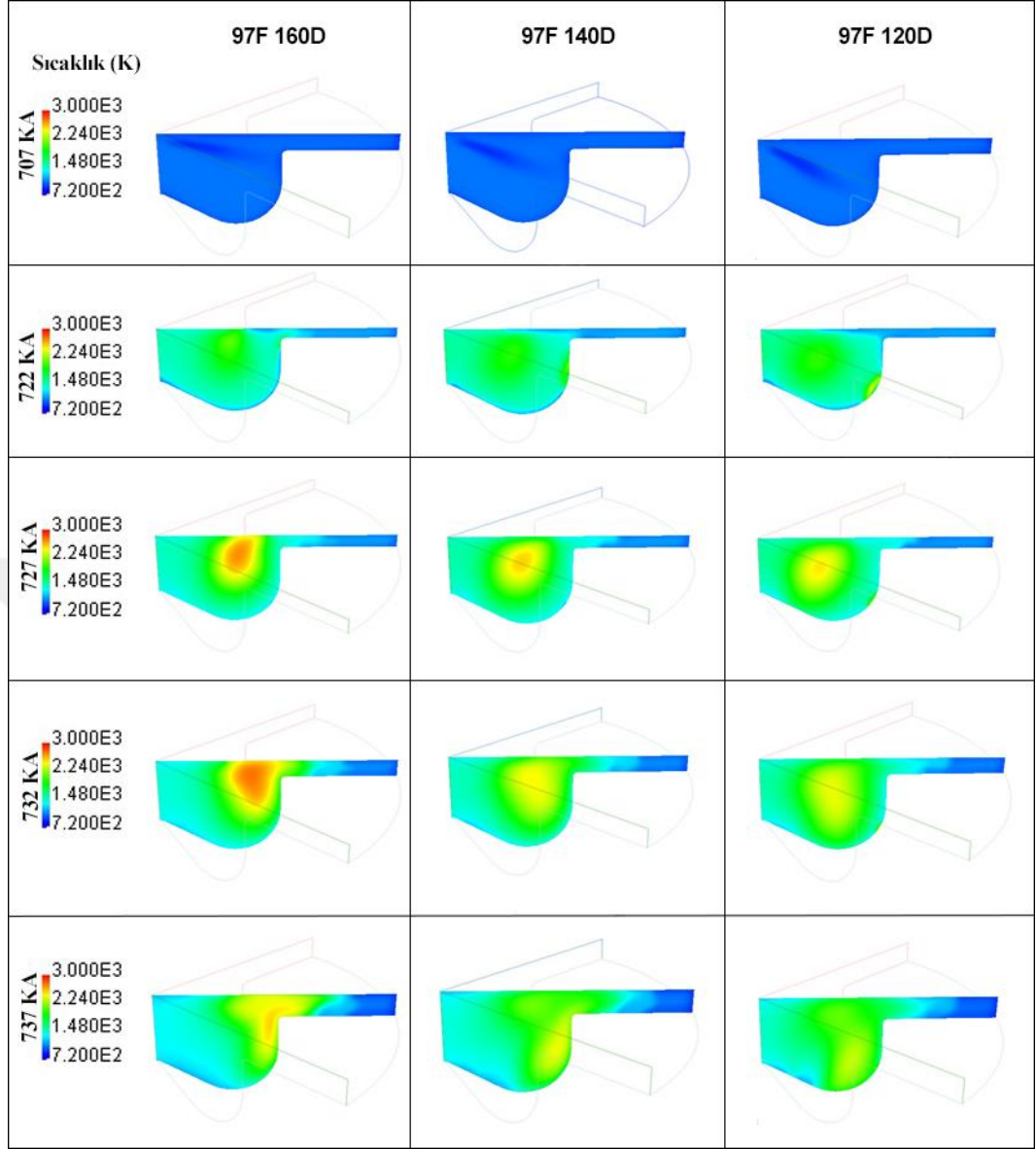
Şekil 6.27 Farklı püskürtme açılarındaki basınç ve sıcaklık değişimleri (97F)

Şekil 6.28’de yakıtın krank açısına bağlı olarak; belirlenen püskürtme açısı değerlerindeki kütlelesel değişim ve sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



