

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİZEL MAKİNELERDE YAKIT PÜSKÜRTME
DEĞİŞKENLERİ İLE EGZOZ SALIMI İLİŞKİSİ
ÜZERİNE DENEYSEL BİR ARAŞTIRMA**

Yiğit GÜLMEZ

Temmuz, 2017

İZMİR

DİZEL MAKİNELERDE YAKIT PÜSKÜRTME DEĞİŞKENLERİ İLE EGZOZ SALIMI İLİŞKİSİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ARAŞTIRMA

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Deniz

Ulaştırma Sistemleri Programı

Yiğit GÜLMEZ

Temmuz, 2017

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

YİĞİT GÜLMEZ, tarafından YRD. DOÇ. DR. MUSTAFA NURAN yönetiminde hazırlanan “DİZEL MAKİNELERDE YAKIT PÜSKÜRTME DEĞİŞKENLERİ İLE EGZOZ SALIMI İLİŞKİSİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ARAŞTIRMA” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Yrd. Doç. Dr. Mustafa NURAN

Yönetici

.....
YRD. DOÇ. DR. MEHMET MURAT ZORAS Yrd. Doç. Dr. Gökhan Gürlek

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

.....

Prof. Dr. Emine İlknur CÖCEN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bana daima yardımcı olan, her aşamada bilgi ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa NURAN'a ve tezimde kullanılan deney setinin kurulum aşamasında destek olan anabilim dalı başkanımız Prof. Dr. A. Güldem CERİT'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen değerli dostum ve meslektaşım Araş. Gör. Olgun KONUR'a ve yapmış olduğum çalışmalarda kullanılan yakıt çeşitlerinin temini ve analizleri hususunda destek olan Tüpraş İzmir Rafineri Müdürlüğü ve değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Akademik kariyere başlamam konusunda beni cesaretlendiren ve bana her zaman destek olan değerli eşim ve meslektaşım Araş. Gör. Seçil GÜLMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Yiğit GÜLMEZ

DİZEL MAKİNELERDE YAKIT PÜSKÜRTME DEĞİŞKENLERİ İLE EGZOZ SALIMI İLİŞKİSİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ARAŞTIRMA

ÖZ

Büyümekte olan küresel ekonomi, sanayileşme, nüfus artışı, kentleşme ve gelişmiş enerji erişimi ihtiyacı küresel enerji talebini hızla arttırmaktadır. Dünya enerji pazarının geleceği üzerine yürütülen tahminlerde 50 yıllık yakın gelecekte enerji talebinin karşılanmasında fosil yakıtların günümüzde olduğu gibi en yüksek orana sahip kaynak olacağı öngörülmektedir. Ancak fosil yakıtlardan enerji üretimi hava kirliliğinin ve küresel ısınmanın başlıca sebebidir. Fosil yakıtlar kullanılarak enerji üretimi sağlayan makinelerin daha düşük oranlarda salım yapmasının sağlanabilmesi çevreye verilen zararların indirgenebilmesi için oldukça önemlidir. Fosil yakıtlar kullanılarak enerji üretimi yapan dizel motorlar yüksek termal verimi sebebiyle enerji üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Dizel motorların çalışması sırasında ortaya çıkan hava kirletici maddelerin salım oranlarının azaltılması için uygulanabilecek çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler; motorun çalışma parametreleri üzerinde yapılan değişikliklerle egzoz salımlarının azaltılması, egzoz gazı resirkülasyonu sistemleri kullanılarak egzoz salımlarının azaltılması ve egzoz gazı son işleme sistemleri kullanılarak oluşan hava kirleticilerin atmosfere salınmadan önce ortadan kaldırılması veya çevreye daha az zararlı hale getirilmesi olarak sıralanabilir. Dizel motorlarda silindir içerisine yakıt püskürtme ve emme havası gönderimi stratejilerinde yapılan değişikliklerle egzoz salımlarının kontrolü mümkün olmaktadır. Bu tezde farklı yakıtların kullanımında yakıt püskürtme stratejisinde yapılabilecek değişikliklerden püskürtme basıncı ve püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin egzoz salımları ve motor performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, yakıt olarak motorin, denizcilik motorini ve denizcilik motorini içeriğine yüzde 5 oranda artık denizcilik yakıtı eklenerek hazırlanmış yakıt karışımı kullanılan tek silindirli, 11,4 kw gücünde bir dizel motorda püskürtme basıncının sırasıyla 180, 200 ve 220 bar basınçlarına ve püskürtme zamanlamasının sırasıyla üst ölü noktanın 15, 20 ve 25 derece öncesine alınmasının motor egzoz sıcaklığı, özgül yakıt harcaması ve egzoz gazı içeriğindeki karbondioksit, karbonmonoksit, oksijen, kükürtdioksit ve azot oksitler oranları

zerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre dizel motorlarda yakıt püskürtme stratejisinin kullanılan yakıt tipine, motor yüküne ve çevresel koşullara baēlı olarak belirlenmesiyle çevreye verilen zararın önemli oranda azaltılabileceēi sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dizel motorlar, egzoz salımları, yakıt püskürtme stratejisi, denizcilik yakıtları



AN EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE RELATIONS OF FUEL INJECTION VARIABLES AND EXHAUST EMISSIONS FOR DIESEL ENGINES

ABSTRACT

Growing global economy, industrialization, population growth, urbanization and improved need for energy access cause rapid increase of global energy demand. Studies on estimation of the future of energy market argues the fact energy production from fossil fuels will still be dominant on global energy market in the next 50 years. However, energy production from fossil fuels is the main cause of air pollution and global warming. Diesel engines that generate energy by using fossil fuels are often preferred for energy production due to high thermal efficiency. There are various methods that can be applied to reduce the emission rates of air pollutants during the operation of diesel engines. These methods include; reduction of exhaust emissions by changes in engine operating parameters, reduction of exhaust emissions using exhaust gas recirculation systems, and removal of air pollutants using exhaust gas aftertreatment systems. In diesel engines it is possible to control the exhaust emissions by changing fuel injection and intake air supply strategies. In this thesis, influence of changes in injection pressures and injection timing on exhaust emissions and motor performance in the use of different fuels have been investigated. For this purpose, tests were conducted on a one cylinder, 11.4 kw diesel engines to investigate effects of different injection pressures (180, 200 and 220 bar) and different injection timings (15, 20 and 25 crank angle degree before top death center) by using diesel oil, marine diesel oil and fuel blend (95 percent marine diesel oil and 5 percent marine residual fuel) as fuel on specific fuel consumption, exhaust temperatures and carbon dioxide, carbon monoxide, oxygen, sulfur dioxide and nitrogen oxides emissions. The results of the test indicate the fact that diesel engines based air pollution can be reduced by using optimum injection strategy determined according to fuel type, engine load and environmental conditions.

Keywords: Diesel engines, exhaust emissions, fuel injection strategy, marine fuels

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - DİZEL MOTORLAR VE YAKITLAR.....	3
2.1 Dizel Motorların Tarihçesi.....	3
2.2 Dizel Yakıtların Özellikleri ve Sınıflandırılması.....	7
2.2.1 Dizel Yakıtların Özellikleri.....	7
2.2.1.1 Setan Sayısı.....	7
2.2.1.2 Viskozite.....	10
2.2.1.3 Isıl Değer	11
2.2.1.4 Yoğunluk.....	12
2.2.1.5 Uçuculuk	14
2.2.1.6 Kül Miktarı.....	14
2.2.1.7 Yağlama Özelliği.....	15
2.2.1.8 Kükürt Oranı.....	17
2.2.1.9 Karbon Kirliliği.....	18
2.2.1.10 Akma Noktası.....	19
2.2.1.11 Bulutlanma Noktası.....	20
2.2.1.12 Parlama Noktası.....	21
2.2.1.13 Kararlılık	22
2.2.1.14 Su ve Tortu Miktarı.....	23
2.2.2 Dizel Yakıtların Sınıflandırılması.....	25
2.2.2.1 ASTM Standartlarına Göre Yakıt Sınıflandırılması.....	25

2.2.2.2 Avrupa Standartlarına Göre Yakıt Sınıflandırması.....	28
2.2.2.3 Denizcilik Endüstrisinde Kullanılan Yakıtlar İçin Yapılan Sınıflandırmalar	32
2.3 Dizel Motorlarda Yanma.....	34
2.3.1 Tutuşma Gecikmesi.....	37
2.3.2 Ani Yanma Periyodu.....	39
2.3.3 Kontrollü Yanma Periyodu.....	39
2.3.4 Art Yanma Periyodu.....	41

BÖLÜM ÜÇ - DİZEL MOTORLAR KAYNAKLI HAVA KİRLETİCİ ÇEŞİTLERİ42

3.1 Dizel Motorlar Kaynaklı Hava Kirleticilerin Oluşumu.....	42
3.1.1 Partiküller ve İs.....	43
3.1.2 Karbonmonoksit	44
3.1.3 Hidrokarbonlar	45
3.1.4 Kükürt Oksitleri	46
3.1.5 Azot Oksitleri	46
3.2 Dizel Motorlarda Egzoz Gazında Hava Kirleticilerin Oranlarının Düşürülmesi İçin Kullanılan Yöntemler.....	47
3.2.1 Yakıt Püskürtme Stratejisinde Yapılan Değişikliklerle Egzoz Salımlarının Azaltılması.....	47
3.2.2 Emme Havası Üzerinde Yapılan Değişikliklerle Egzoz Salımlarının Azaltılması	51
3.2.3 Yanma Odasına Su Gönderimiyle Egzoz Salımlarının Azaltılması....	55
3.2.4 Egzoz Gazı Resirkülasyonu Sistemi Kullanılarak Egzoz Salımlarının Azaltılması	56
3.2.5 Egzoz Gazı Son İşleme Sistemleri Kullanılarak Egzoz Salımlarının Azaltılması	58

BÖLÜM DÖRT - LİTERATÜR TARAMASI.....64

BÖLÜM BEŞ - MATERYAL VE YÖNTEM.....75

5.1 Deneylerde Kullanılan Materyaller ve Yakıtlar.....	75
5.1.1 Dizel Motor.....	75
5.1.2 Enjektör Test Cihazı.....	77
5.1.3 Deneylerde Kullanılan Yakıtlar.....	77
5.2 Deneylerde Kullanılan Ölçü Aletleri.....	79
5.2.1 Motor Dinamometresi ve Yük Hücresi.....	79
5.2.2 Egzoz Gazı Analizörü.....	81
5.2.3 Yakıt Debi Ölçeri.....	83
5.2.4 Nem ve Sıcaklık Ölçer.....	84
5.3 Deneylerde Kullanılan Yöntemler.....	85
5.4 Deney Sonuçları Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar.....	86
BÖLÜM ALTI – DENEY SONUÇLARI VE BULGULAR.....	89
BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR.....	103
KAYNAKLAR	112

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Dizel motorlarda yanma safhaları.....	37
Şekil 3.1 Dizel motorlarda egzoz gazında bulunan maddeler.....	42
Şekil 3.2 Hava kirleticilerin oransal dağılımı.....	43
Şekil 3.3 Püskürtme avansının basınç değişimine etkisi.....	50
Şekil 5.1 Test düzeneği.....	75
Şekil 5.2 Test motoru.....	76
Şekil 5.3 Enjektör test cihazı.....	77
Şekil 5.4 Motor dinamometresi.....	80
Şekil 5.5 Yük hücresi.....	81
Şekil 5.6 Egzoz gazı analizörü ve yardımcı ekipmanları.....	82
Şekil 5.7 Yakıt debi ölçeri.....	84
Şekil 5.8 Yakıt tankı.....	84
Şekil 6.1 Farklı yakıt tipleri ve değişken motor hızlarında elde edilen maksimum tork değerleri	89
Şekil 6.2 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin NO _x salımları üzerindeki etkileri	91
Şekil 6.3 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin CO salımları üzerindeki etkileri	92
Şekil 6.4 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin yakıt harcamaları üzerindeki etkileri	93
Şekil 6.5 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin özgül yakıt harcamı üzerindeki etkileri	93
Şekil 6.6 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin CO ₂ salımları üzerindeki etkileri	94
Şekil 6.7 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin O ₂ salımları üzerindeki etkileri	95
Şekil 6.8 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin SO ₂ salımları üzerindeki etkileri	95
Şekil 6.9 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin motor egzoz gazı sıcaklığı üzerindeki etkileri	96

Şekil 6.10 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin motor NO _x salımları üzerindeki etkileri	98
Şekil 6.11 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin motor CO salımları üzerindeki etkileri	99
Şekil 6.12 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin yakıt harcamaları üzerindeki etkileri	99
Şekil 6.13 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin özgül yakıt harcamı üzerindeki etkileri	100
Şekil 6.14 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin motor CO ₂ salımları üzerindeki etkileri	100
Şekil 6.15 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin motor O ₂ salımları üzerindeki etkileri	101
Şekil 6.16 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin motor SO ₂ salımları üzerindeki etkileri	102
Şekil 6.17 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin egzoz sıcaklıkları üzerindeki etkileri	102

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 ASTM D975-16a standardına göre yakıtların sınıflandırması.....	26
Tablo 2.2 ASTM D396-16 standardına göre ağır yakıtların sınıflandırması.....	28
Tablo 2.3 EN 590 standardına göre belirlenen Avrupa’da kullanılan otomobil dizel yakıtları için limitler.....	29
Tablo 2.4 Avrupa Parlamentosu’nun ilgili yönergesine göre lastikli taşıtlar dışında kullanılan 560 kW’ya kadar güce sahip dizel motorların yakıtları için limitler	30
Tablo 2.5 Avrupa Parlamentosu’nun ilgili yönergesine göre lastikli taşıtlar dışında kullanılan 560 kW’nın üstünde güce sahip dizel motorların yakıtları için limitler	31
Tablo 2.6 Denizcilik endüstrisinde kullanılan damıtılmış yakıtlar için belirlenen limitler	33
Tablo 2.7 Denizcilik endüstrisinde kullanılan artık fuel oil yakıtlar için belirlenen limitler	34
Tablo 5.1 Test motoru teknik özellikleri.....	76
Tablo 5.2 Deneylerde kullanılan yakıtlara ait analiz sonuçları.....	78
Tablo 5.3 Deneylerde kullanılan yakıtların farklı sıcaklık değerleri için hesaplanan yoğunluklar	79
Tablo 5.4 Motor dinamometresi teknik özellikleri.....	80
Tablo 5.5 Yük hücresi teknik özellikleri.....	81
Tablo 5.6 Egzoz gazı analizörü teknik özellikleri.....	82
Tablo 5.7 Yakıt debi ölçeri teknik özellikleri.....	83
Tablo 5.8 Nem ve sıcaklık ölçer teknik özellikleri.....	85
Tablo 6.1 Yakıt püskürtme basıncı değişiminin egzoz salımları ve dizel motor performansına etkisinin gözlemlendiği deney sonuçları.....	90

Tablo 6.2 Yakıt püskürtme zamanlaması değişiminin egzoz salımları ve motor performansına etkisinin gözlemlendiği deney sonuçları.....	97
---	----



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Büyümekte olan küresel ekonomi, sanayileşme, nüfus artışı, kentleşme ve gelişmiş enerji erişimi ihtiyacı küresel enerji talebini hızla arttırmaktadır (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı [IRENA], 2017). Günümüzde dünya enerji talebinin karşılanması için alternatif enerji kaynaklarının kullanımı üzerinde birçok gelişmeler yaşanmaktadır. Dünya enerji pazarının geleceği üzerine istatistikler üzerinden tahminler yürütülen çeşitli çalışmalarda (Shell, 2008; Dünya Enerji Konseyi, 2013; Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi Yönetimi [US EIA], 2016) 50 yıllık yakın gelecekte enerji talebinin karşılanmasında alternatif enerji kaynakları kullanımının yükseleceği ancak fosil yakıtların günümüzde olduğu gibi en yüksek orana sahip kaynak olacağı öngörülmektedir.

Fosil yakıtların ideal koşullarda yakılması sonucu karbondioksit (CO_2) ve su buharı ortaya çıkar. Ayrıca çeşitli yanma koşullarında yanma sonucu karbonmonoksit (CO), yanmamış hidrokarbon artıkları (HC), azot oksitleri (NO_x), kükürt oksitleri (SO_x) ve is salımları meydana gelir. Bu hava kirleticilerden karbonmonoksit, hidrokarbonlar ve is kötü veya yetersiz yanma sebebiyle, kükürt oksitleri yakıt içeriğinde bulunan kükürtün oksijenle tepkimeye girmesi sebebiyle, azot oksitler ise yanma odasında meydana gelen ikincil tepkimeler sonucunda oluşur (Velji, Lüft ve Merkel, 2010). İdeal yanma sonucu salımı yapılan CO_2 ve çeşitli sebeplerle ortaya çıkan hava kirleticiler sera gazı etkisiyle dünyanın ısınmasına yol açmakta ve aynı zamanda ekosisteme ciddi zararlar vermektedir (Flagan ve Seinfeld, 1988).

Günümüzde üretim, enerji üretimi, taşımacılık ve tarım gibi alanlarda sıklıkla içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır (Chevron, 2007). İçten yanmalı motorların CO_2 ve hava kirletici salım miktarının tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir. Ancak bu motorların tasarımlarında ve işletilmesinde yapılacak iyileştirmelerle ve motorda kullanılan yakıt üzerinde yapılan geliştirmelerle çevreye verilen olumsuz etkilerinin azaltılması mümkündür (Greenbaum, 2013).

Son yıllarda çeşitli endüstrilerde kullanılan içten yanmalı motorların çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak için hem motor üretim standartlarında hem de kullanılabilecek yakıt standartlarında çeşitli yasal sınırlamalar getirilmiştir. Bu tezin ikinci bölümünde dizel motorlar ve yakıtlarla ilgili bazı standartlar incelenmiştir.

Dizel motorların çalışması sırasında harcanan yakıt miktarı ve salım yapılan hava kirletici oranları yakıt püskürtme stratejisinde yapılan iyileştirmelerle, silindir içerisine verilen emme havasının fiziksel özelliklerinde yapılan değişikliklerle, yanma odasına su gönderimiyle, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) sistemiyle veya egzoz gazı son işleme sistemlerinin kullanımıyla azaltılabilir. Bu yöntemler ve etkileri bu tezin üçüncü bölümünde incelenmiştir.

Dizel motorların çalışma parametrelerindeki ve kullanılan yakıt tiplerindeki değişimlerin egzoz salımlarına ve motor performansına etkilerini inceleyen birçok akademik çalışma mevcuttur. Çalışmalarda genellikle tek silindirli dizel motorlar üzerinde çeşitli yakıtlar kullanılması sırasında çalışma parametrelerinin değişiminin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmalardan bazılarının yöntem ve sonuçları bu tezin dördüncü bölümünde detaylı olarak incelenmiştir.

Bu tez kapsamında 11,4 kW gücünde tek silindirli, doğal emişli, yakıt olarak Avrupa standartları'nda (EN) sınıflandırılmış olan EN 590 standartlarında motorin, Uluslararası Standartlar Teşkilatı (ISO) 8217 standartlarına göre sınıflandırılmış DMA standartlarında marin tipi motorin ve bu yakıt içeriğine %5 oranında artık RME 180 fuel oil katılarak hazırlanmış yakıt karışımları kullanılan bir dizel motor üzerinde püskürtme basıncı ve püskürtme zamanlaması değişimlerinin motor performansı ve egzoz salımları üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmada denizcilik endüstrisinde belirlenen standartlara uygun farklı özelliklerdeki yakıtların kullanımı sırasında dizel motor yakıt sistemi üzerinde yapılan değişikliklerin egzoz salımları ve motor performansına etkilerini ölçerek kullanılan yakıt karakteristiklerine uygun püskürtme stratejisinin önemi araştırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

DİZEL MOTORLAR VE YAKITLAR

Bu bölümde dizel motorların tarihçesi, dizel motorlarda kullanılan yakıtlar ve bazı özellikleri ve dizel motorlarda yanma periyotları incelenmiştir.