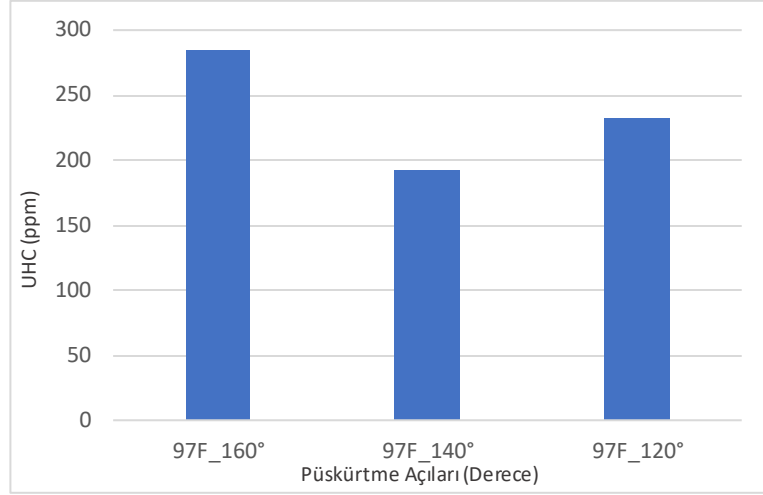
Şekil 6.28 Farklı püskürtme açılarında yakıt damlacıklarının sıcaklık değişimi (97F)

Şekil 6.29’da kesiti alınan yanma odasının belirli krank açılarındaki sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



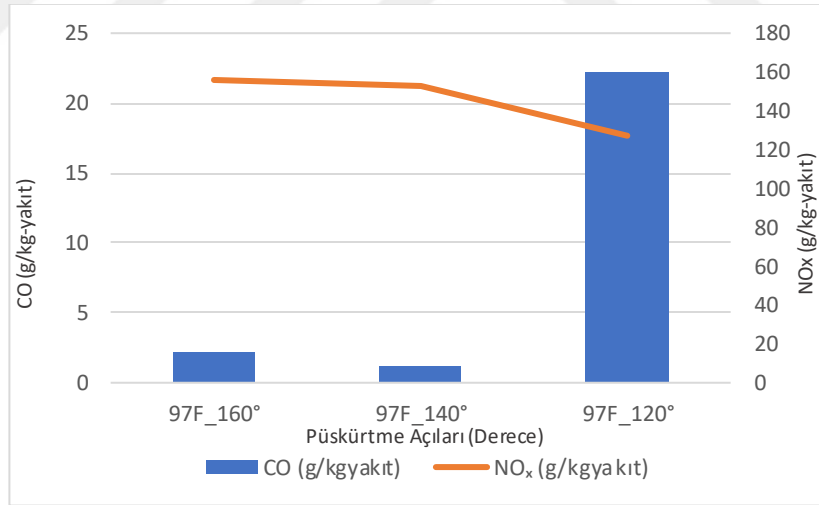
Şekil 6.29 Farklı püskürtme açılarında silindir içi sıcaklık değişimi (97F)

140° açı ile püskürtülen yakıt ile çalıştırılan motorda; 160° açı ile püskürtülen yakıt ile elde edilen değerlerle kıyaslandığında; CO, NO_x ve UHC emisyonlarında olumlu yönde değişim olduğu tespit edilerek, sırasıyla %49,42, %1,83 ve %32,62 oranında azalma gözlenmiştir.



Şekil 6.30 Farklı püskürtme açılarına bağlı olarak UHC salımı değişimi (97F)

120° açı ile püskürtüldüğünde ise; 160° açı ile püskürtülen yakıt ile elde edilen değerlerle kıyaslandığında UHC ve NO_x değerlerinde sırasıyla %18,32 ve %18,41 azalma gözlenirken CO emisyonu değer olarak 10 kat artmıştır (Şekil 6.30 ve Şekil 6.31).



Şekil 6.31 Farklı püskürtme açılarında CO ve NO_x salımı değişimi (97F)

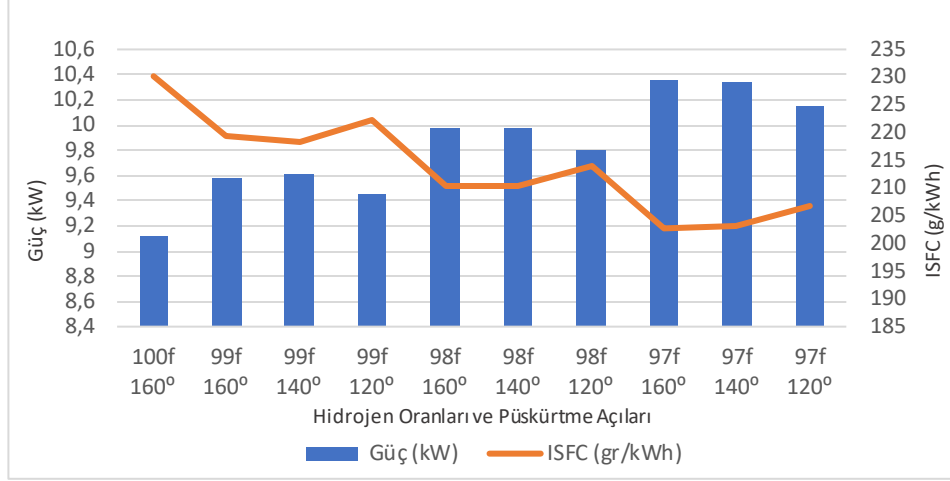
BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