2.1 Dizel Motorların Tarihçesi

İçten yanmalı bir sistem üzerine ortaya atılan ilk fikirler tank, silindir gibi kapalı bir ortamda meydana gelen bir yanma olayı sonucu ortaya çıkan atık gazların soğutulmasıyla vakum elde edilmesinin ardından bu vakumun işe çevrilmesini temel alan teorilere dayanır. Bu alanda yapılan ilk motor denemesi Cristian Huygens ve asistanı Denis Papin tarafından 1680 yılında hayata geçirilmiştir. Bu denemede yakıt olarak barut kullanılmıştır. Bu sebeple de günümüzde barut motoru olarak bilinir. Bu motor dikey durumda bir silindir ve içinde hareket eden bir pistonla iş elde eder. Silindirin içinde, serbest hareket eden pistonun alt tarafına yerleştirilen barutun yakılmasıyla elde edilen egzoz gazının basıncıyla pistonun yukarı yönde hareket etmesi sağlanır. Biriken egzoz gazı pistonun yukarı yönde hareketi sonrası silindir üzerindeki egzoz portlarından dışarı atılır. İçerde kalan artık gazların soğumasıyla basıncının düşmesi, pistonu üst tarafından etki eden açık hava basıncı ve pistonun ağırlığı sayesinde piston aşağı yönlü hareket eder. Böyle motorun bir çevrimi ortaya çıkar. Ancak bu denemede karşılaşılan en büyük sorun bir sonraki çevrim için gerekli hava ve barutun sisteme dahil edilmesinde karşılaşılan zorluktur (Deniz, 2008). Bu sebeple bu motorun sürekli çalıştırılması mümkün olmamıştır.

Mekanik güç üreten makinelerle ilgili daha sonraki yıllarda ortaya çıkan fikirlerin genellikle buhar türbinleri veya gaz türbinleri üzerine olduğu görülmektedir. Ancak içten yanmalı motorlar üzerine yapılan denemelerde de yeni gelişmeler kaydedilmiştir. 1794 yılında Robert Street ve 1798 yılında John Stevens tarafından geliştirilen motorlar bu gelişmelerin örnekleridir.

Bir taşıtta, içten yanmalı bir motorun ana güç kaynağı olarak kullanılmasına yönelik ilk deneme ise 1807 yılında Nicephore Niepce ve kardeşi Claude Niepce tarafından yapılmıştır. Yakıt olarak kömür tozu ve reçine kullanan bu motor Fransa’da Sona Nehri’nde bir tekne üzerinde denenmiştir (McConnell, 2016). Aynı yıl François Isaac de Rivaz da kendisinin geliştirdiği ve yakıt olarak hidrojen ve oksijen karışımı kullanılan bir motorla hareket ettirebileceği bir araba yapmıştır (Michelet, 1965). Ancak bu dönemdeki denemeler motorların sürekli bir güç kaynağı olarak kullanılamaması sebebiyle başarılı olamamıştır.

Daha sonraki yıllarda da gelişmeler ve denemeler devam etmiştir. 1820 yılında William Cecil tarafından yakıt olarak hidrojen kullanan ilk motor (McNeil, 1990), 1826 yılında Samuel Morey tarafından karbüratör sistemine benzer bir sisteme sahip olan ilk motor (Getman, 1936) ve 1833 yılında Lamuel Wellman Wright tarafından ceket soğutma mekanizmasına sahip ilk motor (Moon, 2014) geliştirilmiştir. Ancak bu yıllara kadar geliştirilen içten yanmalı motorların hiçbirisi sürekli çalışma ihtiyacını karşılayamadığı için mekanik güç üreten makine ihtiyacına tam anlamıyla cevap verememiştir.

Bu yıllarda yaşanan en önemli gelişmelerden biri 1824 yılında Sadi Carnot tarafından yayınlanan “Carnot Çevrimi”nin ortaya çıkmasıdır. “Carnot çevrimi, ikisi sabit sıcaklıkta ikisi de adyabatik olmak üzere dört tersinir hal değişiminden oluşur” (Çengel ve Moles, 2008). Bu çevrim 1830 ve 1840 yıllarında Emilie Clapeyron tarafından geliştirilmiştir. Meier (1898), Rudolf Diesel tarafından 1893 yılında geliştirilen motorun çalışma prensibinin Carnot Çevrimi’ne dayandığını belirtmiştir.

Eugenio Barsanti ve Felice Matteucci tarafından 1853 yılında yakıt olarak kömür gazı (kömürden elde edilen uçucu gaz, şehir gazı) kullanılan, kıvılcım ateşleme mekanizmasına sahip ve serbest pistonlu bir içten yanmalı motor geliştirilmiştir. Serbest piston sistemi (Herhangi bir krank mekanizmasına bağlı olmayan piston) ilk kez bu motorda kullanılmıştır (Deniz, 2008). Ancak bu motor ticari bir başarıya ulaşamamıştır.

Sürekli bir güç kaynağı olarak kullanılabilecek ilk içten yanmalı motor 1860 yılında Jean Joseph Etienne Lenoir tarafından geliştirilen, yakıt olarak kömür gazı kullanan, kıvılcım ateşlemeli, çift etkili, iki zamanlı ve “Lenoir Motoru” olarak bilinen motordur. Bu motorda hava girişi ve egzoz çıkışı sürgülü valflerle sağlanır. Ancak ısı verimi %5 dolaylarındadır (McNeil, 1990).

1862 yılında günümüz motorunun çalışma prensipleri ortaya çıkmıştır. Alphonse Beau de Rochas yayınladığı makalesinde emme, sıkıştırma genişleme ve egzoz stroklarının detaylı bir şekilde anlatmıştır (McNeil, 1990). Ayrıca bu çevrimle çalışacak motorun verimini arttıracak yöntemler de bu çalışmada doğru olarak belirlenmiştir. Ancak bu çalışma sonucunda deneysel bir araştırma yapılmamıştır.

1867 yılında Nicolaus August Otto ve Eugen Langen, 1853 yılında Barsanti ve Matteucci tarafından geliştirilen serbest pistonlu motor dizaynında geliştirmeler yapmışlardır. Geliştirilen motor Lenoir motorundan daha verimlidir ve sürekli çalışmaya uygundur (Grenning, 1991). Bu motor önemli bir ticari başarı göstermiştir. Takip eden yıllarda Nicolaus August Otto, Gottlieb Daimler ve Wilhelm Maybach serbest pistonlu motorların tasarımında geliştirmeler yapmışlardır.

1876 yılında Nicolaus August Otto ve Wilhelm Maybach yeni bir motor üzerine çalışmaya başlamışlardır. Bu motorda kullanılan çevrim 1862 yılında Rochas’ın makalesinde anlattığı motorun çevrimidir (McNeil, 1990). Dört zamanlı olarak geliştirilen bu motor oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Bu motorda kullanılan çevrimin patenti 1876 yılında Nicolaus August Otto tarafından alınmıştır ve günümüzde “Otto çevrimi” olarak bilinir.

Dört zamanlı motorlar oldukça başarılı olsa da iki zamanlı motorlarda da yeni geliştirmeler devam etmiştir. 1878 yılında Dugald Clerk iki zamanlı sürekli olarak çalışabilen ilk motoru geliştirmiştir. Bu motorda bir silindirde yanma ve iş oluşurken aynı krank şafta bağlı bir başka silindirde de hava sıkıştırması yapılmakta ve sıkıştırılan hava bir sonraki strokta daha verimli iş yapılabilmesi için yanmanın olduğu

silindire transfer edilmekteydi (Boothroyd, 2001). Bu sebeple bu motorun süperşarj kullanılan ilk motor olduğu söylenebilir.

1884 yılında Edward Butler petrol türevi bir sıvı yakıt kullanan içten yanmalı bir motor geliştirmiştir (McNeil, 1990). 1886 yılında Karl Benz yakıt olarak petrol türevi kullanan kıvılcım ateşlemeli karbüratörlü ilk motoru geliştirmiştir (Smil, 2010). Aynı yıl Gottlieb Daimler ve Wilhelm Maybach de yine petrol türevleriyle çalışan başka bir motor geliştirmişlerdir (Smil, 2010).

1893 yılında Rudolf Diesel sıkıştırma ateşlemeli ilk motoru geliştirmiştir (Smil, 2010). Yakıt olarak fıstık yağı kullanılan (Guo, Song ve Buhain, 2015) bu motorun patenti 1895 yılında alınmıştır. Silindir içinde sıkıştırılan havaya yüksek basınçta yakıt püskürtülmesiyle ateşlenen bu motorların gelişmesi içten yanmalı motorların tarihsel gelişiminde çok önemli bir dönüm noktasıdır. Bu motorun termal verimi oldukça yüksektir (Shrinivasa, 2012). Rudolf Diesel bu motoru geliştirdikten sonra seri üretim haklarını çeşitli firmalara vermiştir. Günümüzde hala kullanılmaktadır ve dizel motorlar olarak adlandırılmaktadır.

Dizel motorlar, 1900'li yılların başında hızla endüstrinin çeşitli alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Jeneratörler, denizaltılar, gemiler ve kara taşıtları gibi birçok başarılı denemeler yapılmıştır.

Dizel motorların teknolojileri 20. yüzyılın başlarından itibaren hızla gelişmektedir. Yanma odası geometrisinin optimizasyonu, çeşitli yardımcı sistemlerin optimizasyonu, süperşarj konusunda yeni çözümler, elektronik ve robotik destekli dizel motorların üretimi gibi birçok geliştirmeler sürekli devam etmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ve geliştirmeler ise dizel motorların daha çevreci ve daha verimli olmasını hedeflemektedir. Bu ihtiyaçları karşılayabilmek için birçok yeni yöntem geliştirilmektedir.

2.2 Dizel Yakıtların Özellikleri ve Sınıflandırılması

Bu bölümde dizel motorlarda kullanılan yakıtların yanma performansını doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen özellikleri incelenmiş ve yakıt sınıflandırılmaları yapılmıştır.

2.2.1 Dizel Yakıtların Özellikleri

Dizel motorların performansını etkileyen temel faktörlerden biri kullanılan yakıtın yanma kalitesidir. Bir yakıtın yanma kalitesi o yakıtın fiziksel ve kimyasal yapısını oluşturan bazı değişkenlere bağlıdır (Challen ve Baranescu, 1999). Yakıtların yanma kalitesini etkileyen değişkenler bu bölümde incelenmiştir.

2.2.1.1 Setan Sayısı

Dizel motorlarda yakıtın silindir içine püskürtülmesi ile tutuşma arasında geçen süre tutuşma gecikmesi olarak tanımlanır. Setan sayısı ise yakıtların tutuşma kabiliyetini ifade eder (Verduzco, Rodriguez ve Jacob, 2012).

Setan sayısı azaldıkça tutuşma gecikmesi süreci uzar. Bu durum, yakıtın tutuşmasına kadar geçen sürede silindir içine daha fazla miktarda yakıt püskürtülmesine sebep olur. Tutuşma öncesi silindir içinde daha fazla yakıt püskürtülmüş olması tutuşma sırasında daha fazla miktarda yakıtın çok kısa sürede yanmasına ve silindir içinde ani basınç artışına sebep olur (Nuran, 2015). Bu durum motorun gürültülü çalışmasına sebep olur ve yanma performansını olumsuz etkiler. Bu olaya dizel vuruntusu adı verilir.

Setan sayısının değeri dizel motorların performansında kritik öneme sahiptir. Setan sayısının yükselmesiyle silindir içine püskürtülen yakıtın tutuşma kabiliyeti artar. Bu durum silindir içine püskürtülen yakıtın tamamı püskürtülmeden önce tutuşmanın başlamasını sağlar ve böylece yanma odasındaki patlama koşullarına daha yumuşak bir geçiş sağlanır (Öcal, 2007).

Bir yakıtın tutuşma kabiliyetinin sayısal bir değerle ifade edilebilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden ilki Uluslararası Amerikan Test ve Materyaller Standartları Kurumu (ASTM) tarafından belirlenen D613-16a (2016) standardıyla tanımlanan bir deney yardımıyla setan sayısının belirlenmesidir. Bu yöntemin bir benzeri Uluslararası Standardizasyon Kurumu (ISO) tarafından Avrupa Standartları'nda EN ISO 5165 (1998) standardıyla belirlenmiştir. Bu yöntemlerde test edilen yakıtın setan sayısı, tutuşma kabiliyeti bilinen referans yakıtlarla kıyaslanmasıyla belirlenir. Kıyaslama yapılabilmesi için setan cetveli kullanılır. Bu cetvelin bir ucuna tutuşma kabiliyetinin çok iyi olduğu bilinen ve setan olarak da adlandırılan en az %99 saflıktaki *n-heksadekan* hidrokarbonu yerleştirilmiştir ve setan sayısı 100 olarak kabul edilmiştir. Diğer ucuna da tutuşma kabiliyetinin çok düşük olduğu bilinen en az %99 saflıktaki *izosetan* hidrokarbonu yerleştirilmiştir ve setan sayısı 15 olarak kabul edilmiştir. ASTM D613-16a (2016) standardıyla tanımlanan deneyde sıkıştırma oranı değiştirilebilen tek silindirli bir dizel motor, setan sayısının test edilen yakıtın setan sayısından daha yüksek olduğu bilinen bir referans yakıt ve setan sayısının test edilen yakıtın setan sayısından daha düşük olduğu bilinen bir diğer referans yakıt kullanılır. Bu yakıtlar test edilen yakıtla setan sayısı 100 ve 15 olduğu bilinen yakıtların karıştırılmasıyla da elde edilebilir. Hesaplama test için kullanılan dizel motorun standart çalışma koşullarında her bir yakıt tipi için eşit olacak şekilde belirlenen tutuşma gecikmesi süresini yakalayabildiği sıkıştırma oranlarını ayarlayan indeks kolunun seviyesi, düşük setan sayılı yakıtın setan sayısı ve yüksek setan sayılı yakıtın setan sayısı verileri kullanılır. Hesaplamalarda aşağıdaki formül kullanılır.

$$SN_N = SN_{DRY} + \left(\frac{İK_N - İK_{DRY}}{İK_{YRY} - İK_{DRY}} \right) (SN_{YRY} - SN_{DRY}) \quad (2.1)$$

SN_N = Test edilen yakıt numunesinin setan sayısı

SN_{DRY} = Düşük setan sayılı referans yakıtın setan sayısı

SN_{YRY} = Yüksek setan sayılı referans yakıtın setan sayısı

$İK_N$ = Test edilen yakıt numunesinin indeks kolu seviyesi

$İK_{DRY}$ = Düşük setan sayılı referans yakıtın indeks kolu seviyesi

$İK_{YRY}$ = Yüksek setan sayılı referans yakıtın indeks kolu seviyesi

Setan sayısının deneysel olarak bulunması yöntemi doğru ve hassas sonuçlar veriyor olsa da ASTM D613-16a (2016) standardına göre test edilen her yakıt numunesi için deney düzeneğinde üç farklı ölçüm yapılması gerekliliği ve her numuneden minimum yarım litre harcanması bu yöntemin zaman ve maliyet yönünden oldukça masraflı olmasına sebep olmaktadır.

Setan sayısını belirlemek veya tahmin etmek için daha az maliyetli bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden ilki ASTM D6890-16 (2016) ve ASTM D7170-16 (2016) standardıyla belirlenmiş ve sonucunda türetilmiş setan sayısını ortaya çıkartan tutuşma gecikmesiyle sabit hacimli odacıkta yakma yöntemidir. Bu yöntemde basınçlı hava desteği verilen sabit hacimli bir odacık içerisine püskürtülen test yakıtının püskürtme zamanı ve tutuşma zamanı sensörler yardımıyla ölçülür. Ölçülen bu veriler kullanılarak, bir denklem yardımıyla ASTM D613-16a (2016) standardıyla ölçülen setan sayısının sayısal değerine yakın bir değer elde edilir. Bu yöntem ilk yöntemle göre zaman yönünden daha karlı olsa da ölçümlerin yapılabilmesi için bir deney düzeneği gerektiği için ASTM D613-16a (2016) yöntemi kadar olmasa da yine pahalı bir yöntemdir. Bu yöntemin prosedürlerini belirleyen iki standart birbirine oldukça benzerdir. Aralarındaki tek fark ASTM D6890 (2016) yönteminde 32 adet, ASTM D7170-16 (2016) yönteminde ise 25 adet çevrim yapılır (Barsamian, 2009) ve her iki yöntemde de bu çevrimlerin aritmetik ortalaması alınarak formüle dahil edilir. Türetilmiş setan sayısı hesaplanmasını içeren diğer bir standart da ASTM D7668-14a (2014) standardıdır. Bu standarda göre tutuşma gecikmesinin sayısal değeri, sabit hacimli bir odacık içerisine yakıt enjeksiyonu sonrası ortaya çıkan basınç değişimlerinin bir basınç sensörü kullanılarak ölçülmesiyle elde edilen grafiğin kırılma noktaları yardımıyla bulunur. Bu yöntemlere benzer yöntemler Avrupa Standardizasyon Komitesi (EN) tarafından EN 15195 (2014), EN 16144 (2012) ve EN 16715 (2010) standartlarıyla belirlenmiştir.

Bir yakıtın tutuşma kalitesi belirlenirken kullanılan bir diğer yöntem de setan indisi tayini yöntemleridir. Bu yöntemlerde bağımsız değişkenler kullanılarak ampirik bir formül oluşturulur ve böylece setan sayısı tahminlenir. Bunun için kullanılan iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birincisi değişken olarak yakıtın spesifik gravitesi, açık hava

basıncında kaynama noktası ve yoğunluğu dahil edilen ASTM D976-06 (2016) standardıyla belirlenmiş olan yöntemdir. Ancak bu yöntemin uygunluğu Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US EPA) tarafından geçici bir süre dondurulmuştur (ASTM D976-06, 2016). İkinci yöntem ise ASTM D4737-10 (2016) standardıyla belirlenen ve değişken olarak yakıtın yoğunluğunu ve açık hava basıncında %10, %50 ve %90'lık miktarlarının buharlaştığı sıcaklık verilerini kullanan ve en küçük kareler yöntemi kullanılarak ortaya çıkarılan ampirik bir formülle setan sayısı tahmin edilen yöntemdir. Her iki yöntemle de elde edilen verilere setan sayısından farklı olarak setan indisi adı verilir. Ancak bu yöntemler setan sayısını arttıran ilave kimyasal kullanan yakıtlarda, saf hidrokarbonlarda, kaya gazı veya kömür gazından üretilen yakıtlarda, ham petrol veya ağır fuel oil testlerinde yanlış sonuçlar verebilmektedir. Ayrıca bu yöntemlere benzer bir yöntem Avrupa Standardizasyon Komitesi tarafından EN ISO 4264 (2007) standardıyla belirlenmiştir.

2.2.1.2 Viskozite

Viskozite (akmazlık, dinamik viskozite) bir akışkanın yüzey gerilimi altında akmaya karşı göstermiş olduğu direncin ölçüsüdür ve birimi $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ 'dir. Kinematik viskozite ise dinamik viskozitenin yoğunluğa oranıdır ve birimi cm^2/sn veya m^2/s 'dir. $1 \text{ cm}^2/\text{sn}$ 1 stoke veya 1 cst (centistoke) olarak ifade edilir. Hesaplamalarda genellikle kinematik viskozite kullanılır. Viskozitesi yüksek olan bir yakıtın daha az akışkan olduğu ve şekil değiştirmeye daha dirençli olduğu söylenebilir.

Viskozite, yakıtlar için oldukça önemli bir kavramdır. Bir yakıtın viskozitesi arttıkça yakıtın atomizasyon kalitesi azalır (Agarwal, 2007). Bu durum, silindir içine püskürtülen yakıtın silindir içerisine verilen havanın içinde daha büyük tanecikler halinde karışmasına yol açarak yanma kalitesini düşürür, egzoz gazında yanmamış hidrokarbonların miktarını artırır (Albayrak, 2014) ve is emisyonları oluşmasına sebep olur (Banapurmath, Tewari ve Hosmath, 2008). Ayrıca viskozitenin artması yakıtın transfer pompaları ve püskürtme sistemlerini yağlama etkisini azaltacağı için (Agarwal, 2007) makine parçalarının kullanım ömrünü de olumsuz yönde etkiler.

Viskozitenin düşük olması, püskürtülen yakıtın, silindir içine verilen hava ile daha iyi karışmasını ve böylece yanma veriminin daha yüksek olmasını sağlar. Ayrıca hidrokarbon ve is emisyonlarında azalmaya sebep olur. Ancak viskozitenin çok düşük olması da yakıt devresi üzerinde kaçaklara sebep olur (Goldwine, 2008).

Viskozite sıcaklığa ve basınca bağlı bir kavramdır. Sıvılarda sıcaklık arttıkça viskozite düşer, basınç ise sıvılar için çok yüksek basınçlar hariç viskoziteyi etkilemez. Gazlarda ise sıcaklık arttıkça viskozite artar. Yüksek basınç altında gazların yoğunluğu da arttığı için viskozitesi artar (Schmelzer, Zanutto ve Fokin, 2005). Bu sebeple yakıtların viskozitesi belirtilirken sıcaklığı da belirtilir.

Bir yakıtın veya yağın kinematik viskozitesi cm^2/sn , m^2/s veya cst gibi birimlerle ifade edilse de aynı amaçla kullanılan Engler viskozimetresiyle ölçülebilen Engler derecesi, Saybolt viskozimetresiyle ölçülebilen Saybolt saniye ve Redwood viskozimetresiyle ölçülebilen Redwood saniye gibi boyutsuz sayılarla da ifade edilebilir. Bu ölçümler için EN ISO 3104 (1994), ASTM D445-15a (2015) gibi bazı standartlar kullanılır.

2.2.1.3 Isıl Değer

Isıl değer, bir yakıtın sabit basınç altında ve normal şartlar altında (0°C ve 1013 mbar) birim kütlesi yakıldığında ortaya çıkan ısı miktarıdır ve J/g, kJ/kg, Btu/lb, kwh/ m^3 gibi birimlerle ifade edilir. Isıl değere kalorifik değer de denir.

Bir yakıtın ısı değeri, harcanan yakıt miktarı (m^3 , ton vb.) bilindiğinde, yanma sonrası elde edilen toplam enerjiyi hesaplamak için kullanılır. Isıl değer, istatistik verilerinde ve bilimsel çalışmalarda alt ısı değeri (net kalorifik değer) ve üst ısı değeri (gross kalorifik değer) olarak kullanılabilir. Bu iki değer arasındaki farkın sebebi kalorifik değerlerin ölçülmesi sırasında izlenen yöntemlere dayanır. Üst ısı değeri ölçülürken yakıtın yanması sonucu oluşan gaz 20°C 'ye kadar soğutulur (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü [YEGM], 2016) ve bu sırada içeriğinde bulunan su buharı sıvı hale geçer. Bu durumda hal değişimi sırasında ortaya çıkan gizli ısı da

hesaplamaya girer. Böylece birim yakıt yandığında ortaya çıkan enerji miktarı hesaplanırken yanma sonrası oluşan gaz içeriğinde bulunan su moleküllerinin hal değişimi için ortaya çıkan enerji de hesaplanmış olur. Alt ısı değer için ise ölçüm sırasında yanma sonrası oluşan gazın sıcaklığı 100°C'nin üzerinde kalacağı için (YEGM, 2016) içeriğinde bulunan su buharı hal değişimine uğramaz. Böylece aynı yakıtın alt ısı değeri, üst ısı değerinden düşük çıkar. İki ısı değeri arasındaki fark fuel oil veya kömür gibi yakıtlarda %5 civarında olsa da doğal gaz gibi gaz fazında yakıtlarda aradaki fark daha da yükselir (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli [IPCC], 2006).

Bir yakıtın kalorifik değerini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntem ASTM D240-14 (2014), ASTM D4809-13 (2013) ve ISO 1928 (2009) standartlarında tanımlanan yöntemlerle kalorimetre cihazları yardımıyla ölçülür. Bu yöntemlerde, belirlenen miktarda yakıtın kapalı bir odacıkta yakılması sonucu odacık içerisinde meydana gelen sıcaklık değişimi termometre veya termoçift (termokupl) vasıtasıyla ölçülür. Elde edilen yanma öncesi, yanmanın %60'ının gerçekleştiği andaki ve yanma sonrası sıcaklıklar ile termokimyasal ve ısı transferi düzeltmeleri kullanılarak kalorifik değer hesaplanır. Bu yöntem dışında bir yakıtın ısı değerini öğrenmek için ASTM D2890-92 (2013) standardıyla belirlenmiş ve yakıtın spesifik gravitesi, kaynama noktası ve yakıtın sıcaklığı verileri kullanarak hesaplama yapılan bir yöntem ve ASTM D4529-01 (2011) standardıyla belirlenmiş yakıtın anilin noktası (eşit hacimdeki anilin bileşiği ile bir baz yakıtın eşit miktarda karıştığı en düşük sıcaklık), yoğunluğu ve kükürt oranı verileri kullanarak tahminleme yapılan bir yöntem de mevcuttur.

2.2.1.4 Yoğunluk

Yoğunluk yakıtın birim hacimdeki kütlesini ifade eder ve sıcaklığa bağlı bir fonksiyondur. Bir akışkanın yoğunluğu verilirken sıcaklık değeri de birlikte verilir. Yakıtların yoğunluğu genellikle 15°C referans sıcaklığında verilir. Sıcaklık arttıkça yoğunluk azalır. Spesifik gravite ise bir sıvının yoğunluğunun aynı sıcaklıktaki suyun yoğunluğuna oranıdır. API Gravite ise Amerikan Petrol Enstitüsü (API) tarafından kullanılan bir ölçüdür, özgül ağırlıkla ters orantılıdır ve boyutsuz bir sayıdır. Bir

yakıtın API derecesi 60°F (15,55°C) sıcaklığında verilir ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\text{API Derecesi} = \left(\frac{141.5}{\text{SG}} \right) - 131.5 \quad (2.2)$$

SG: Spesifik Gravite

Bir yakıtın yoğunluğunu ölçmek için kullanılan en yaygın yöntem hidrometre ile ölçüm yöntemidir (Speight, 2002). Bu yöntemin prosedürleri ASTM D1298-12b (2012) ve ISO 3675 (1998) standartlarıyla belirlenmiştir. Bu yöntemde, yakıt numunesiyle yaklaşık olarak eşit sıcaklığa getirilmiş olan hidrometre içine bir miktar yakıt numunesi alınır. Numune ile hidrometre arasındaki ısı alışverişi bittiğinde ve numune hidrometre içerisinde çökelediğinde hidrometre üzerinden değer okunur. Bir diğer yöntem ise salınım yapan u-tüpü yöntemiyle (ASTM D5002-16, 2016; ISO 12185,1996) belirlenmesidir. Bu yöntemde de 1-2 ml yakıt numunesi salınım yapan u-tüpüne eklenir. Eklenen yakıtın ağırlığından dolayı u-tüpünün yaptığı salınım ölçülür ve yoğunluk hesaplanır. Ayrıca benzer bir yöntemde, bu salınımın dijital olarak ölçülmesiyle yoğunluk hesaplaması yapılır (ASTM D4052-15, 2015).

Yakıtın 15°C'deki yoğunluk değerinden faydalanarak herhangi bir sıcaklıktaki yoğunluğunu hesaplamak için ASTM D1250-08 (2013) standardıyla belirlenen hacim düzeltme katsayıları tablosundan alınan düzeltme katsayısı kullanılır.

Yakıtın yoğunluğu yakıt kalitesi açısından önemli bir parametredir. Türetilmiş setan sayısının, setan indisinin ve ısıl değer hesaplanmasında ve tahminlemesinde yakıt yoğunluğu parametresi kullanılarak hesaplama yapılır.

Yakıt yoğunluğundaki azalma, indeks koluyla yakıt miktarı ayarı yapılan dizel motorlarda silindir içine püskürtülen yakıtın enerji içeriğini artırır (Chevron, 2007) ve NO_x salımlarının düşmesini sağlar. Elektronik enjeksiyonlu modern dizel motorlarda ise egzoz salımları yoğunluk değişiminden etkilenmez (Lee, Pedley ve Hobbs, 1998; Chevron, 2007).

2.2.1.5 Uçuculuk

Uçuculuk, bir sıvının gaz fazına geçme eğilimi olarak tanımlanır. Yakıtların uçuculuğu özellikle orta ve yüksek devirli motorların performansında önemli bir etkiye sahiptir (Speight,2002). Bir yakıtın uçuculuğunun yüksek olması daha düşük sıcaklıklarda kaynamaya ve parlamaya eğilimli olduğunu gösterir (Chevron, 2007).

Bir dizel motorunun kullandığı yakıtın uçuculuk gereksinimi motorun hızına, boyutuna ve tasarımına göre değişiklik gösterebilir (Speight, 2002). Ancak çeşitli kaynaklarda yakıtın uçuculuğunun düşük olmasının yol açtığı bazı sebepler verilmiştir. Uçuculuğun düşük olması segmanların sıkışmasına, enjektörlerin daha çabuk tıkanmasına sebep olur (Monyem,1998). Uçuculuğu düşük bir yakıt sıkıştırmayla tutuşmaya karşı daha dirençlidir (Bastiani, 2008), bu durum tutuşma gecikmesi sürecini etkileyebilir. Düşük uçuculukta bir yakıtla çalışan bir dizel motorda spesifik yakıt harcamı artar (Saandum, 2008) ve hidrokarbon salımlarında artış görülür (Monyem, 1998). Ayrıca düşük uçuculukta bir yakıt, dizel motorlarda kötü bir püskürtme olmasına (Nguyen, Dan ve Asano, 2014) ve yanma sonrası silindir duvarında tortu kalmasına sebep olur (Tziourtzioumis, 2012).

Petrol türevi yakıtların atmosfer basıncında uçuculuk karakteristikleri; ASTM D86-16a (2016) ve ISO 3405 (2011) gibi standartlarla belirlenmiş olan sabit basınçta sıcaklık artışıyla buharlaşan yakıt yüzdelерinin ve buharlaşma sıcaklığının ölçülmesini içeren test prosedürüyle yapılır.

2.2.1.6 Kül Miktarı

Dizel motorlarda kullanılan yakıtların içeriğinde yanma odasının ulaştığı sıcaklıklarda tutuşmayan, katı ve metal sabunu formunda olan bazı maddeler bulunur (Speight, 2002). Bu maddeler kül olarak adlandırılır. Bir yakıtın içindeki kül miktarı yakıtın tamamına oranla kütlece yüzdesi olarak ölçülür ve dizel motorların performansı ve egzoz salımlarında önemli bir role sahiptir. Yakıttaki kül miktarının

yükselmesi, yanma sırasında yanmayan artık madde oranının yükselmesi sonucunu doğurur (Speight, 2002).

Bir yakıtın kül oranının yüksek olması yakıt filtrelerinin çabuk tıkanmasına ve yüksek basınçlı yakıtın temas ettiği yüzeylerde daha hızlı aşınma olmasına (Reşitoğlu, 2010), dizel motor üzerinde bölgesel yüksek sıcaklık artışlarına ve yanma odasına dahil olan parçaların hızlı aşınmasına (American Bureau of Shipping [ABS],1984) sebep olur. Bir yakıt içeriğindeki tutuşmayan maddeler; sodyum, vanadyum, kalsiyum, magnezyum, silikon, demir, alüminyum, nikel bileşikleri olarak bulunabilirler (India Bureau of Energy Efficiency [India BEE], 2016).

Yakıtların damıtma süreci boyunca kullanılan ve genellikle alüminyum bileşikleri olan katalizörler damıtma süreci bittikten katalizör atıkları olarak artık yakıtlar içinde kalabilir (Wharton, 1991). Bu amaçla çeşitli geri kazanım yöntemleri uygulansa da artık yakıtların içinden katalizör atıklarının tamamının geri kazanımı mümkün değildir (Açma, Oktaybaş ve Sönmez, 2002). Bu sebeple bu maddeler özellikle artık yakıtlar içeriğindeki kül miktarı oranını artırır.

Yakıtların içeriğinde kül miktarını saptamak için kullanılan en yaygın yöntem ASTM D482-13 (2013) standardıyla belirlenmiştir. Bu standarda göre kütlesi ölçülen az miktarda yakıtın tamamı yakılması sonucu ortamda kalan artık maddelerin kütlesi ölçülür ve başlangıçtaki yakıt kütlesine oranlanır. Bu oran yakıt içindeki kül miktarını verir. Ayrıca ISO 6245 (2001) standardında da yakıt içeriğindeki kül oranını saptamak için aynı yöntem kullanılır.

2.2.1.7 Yağlama Özelliği

Dizel motorlarda, yakıtın temas ettiği hareketli yüzeylerin yağlaması yakıt tarafından yapılır. Özellikle yüksek basınçlı yakıtla temas eden ve hassas ölçülerde işlenmiş olan parçalardaki aşınmanın azaltılmasında yakıtın yağlayıcılığı önemli bir role sahiptir. Ayrıca yakıtın yağlama özelliğinin artması, motor parçalarındaki sürtünme kaynaklı kayıpları azaltır ve böylece motor veriminin yükselmesini sağlar

(Habibullah, Fattah, Masjuki ve Kalam, 2015). Bir yakıtın yağlama özelliği çoğunlukla yakıtın kinematik viskozitesiyle doğru orantılıdır (Li, Zhen, Xingcai, Wu-gao ve Jian-guang, 2005). Bu bilgiye dayanarak yakıtın yağlama özelliğinin de kinematik viskozite gibi sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olduğu söylenebilir.

Son yıllarda yakıt içeriğindeki kükürt miktarının azaltılabilmesi için uygulanan işlemler yakıtın yağlama özelliğini olumsuz etkilemektedir (Hazrat, Rasul ve Khan, 2015). Bu durum özellikle kükürt oranının 50 ppm altına düşürüldüğü yakıtlarda görülmektedir (İlkfer, 2009). Bunu telafi etmek için çeşitli yakıt katkı maddeleri mevcuttur ancak bu katkı maddeleri özellikle asit içerikliyse enjektör deliklerinin tıkanmasına sebep olabilir (Leedham, Caprotti, Graupner ve Klaua, 2004).

Bir yakıtın yağlama kabiliyetini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri prosedürleri ISO 12156 (2016), ASTM D6079-11 (2016) ve ASTM D7688-11 (2016) standardıyla belirlenen yüksek frekanslı ileri geri hareket testidir. Bu teste göre 2 ml hacimde ve 60°C sıcaklıktaki yakıt numunesinin eklendiği bir düzenekte yakıtın üzerinde bulunduğu disk üzerine bulunduğu yerde dönmeyen 200 gr ağırlığında çelik bir bilye 1 mm hareket aralığında 50 Hz frekansında 75 dakika boyunca ileri geri yönde hareket ettirilir. Deney sonunda çelik topun aşınmasının en büyük ve en küçük olduğu yerlerin ölçüsü her bir standarda göre farklı yöntemlerle ölçülür. Mikron cinsinden elde edilen bu değer yakıt yağlama kalitesini ifade eder.

Kullanılan bir diğer yöntem de prosedürleri ASTM D5001-10 (2014) standardıyla belirlenen yöntemdir. Bu yöntemde göre test edilen yakıt numunesi, bir test rezervuarına yerleştirilir. Bulunduğu yerde dönmeyen çelik bir bilye, dikey olarak monte edilmiş bir mandrende tutulur ve eksensel olarak monte edilmiş bir silindirik çelik halkanın dış çapına uygulanan bir yük ile zorlanır. Test halkası, bir kısmı sıvı haznesine daldırılarak sabit bir hızda döndürülür. Bu durum test edilen yakıtı sürekli olarak top / halka arasındaki yüzeye taşır. Deney sonucunda çelik top yüzeyinde oluşan aşınma izinin mikron cinsinden değeri, yakıtın yağlama özelliğinin bir ölçüsüdür. Bu yöntem genellikle havacılık endüstrisi yakıtlarında kullanılır.

2.2.1.8 Kükürt Oranı

Yakıt içeriğinde çeşitli bileşikler halinde veya saf olarak bulunabilen kükürt yanma sonrası kükürt oksitlerine (SO_x) ve sülfirik asit (H_2SO_4) dönüşür ve egzoz gazına karışır. Gaz içine karışan bu bileşiklerin hem motor parçalarına hem de doğaya ciddi zararları vardır (Sirvio, Niemi, Heikkila ve Hiltunen, 2016; Heywood, 1988). Özellikle çevreye olan bu zararların azaltılabilmesi için son yıllarda yakıt içeriğindeki kükürt miktarının ve böylece egzoz gazındaki kükürt bileşiklerinin indirgenmesine yönelik birçok kısıtlamalar getirilmiştir.

Yakıt içeriğindeki kükürt, yanma esnasında yanmaya katılıp ortaya enerji çıkarır. Ancak bu enerji yakıt içeriğindeki hidrokarbonlara göre oldukça düşüktür. Yüzde 1 oranında kükürt içeriğinin toplamda 1 kg yakıt yakıldığında 0,3 MJ daha az enerji ortaya çıkmasına sebep olur (International Bunker Industry Association [IBIA], 2016). Yakıt içeriğindeki kükürt oranına bağlı olarak egzoz gazı içeriğindeki oranı artan kükürt bileşikleri, egzoz gazının temas ettiği parçalardaki korozyonu artırır (Kass, Thomas, Wilson, Lewis ve Sarles, 2004). Ayrıca yanma sonrası ortaya çıkan gaz halindeki sülfirik asitin miktarı arttıkça gaz halinde bulunan asit ve su buharı karışımının çiğlenme noktası yükselir. Silindir içerisinde çiğlenme noktası altındaki sıcaklıklarda sıvı halde sülfirik asit çözeltisi oluşur (Cordtz, Schramm ve Rabe, 2013). Sülfirik asit oranının yüksekliği bu çözeltinin aşındırma gücünü artırır (van Helden, Valentijn ve van Doorn, 1989).

Yakıt içeriğindeki kükürt yakıtın püskürtülmeden önce temas ettiği metal yüzeyler üzerinde çok ince bir metalik sülfid tabakası oluşturur. Bu durum özellikle hassas işlenmiş parçaların aşınma miktarını azaltır (IBIA, 2016). Ayrıca daha önce de belirtildiği gibi yakıt içeriğindeki kükürt miktarını azaltmak için uygulanan yöntemler yakıtın yağlayıcılık özelliğini azaltır (Hazrat ve diğer., 2015) ve yakıt devresindeki hareketli parçaların aşınma hızının artmasına sebep olur.

Bir hidrokarbon içeriğinde bulunan kükürt oranını belirlemek için kullanılan birkaç yöntem vardır. Bu yöntemlerden birincisi prosedürleri ASTM D5453-16 (2016) ve

ISO 20846 (2011) standartlarıyla belirlenen morötesi floresans yöntemidir. Bu yöntemde analizi yapılan hidrokarbon numunesi yüksek sıcaklıkta ve bol oksijene sahip bir tüp içerisine enjekte edilir. Yüksek oksijen oranı sayesinde kükürt oksitlenme tepkimesine girer ve ortaya kükürt dioksit (SO_2) ve su çıkar. Su ortamdan çekilir ve kalan numune morötesi ışına maruz bırakılır. Morötesi ışın SO_2 bileşiklerinin uyarılmasını sağlar. Bu bileşiklerin yeniden kararlı hale dönmesi sırasında yaydığı ışık fotomultiplikator tüp tarafından emilir ve ölçülür. Elde edilen değer yakıtın kükürt oranını belirlemek için kullanılır. Bu yöntem özellikle kükürt oranı düşük yakıtların ölçümü için tercih edilir.