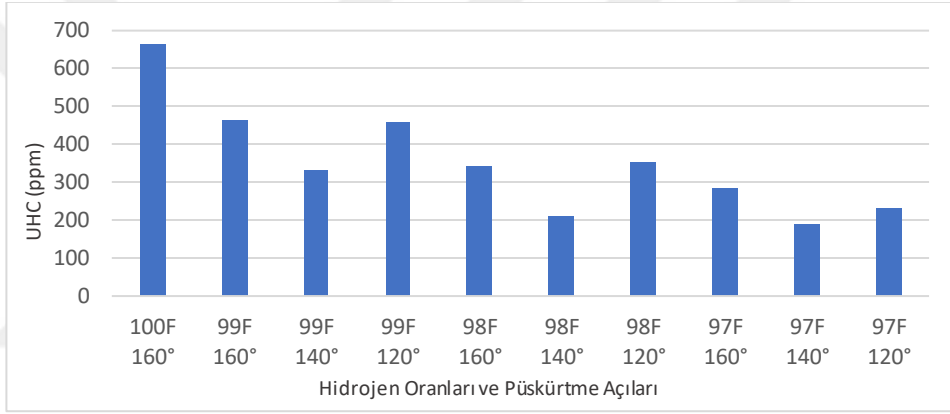
Antor 4LD 820 model tek silindirli 4 zamanlı dizel motoru enjektördeki delik sayısının dört olmasından dolayı hızlı analiz yapabilmek adına 90° lik kesit olarak modellenmiş, n-Heptane yakıtı ile çalıştırılarak; silindir içi basınç, silindir içi sıcaklık, CO, CO₂, NO_x, UHC emisyonları değerlendirilmiştir.

Ayrıca emme havasına ilave olarak %1, %2 ve %3 oranlarında hidrojen ilavesi yapılarak ortaya çıkan yeni bulgular değerlendirilmiştir. Değerlendirmenin sonucuna göre; hidrojen ilavesi ile silindir içerisindeki sıcaklığın ve basıncın arttığı gözlenmiştir. n-Heptane yakıtı ile hidrojen ilavesiz çalıştırılan dizel motorundan elde edilen verilerle kıyaslandığında; molce %1 hidrojen ilavesi yapılarak çalıştırılan motorda silindir içi maksimum basınç %4,44 oranında, silindir içerisindeki maksimum sıcaklığın ise %4,54 oranında arttığı gözlemlendi. %2 ve %3 hidrojen ilavelerinde ise sırasıyla silindir içi maksimum basıncın %8,88 ve %13,03 oranlarında, silindir içerisindeki maksimum sıcaklık ise %9,29 ve %13,75 oranlarında artış olduğu gözlenmiştir. CO, NO₂, UHC emisyonlarının hidrojen ilavesine bağlantılı bir şekilde düştüğü, NO_x emisyonlarının hidrojen ilavesi ile arttığı tespit edilmiştir. CO₂ emisyonundaki değişim ihmal edilebilir boyutta olmuştur (Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4).

Hidrojen ilavesine bağlı olarak yanma verimlerinin de arttığı ayrıca güç değerlerin de olumlu gelişmeler gözlenmiştir. Özgül yakıt tüketiminin de düştüğü tespit edilmiştir. Şekil 7.1’de hidrojen ilaveleri ve püskürtme açalarına bağlı olarak özgül yakıt harcamaları ve güç verileri verilmiştir.

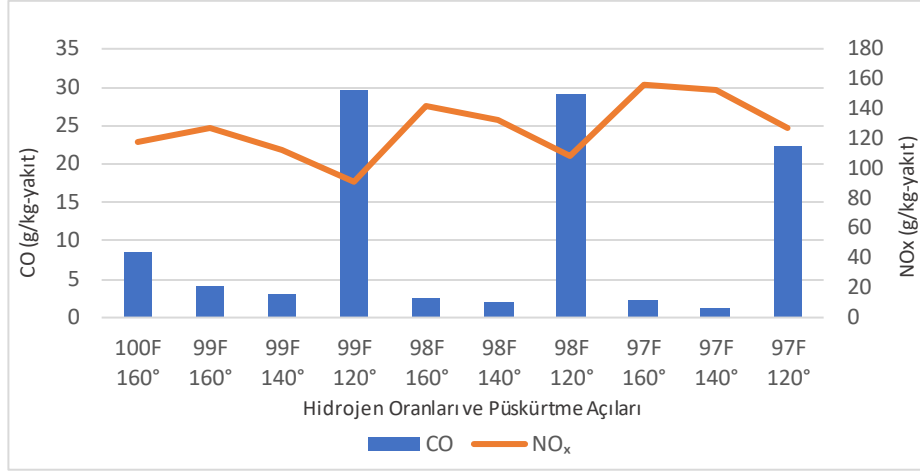


Şekil 7.1 Hidrojen ilavesi ve püskürtme açılarının güç ve özgül yakıt tüketiminin değişimi

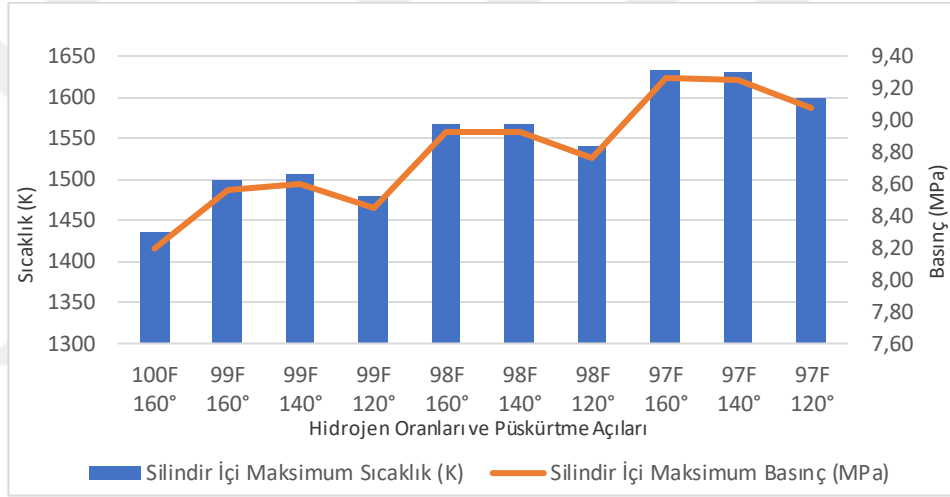


Şekil 7.2 Hidrojen ilavesi ve püskürtme açısının UHC salım değerleri

Emme havası içerisinde yapılan hidrojen ilavesine ek olarak yakıt püskürtme açıları değişikliğinin sonuçları da değerlendirilmiştir. Normalinde 160° püskürtme açısıyla yanma odası içerisinde enjekte edilen yakıt ile çalıştırılan motorun yanma sonuçları değerlendirilerek, 140° ve 120° püskürtme açıları da sonuçlar değerlendirilerek kıyaslanmıştır. Tüm hidrojen ilave oranlarında yakıtın 140° ile püskürtülmesi tüm emisyon değerlerini olumlu yönde değiştirirken, 120° ile püskürtüldüğünde genel olarak silindir içi maksimum sıcaklığın ve basıncın düştüğü ayrıca CO emisyonunda ciddi artışlar gözlenmiştir. CO₂ emisyonunda ise değişim ihmal edilebilir boyuttadır.



Şekil 7.3 Hidrojen ilavesi ve püskürtme açısına bağlı olarak CO ve NO_x salım değerleri değişimi



Şekil 7.4 Hidrojen ilavesi ve püskürtme açısına bağlı olarak silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri değişimi

Emme havası içerisinde molce %1 oranında hidrojen ilavesi yapılan ve 160° ile püskürtülen yakıt ile gerçekleştirilen motor yanma verilerine kıyaslandığında; 140° ile püskürtüldüğünde silindir içi maksimum basınç ve sıcaklığın sırasıyla %0,40 ve %0,44 oranlarında arttığı, CO, UHC, NO_x emisyonlarının sırasıyla %26,16, %28,32 ve %11,28 oranlarında azalarak iyileştiği gözlenmiştir. 120° püskürtüldüğünde ise silindir içi maksimum basınç ve sıcaklığın 160° lik püskürtme açısıyla elde edilen yanma verilerine kıyasla sırasıyla %1,26 ve %1,29 oranında düşüş olduğu, UHC ve NO_x emisyonlarında sırasıyla %1,8 e %28,47 oranında azaldığı ancak CO emisyonunda 7,32 kat ciddi bir artış gözlenmiştir.