Petrol ürünlerindeki kükürt oranını belirlemek için kullanılan bir diğer yöntem de prosedürleri ASTM D2622 (2016) ve ISO 20884 (2011) standartlarıyla belirlenen dalga boyu ayırmalı x-ışını floresans spektrometri yöntemidir. Bu yöntemde, test edilen yakıt numunesi, x-ışını demetine yerleştirilir ve dalga boyu 0,5373 nm'de kükürt hattının tepe yoğunluğu ölçülür. Referans olarak belirlenen dalga boyu olan 0,5190 nm'de ölçülen yoğunluğu tepe yoğunluğundan çıkarılır. Elde edilen net sayım hızı daha sonra kilogram başına miligram cinsinden (mg/kg) veya kütle yüzdesi olarak kükürt konsantrasyonunu elde etmek için önceden hazırlanmış bir kalibrasyon eğrisi veya denklemi ile karşılaştırılır ve böylece yakıt içeriğindeki kükürt oranı belirlenir.

2.2.1.9 Karbon Kalıntısı

Yakıtlarda bulunan karbon içeriğinin yüksekliği, yakıtın sıcaklığının yükseldiği durumda ortamda bırakabileceği karbon artığı miktarının fazlalığını gösterir (Speight, 2002). Karbon artığı ise yakıtın yanması veya termal bozunması sürecinde ortaya çıkan karbon kalıntılarıdır (Nuran, 2015). Karbon kalıntıları, yakıt devrelerinde tıkanma, egzoz devrelerinde karbon tabakası oluşumu, piston kafasında ve silindir duvarlarında karbon tabakası oluşumu gibi sonuçlara sebep olur. Bu tabakalar da motor soğutmasını zorlaştırır ve yanma verimini düşürür (Bine Information Service, 2016).

Yakıt içeriğinde bulunan karbon kalıntısı miktarını saptamak için kullanılan birkaç temel yöntem vardır. Bunlardan bir tanesi prosedürleri ASTM D189-06 (2014) ve ISO

6615 (1993) standartlarıyla belirlenen Conradson yöntemidir. Bu yöntemde bir miktar numune tartılır, ısıtma ve damıtmaya tabi tutulur. Isınma sırasında numune içeriğindeki kalıntı madde çatlama ve koklaştırma reaksiyonlarına maruz kalır. Isıtma süresinin sonlandırılmasında, karbonlu kalıntıyı ihtiva eden numune soğutulur ve tartılır. Arada kalan farka göre karbon kalıntısı miktarı yüzde olarak belirlenir. Bir diğer yöntem ise prosedürleri ASTM D4530-15 (2015) ve ISO 10370 (2014) standartlarıyla belirlenen mikro yöntemidir. Bu yöntemde, başlangıçta tartılan numune cam bir kaptan, azot gazının yoğun olarak bulunduğu ortamda 500°C'ye kadar ısıtılır. Uçucu artıkların azot tarafından ayrıştırılmasıyla kok oluşumu gözlenir. Oluşan kok miktarının toplam numune miktarına oranı mikro yöntemiyle ölçülen karbon kalıntısı miktarını verir. Bu yöntemde eğer numunedeki karbon kalıntısı oranı %0,1'in altındaysa, numune %10'u kalana kadar damıtılır ve kalan miktar üzerinde aynı deney yapılır. Bu durumda numunenin karbon kalıntısı %10 damıtma kalıntısındaki karbon oranı olarak ölçülür. Son olarak, yakıt içeriğinde bulunan karbon kalıntısı miktarının ölçüldüğü bir diğer yöntem ise prosedürleri ASTM D524-15 (2015) ve ISO 4262 (1993) standartlarıyla belirlenen Ramsbottom yöntemidir. Bu yöntemde numune kılcal bir boruyla havalandırılan kapalı bir kaptan 550°C'ye kadar ısıtılır. Uçucu bileşenler ayrılırken karbon kalıntıları ve kok oluşumu başlar. Daha sonra numune soğutulur. Oluşan karbon kalıntısının toplam numuneye oranı Ramsbottom yöntemine göre karbon kalıntısı oranını verir.

2.2.1.10 Akma Noktası

Akma noktası, bir yakıtın normal koşullarda akabileceği en düşük sıcaklık değeridir (Speight, 2002). Akma noktasının düşük olması yakıt kalitesi için oldukça önemlidir. Tüm petrol türevlerinde damıtma sonrası bir miktar parafin (vaks, mum) bulunur. Düşük sıcaklıklarda mum çökmeye başlar ve kristaller oluşur (Farazmand, Ehsani, Shadman, Ahmadi, Veisi ve Abdi, 2016; Sanjay, Simanta ve Kulwant, 1995). Bu kristaller yakıtın viskoz bir yapıya sahip olmasına sebep olur; filtrelerin, yakıt devrelerinin ve enjeksiyon sistemi elemanlarını tıkanmasına sebep olur (Han, Wang, Wang, Song ve Ren, 2010). Yakıtların akma noktasının düşürülebilmesi için yakıta ilave edilebilen çeşitli katkı maddeleri mevcuttur (Khidr, Doheim ve El-Shamy, 2015).

Yakıtların akma noktasının ölçülebilmesi için çok sayıda yöntem vardır. Bu yöntemlerin her birinde, akma noktası önceden ısıtılmış yakıtın, kademeli olarak soğutulması sırasında akışın olmadığı sıcaklık değerinin ölçülmesiyle belirlenir. Yöntemler arasındaki farklar soğutma yöntemine ve akışın durmasının belirlenmesinde kullanılan yöntemeye dayanır. Örneğin ASTM D97-16 (2016) ve ISO 3016 (1994) standartlarında akışın durduğu gözle kontrol edilirken, diğer yöntemlerde kullanılan çeşitli sensörlerle ölçülmektedir.

2.2.1.11 Bulutlanma Noktası

Yakıtların içeriğinde bulunan parafin bazlı bileşenler düşük sıcaklıklarda çökmesi sonuç olarak akışın durmasına sebep olsa da akışın devam ettiği aşamada yakıt içeriğinde kristalleşen parafin bazlı bileşenler filtrelerin ve devrelerin tıkanmasına sebep olur (Speight, 2002). Yakıt içeriğindeki mum yapılarının kristalleşmeye başladığı sıcaklık değeri bulutlanma noktası olarak adlandırılır. Oluşan parafin bazlı bileşenler bulutlanma noktasından daha düşük sıcaklıklarda yakıtın tamamen kristalize olmasına sebep olur ve akmasını engeller (Coutinho, Mirante, Ribeiro, Sansot ve Daridon, 2002). Bu sıcaklık değeri de akma noktasıdır.

Bulutlanma noktasının ölçümü için kullanılan çok sayıda yöntem vardır. Bu yöntemlerin her birinde, bulutlanma noktası önceden ısıtılmış yakıtın, kademeli olarak soğutulması sırasında kristallerin oluşmaya başladığı sıcaklık değerinin ölçülmesiyle belirlenir. Standartlar arasında, soğutma için kullanılan yöntemler ve bulutlanmanın başladığını saptamakta kullanılan yöntemler değişiklik göstermektedir. ASTM D2500-16b (2016) ve ISO 3015 (1992) standartlarında numune soğutulup, yakıt içinde bulutlanma oluşmaya başlaması göz ile kontrol edilirken, ASTM D5771-15 (2015) standardında kademeli bir şekilde soğutma yapıp, bulutlanma durumu optik olarak ölçülmektedir. Ayrıca, soğutma hızı ASTM D5772-15 (2015) standardında doğrusal olarak ilerlerken, ASTM D5773-15 (2015) standardında sabit hızlı olarak ilerlemektedir. Bu iki yöntemlerde de bulutlanma oluşumu optik olarak ölçülmektedir.

2.2.1.12 Parlama Noktası

Yakıtlar hava olan bir ortama maruz kaldığında yakıt yüzeyinde yakıt buharı ve hava karışımı oluşur. Yakıtın sıcaklığı arttıkça bu karışımın yakıt buharı yüzdesi de artar (ABS, 1984). Bu karışımın herhangi bir dış kaynaktan gelecek bir tetiklemeyle tutuşabileceği minimum sıcaklık değeri parlama noktası olarak tanımlanır (Wu ve diğer., 2016).

Minimum parlama noktasının değeri, yakıtın emniyetli bir şekilde depolanabilmesi ve taşınabilmesi için oldukça önemli bir parametredir (Nuran, 2015). Bir yakıtın uçuculuğu arttıkça parlama noktası da düşer (Chevron, 2007). Biyodizeller, parlama noktası oldukça yüksek yakıtlardır ve bu durum konvansiyonel dizel yakıtlar karşısında en büyük avantajlarından biridir (Demirbaş, 2009). Bu sebeple dizel yakıtlar içeriğine biyodizel karıştırılması parlama noktasını yükseltir.

Parlama noktasının ölçülmesi için kullanılan yöntemler temelde kapalı kap yöntemleri ve açık kap yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılır. Kapalı kap yöntemlerinde numune kapalı bir kabın içinde ısıtılır ve oluşan buhar/hava oranı belli aralıklarla dış bir kaynak tarafından parlaması için tetiklenir. Bu yöntemlerde numune laboratuvarın ortam koşullarından izole edilmiş olur (Montemayor, Collier ve Lazarczyk, 2002). Kapalı kap yöntemlerinden en yaygın olanları, prosedürleri ASTM D56-16a (2016) standardıyla belirlenen Tag kapalı kap yöntemi, prosedürleri ASTM D93-16a (2016) ve ISO 2719 (2016) standartlarıyla belirlenen Pensky-Martens kapalı kap yöntemi, prosedürleri ISO 13736 (2013) standardıyla belirlenen Abel kapalı kap yöntemi ve prosedürleri ASTM D3828-16a (2016) ve ISO 3679 (2015) standartlarıyla belirlenen hızlı denge veya küçük ölçekli kap yöntemidir. Tag yöntemi, kerosen, yakıt nafta gibi uçuculuğu yüksek yakıtların, Pensky-Martens yöntemi, parlama noktası 30 °C üzerinde olan boyalar, yağlar, yakıtların, Abel yöntemi de genellikle havacılık alanında kullanılan ve parlama noktası -30°C ve 70°C arasında değişen yakıtların parlama noktasını belirlemede kullanılır (Sherrat, 2005). Bu yöntemlerden Pensky-Martens yönteminin viskozitesi düşük ve viskozitesi yüksek yakıtları analiz edebilmek için iki farklı alt prosedürü bulunur (ASTM D93-16a, 2016). Açık kap yöntemlerinden

en yaygın olanı ise prosedürleri ASTM D92-16a (2016) ve ISO 2592 (2000) standartlarıyla belirlenen Cleveland açık kap yöntemidir. Bu yöntemde ölçüm açık bir kapta ve laboratuvar koşullarının da dahil edilmesiyle yapılır (Montemayor ve diğer., 2002).

2.2.1.13 Kararlılık

Yakıtların çevresel koşulların etkisiyle veya uzun süreli depolanması sebebiyle kimyasal değişime uğramaya karşı direnme kabiliyeti yakıtın kararlılığı olarak ifade edilir (Breneol, b.t.). Bir yakıtın kararlılığı azaldıkça içeriğinde reçine benzeri oksitlenmiş yakıt artığı (gam) oluşumu gözlenir (Chevron, 2007) ve çözünmemiş hidrokarbon oranı artar (Speight, 2002). Kararlılık; ışık, kirleticilerle temas, tortu oluşumuna neden olan faktörler, renk değişimine neden olan faktörler ve yakıtın safsızlığını etkileyen parametrelerden etkilenebilir (Dunn, 2008; Rand, 2003). Kararlılık temelde depolama kararlılığı, termal kararlılık ve oksidasyon kararlılığı olmak üzere üçe ayrılır. Bir yakıtın depolama kararlılığı, yakıtın uzun bir süre boyunca kaydadeğer bir değişime uğramadan kalabilmesini, termal kararlılığı da yakıtın kısa bir süre boyunca yüksek sıcaklık stresine dayanabilme kabiliyetini ifade eder (Batts ve Fathoni, 1991). Oksidasyon kararlılığı ise yakıtın tankta bekletildiği sürede uğrayacağı oksidasyona karşı direncini ifade eder (Wallace, b.t.). Yakıtın motor performansına etkisi için standartlarla belirlenen limitlerde depolama kararlılığını da etkilediği için genellikle oksidasyon kararlılığı kullanılıyor olsa da daha yüksek performanslı yakıt püskürtme sistemlerinin tasarlanabilmesi için termal kararlılığın yükseltilebilmesi oldukça önemlidir (Chevron, 2007).

Speight (2002), yakıtların içeriğindeki kükürt ve azot oranı artmasıyla slaç oluşumunun da artmasına dayanarak kükürt ve azot oranı ile yakıtın kararlılığı arasında pozitif korelasyon olabileceğini ifade etmiştir. Ayrıca yakıtların operasyonunda, yüksek kararlılıkta iki yakıtın karıştırılmasıyla düşük kararlılıkta bir yakıt elde edilebildiği görülmektedir (Chevron, 2007). Bu sebeple farklı iki kaynaktan temin edilen iki farklı yakıt birbiriyle karıştırılmamalıdır.

Bir yakıtın kararlılığını ölçebilmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan sıklıkla kullanılan bir tanesi prosedürleri ASTM D2274-14 (2014) standardıyla belirlenen ve genellikle bir katalizör varlığında ısıtılan yakıt numunesi içinde oluşan tortu ve gam miktarının ölçülmesiyle kullanılan yöntemdir. Bu yöntem genellikle distile yakıtların analizinde kullanılır. Yakıtlar, oksidasyona uğradığında ortaya içeriğinde peroksit bulunan bileşikler çıkar. Bu sebeple bu bileşiklerin oranının ölçülmesi yakıtın kararlılığı konusunda bir ölçüt olarak kabul edilir (Speight, 2002). Yakıt içeriğindeki peroksit bileşiklerinin oranı ASTM D6447-09 (2014) standardına göre ölçülür. Artık fuel oillerın kararlılığı ölçülürken ise ASTM D4740-04 (2014) standardıyla belirlenen nokta testi kullanılır. Bu standarda göre, ısıtılarak homojen hale getirilen numunenin çok az bir miktarı bir kağıdın üzerine damlatılır ve kağıt 100°C'ye kadar ısıtılır. Daha sonra kağıt üzerinde kalan lekenin gölgesinin koyuluğu yakıtın kararlılığını gösterir. Ayrıca ısıtılan yakıt numunesi içinde oluşan tortu ve gam miktarının ölçülmesiyle oksidasyon kararlılığının belirlendiği, prosedürleri distile yakıtlar için ISO 12205 (1995) standardına göre belirlenen yöntem de sıklıkla kullanılmaktadır. Biyodizellerin veya içeriğinde %2'den fazla yağ asiti metil esterleri içeren yakıtların oksidasyon kararlılığı ise prosedürleri EN 15751 (2014) standardıyla belirlenen bir yöntemle ölçülür. Bu yöntemde temizlenmiş hava akımı altında ısıtılan numuneden buharlaşan ve havaya karışan uçucu bileşikler hava ile birlikte içerisine elektrot daldırılmış ve demineralize edilmiş suyun içine karıştırılır. Suyun içine karışan bileşikler suyun iletkenleşmesine ve elektrottan akım geçmesine sebep olur. Isıtılan yakıttan buharlaşan bileşikler içeriğinde karboksilik asitler oluşmaya başladığında elektrottan geçen akım da ani bir artış olur. Akım geçişinin başlamasıyla ani artışın yaşandığı zaman arasında kalan süre ısıtılan yakıt numunesinin kararlılığını ifade eder.

2.2.1.14 Su ve Tortu Miktarı

Yakıt içeriğinde bulunan su ve tortu öncelikle yakıtların damıtma aşamasında ekipmanların korozyonu, ısı değiştiricilerde tıkanıklık gibi ürün kalitesini olumsuz yönde etkileyen problemlere yol açar (Speight, 2002). Yakıtta bulunan su ve tortu oluşmasına sebep olan tuz gibi maddeler, genellikle üretim ve taşınması sırasında

yakıtı karıştır (Rand, 2003). Yakıt içeriğine karışan bu maddeler devrelerde ve motor parçalarında korozyona sebep olur (ABS, 1984). Yakıt içeriğinde bulunan su devrelerin paslanmasına ve oluşan artıkların yakıtı karışarak devreleri tıkanmasına sebep olur (Speight, 2002). Ayrıca soğuk havalarda yakıttaki su taneciklerinin yakıtı oranla yüksek sıcaklıklarda donması buz tanelerinin oluşmasına ve böylece devrelerin tıkanmasına sebep olabilir (Chevron, 2007).

Su ve tortular, kullanılacak yakıtın sentrifüj yöntemiyle seperasyonu sonucu gravite farkından yararlanılarak ayrıştırılabilir (Chevron, 2007). Operasyon sırasında bu şekilde ayrıştırılan artık madde slaçın önemli bir kısmını oluşturur (Rand, 2003).

Yakıt içeriğindeki su ve tortu miktarını ölçmek için kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemler uygulandığı yakıt tipine ve ölçülecek maddeleri ayrıştırma yöntemine göre değişiklik gösterir. Ham petrolün içeriğinde bulunan su ve tortuyu ölçmek için prosedürleri ASTM D4807-05 (2015) ve ISO 3735 (1999) standartlarıyla belirlenen filtreleme tekniği kullanılır. Bu yöntemde tolüenle karıştırılan ham petrol 0,45-µm geçirgenliğindeki filtreden geçirilir. Filtre üzerinde kalan artıkların yıkanması, kurutulması ve tartılması sonucu su ve tortu miktarı elde edilir. Bu yöntem dışında hem ham petrol hem de fuel oilerin analizinde kullanılan bir diğer yöntem ise prosedürleri ASTM D473-07 (2012) standardıyla belirlenen, numunenin ısıtıldıktan sonra buharlaşma sonucu kaybettiği kütlenin ölçülmesiyle içeriğindeki su ve tortu miktarını ortaya çıkartan ekstraksiyon yöntemidir. Ayrıca fuel oilerin su ve tortu miktarının analizi için prosedürleri ASTM D1796-11 (2016) standardıyla belirlenen sentrifüj yöntemi de kullanılabilir. Sentrifüj yönteminde, yakıt numunesi seperatörde yüksek devirlerde elde edilen merkezkaç kuvveti sayesinde gravite farkından yararlanılarak su ve yoğunluğu yakıttan daha yüksek olan katı parçalardan ayrıştırılır. Son olarak, hem fuel oilerde hem de ham petrolde sadece yakıttaki su içeriğini belirlemek için prosedürleri ISO 12937 (2000) standartlarıyla belirlenen Karl Fischer titrasyon yöntemi kullanılabilir.

Distile yakıtların tortu miktarının ve kirliliğinin ölçülebilmesi için prosedürleri ASTM D6217-11 (2011) ve EN12662 (2014) standardıyla belirlenen filtreleme, su ve

tortu miktarını ölçmek için de prosedürleri ASTM D2709-16 (2016) standardıyla belirlenen sentrifüj yöntemi kullanılır.

2.2.2 Dizel Yakıtların Sınıflandırılması

Dizel yakıtlar, kullanım amacına ve yanma performansını etkileyen çeşitli parametrelerin çeşitli standartlarda belirtilen alt ve üst limit değerlerine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmalarda kullanılan limitler çevre kirliliğinin azaltılmasını sağlamak, dizel motorların kullanım ömrünü uzatmak ve dizel motorların daha ekonomik bir şekilde kullanımını sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Bu bölümde, Amerika Birleşik Devletleri'nde çeşitli endüstrilerde kullanılan dizel yakıtlar için sınıflandırma yapılırken referans olarak gösterilen ASTM D975-16a (2016) standardı, Avrupa'da çeşitli alanlarda dizel motorlarda kullanılabilen yakıtlarla ilgili kısıtlar ve denizcilik endüstrisinde kullanılabilecek yakıtlar için sınıflandırma yapılırken referans olarak gösterilen ISO 8217 (2010) standardına göre yapılan yakıt sınıflandırmaları ve sınıflandırmaları etkileyen parametreler incelenmiştir.