Emme havası içerisine molce %2 oranında hidrojen ilavesi yapılan ve 160° ile püskürtülen yakıt ile gerçekleştirilen motor yanma verilerine kıyaslandığında; 140° ile püskürtüldüğünde silindir içi maksimum basınç ve sıcaklığın sırasıyla önemli bir fark gözlenmezken, CO, UHC, NO_x emisyonlarının sırasıyla %17,17, %38,84 ve %6,88 oranlarında azalarak iyileştiği gözlenmiştir. 120° püskürtüldüğünde ise silindir içi maksimum basınç ve sıcaklığın 160° lik püskürtme açısıyla elde edilen yanma verilerine kıyasla sırasıyla %1,73 ve %1,76 oranında düşüş olduğu, NO_x emisyonunun %23,55 oranında azaldığı ancak UHC emisyonunun %3,30 oranında arttığı, CO emisyonunda 11,68 kat ciddi bir artış gözlenmiştir.

Emme havası içerisine molce %3 oranında hidrojen ilavesi yapılan ve 160° ile püskürtülen yakıt ile gerçekleştirilen motor yanma verilerine kıyaslandığında; 140° ile püskürtüldüğünde silindir içi maksimum basınç ve sıcaklığın sırasıyla %0,18 ve %0,12 oranlarında düştüğü, CO, UHC, NO_x emisyonlarının sırasıyla %49,42, %32,62 ve %1,83 oranlarında azalarak iyileştiği gözlenmiştir. 120° püskürtüldüğünde ise silindir içi maksimum basınç ve sıcaklığın 160° lik püskürtme açısıyla elde edilen yanma verilerine kıyasla sırasıyla %2,04 ve %2,03 oranında düşüş olduğu, UHC ve NO_x emisyonlarında sırasıyla %18,32 e %18,41 oranında azaldığı ancak CO emisyonunda 10 kat ciddi bir artış gözlenmiştir.

Çalışmanın uygulama kısmı ile ilgili birtakım kısıtlar bulunmaktadır. Bu kısıtlar aşağıda verilmiştir;

- Çalışma, pandemi sürecinde gemi yakıtları ve hidrojen tedarik sürecini olumsuz etkilemesine bağlı olarak Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Antor 4LD 820 model dizel motor üzerinde deneysel olarak gerçekleştirilememiştir.
- Sayısal çalışmada HFO yakıt ve sonuçlarını analiz edebilmek için model bir yakıt olmamasından dolayı çalışma ağır gemi yakıtlarının etkileri üzerine çalışılamamıştır.
- Kullanılan programda kükürt oksit salımı sonucu alınamamaktadır.

Gelecek alışmalar için kısıtlar da göz önünde bulundurularak değerlendirme yapıldığında aşağıdaki önerilerde bulunulabilir;

- HFO yakıt katılarak elde edilen yakıt karışımları ile motor çalıştırılarak deneysel çalışma yapılabilir; hidrojen ilavesinin gemi yakıtı olan HFO yakıt karışımlarındaki yakıt ile çalıştırıldığında ortaya çıkacak olan sonuçlar değerlendirilebilir.
- Kükürt içeren gemi yakıtları ile çalışılarak, hidrojen ilavesinin sülfür oksit değerlerine etki edip etmeyeceği gözlemlenebilir.
- Sayısal analiz ile, oluşturulan model motorun emme havası içerisine hidrojen ilave edilmesi ve farklı enjektör konik açılarıyla yakıtın püskürtülmesine ek olarak; egzoz gaz yeniden sirkülasyonu (EGR) kullanılarak, hidrojen ilavesi ile artığı gözlemlenen NO_x değerlerinin optimizasyon çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Agarwal, D., Sinha, S., ve Agarwal, K. A. (2006). Experimental investigation of control of nox emissions in biodiesel-fueled compression ignition engine. *Renewable Energy*, 31 (14), 2356-2369.
- Akbalık, Z. (2019). *Hidrojen ve su buharı enjeksiyonunun dizel motor performans ve egzoz emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Aktaş, A., ve Şahin, Ö. (2009). Dizel/biyodizel Karışımı İle Çalışan Bir Motorun Performans ve Emisyon Değerlerini İyileştirmek İçin Hidrojen Kullanılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14, 87-95.
- Alozie, N. S., ve Ganippa, C. L. (2020). *Introduction to diesel emissions*. 10 Haziran 2020, <https://www.intechopen.com/books/introduction-to-diesel-emissions>.
- Anderson, W. K., Gropp, W. D., Kaushik, D. K., Keyes, D. E., ve Smith, B. F. (1999). Achieving high sustained performance in an unstructured mesh CFD application. *In Proceedings of the 1999 ACM/IEEE Conference on Supercomputing*, 69.
- Ansys. (2020a). *Ansys forte user's guide*. 14 Temmuz 2020, https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/forte_ug/i38825.html.
- Ansys. (2020b). *Ansys forte theory manual*. 14 Temmuz 2020, https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/forte_th/pgfId-1055016.html.