2.2.2.1 ASTM Standartlarına Göre Yakıt Sınıflandırmaları

ASTM (American Society of Testing and Materials) çeşitli materyal, ürün, sistem ve hizmetler için teknik standartla geliştiren ve yayınlayan uluslararası bir standart organizasyonudur (ASTM, 2017). ASTM tarafından yayınlanan hiçbir standart doğrudan yasal zorunluluklar getiremez. Ancak bir sözleşme, şirket veya devlet tarafından referans olarak gösterilerek zorunlu hale getirilebilir (Melton, 2017). Bu standartlar özellikle Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da yakıt parametreleriyle ilgili limit değerlerinin belirlenmesi için sıklıkla referans gösterilmektedir (Dieselnet, 2017).

ASTM D975-16a (2016) standardında dizel motorlarda kullanılabilecek damıtma ürünü yakıtlar çeşitli özelliklerine göre kategorize etmiştir. Bu standarda ait yakıt sınıflandırmaları ve limitler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 ASTM D975-16a standardına göre yakıtların sınıflandırması (ASTM D975-16a, 2016)

				No. 1-D			No. 2-D			No. 4-D
				S15	S500	S5000	S15	S500	S5000	
Özellikler	Limit	Birim	Test Yöntemi							
Parlama Noktası	min	°C	ASTM D93	38	38	38	52	52	52	55
Su ve Tortu Oranı	mak	%	ASTM D2709	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	---
			ASTM D1796	---	---	---	---	---	---	0,5
40°C'de Kinematik Viskozite	min	mm ² /sn	ASTM D445	1,3	1,3	1,3	1,9	1,9	1,9	5,5
	mak			2,4	2,4	2,4	4,1	4,1	4,1	24
%10 damıtma kalıntısındaki Ramsbottom karbon kalıntısı oranı	mak	%	ASTM D524	0,15	0,15	0,15	0,35	0,35	0,35	---
Kül Oranı	mak	%	ASTM D482	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1
Setan Sayısı	min		ASTM D613	40	40	40	40	40	40	30
Kükürt Oranı	mak	%	ASTM D2622 ASTM D5453	15 ppm	0,05	0,5	15 ppm	0,05	0,5	2
Yağlama Özelliği	mak	mikron	ASTM D6079	520	520	520	520	520	520	
Akma Noktası	mak	°C	ASTM D97	-18	-18	-18	-6	-6	-6	-6
%90'ının Buharlaşacağı Sıcaklık	min	°C	ASTM D86	---	---	---	282	282	282	---
	mak	°C		288	288	288	338	338	338	---

Tabloda görüldüğü gibi bu standarda göre yakıtlar 7 kademeye bölünmüştür. ASTM D975-16a (2016) standardında yakıtların sınıflandırılmasında, kinematik viskozite ve yoğunluğun artışına göre kademe artışı sağlanmaktadır (Institute of Automotive Service Excellence [ASE], 2007). Tabloda belirtilen No. 1-D yakıtların %90'ının buharlaşabileceği sıcaklık 288°C olduğu dikkate alındığında oldukça uçucu olduğu görülmektedir. Kerosen, jet yakıtı gibi yakıtlar No. 1-D dizel yakıtı gerekliliklerini sağlar (US Energy Information Administration [EIA], 2016). Bu yakıtlar genellikle yüksek hızlı ve değişken devirli dizel motorlarda kullanılır (Norman ve Corinchock, 2007, böl. 14). No. 1-D yakıtların bir diğer kullanım amacı da akma noktası, bulutlanma noktası gibi soğuk iklim koşullarında No. 2-D yakıtlardan daha üstün özelliklere sahip olması sebebiyle bu yakıtların özelliklerini geliştirmek için soğuk iklimlerde No. 2-D yakıtlarla karıştırılarak kullanılabilir (Challen ve Baranescu, 1999).

No. 2-D dizel yakıtlar, No. 1-D yakıtlara göre daha vizkoz, daha az uçucu olan orta damıtma yakıtlarıdır (US Energy Information Administration [EIA], 2016). Bu yakıtlar genellikle düşük uçuculuk sıcaklığı ihtiyacı olmayan otomobil yakıtları olarak veya değişken devir gerektiren yüksek güçlü motorlarda kullanılır (Winkler, 2003). No. 2-D dizel yakıtlar ısıtma gerektirmeyen uygulamalarda sıklıkla kullanılır (ASE, 2007).

No. 4-D dizel yakıtlar ise diğer yakıtlara göre daha ağır ancak yine damıtma ürünü olan yakıtlardır. Bu tip yakıtlar genellikle ağır ve orta devirli dizel motorlarda kullanılır (Speight, 2015). Ayrıca bu yakıtlar bazı durumlarda ısıtılarak ve böylece viskozitesi azaltılarak kullanılabilir (Challen ve Baranescu, 1999).

ASTM D975-16a (2016) standardıyla sınıflandırılan yakıtlardan No: 1-D ve No: 2-D yakıtlar içeriğinde bulunan kükürt oranlarına göre de sınıflandırılmıştır. Tablo 2.1'den de anlaşılacağı gibi bu sınıflandırmalardan S15 kükürt oranının maksimum 15 ppm, S500 kükürt oranının maksimum %0,05 ve S5000 kükürt oranının maksimum %0,5 olabileceği yakıtlardır. Tüm endüstrilerde daha düşük kükürtlü yakıtların kullanımı için yakıt içeriğindeki maksimum kükürt oranları ile ilgili limitler sürekli azaltılmaktadır (Omidvarborna, Kumar ve Kim, 2014).

ASTM D975-16a (2016) standardında belirtilen yakıtların tamamı distile yakıtlardır. Dizel motorlarda kullanılabilen ancak distile olmayan, artık fuel oiller bu standartta yer almamaktadır. ASTM standartlarında distile olmayan yakıtların limitleri belirlenirken ısıtma işlemlerinde kullanılan fuel oiller için limitleri belirleyen ASTM D396-16 (2016) standardı kullanılmaktadır (EIA, 2016). Bu yakıtlar yüksek viskoziteli yakıtlardır ve dizel motorlarda kullanımı öncesi ısıtılması ve viskozitesinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu sebeple bu yakıtların kullanıldığı dizel motorların işletmeleri için ilk kurulum maliyetleri daha yüksek olmaktadır. Belirtilen standartta No: 5 ve No: 6 yakıtlar olarak geçen ağır yakıtlar için belirlenen limit değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 ASTM D396-16 standardına göre ağır yakıtların sınıflandırması (ASTM D396-16, 2016)

Özellikler	Limit	Birim	Test Yöntemi	No. 5		No. 6
				Hafif	Ağır	
Parlama Noktası	min	°C	ASTM D93	55	55	60
Su ve Tortu Oranı	mak	%	ASTM D2709	---	---	---
			ASTM D473	0,5	1	1
100°C'de Kinematik Viskozite	min	mm ² /sn	ASTM D445	5	9	15
	mak			8,9	14,9	50
Kül Oranı	mak	%	ASTM D482	0,15	0,15	---

Tabloda verilen limit değerleri incelendiğinde artık fuel oiller için izin verilen kül oranı ve tortu oranı distile yakıtlara göre oldukça yüksektir. Ayrıca 100°C'de ölçülen kinematik vizkoziteler de oldukça yüksektir. Bu parametre bu yakıtların akışkan duruma geçebilmesi için ısıtılması gerektiğini ifade eder. Bu yakıtlar genellikle kalorifer sistemlerinde, ağır ve orta devirli dizel motorlarda veya kazan sistemlerinde kullanılabilir (Speight, 2015).

2.2.2.2 Avrupa Standartlarına Göre Yakıt Sınıflandırmaları

CEN (Avrupa Standardizasyon Komitesi), Avrupa Birliği tarafından ve Avrupa Serbest Ticaret Birliği (EFTA) tarafından Avrupa düzeyinde gönüllü standartların geliştirilmesi ve tanımlanmasından resmi olarak tanınan üç Avrupa Standartlaştırma Kuruluşundan biridir (CEN, 2017). Diğer iki kuruluştan bir tanesi Avrupa Elektroteknoloji Standartları Kuruluşu (CENELEC), diğeri ise Avrupa Telekomunikasyon Standartları Kuruluşu (ETSI) olarak adlandırılır. Yakıtlarla ilgili çeşitli parametreler için limitleri belirleyen standartlar CEN tarafından belirlenmiştir. CEN, bünyesinde 34 Avrupa ülkesinin ulusal standardizasyon kuruluşlarını bir araya getiren bir kuruluştur (CEN, 2017). Bu standartlarda belirtilen limitler resmi olarak uygulanırken uygulayan ülkenin ulusal standardı olarak revizyon edilerek kullanılır. Bu revizyonda ülkede konu ile ilgili diğer dinamiklerin etkisi de standardın metnine dahil edilir (BSI Group, 2017).

Avrupa’da otomobillerde kullanılabilecek yakıtların çeşitli parametreleri için limitler belirlenirken referans olarak kabul edilen EN 590 (2009) standardına göre belirlenen çeşitli limitler Tablo 2.3’te verilmiştir.

Tablo 2.3 EN 590 standardına göre belirlenen Avrupa’da kullanılan otomobil dizel yakıtları için limitler (EN 590, 2016)

Özellikler	Limit	Birim	Test Yöntemi	
Setan Sayısı	min		EN 15195	51
			EN ISO 5165	
Setan İndisi	min		EN ISO 4264	46
Yoğunluk (15°C)	min	kg/m ³	EN ISO 3675	820
	mak		EN ISO 12185	845
Kükürt Oranı	mak	mg/kg	EN ISO 20846	10
			EN ISO 20884	
Parlama Noktası	min	°C	EN ISO 2719	>55
%10 Damıtma Kalıntısındaki Karbon Oranı	mak	%	EN ISO 10370	0,3
Kül Oranı	mak	%	EN ISO 6245	0,01
Su Oranı	mak	mg/kg	EN ISO 12937	200
Oksidasyon Kararlılığı	mak	g/m ³	EN ISO 12205	25
Yağlama Özelliği	mak	micron	EN ISO 12156	460
40°C'de Kinematik Viskozite	min	mm ² /sn	EN ISO 3104	2
	mak			4,5
250°C'de Buharlaşma Oranı	mak	%	EN ISO 3405	<65
350°C'de Buharlaşma Oranı	min	%		85
%95'inin Buharlaştığı Sıcaklık	mak	°C		360

Tabloda verilen değerler incelendiğinde bu standarda uygun yakıtların oldukça uçuşucu ve düşük viskoziteli olduğu görülmektedir. Ayrıca ASTM standartlarında limitleri belirlenen yakıtlarla karşılaştırıldığında EN 590 (2009) standardıyla belirlenen otomobil yakıtlarının limitlerinin No. 2-D dizel yakıtların limitlerine yakın olduğu görülmektedir. Bu yakıtlar karşılaştırıldığında EN 590 standardıyla belirlenen yakıtların No. 2-D yakıtlara göre minimum setan sayısı değerinin oldukça yüksek olduğu ve izin verilen maksimum kükürt oranının da daha düşük olduğu görülmektedir.

Avrupa’da otomobil (Lastikli taşıt) yakıtlarına ek olarak çeşitli endüstrilerde çeşitli amaçlarla kullanılabilen dizel motorların kullanabileceği yakıtlarla ilgili parametreler Avrupa Parlamentosu’nun yayınladığı yönergeye göre limitlendirilmiştir. Bu yönergede kullanabileceği yakıtlar için sınırlama getirilen dizel motorlar güçleri ve üretim yılları dikkate alınarak çeşitli sınıflara ayrılmıştır. Günümüzde 560 kW’a kadar güçteki yeni üretilen dizel motorlar için 4. nesil dizel motorlar için belirlenen limitler, daha yüksek güçteki dizel motorlar için ise 3. nesil A kategorisi motorlar için belirlenen limitler kullanılmaktadır (European Union Law Publications, 2004). Ayrıca, yönergenin yayınlandığı yıldan itibaren her geçen yıl yeni üretilen dizel motorların kullanabileceği yakıtların parametrelerine ait limitlerin sıkılaştığı görülmektedir. 560 kW’a kadar güce sahip dizel motorların kullanabileceği yakıtlarla ilgili limitler Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.4 Avrupa Parlamentosu’nun ilgili yönergesine göre lastikli taşıtlar dışında kullanılan 560 kW’ya kadar güce sahip dizel motorların yakıtları için limitler (European Union Law Publications, 2004)

Özellikler	Limit	Birim	Test Yöntemi	
Setan Sayısı	mak		EN ISO 5165	54
Yoğunluk (15°C)	min	kg/m ³	EN ISO 3675	833
	mak			837
Kükürt Oranı	mak	mg/kg	ASTM D5453	10
Parlama Noktası	min	°C	EN ISO 2719	55
%10 Damıtma Kalıntısındaki Karbon Oranı	mak	%	EN ISO 10370	0,2
Kül Oranı	mak	%	EN ISO 6245	0,01
Su Oranı	mak	%	EN ISO 12937	0,02
Oksidasyon Kararlılığı	mak	%	EN ISO 12205	0,025
Yağlama Özelliği	mak	micron	EN ISO 12156	400
40°C’de Kinematik Viskozite	min	mm ² /sn	EN ISO 3104	2,3
	mak			3,3
%50’sinin Buharlaştığı Sıcaklık	min	°C	EN ISO 3405	245
%95’inin Buharlaştığı Sıcaklık	min	°C		345
%95’inin Buharlaştığı Sıcaklık	mak	°C		350

Tabloda verilen veriler incelendiğinde lastikli taşıtlar dışında kullanılan 560 kW’ya kadar güce sahip dizel motorlarda kullanılan yakıtlara ait belirlenen limitlerin, EN 590

(2009) standardıyla otomobil yakıtları için belirlenen limitlere oldukça benzerlik göstermektedir. Ancak, bu yakıtlarda setan sayısı için bir üst limit belirlenmiş olması ve yağlama özelliği için daha yüksek bir maksimum limit belirlenmiş olması dikkat çekmektedir.

560 kW'ın üzerinde güce sahip dizel motorların kullanabileceği yakıtlarla ilgili limitler Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5 Avrupa Parlamentosu'nun ilgili yönergesine göre lastikli taşıtlar dışında kullanılan 560 kW'nın üstünde güce sahip dizel motorların yakıtları için limitler (European Union Law Publications, 2004)

Özellikler	Limit	Birim	Test Yöntemi	
Setan Sayısı	min		EN ISO 5165	52
	mak			54
Yoğunluk (15°C)	min	kg/m ³	EN ISO 3675	833
	mak			837
Kükürt Oranı	mak	mg/kg	ASTM D5453	300
Parlama Noktası	min	°C	EN ISO 2719	55
%10 Damıtma Kalıntısındaki Karbon Oranı	mak	%	EN ISO 10370	0,2
Kül Oranı	mak	%	EN ISO 6245	0,01
Su Oranı	mak	%	EN ISO 12937	0,05
Oksidasyon Kararlılığı	mak	%	EN ISO 12205	0,025
40°C'de Kinematik Viskozite	min	mm ² /sn	EN ISO 3104	2,5
	mak			3,5
%50'sinin Buharlaştığı Sıcaklık	min	°C	EN ISO 3405	245
%95'inin Buharlaştığı Sıcaklık	min	°C		345
%95'inin Buharlaştığı Sıcaklık	mak	°C		350

Tabloda görüldüğü gibi lastikli taşıtlar dışında kullanılan 560 kW'nın üzerinde güce sahip dizel motorların yakıtları ile ilgili belirlenen limitler 560 kW'ya kadar güce sahip dizel motorlarda kullanılan yakıtlara ait belirlenen limitlere benzerlik göstermektedir. Ancak bu yakıtların izin verilen en yüksek kükürt oranı limiti 560 kW'ya kadar güce sahip dizel motorlarda kullanılan yakıtlar için belirlenen en yüksek kükürt oranı limitine göre çok yüksek olduğu görülmektedir.

2.2.2.3 Denizcilik Endüstrisinde Kullanılan Yakıtlar İçin Yapılan Sınıflandırmalar

Cooper (2015) editörlüğünde hazırlanan ve Avrupa Petrol Rafinerileri Birliği tarafından yayınlanan istatistiksel raporda 2015 yılında tüm dünyada harcanan toplam akaryakıt miktarı 4,185 milyon ton; denizcilik endüstrisinde kullanılan toplam damıtılmış ve artık fuel oil miktarı ise 235 milyon ton olarak belirtilmiştir. Bu veriler dikkate alındığında dünyadaki toplam akaryakıt harcamasının %5,61'inin denizcilik endüstrisi tarafından yapıldığı görülmektedir. Bu sebeple hava kirliliğinin azaltılmasında deniz yakıtları için belirlenen limitlerin oldukça önemli olduğu görülmektedir.

Denizcilik endüstrisinde gemi kaynaklı kirliliği önleme konusunda MARPOL Konvansiyonu, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından 1973 yılında imzalanmış, 1978 yılında güncellenmiş ve 1983 yılında yürürlüğe girmiştir (IMO, 2017). MARPOL konvansiyonu imzalandığı günden itibaren sürekli geliştirilmekte ve yeni ekler ve yeni maddelerle zenginleştirilmektedir.

Denizcilik kaynaklı hava kirliliğinin azaltılması konusu MARPOL konvansiyonun 1997 yılında kabul edilen ve 2005 yılında yürürlüğe giren “Gemilerden Kaynaklı Hava Kirliliğinin Önlenmesi” başlığına sahip Ek-VI (Annex VI) kısmıyla ilgilidir. Günümüzde dünyadaki tüm gemi kapasitesinin %88,9'una sahip olan 63 ülke bu protokole taraf olmuştur (Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı [UDHB], 2017). Türkiye bu sözleşmeye 24 Haziran 1990 tarihinde taraf olmuştur ve bu tarihten itibaren yetkilendirilmiş birimlerle sözleşme kapsamında kabul edilen tüm limitleri uygulamasını ve denetimini devam ettirmektedir.

Denizcilik endüstrisinde gemilerden kaynaklı hava kirliliğini azaltmak için kullanılabilecek yakıtların çeşitli parametreleri için limitler, IMO ile işbirliği içinde çalışan (ISO, 2017) Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu (ISO) tarafından hazırlanan ISO 8217 (2010) standardıyla belirlenmiştir. Denizcilik endüstrisinde kullanılan damıtılmış dizel yakıtlar için belirlenen limitler Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6 Denizcilik endüstrisinde kullanılan damıtılmış yakıtlar için belirlenen limitler (ISO 8217, 2010)

Özellikler	Limit	Birim	DMX	DMA	DMZ	DMB
Setan İndisi	min		45	40	40	35
Yoğunluk (15°C)	mak	kg/m ³	---	890	890	900
Kükürt Oranı	mak	%	1	1,5	1,5	2
Parlama Noktası	min	°C	43	60	60	60
Akma Noktası	yaz/mak	°C	---	0	0	6
	kış/mak	°C	---	-6	-6	0
Bulutlanma Noktası	mak	°C	-16	---	---	---
%10 Damıtma Kalıntısındaki Karbon Oranı	mak	%	0,3	0,3	0,3	---
Kül Oranı	mak	%	0,01	0,01	0,01	0,01
Su Oranı	mak	%	---	---	---	0,3
Oksidasyon Kararlılığı	mak	g/m ³	25	25	25	25
Yağlama Özelliği	mak	micron	520	520	520	520
40°C'de Kinematik Viskozite	min	mm ² /sn	1,4	2	3	2
	mak		5,5	6	6	11

Tabloda görüldüğü gibi denizcilik endüstrisinde kullanılan damıtılmış yakıtlar 4 gruba ayrılmıştır. Bu gruplardan birincisi tabloda DMX yakıtı olarak belirtilen oldukça düşük parlama noktası alt limitine sahip, genellikle yüksek devirli dizel motorlarda kullanılan kerosen benzeri dizel yakıtlardır (Arkas Bunker, 2017). Diğer türler olan DMA ve DMZ ise, marine gas oil (MGO) olarak bilinen yakıtı oldukça yakın ve yüksek kaliteli dizel yakıtlardır (Exxonmobil, 2017). Tabloda DMB olarak gösterilen yakıt ise diğer damıtılmış yakıtlara göre daha viskoz, su oranı ve yoğunluğu daha yüksek olan ve marine diesel oil (MDO) olarak bilinen yakıtı benzerlik gösteren distile bir yakıttır (The International Council on Combustion Engines [CIMAC], 2013).

Denizcilik endüstrisinde en çok kullanılan petrol ürünü yakıt türü artık fuel oillerdir. Bu yakıtlar damıtma esnasında buharlaşmamış olan ürünlerin çeşitli oranlarda damıtılmış yakıtlarla karıştırılmasıyla elde edilir (Stipanovic, 2003, böl. 7). Dünyada yıllık yaklaşık 200 milyon ton artık fuel oil harcamı vardır (Cooper, 2015). Bu yakıtlar damıtma ürünü olmadığı için yoğunluğu, viskozitesi, karbon oranı yüksek yakıtlardır (ABS, 1984). Denizcilik endüstrisinde kullanılan artık fuel oiller için ISO 8217 (2010) standardıyla belirlenen limit değerleri Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7 Denizcilik endüstrisinde kullanılan artık fuel oil yakıtlar için belirlenen limitler (ISO 8217, 2010)

			RMA	RMB	RMD	RME	RMG				RMK		
			10	30	80	180	180	380	500	700	380	500	700
Özellikler	Limit	Birim											
50°C'de Kinematik Viskozite	mak	mm ² /sn	10	30	80	180	180	380	500	700	380	500	700
Yoğunluk	mak	kg/m ³	920	960	975	991	991				1010		
Mikro Karbon Kalıntısı	mak	%	2,5	10	14	15	18				20		
Kül Oranı	mak	%	0,04	0,07	0,07	0,07	0,1				0,15		
Su Oranı	mak	%	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5				0,5		
Akma Noktası (Yaz)	mak	°C	6	6	30	30	30				30		
Akma Noktası (Kış)	mak	°C	0	0	30	30	30				30		
Parlama Noktası	min	°C	60	60	60	60	60				60		
Vanadyum Oranı	mak	mg/kg	50	150	150	150	350				450		
Sodyum Oranı	mak	mg/kg	500	100	100	50	100				100		
Aluminyum+Silisyum Oranı	mak	mg/kg	25	40	40	50	60				60		

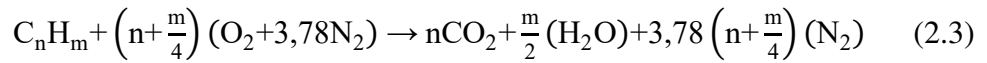
Tabloda görüldüğü gibi denizcilik endüstrisinde kullanılan artık fuel oiler kinematik viskoziteleri ve yoğunluklarına göre isimlendirilmişlerdir. Tabloda soldan sağa doğru ilerledikçe yakıtların viskozitesinin ve yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Yakıtların yüksek viskozitesi dikkate alındığında akışkan bir şekilde kullanılabilmesi için ısıtılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bu yakıtlar distile edilmiş yakıtlarla karşılaştırıldığında kül oranının, su oranının ve karbon kalıntısının daha yüksek olduğu görülmektedir. Son olarak, bu yakıtlarda önceki tüm yakıtlardan farklı olarak içeriğinde bulunan vanadyum, sodyum, aluminyum ve silisyum oranları da limitlendirilmiştir.

2.3 Dizel Motorlarda Yanma

Dizel motorlar, hidrokarbonlardan oluşan yakıtların içeriğindeki kimyasal enerjiyi işe çevirmek için silindir içine verilen hava içeriğindeki oksijeni kullanırlar. Yüksek basınçtaki hava içine püskürtülen yakıtın oksijenle reaksiyona girmesi (yanması) sonucu ortaya çıkan basınç yükselmesiyle elde edilen enerji pistonlar yardımıyla mekanik işe çevrilir (Challen ve Baranescu, 1999). Silindir içerisinde meydana gelen

yanma, önemli miktarda ısı ortaya çıkmasını sağlayan ve uygun ortamda hızlıca yayılabilen ekzotermik bir reaksiyondur (El- Mahallawy ve El-Din Habik, 2012). Yanma süreci, yakıtın spesifik özelliklerinden, dış etkilere ve motorun tasarım özelliklerinden etkilenebilen karmaşık bir süreçtir (Velji, Lüft ve Merkel, 2010). Dizel motorlarda yanma süreci, kendi kendine tutuşabilme özelliğine sahip bir yakıtın silindir içerisinde yüksek basınç ve sıcaklığa ulaşmış hava içerisine püskürtülmesiyle başlayan ve atık gazların egzoz valfinden atılmasına kadar devam eder (Binder, 2010).

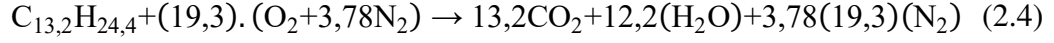
Dizel motorlarda silindir içerisinde gerçekleşen yanma olayı sırasında silindir içerisine verilen hava miktarı en az püskürtülen yakıtın tamamının tepkimeye girebileceği miktarda olmalıdır (Tauzia ve Maiboom, 2013). Bu orana stokiyometrik oran denir. Ancak uygulamada bu oranda gerekenden daha fazla miktarda hava verilir (Challen ve Baranescu, 1999). Silindir içine verilen gerçek hava miktarının stokiyometrik orana göre verilmesi gereken hava miktarına oranına da hava fazlalık katsayısı denir. Silindir içine stokiyometrik orana eşit miktarda hava verildiği durumda hava fazlalık katsayısı 1 olur. Bir dizel motorda silindir içerisine stokiyometrik orana göre hava verildiğinde gerçekleşen tepkimenin denklemi aşağıda verilmiştir (Flagan ve Seinfeld, 1988).



Yukarıdaki tepkime, C_nH_m şeklinde gösterilen hidrokarbonun tamamının tepkimeye gireceği minimum miktarda oksijenle yakıldığında oluşan karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) miktarını göstermektedir. Ayrıca dizel motorlarda yanma sırasında silindir içerisine ortamdaki hava verilmektedir. Bu hava da bünyesinde oksijen haricinde yüksek miktarda azot (N_2) ve az miktarda çeşitli gazlar bulundurmaktadır. Bu tepkimede silindir içine verilen hava içeriğindeki azot oranı %78, oksijen oranı ise %21 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla silindir içerisine 1 mol oksijen (O_2) verildiğinde 3,78 mol de N_2 verildiği hesaplanmıştır.

Challen ve Baranescu (1999) ASTM standartlarına göre belirlenen No. 2-D dizel yakıtının yaklaşık molekül ağırlığının 183 gram/mol ve yaklaşık karbon oranının da

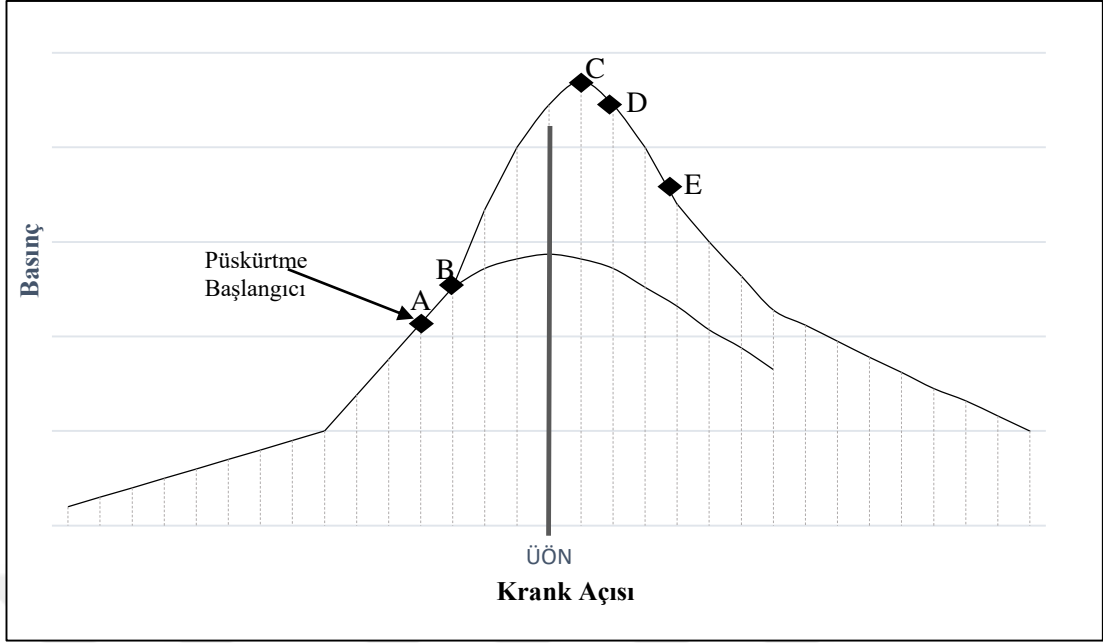
%86,57 olduğundan yola çıkarak bu yakıtın kimyasal gösteriminin yaklaşık değerini $C_{13,2}H_{24,4}$ olarak hesaplamışlardır. Buna göre yukarıda verilen tepkime denklemine bu verileri ekleyecek olursak aşağıda verilen tepkime denklemi elde edilir.



Bu denkleme göre 1 mol yakıt tepkimeye girdiğinde 19,3 mol O_2 de tepkimeye girmekte ve sonuç olarak 13,2 mol CO_2 , 12,2 mol H_2O tepkimeden çıkmaktadır. Buna göre 186 gram (1 mol) yakıt yakıldığında, 580,8 gram CO_2 salımı yapıldığı görülmektedir. Ayrıca tepkimeye 19,3 mol O_2 girebilmesi için yaklaşık 73 mol de N_2 tepkimeye girmelidir.

Tepkime denkleminde yanan yakıtın içeriğinde bulunan diğer maddeler ile hava içeriğinde bulunan azot ve oksijen dışındaki maddeler işleme dahil edilmemiştir. Ancak gerçek yanma koşullarında yanma odasına hem yakıt içeriğinden hem de hava içeriğinden farklı maddeler de dahil olacaktır. Bun göre de salımı yapılan hava kirleticilerin çeşitliliği değişkenlik gösterebilecektir (El- Mahallawy ve El-Din Habik, 2012).

Dizel motorlarda yanmanın gerçekleştirilmesi için silindir içine yakıtın püskürtülmesinden sonra artık gazların egzoz valfi üzerinden atılmasına kadar süren yanma olayı 4 ayrı periyot olarak incelenmektedir. Bu periyotlar, krank açısına göre silindir içi basınç değişimini gösteren grafik üzerinde Şekil 2.1’de verilmiştir. Buna göre birinci periyot A noktasında başlayıp B noktasına kadar süren tutuşma gecikmesi periyodu, ikinci periyot B noktasıyla C noktası arasındaki ani yanma periyodu, üçüncü periyot C noktası ile D noktası arasındaki kontrollü yanma periyodu ve dördüncü periyot da D noktasıyla E noktası arasında kalan art yanma periyodudur. (Sitkei, 1964; Velji, Lüft ve Merkel, 2010).



Şekil 2.1 Dizel motorlarda yanma safhaları (Velji, Lüft ve Merkel, 2010)

2.3.1 Tutuşma Gecikmesi

Silindir içersine püskürtülen yakıtın enjektörün atomizöründen çıktıktan sonra buharlaşarak silindir içersinde bulunan basınçlı hava içersine karışır ve bazı kimyasal değişikliklere uğrar. Hava içersine karışan ve gerekli kimyasal değişiklikleri tamamlayan yakıt patlar ve böylece silindir içersinde ani bir basınç yükselmesi olur. Silindir içersine yakıtın püskürtülmesiyle patlamanın başlaması arasında geçen zaman tutuşma gecikmesi olarak adlandırılır (Wharton, 1991). Tutuşma gecikmesinin süresi yakıtın yanma ortamında gereken uygun şartlara hazırlanması için gerekli bir süre olduğu için birçok dış etkenden etkilenebilir. Tutuşma gecikmesi, yakıtın setan sayısı, viskozitesi, püskürtülme miktarı, püskürtülme basıncı, uçuculuğu ile dizel motorun enjeksiyon sistemi ve enjektör memesi geometrisinden etkilenebilir (Lakshminarayanan ve Aghav, 2010).

Silindir içersindeki hava sıcaklığı yükseldikçe yakıtın buharlaşma ve hava içersinde karışma hızı artacak ve böylece tutuşma gecikmesi süreci kısacaktır (Woodyard, 2004). Buna paralel olarak yanma odasının dış ortamla ısı alış verişinin azalması tutuşma gecikmesinin kışalmasına sebep olur (Stone, 1992). Ayrıca, dizel

motorlarda sıkıştırma oranı arttıkça tutuşma gecikmesi sürecinin de kısaldığı görülmektedir (Selvan, Anand ve Udayakumar, 2009). Son olarak yakıtların uçuculuğunun yüksek olması, daha düşük sıcaklıklarda buharlaşmasına ve hava içerisinde daha iyi karışmasına sebep olur. Böylece tutuşma gecikmesi süreci kısalmış ve özgül yakıt harcaması azalır (Lakshminarayanan ve Aghav, 2010).

Yakıtın silindir içerisine püskürtülme stratejisi tutuşma gecikmesi sürecini etkileyebilir. Gerekli miktarda yakıtın silindir içerisine püskürtülmesinin başlamasıyla bitmesi arasındaki sürecin kısılması, yakıtın daha yüksek basınçlarda püskürtülmesi ve püskürtme sırasında daha iyi atomizasyon sağlanması gibi durumlar yanmanın başlangıcını kolaylaştırarak tutuşma gecikmesi sürecini kısaltır (Woodyard, 2004). Ayrıca pilot enjeksiyonu yapılması da ana enjeksiyonda püskürtülen yakıtın tutuşma gecikmesi sürecini kısaltmaktadır (Herfatmanesh ve Zhao, 2014; Schmid, Leipertz ve Fettes, 2002).

Tutuşma gecikmesinin uzun olması yanma sırasında daha yüksek basınçlara ve sıcaklıklara ulaşılmasına sebep olur (Lejda ve Wos, 2012). Bu durum NO_x emisyonlarında önemli ölçüde artışlar olması sonucunu ortaya çıkarır (Debnath, Saha ve Sahoo, 2015; Ishida, Ueki ve Sakauguo, 1997). Dizel motorlar kaynaklı NO_x emisyonlarının tamamına yakın bir kısmı yüksek sıcaklıklarda meydana gelmektedir (Saravanan, Nagarajan, Anand ve Sampath, 2012).

Tutuşma gecikmesi çeşitli setan arttırıcı katkı maddeleri ekleyerek yakıtın kimyasal özelliklerini veya silindir içerisindeki gazların termodinamik koşulları değiştirilerek kısaltılabilir (Musculus ve Dietz, 2005). Setan sayısının azalması ise tutuşma gecikmesi sürecinin uzamasına sebep olur. Tutuşma gecikmesi sürecinin uzaması da yanma sırasında silindir içerisinde daha yüksek basınçlara ve sıcaklıklara ulaşılmasına sebep olarak motor verimini arttıracak ve spesifik yakıt harcamasını azaltacaktır (Lejda ve Wos, 2012). Ayrıca, tutuşma gecikmesi süresinin uzamasıyla yanma öncesinde silindir içerisinde daha iyi bir hava-yakıt karışımı sağlanabilir (Tsukahara, Murayama ve Yoshimoto, 1982).

2.3.2 Ani Yanma Periyodu

Silindir içerisine püskürtülen yakıtın tutuşma gecikmesi sonrası tutuşmasıyla başlayan ve silindir içi basıncın en yüksek olduğu noktada sona eren tanma evresi ani yanma periyodudur (Velji, Lft ve Merkel, 2010). Bu evre şekil 2.1’de B ve C noktaları arasında kalan bölüm olarak gösterilmiştir. Bu evrede tutuşma olduğu için basınç ve sıcaklık ani olarak yükselmektedir. Silindir içi basıncın ulaşabileceği maksimum değer ani yanma periyodunda gerçekleşen yanma performansına göre ortaya çıkar (Stone, 1992).

Ani yanma periyodu, tutuşma gecikmesi süresince silindir içerisinde biriken yakıtın tutuşmanın başlamasıyla birlikte çok hızlı bir şekilde yandığı periyottur. Tutuşma gecikmesi süreci uzadıkça silindir içerisinde meydana gelen hava yakıt karışımının kalitesi artacaktır ve böylece daha hızlı bir yanma olarak ani yanma periyodunda meydana gelen basınç yükselmesi oranı artacaktır. Bu ani basınç artışı da motorun daha gürültülü ve sert çalışmasına sebep olacaktır. Bu duruma dizel vuruntusu adı verilir. Dizel vuruntusu ve ani basınç yükselişi dizel motorun parçalarında zorlanma ve yorulmaya sebep olur (Nuran, 2015).

Tutuşma gecikmesi sürecinin kısa olmasıyla, tutuşmanın başladığı sırada daha az yakıt hava içinde dağılmış olacağı için silindir içerisinde daha yumuşak bir basınç artışı sağlanacak ve daha düşük maksimum basınç değerlerine ulaşılacaktır (Herfatmanesh ve Zhao, 2014). Bu durum hem motor parçalarında aşınma ve yorulma oranlarının azalmasına hem de yanma ve g üretiminin daha geniş bir krank açısı aralığında yapılabilmesine olanak sağlar.

2.3.3 Kontrollü Yanma Periyodu

Kontrollü yanma periyodu, şekil 2.1’e göre C ve D noktaları arasında kalan periyottur. Bu periyot silindir içerisinde ani yanma sonrası maksimum basına ulaşılan noktada başlar, yanmanın büyük ölçüde tamamlandığı, ısı yayılım oranının %90-95 oranlarına ulaştığı ve maksimum sıcaklığın elde edildiği noktaya kadar devam eder

(Velji, Lüft ve Merkel, 2010; Özer, 2015; Heywood, 1988; Matsson ve Andersson, 2002). Ani yanma periyodunun bitiminde silindir içerisinde basınç ve sıcaklık çok yüksek olduğu için kontrollü yanma periyodunda silindir içerisinde kalan veya püskürtülen yakıt çok hızlı bir şekilde yanar. Tutuşma gecikmesi sürecinde hava içerisine karışmamış ve henüz yanmamış olan yakıt veya halen püskürtülmekte olan yakıt bu evrede silindir içerisinde çeşitli parametrelere göre değişen kalitede ve hızda yanar. Bu parametreler, yakıtın enjeksiyon hızı, ani yanma sonrası silindir içerisinde kalan oksijen miktarı, yanma odası geometrisine bağlı olarak oluşan hava türbülansı ve bu evrede pistonun üst ölü noktaya olan yakınlığı olarak sıralanabilir (Kaya, 2010; Kulakoğlu, 2009; Hazar ve Öner, 2004). Bu periyotta yanmanın hızını ve kalitesini difüzyon kalitesi belirlediği için bu periyoda difüzyon kontrollü yanma periyodu da denir.