Ansyc. (2020c). *Reduced mechanisms for diesel engine applications*. 14 Temmuz 2020,

https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/forte_ug/pgfId-1078552.html.

Antor. (2020). *Antor motor broşür*. 21 Mayıs 2020,

https://www.anadolumotor.com/uploads/Antor_4LD_820.pdf.

Arkas Bunker. (2020). *Yakıt ikmali*. 4 Haziran 2020,

http://www.arkasbunker.com/bunker_hakkinda.html.

Baltacıoğlu, M. K. (2016). *Hidroksi (hho) ve hidrojen (h2) ile zenginleştirilmiş sıkıştırılmış doğal gazın (cng) biyodizel yakıtlı dizel motorlarda kullanımı*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Basille, A. ve Ghasemzadeh, K. (2020). *Current trends and future developments on (bio-) membranes*. (1. Baskı). İtalya: Elsevier.

BP. (2019). *Statistical review of world energy*. 20 Mayıs 2020,

<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.

Bureau Veritas. (2009). *Guidelines for fuel cell systems onboard commercial ships*. 13

Haziran 2020, <https://marine-offshore.bureauveritas.com>.

Brynof, S., Fridell, E., ve Andersson, K. (2014). Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of Cleaner Production*, 74, 86-95.

- Chen, P.-C., Wang, W.-C., Roberts, W. L., ve Fang, T. (2013). Spray and atomization of diesel fuel and its alternatives from a single-hole injector using a common rail fuel injection system. *Fuel*, 103, 850-861.
- Chong , K. J., ve Bridgwater, A. V. (2016). Fast pyrolysis oil fuel blend for marine vessels. *Environmental Progress ve Sustainable Energy*, 36 (3), 677-684.
- Ciniviz, M., ve Köse, H. (2012). Hydrogen use in internal combustion engine: a review. *Academic Paper*, 2-13.
- Corbett , J. J., ve Winebrake, J. J. (2012). Emissions tradeoffs among alternative marine fuels: total fuel cycle analysis of residual oil, marine gas oil, and marine diesel oil. *Technical Paper*, 58, 538-542.
- Crookes, R. J., ve Bob-Manuel, K. D. (2007). RME or DME: A preferred alternative fuel option for future diesel engine operation. *Energy Conversion and Management*, 48 (11), 2971-2977.
- Davis., B. J. (2010). *Energy today hydrogen fuel*. (1. Baskı). New York: Chelsea Club House.
- Demirci, A. (2010). *Elektroliz yöntemi ile elde edilen hidrojenin dizel motor dolgusuna ilavesinin performans ve emisyonlara etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Deniz, C., ve Zincir, B. (2016). Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production*, 113, 438-449.
- Drake, M. C., ve Blint, R. J. (1991). Calculations of NO_x formation pathways in propagating laminar, high pressure premixed CH₄/air flames. *Combustion Science and Technology*, 75 (4-6), 261-285.

- Erman, C. (2007). *Hidrojenin ek yakıt olarak kullanılmasının dizel motora etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Exxon Mobile. (2020). *Commercial fuel*. 24 Mayıs 2020, <https://www.exxonmobil.com/en-GB/Commercial-Fuel/pds/GL-XX-RMFO>.
- Fahim, M. A., Alsahhaf, T. A., ve Elkilani, A. (2009). *Fundamentals of petroleum refining*. (1. Baskı). Kuveyt: Elsevier.
- Fuels Europe. (2019). *Statistical report*. 20 Mayıs 2020, <https://www.fuelseurope.eu/publication/statistical-report-2019>.
- Greeves, G., Khan, I. M., Wang, C. H., ve Fenne, I. (1977). Origins of hydrocarbon emissions from diesel engines. *SAE International*, 86 (2), 1235-1251.
- Grimes, C. A., Varghese, O. K., ve Ranjan, S. (2008). *The solar generation of hydrogen by water photoelectrolysis*. (2. Baskı). Pensilvanya: Springer.
- Gupta, R. B. (2009). *Hydrogen fuel: production transport and storage*. (2. Baskı). USA: CRC.
- Gülmez, Y. (2017). *Dizel makinelerde yakıt püskürtme değişkenleri ile egzoz salımı ilişkisi üzerine deneysel bir araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Hawley, J. G., Brace, C. J., ve Wallace, F. J. (1998). *Handbook of air pollution from internal combustion engines*. (1. Baskı). Londra: Academic Press.
- Herdzik, J. (2011). LNG as a marine fuel; possibilities and problems. *Journal of Kones Powertrain and Transport*, 18 (2), 170-175.

- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. (2. Baskı) USA: McGraw Hill.
- Hoekman, S. K., ve Robbins, C. (2012). Review of the effects of biodiesel on NOx emissions. *Fuel Processing Technology*, 96, 237-249.
- IMO. (2020a). *Pollution prevention*. 4 Mayıs 2020, [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93Regulation-14.aspx).
- IMO. (2020b). *Emission control areas*. 4 Mayıs 2020, [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx).
- IMO. (2020c). *Low carbon shipping and air pollution control*. 4 Mayıs 2020, <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Pages/default.aspx>.
- ISO. (2020). *Specifications of marine fuels*. 4 Mayıs 2020, <https://www.iso.org/standard/64247.html>.
- Jamal, Y., & Wyszynski, M. L. (1994). On-board generation of hydrogen-rich gaseous fuels—a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19(7), 557-572.
- Jonson, J. E., Tarrason, L., Klein, H., Vestreng, V., Cofala, J., ve Whal, C. (2014). Effects of ship emissions on European ground-level ozone in 2020. *International Journal of Remote Sensing*, 30 (15-16), 4099–4110.
- Karagöz, Y., Güler, İ., Sandalcı, T., Yüksek, L., ve Dalkılıç, A. S. (2016). Effect of hydrogen enrichment on combustion characteristics, emissions and performance of a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 656-665.

- Karim, G. A., (2012). *Fuels, energy, and the environment* (1. Baskı). USA: CRC Press.
- Kim, H., Koo, K. Y., ve Joung, T. H. (2020). A study on the necessity of integrated evaluation. *Journal of International Maritime Safety, Environmental*, 4 (2), 26-31.
- Kjartansson, S. (2011). *A feasibility study on lpg as marine fuel*. Yüksek Lisans Tezi, Chalmers Teknoloji Üniversitesi, İsveç.
- Kobori, S., Kamimoto, T., ve Aradi, A. A. (2000). A study of ignition delay of diesel fuel sprays. *International Journal of Engine Research*, 1 (1), 29-38.
- Lee, S. M., ve Lee, Y. H. (2000). Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 76 (20), 2877-2879.
- Ley, M. B., Jepsen, L. H., Lee, Y. S., ve Cho, Y. W. (2014). Complex hydrides for hydrogen storage new perspectives. *Materials Today*, 17 (3), 112-128.
- Loganathan, M., Thanigaivelan, V., Madhavan, V. M., Anbarasu, A., ve Velmurugan, A. (2020). The synergetic effect between hydrogen addition and EGR on cashew nut shell liquid biofuel-diesel operated engine. *Fuel*, 266, 1-9.
- MAN. (2020a). *Two stroke technology*. 4 Mayıs 2020, <https://marine.man-es.com/technology/low-speed-technology>.
- MAN. (2020b). *2 stroke engines*. 4 Mayıs 2020, <https://marine.man-es.com/two-stroke/2-stroke-engines>.
- Marquard Bahls. (2020). *Marine fuels*. 4 Mayıs 2020, <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-fuels-bunker-fuels.html>.

- Miyamoto, T., Hasegawa, H., Mikami, M., Kojima, N., Kabashima, H., ve Urata, Y. (2011). Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (20), 13138-13149.
- Mollenhauer, K., ve Tschoeke, H. (2010). *Handbook of diesel engines*. (1. Baskı). Berlin: Springer Bosch.
- Morgan, W. K., Reger, R. B., ve Tucker, D. M. (1997). Health effects of diesel emissions. *Annals of Occupational Hygiene*, 41 (6), 643-658.
- Mylona, S. (1996). Sulphur dioxide emissions in Europe 1880–1991 and their effect on sulphur concentrations and depositions. *Tellus*, 48, 662-689.
- Nag, S., Sharma, P., Gupta, A., ve Dhar, A. (2019). Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (23), 12163-12175.
- Nuran, M. (2014). *Gemi makineleri işletme mühendisliği ekonomisi; alternatif enerji kaynakları için karşılaştırmalı maliyet analizi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Okada, Y., Sasaki, E., Watanabe, E., Hyodo, S., ve Nishijima, H. (2006). Development of dehydrogenation catalyst for hydrogen generation in organic chemical hydride method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31 (10), 1348-1356.
- Okubo, M., ve Kuwahara, T. (2020). *New technologies for emission control in marine diesel engines*. (1. Baskı). İngiltere: Butterworth Heinemann.
- Özdemir, Z. Ö., ve Mutlubaş, H. (2019). Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri, *Jonas*, 2 (1), 16-34.