Kontrollü yanma periyodunda motor veriminin yüksek tutulması amacıyla yanmanın mümkün olduğunca üst ölü noktaya yakın bir yerde tamamlanması istenir (Özer, 2010; Goldwine, 2008; Heywood, 1988). Bunun sebebi; genişleme stroku boyunca silindir içerisinde basınç azalacağı için yanmanın genişleme strokunun sonlarına doğru devam etmesinin istenmemesidir. Yanmanın üst ölü nokta yakınlıklarında tamamlanmaması durumunda yanmamış yakıt demeti miktarı artacak ve böylece CO ve HC salımlarında artış meydana gelecektir (Rounce, 2011).

Silindir içerisine verilen yakıtın püskürtme hızı, gerekli miktarda yakıtın püskürtülemeye başlanacağı ve püskürtmenin biteceği krank açısını belirler. Silindire tutuşma gecikmesi sürecinde püskürtülen yakıt ani yanma periyodunda yanacaktır. Maksimum silindir basıncını ve NO_x salımlarını daha düşük seviyede tutmak için tutuşma gecikmesi sırasında püskürtülen ve hava içerisine karışan yakıt miktarının çok yüksek olmaması gerekir. Böylece, daha fazla miktarda yakıt kontrollü yanma sürecinde yakılarak daha homojen bir basınç dağılımı sağlanabilir. Ancak, kontrollü yanma evresinde yakılmak üzere çok fazla yakıt kalması da bu evrenin genişleme strokunun daha geç zamanlarına kadar sarkmasına sebep olur. Bu durum da bu evrede silindir içi basınç da düşmeye başladığı için yanma verimini düşürür. Ayrıca, hava yakıt karışımının kötü olması kontrollü yanma süreci sonunda yanmamış yakıt demeti

miktarını arttıracaktır. Böylece yanma veriminin düşmesi ve is oluşumu sonuçları ortaya çıkacaktır (Eliçin, 2011; Heywood, 1988; Velji, Lüft ve Merkel, 2010; Payri, Desantes ve Benajes, 2015; Lakshminarayanan ve Aghav, 2010).

Kontrollü yanma evresinde yanan yakıtın hava ile daha iyi karışım yapmasını sağlayan önemli parametrelerden biri de silindir içerisindeki hava türbülansıdır (Heywood, 1988). Hava türbülansının etkinliği bu evrede silindir içerisine verilen havanın daha fazla miktarda yakıtla tepkimeye girmesini sağlayarak yanma performansını arttıracak böylece yakıtın tamamı daha kısa sürede yanabilecektir. Silindir içerisindeki hava türbülansı, yanma odası geometrisine ve hava fazlalık katsayısına bağlıdır (Yadollahi ve Baroomand, 2013; Bapu, Saravanakumar ve Prasad, 2017).

“İdeal bir dizel motorunda, tutuşma gecikmesi çok kısa ve silindir içerisindeki hava türbülansı çok etkili olurdu. Böylece, basınç yükselme hızı püskürtme hızı ile kontrol edilirken basınç yükselme miktarı püskürtülen yakıt miktarı ve püskürtme avansı ile belirlenirdi” (Eliçin, 2011).

2.3.4 Art Yanma Periyodu

Art yanma periyodu Şekil 2.1'e göre D ve E noktaları arasında kalan ve kontrollü yanmanın bitiminden egzoz valfinin açılmasına kadar geçen periyottur. Kontrollü yanma periyodunda yanmamış olan yakıt demetleri bu evrede yanar. Genişleme stroku boyunca silindir hacmi artması sebebiyle basınç düştüğü için oldukça verimsiz bir yanma gerçekleşir. Bu sürecin motor veriminin artırılması ve egzoz salımlarının azaltılabilmesi için kısa sürmesi istenir (Özer, 2015; Eliçin, 2011).

Art yanma periyodunda fazla miktarda yakıtın yanması durumunda motorun spesifik yakıt harcamı yükselecek ve böylece yanma verimi düşecektir. Art yanma süresinin uzun sürmesi piston segmanlarında kurum ve egzozda is oluşumuna sebep olur (Küçükşahin, 2008).

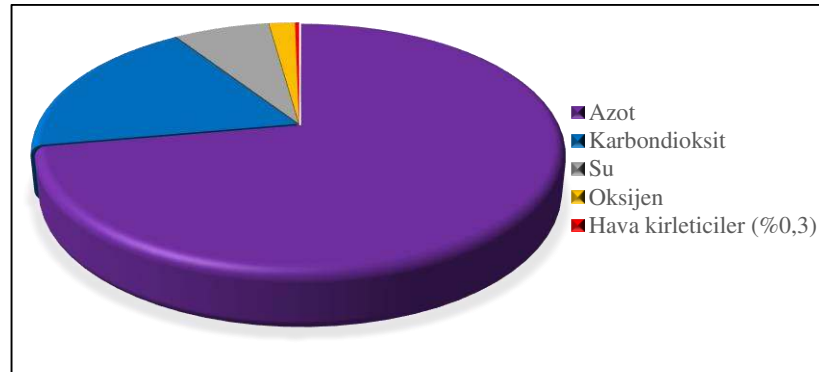
BÖLÜM ÜÇ

DİZEL MOTORLAR KAYNAKLI HAVA KİRLETİCİ ÇEŞİTLERİ

Bu bölümde dizel motorlar kaynaklı hava kirleticilerin çeşitleri, oluşum şekilleri, oluşma oranını etkileyen faktörler ve günümüzde hava kirleticilerinin oranlarının azaltılabilmesi için izlenen stratejiler incelenmiştir.

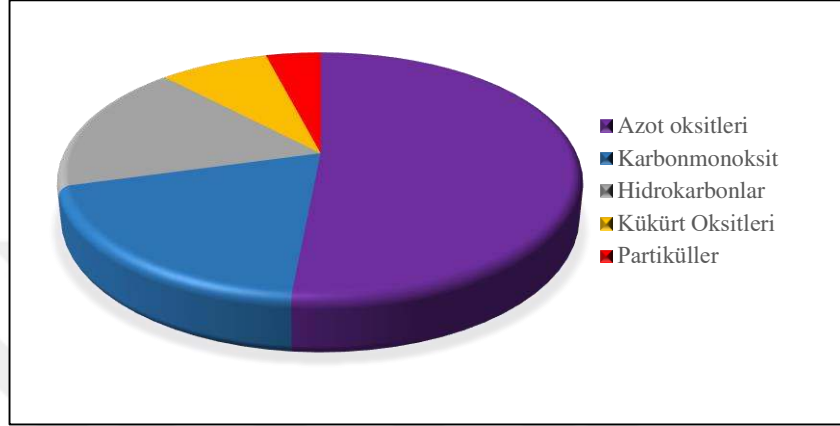
3.1 Dizel Motorlar Kaynaklı Hava Kirleticilerin Oluşumu

Dizel motorlarda yanma sonucu oluşan egzoz gazı içeriğindeki bazı zararlı maddeler hava kirliliğinin temel sebepleridir. Egzoz gazı içeriğinde ideal bir yanma meydana geldiğinde yanma sonucu CO₂ ve su açığa çıkar. Bu iki bileşiğe ek olarak yanma odasına gerekli oksijenin sağlanabilmesi için verilen hava içeriğinde bulunan başta azot olmak üzere bazı bileşikler de yanma odasında reaksiyona girmeden egzoz çıkışından atılır. Son olarak hava fazlalık katsayısı nedeniyle yanma için ihtiyaç duyulandan daha fazla miktarda verilen oksijen de yanmaya uğramadan egzoz gazı içerisinde dışarı atılır. Ancak bu bileşiklerin hiçbiri dizel motorların çevreye verdiği zararın temel sebebi değildir (Heywood, 1988; Bennett, 2010; Velji, Lüft ve Merkel, 2010). Dizel motorlar kaynaklı hava kirleticiler ideal olmayan bir yanma durumunda ortaya çıkar. Yanma sonucu ortaya çıkan bileşikler zararlı ve zararlı olmayan egzoz bileşenleri olarak gruplanabilir (Tschoeke ve diğer., 2010; Velji, Lüft ve Merkel, 2010). Yanma sonucu egzoz gazında bulunan maddeler Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Dizel motorlarda egzoz gazında bulunan maddeler (Velji, Lüft ve Merkel, 2010)

Şekilde görüldüğü gibi egzoz gazının yaklaşık %72,2'si yanma odasına hava olarak giren ve yanmadan çıkan azottan, %7'si su buharından, %18,6'sı karbondioksitten ve %1.9'u da yanmadan çıkan oksijenden oluşur. Yalnızca yaklaşık olarak %0,3'lük kısım çeşitli hava kirletici çeşitli maddelerden oluşur. Hava kirleticilerin oransal dağılımı da Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Hava kirleticilerin oransal dağılımı (Velji, Lüft ve Merkel, 2010)

Şekilde görüldüğü gibi egzoz gazı içerisindeki hava kirleticiler azot oksitlerinden, karbonmonoksitten, yanmamış hidrokarbonlardan, kükürt oksitlerinden ve katı veya katı olmayan partiküllerden oluşmaktadır. Hava kirleticilerden karbonmonoksit, hidrokarbonlar, partiküller ve is kötü veya yetersiz yanma sebebiyle, kükürt oksitleri yakıt içeriğinde bulunan kükürtün oksijenle tepkimeye girmesi sebebiyle, azot oksitler ise yanma odasında meydana gelen ikincil tepkimeler neticesinde oluşur (Velji, Lüft ve Merkel, 2010). Bazı kaynaklarda hidrokarbon ve karbonmonoksit salımları da partiküler madde salımları arasında gösterilmektedir. Son yıllarda tüm salımların indirgenebilmesi için çeşitli endüstrilerde birçok regülasyonla kısıtlamalar getirilmiştir. Bu sebeple dizel motorlar kaynaklı egzoz salımların engellenebilmesi veya azaltılması dizel motor üreticileri ve kullanıcıları için önemli bir hedeftir.

3.1.1 Partiküller ve İs

Partiküler maddeler (PM) ve is, silindir içerisinde yeterli oksijen miktarı bulunmaması veya yeterli miktarda oksijen olsa da homojen bir yanma sağlanamaması

sebebiyle oluşur (Lakshminarayanan ve Aghav, 2010). Bu maddeler tamamlanmamış yanma sonucu oluşan organik ve inorganik bileşikler, yanmamış yağlama veya silindir yağı, yakıt içeriğinde bulunan kül ve oksijenle birleşmeyen yakıt moleküllerinin ısı parçalanması sonucu ortaya çıkan bileşiklerden oluşur (Borat, Balcı ve Sürmen, 1995; Yaşar, 2016; Woodyard, 2004). Bu maddeler yeterli oksijen oranı ve uygun sıcaklıkta yanabilmektedir (Borat, Balcı ve Sürmen, 1995; Yaşar, 2016).

EPA partikülleri büyüklüklerine göre 2,5 mikron ve altında büyüklüğe sahip partikülleri solunum sisteminde akciğerlere kadar ulaşabilen partiküller ve büyüklüğü 2,5 – 10 mikron arasında değişen solunum sisteminde akciğerlere kadar ulaşamayan partiküller olarak iki farklı sınıfa ayırmıştır (Bennett, 2010).

PM salımlarının artması durumu dolaylı olarak yağlama yağı içeriğine karışan kurum miktarını arttıracak için motor parçalarının aşınmasını hızlandırır (George, Balla ve Gautam, 2007; Agarwal, Srivastava, Dhar, Maurya, Shukla ve Singh, 2013). Ayrıca, segman klerenslerinin artması, emme veya egzoz valflerinin kaçırması gibi kompresyon basıncını azaltacak çeşitli durumlar PM salımlarının artmasına sebep olur (Tufte, 2014).

3.1.2 Karbonmonoksit

Karbonmonoksit (CO); renksiz, kokusuz, tatsız ve oldukça zehirleyici bir gazdır. 1 bar ve 0°C'deki yoğunluğu 1,25 kg/m³'tür. Karbonmonoksite maruz kalmak beyin fonksiyonlarını olumsuz etkilemekte ve ölüme sebep olabilmektedir (Bennett, 2010). Dizel motorlarda yanma sırasında yeterli miktarda oksijen bulunmaması veya yanma odasındaki oksijenin karbon atomlarıyla yeteri kadar buluşamaması yanma ürünleri arasında karbonmonoksit oluşmasının temel sebebidir (Woodyard, 2004). Bu sebeple hava fazlalık katsayısının artmasının CO salımlarını azaltacağı sonucuna varılabilir. Silindir içerisinde yanma olayının başlangıcında püskürtülen yakıt kütlesinin yüzeyinde henüz yanma için elverişli sıcaklığa ulaşılmamış durumda meydana gelen tutuşmalar sonucu karbon atomlarının yeterli miktarda oksidasyona uğrayamaması sebebiyle CO bileşikleri ortaya çıkar. Ayrıca yanma odasında oksijen oranının düşük

olduğu püskürtülen yakıt kütlelerinin merkezinde ve silindir duvarı yüzeyinde meydana gelen yanma olaylarında da yeterli oksidasyon sağlanamadığı için CO bileşikleri oluşur (Velji, Lüft ve Merkel, 2010). CO salımları motorun ilk çalışması ve motor yükünün artması gibi yanma odasının yakıtça zenginleştiği durumlarda artış gösterir. (Yaşar, 2016). Oluşan CO bileşikleri oksijenle reaksiyona girerek CO₂ bileşiklerine dönüşebilir (Heywood, 1988).

3.1.3 Hidrokarbonlar

Dizel motorlarda yanma sırasında yüksek sıcaklıklarda moleküler olarak değişime uğrayan hidrokarbon türevi yakıtlar, ortamda yetersiz oksijen olması veya herhangi bir sebeple bir kısmının tutuşmaması sonucu termal kraking oluşmasıyla ilk bileşiktekinden daha farklı bir hidrokarbon formuna dönüşebilir. Bu hidrokarbonların bir kısmı yanmanın devam etme sürecinde tutuşarak yansa da bir kısmı yanmadan egzoz gazı içerisine karışır. Egzoz gazı içerisine karışan bu yanma ürünleri hidrokarbon (HC) salımlarının ortaya çıkmasına sebep olur (Velji, Lüft ve Merkel, 2010). Tutuşma gecikmesinden sonra püskürtülen yakıt, silindir içerisindeki karışım hızını yavaşlatır. Bu durum daha düşük verimli bir yanmaya sebep olarak hidrokarbon salımlarının artmasına sebep olur (Özer, 2015; Kutlar, Ergeneman, Arslan ve Mutlu, 1992). Ayrıca, silindir içerisine püskürtülen yakıt tutuştuğunda oluşan alev özellikle silindir duvarı yüzeyine ve püskürtülen yakıt kütlelerinin merkezine bu bölgelerdeki düşük sıcaklık ve oksijen konsantrasyonu sebebiyle ulaşamayabilir. Bu durum özellikle soğuk ilk hareket sırasında veya motorun düşük yük durumlarında görülebilir. Böyle bir durumda bu bölgelerde bulunan termal krakinge uğramış veya uğramamış hidrokarbonlar tutuşma olmaksızın egzoz gazı içerisine karışarak dışarı atılır (Velji, Lüft ve Merkel, 2010, Flagan ve Seinfeld, 1988). Ayrıca püskürtme sistemindeki sorunlar veya püskürtme sonrası enjektörde damlalar halinde gelen yakıt da hidrokarbon salımlarında artışa sebep olur (Lakshminarayanan ve Aghav, 2010; Yu, Wong ve Shahed, 1980).

3.1.4 Kükürt Oksitleri

Dizel motorlarda kullanılan hidrokarbon türevi yakıtlar içeriğinde bulunan kükürt yanma sırasında oksidasyona uğrayarak önce kükürt dioksit (SO_2) bileşiğine bir kısmı da kükürt trioksit (SO_3) bileşiğine dönüşür. SO_3 bileşiği de egzoz içinde bulunan su buharı ile tepkimeye girdiğinde H_2SO_4 asitini oluşturur. Bu asit egzoz devrelerinde ve egzozun temas ettiği ekipmanlarda aşınmaya sebep olur (Heywood, 1988; Sirvio, Niemi, Heikkilä ve Hiltunen, 2016). SO_2 ve diğer kükürt oksitleri asit yağmurlarının temel sebeplerinden biridir (US EPA, 2017a). SO_2 'nin 1 bar ve 0°C 'deki yoğunluğu $2,85 \text{ kg/m}^3$ 'tür.

3.1.5 Azot Oksitleri

Dizel motorlarda yanma sırasında silindir içerisinde bulunan azot inert bir gazdır ve tepkimeye girmeye yatkın değildir. Normal koşullarda hava ile birlikte yanma odasına giren azotun yanma sonrası tepkimeye girmeden yine azot olarak çıkması beklenir (Bennett, 2010). Ancak bazı durumlarda azot da oksidasyona uğrayarak nitrik oksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) olarak azot oksit bileşiklerine dönüşür. 1 bar ve 0°C 'deki nitrik oksitin yoğunluğu $1,34 \text{ kg/m}^3$, azot dioksitin yoğunluğu ise $2,05 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Azot oksitlerinin (NO_x) oluşmasının 3 kaynağı vardır. Bunlardan birincisi; Zeldovich mekanizmasıyla açıklanan ve silindir içi sıcaklığın 1900°C 'nin üzerine çıktığı durumda hava içerisindeki azot atomlarının oksidasyonu ile termal kaynaklı azot oksit oluşumudur (Velji, Lüft ve Merkel, 2010; Heywood, 1988; Zeldovich, 1946). İkinci durum Fenimore mekanizmasıyla açıklanan yine hava içerisindeki azotun silindirde oluşan alev çevresinde çok ani olarak 2500°C 'nin üstüne yükselen sıcaklık kaynaklı bu bölgelerde meydana gelen azot oksit oluşumudur. Bu durumda moleküllerin oluşması için gerekli süre milisaniyeler aralığındadır (Velji, Lüft ve Merkel, 2010; Sutton ve Flemming, 2008). Üçüncü durum ise yakıt içeriğinde bulunan azot atomlarının alev bölgesinde oksidasyona uğramasıyla ortaya çıkan azot oksit oluşumudur (Velji, Lüft ve Merkel, 2010; Kolb, 1990). Ancak yakıt içeriğindeki azottan kaynaklı oluşan NO_x salımları, hava içeriğinde bulunan azottan kaynaklı NO_x

salımları yanında ihmal edilebilecek ölçüde düşük seviyededir. Azot oksit salımları ayrıca azot asit yağmurlarının oluşmasında önemli rol oynar (US EPA, 2017b).

3.2 Dizel Motorlarda Egzoz Gazında Hava Kirleticilerin Oranlarının Düşürülmesi İçin Kullanılan Yöntemler

Dizel motorlarda HC, CO ve PM salımları silindir içerisinde hava ve yakıt kütlelerinin karışım kalitesinden, NO_x salımları silindir içerisindeki yüksek sıcaklıktan, SO_x salımları ise yakıt içeriğinde bulunan kükürt miktarından kaynaklanır (Posada, Chambliss ve Blumberg, 2016; Sirvio, Niemi, Heikkila ve Hiltunen, 2016). Oluşan hava kirleticilerinin seviyesi motorda kullanılan yakıtın püskürtme stratejisinde yapılan iyileştirmelerle, silindir içerisine verilen emme havasının fiziksel özelliklerinde yapılan değişikliklerle, yanma odasına su gönderimiyle, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) sistemiyle veya egzoz gazı son işleme sistemlerinin kullanımıyla azaltılabilir.

3.2.1 Yakıt Püskürtme Stratejisinde Yapılan Değişikliklerle Egzoz Salımlarının Azaltılması

Yanma sırasında meydana gelen hava yakıt karışımının kalitesi yanma performansını ve yanma sonrası oluşan egzoz salımlarının oranını etkiler. Dolayısıyla iyi bir karışım olmasını sağlayan tüm etkenler yanma kalitesini ve salımları da etkiler. Yakıt ve yakıt sistemiyle ilgili olan yakıt püskürtme basıncı, yakıt püskürtme sıcaklığı, püskürtme zamanlaması, tanecik büyüklüğü, tutuşma gecikmesi süreci, püskürtme miktarı, pilot püskürtme kullanımı gibi değişkenler motor performansı ve egzoz salımları üzerinde etkilidir (Posada, Chambliss ve Blumberg, 2016).