- Pagliari, M., Konstandopoulos, A. G., Ciriminna, R., ve Palmisano, G. (2010). Solar hydrogen: fuel of the near future. *Energy and Environmental Science*, 3, 279-287.
- Pan, H., Pournazeri, S., Princevac, M., Miller, J. W., Mahalingam, S., Khan, M. Y., ve diğeri. (2014). Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (21), 11336-11345.
- Park, S. (2012). Optimization of combustion chamber geometry and engine operating conditions for compression ignition engines fueled with dimethyl ether. *Fuel*, 97, 61-71.
- Patel, A., Kong, S.-C., ve Reitz, R. D. (2004). Development and validation of a reduced reaction mechanism for hcci engine simulations. *Sae Technical Paper Series*, 14-16.
- Petzold, A., Lauer, P., Fritsche, U., Hasselbach, J., Lichtenstern, M., Schlager, H., ve Fleischer, F. (2011). Operation of marine diesel engines on biogenic fuels: modification of emissions and resulting climate effects. *Environmental Science and Technology*, 45 (24), 10394-10400.
- Power. (2019). *Feasibility of hydrogen bunkering*. 20 Mayıs 2020. <https://northsearegion.eu/media/9385/feasibility-of-hydrogen-bunkering-final-080419.pdf>.
- Pulkrabek, W. W. (1997). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. (1. Baskı). USA: Prentice Hall.
- Reşitoğlu, İ. A., Altinişik, K., & Keskin, A. (2015). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(1), 15-27.

- Ryu, Y., ve Dan, T. (2012). Combustion and emission characteristics of diesel engine by mixing dme and bunker oil. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 36 (7), 885-893.
- Seddiek, I. S., Elgohary, M. M., ve Ammar, N. R. (2015). The hydrogen-fuelled internal combustion engines for marine applications with a case study. *Brodogradnja*, 66, 23-38.
- Shell. (2020a). *Marine fuels*. 4 Mayıs 2020, <https://www.shell.com/business-customers/marine/fuel.html>.
- Shell. (2020b). *Global marine fuels network*. 4 Mayıs 2020, <https://www.shell.com/business-customers/marine/fuel/marine-network.html>.
- Solway, A. (2008). *Energy for the future and global warming; hydrogen fuel*. (1. Baskı). New York: Gareth Stevens.
- Stamirowska, Z. K. (2020). Network effects govern the evolution of maritime trade. *PNAS*, 117 (23), 1-10.
- Sydbom, A., Blomberg, A., Parnia, S., Stenfors, N., Sandström, T., ve Dahlen, S.-E. (2001). Health effects of diesel exhaust emissions. *European Respiratory Journal*, 17, 733-746.
- Şahin, Ö. (2009). *Biyodizel ile çalışan bir motora hidrojen ilave edilmesinin motor performansına ve emisyonlara etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Talibi, M., Hellier, P., Balachandran, R., ve Ladommatos, N. (2014). Effect of hydrogen-diesel fuel co-combustion on exhaust emissions with verification using an inecylinder gas sampling technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (27), 15088-15102.

- Yoo, J. B., Kim, H. S., Kang, S. H., Lee, B., ve Hur, H. N. (2014). Hollow nickel-coated silica microspheres containing rhodium nanoparticles for highly selective production of hydrogen from hydrous hydrazine. *The Royal Society of Chemistry*, 2 (44), 18929–18937.
- Yuan, C., Han, C., Liu, Y., He, Y., Shao, Y., ve Jian, X. (2018). Effect of hydrogen addition on the combustion and emission of a diesel free-piston engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (29), 13583-13593.
- Zervas, E., Montagne, X., ve Lahaye, J. (2001). Emission of specific pollutants from a compression ignition engine. Influence of fuel hydrotreatment and fuel/air equivalence ratio. *Atmospheric Environment*, 35 (7), 1301-1306.
- Züttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *The Science of Nature*, 91 (4), 157-172.