Dizel motorlarda püskürtme basıncının artması yakıtın pulvarizasyonunu artırır. Silindir içerisinde daha iyi pulvarizasyon sağlanması yakıt taneciklerinin çapını düşürür ve daha iyi bir hava yakıt karışımı elde edilebilir. Daha küçük tanecik çapları daha hızlı buharlaşır ve daha hızlı tutuşur ve yanar. Bu durum uygun şartlarda CO, HC ve PM salımlarının azalmasını sağlar (Tschoeke ve diğer., 2010). Ancak, çapları

küçülen ve dolayısıyla ataletleri azalan yakıt parçacıkları silindir çeperine yaklaşımadan önce enjektörden çıktığı bölgelerde hızlı bir şekilde tutuşacağı için silindir duvarında ve piston yüzeyinde yanmamış hava bölümleri kalabilir. Bu bölümlerin bulunması da özellikle motor yükünün ve püskürtülecek yakıt miktarının düşük olduğu durumlarda CO, HC ve PM salımlarının artmasına sebep olabilir (Eliçin, 2011). Ayrıca yakıt basıncının artması özgül yakıt harcamasını da azaltacağı için (Tschoeke ve diğer., 2010) SO_x salımlarını da azaltacaktır (Wright, 2005).

Yakıt basıncının artması; daha iyi bir karışım ortamı sağlanacağı için yanma sırasında daha yüksek basınç ve sıcaklıklara ulaşılmasının sağlanacak olması NO_x salımlarının artmasına sebep olabilir. Ancak püskürtme basıncı artışıyla beraber yakıt püskürtme zamanlamasında yapılabilecek bir optimizasyonla NO_x salımları düşürülebilir. Ayrıca EGR sisteminin kullanımı durumunda da püskürtme basıncı arttıkça NO_x salımlarının azaldığı görülür (Tschoeke ve diğer., 2010).

Yakıt basıncı arttıkça artan hava yakıt karışma oranı tutuşma gecikmesi sürecinin kısılmasına sebep olur (Agarwal, Srivastava, Dhar, Maurya, Shukla ve Singh, 2003; Chen, Wang, Roberts ve Fang, 2013; Wang, Huang, Kutti, Zhang ve Nishida, 2010). Bu durum yanma verimini arttırır. Ancak, püskürtme basıncı çok yüksek olup da tutuşma gecikmesi süreci çok kısalsın hava yakıt karışımının sağlanabilmesi için yeterli zaman olmayacağı için yanma verimi düşer (Çelikten, 2003) ve is oluşumunda artış gözlenir (İçingür ve Altıparmak, 2003; Taylor, 1989).

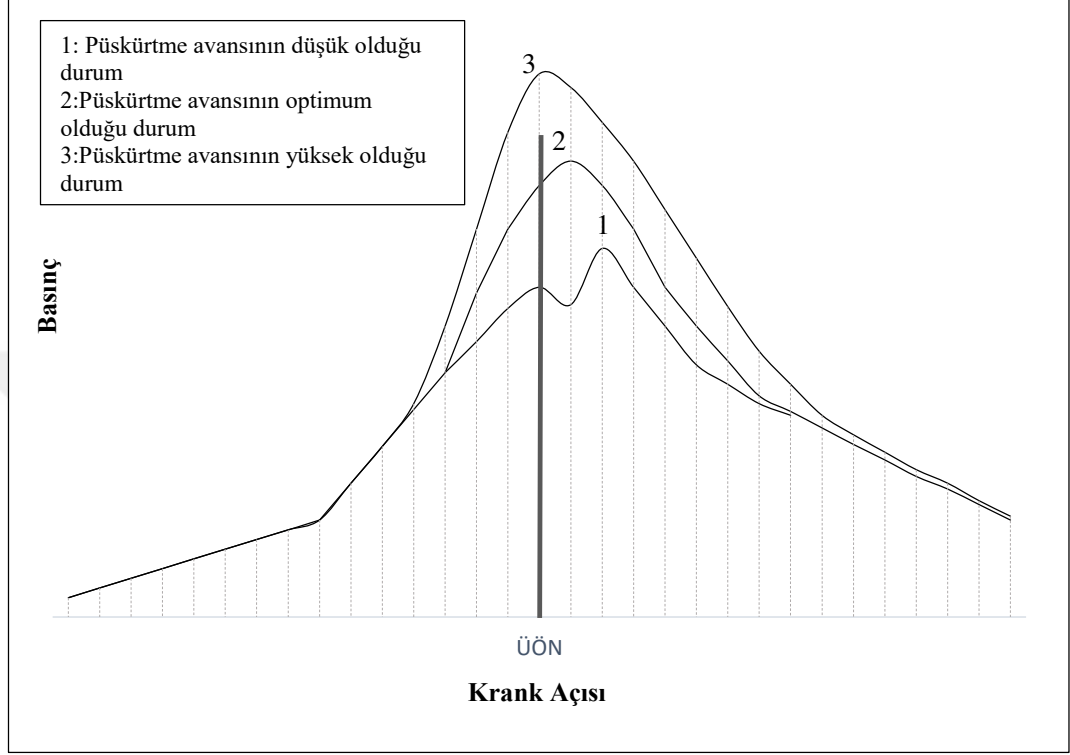
Yakıtın silindir içerisine püskürtülme sıcaklığı, sıvıların sıkıştırılamaması ve sıcaklık artmasıyla yoğunluğun azalması sebebiyle yanma performansını etkileyebilir (Guangxin, Zhulin, Apeng, Shenghua ve Yanju, 2013). Yakıt sıcaklığının artması yakıtın püskürtme sonrası daha iyi pulvarize olmasını sağlayacak bu durum da daha iyi bir hava yakıt karışması sağlayacaktır (Wang ve Lefebvre, 1988). Böylece, enjeksiyon basıncının artışında olduğu gibi HC, PM ve CO salımlarında azalma görülürken (Heinze ve diğer., 1996), NO_x salımlarında artış görülür (Walsh, 2004). Ancak, dizel motorlarda yakıt pompalarının silindir içerisine püskürtülecek olan yakıtı hacimsel olarak ölçerek basınçlandırdığı dikkate alındığında yoğunluk değişiminin

püskürtülecek gerekli yakıt hacmini değiştirdiği görülmektedir. Bu durum, püskürtme süresini ve püskürtülecek yakıt hacmini etkileyeceği için bu parametrelerde yoğunluk değişimine göre yapılacak düzenlemelerle yakıt sıcaklığı değişiminin egzoz salımlarına etkisi kısmen veya tamamen geri alınabilir (Heinze ve diğer., 1996; Williams ve diğer., 2016).

Yakıtın setan sayısı tutuşma gecikmesi sürecini belirlediği için yanma performansında ve egzoz salımlarının dağılımı konusunda belirleyici bir kavramdır (İçingür ve Altıparmak, 2003; Cataluna ve Silva, 2012). Setan sayısı azaldıkça tutuşma gecikmesi süreci artar ve yanma performansı kötüleşir (Ahmed ve Chaichan, 2012). Tutuşma gecikmesinin uzun olması durumunda yakıtın püskürtülmeye başlanması ve tutuşması arasında geçen sürede püskürtülen yakıt miktarı artar. Tutuşma öncesi yanma odasında daha fazla yakıt püskürtülmüş olması tutuşma sırasında daha fazla miktarda yakıtın çok kısa sürede yanmasına ve silindir içinde ani basınç artışına sebep olur (Nuran, 2015). Ani basınç yükselmesi sonucunda da maksimum sıcaklık, maksimum basınç ve NO_x salımları artış gösterir. Setan sayısının yükselmesi PM salımlarını azaltmasına ek olarak yakıt harcamının da azalmasını sağlar (Braun, Appel ve Schmel, 2004; Cataluna ve Silva, 2012).

Püskürtülen yakıtın tutuşma gecikmesi gibi yakıtın püskürtülmeye başlandığı zaman ve püskürtmenin üst ölü noktadan ne kadar öncesinde başlayacağını ifade eden püskürtme avansı da motordan en yüksek verimin elde edilmesi için oldukça önemlidir. Yanmanın en verimli olacağı krank açısında sağlanabilmesi ve egzoz salımlarının kontrol edilebilmesi için püskürtme avansının optimizasyonu gereklidir (Janardhan, Krishna, Reddy ve Prasad, 2014; Swamy, Chandrashekar, Banapurmath ve Nashipudi, 2014; Khan, Qidwai ve Chausalkar, 2014). Uygun zamanın öncesinde püskürtme yapıldığında yani püskürtme avansı yüksek olduğunda, yanma odasındaki hava sıcaklığı ve basıncı düşük olduğundan dolayı tutuşma gecikmesi süreci artacaktır (Sayın, İlhan, Çanakçı ve Gümüş, 2009). Uygun zamanın sonrasında püskürtme yapıldığında yani püskürtme avansı düşük olduğunda ise yanma geç başlayacağı için yanma sırasında piston üst ölü noktadan uzaklaşacağı için maksimum ve ortalama efektif basınçlar düşük olur ve verim düşer (Eliçin, 2011). Bir dizel motor için

püskürtme avansının optimum olduğu, püskürtme avansının yüksek olduğu ve püskürtme avansının düşük olduğu durumların basınç değişimine etkisi Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Püskürtme avansının basınç değişimine etkisi (Eliçin, 2011; Vural, 2009; Szybist, Boehman, Taylor ve McCormick, 2005)

Şekilde görüldüğü gibi 3 numaralı eğriyle gösterilen püskürtme avansının yüksek olduğu durumda yakıt püskürtmesi ve bağlı olarak basınç yükselişi henüz silindir içerisinde uygun hava sıcaklığı ve basıncı olmadan başlamakta ve böylece tutuşma gecikmesi süreci uzun sürmektedir. Bu durum tutuşma başlamadan önce daha fazla miktarda püskürtülmüş olan yakıtın çok kısa bir zaman aralığında yükselmesi sebebiyle yanmanın önemli kısmının ani basınç yükselmesi evresinde tamamlanmasına sebep olmaktadır. 1 numaralı eğriyle gösterilen püskürtme avansının düşük olduğu durumda ise basınç yükselmesi daha geç olduğu için yanma da daha geç olmakta ve ulaşılan maksimum basınç düşük olmaktadır.

Dizel motorlarda herhangi bir motor için tüm çalışma parametreleri için geçerli, en yüksek verimi ve en düşük egzoz salımlarını sağlayan sabit püskürtme avansı değeri belirlemek mümkün değildir. Çünkü optimum püskürtme avansı yakıt, yanma şartları ve motor parametrelerinin değişimine göre değişkenlik gösterebilir. Motorda kullanılan yakıtın setan sayısı, yanma odasına verilen hava sıcaklığı ve basıncı, motor yükü ve hızı, sıkıştırma oranı, yakıt yoğunluğu ve viskozitesi gibi birçok kavram yanma kondisyonunu ve yakıt basınçlandırma sürecini etkileyeceği için optimum püskürtme avansını da etkileyebilir (Szybist, Boehman, Taylor, McCormick, 2005; Rahman, Kamil ve Bakar, 2011; Tat, Gerpen ve Wang, 2004; Ramalingam, Rajendran ve Nattan, 2015).

Yakıtın silindir içerisine püskürtme açısı ve enjektör memesinin delik çapı gibi parametreler de hava ve yakıtın karışma oranını etkileyeceği için bu parametrelerin değişimi yanma kondisyonunu ve egzoz salımlarını etkileyebilir. Ayrıca bu parametrelerin değişiminin sebep olabileceği yakıtın püskürtme sırasında silindir duvarına temas etmesi veya yanmanın silindir duvarına uzak bir bölgede gerçekleşmesi gibi durumlar da yanma kondisyonunu etkilemektedir (Kulakoğlu, 2009; Ambrozik; Ambrozik, Kurczynski, Lagowski, 2014, Diez ve Zhao, 2010). Her iki durumda da yanma kondisyonu değişeceği için CO, HC ve PM salımlarında artış görülebilir. Ayrıca özgül yakıt harcamı da artacağı için SO_x salımlarında da artış görülür.

3.2.2 Emme Havası Üzerinde Yapılan Değişikliklerle Egzoz Salımlarının Azaltılması

Dizel motorlarda yakıt püskürtmesinin başlangıcından önce yanma odasının durumu yanma verimi ve yanma sonrası ortaya çıkacak egzoz salımlarının seviyesi konusunda belirleyici bir faktördür. Yanma odasına verilen havanın sıcaklığı, skavenç basıncı, püskürtülecek olan yakıt miktarını yakmak için gerekli minimum hava miktarından hangi oranda daha fazla miktarda hava verildiği (hava fazlalık katsayısı), verilen havanın nemliliği, hidrojen oranı, dizel motorun silindir içerisine verilen havayı sıkıştırma oranı ve havanın silindir içerisindeki girdap hareketleri gibi

parametreler silindir içerisinde yanma öncesi oluşan durumun yanma performansına ve egzoz salımlarına etkisini belirlemektedir (Posada, Chambliss ve Blumberg, 2016).

Dizel motorlarda silindir içerisine verilen hava akış oranı motorun maksimum güç limitinin belirlenmesinde önemli bir etkidir (Mamat, Abdullah, Xu, Wyszynski ve Tsolakis, 2010). Dizel motorlarda silindir içerisine verilen havanın sıcaklığı sabit hacimde karışma oranını arttıracak olsa da hava yoğunluğu artışı sebebiyle volumetrik verimi azaltacağı için (Pucher, 2010, s. 31; Alakel, 2008) yanma odasına daha az miktarda hava girmesine sebep olacaktır. Bu durum da sıkıştırma sonrası sıcaklığı ve basıncı düşürerek yanma performansını olumsuz etkileyecektir.

Volumetrik verimi etkileyen bir diğer önemli unsur da silindir içerisine verilen havanın basıncıdır (Pucher, 2010, s. 31). Süperşarjlı motorlar, basınçlandırılmış hava silindir içerisine verildiği için doğal emişli motorlara göre daha yüksek verime sahiptir (Sandu, 2014). Basınçlandırılmış olarak silindir içerisine verilen hava sıkıştırma sonrası daha yüksek basınç ve sıcaklık değerlerine ulaşılmasını sağladığı için tutuşma gecikmesi sürecini kısaltmaktadır. Tutuşma gecikmesinin kısalması da NO_x salımlarının indirgenmesi konusunda kritik öneme sahiptir. Ayrıca süperşarjlı basınçlandırılma sonucu sıcaklığı yükselen emme havası, interküler vasıtasıyla soğutma işlemine tabi tutulur. Böylece sıcaklık yükselmesiyle azalan volumetrik verimin artması sağlanır (Lajqi, Baxhaku ve Lajqi, 2009).

Silindir içerisine püskürtülen yakıt ile verilen havanın oranı dizel motorlarda egzoz salımını etkileyen bir değişkendir. Ancak bu değişken yanma performansını doğrudan etkilememektedir. Çünkü; silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarından ziyade tutuşma öncesi hava ile karışmış olan yakıt miktarı yanma performansında etkilidir. Ancak yakıt/hava oranının düşük olması yanma sonu oluşacak olan maksimum sıcaklığın ve silindir duvar sıcaklığının daha düşük olmasına sebep olacağı için tutuşma gecikmesi sürecini uzatabilir (Vural, 2009; Özer, 2010; Eliçin, 2011). Düşük yüklerde düşük yakıt/hava oranlarında püskürtme sisteminden kaynaklı olarak amaçlanan püskürtme özelliklerinin yakalanması güçleşir (Eliçin, 2011).

Yakıt/hava oranının kritik derecede önemli olduğu konu ise yüksek yakıt/hava oranlarında egzoz gazı içinde oranı artacak olan yanmamış HC ve PM salımlarıdır. Püskürtülen yakıt yanma için gerekli oksijeni bulamadığı durumda çeşitli HC çeşitlerine dönüşerek ve PM oluşumuna sebep olarak egzozla karışır. Bu durum isli bir yanmaya sebep olur ve özgül yakıt harcamasını da arttırır. Yüksek yakıt/hava oranında tutuşma gecikmesi sürecinin de dolaylı olarak artacağı göz önüne alındığında NO_x salımlarında artış görülecektir. Ayrıca özgül yakıt harcamasının artmasıyla SO_x salımlarında da artış görülebilir.

Turboşarj uygulanan dizel motorlarda motor yükü arttırılırken önce governör vasıtasıyla silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı arttırılır. Bu artış sonucunda egzoz basıncı ve sıcaklığı ile dolaylı olarak türbin devri yükselir. Ancak türbin devrinin yükselmesi öncesi silindir içerisinde kısa bir süre yüksek oranda yakıt/hava oranıyla yanma sağlanır. Bu durum kısa süreli de olsa yüksek egzoz salımlarına sebep olabilir (Tuft, 2014).

Yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde (Raheman ve Ghadge, 2008; Kaliveer, D'Silva, Kumar ve Raju, 2015; Attrı, Sharma, Singh ve Saraswat, 2015; Datta ve Mandal, 2016; Kurre, Panday ve Saxena, 2013) egzoz salımlarının minimum düzeylere indirgenebilmesi veya kontrolü için seçilmesi gereken optimum sıkıştırma oranının, üzerinde deney yapılan motor, kullanılan yakıt gibi çeşitli parametrelere bağılı olarak değiştiği sonucuna varılmaktadır. Sıkıştırma oranının optimum değerin altında tutulması durumunda yanma öncesi silindir içerisinde oluşan basınç ve sıcaklık düşük olacağı için tutuşma gecikmesi süreci uzayacaktır. Bu durum yanma sırasında daha yüksek basınç ve sıcaklıklara ulaşılacak olması sebebiyle NO_x salımlarını arttıracaktır. Ayrıca silindir içerisinde yanma geç başlayacağı için yakıtın bir kısmının yanmadan egzozdan atılması ve böylece HC ve PM salımlarının artması durumu ortaya çıkacaktır. Tamamlanmamış yanma sebebiyle de CO salımlarında artış görülecektir. Son olarak özgül yakıt harcamasının artmasına paralel olarak SO_x salımlarında artış görülecektir. Sıkıştırma oranının optimum değerin üstünde tutulması durumunda ise silindir içi basınç artacağı için krank-biyel mekanizmasının daha dayanıklı ve dolayısıyla daha ağır olması gereklidir. Sıkıştırma oranının artması

segmanlar üzerindeki yükü de arttıracak için kaçaklara sebep olarak amaçlananın aksine sıkıştırma sonu basıncın düşmesine sebep olabilmektedir. Ayrıca, yüksek sıkıştırma oranı ilk hareketi de zorlaştıracaktır (Datta ve Mandal, 2016; Vural, 2009; Özer, 2010; Eliçin, 2011; Kurre, Pandey ve Saxena, 2013).

Emme havasının sıcaklık, basınç, sıkıştırma oranı gibi özellikleri dışında silindire verilen havanın silindir içerisindeki hareketi de hava ve yakıt karışma kalitesini etkileyeceği için egzoz salımlarının kontrolü konusunda önemli bir değişkendir (Posada, Chambliss ve Blumberg, 2016). Silindir içerisindeki girdap oranı (havanın açılal hızının motor hızına oranı) arttıkça yakıt ve havanın karışma oranı artmakta ve böylece tutuşma gecikmesi sürecinde hava içine karışan yakıt miktarı artacaktır (Wei, Wang, Leng, Liu ve Ji, 2013; Prasad, Sharma, Anand ve Ravikrishna, 2011; Eliçin, 2011). Bu durum daha yüksek maksimum sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşılmasını sağlayacağı sebebiyle NO_x salımlarını arttıracaktır. Ek olarak silindir duvarı yakınında hava akışı olması yakıt püskürtme basıncının yüksek olması durumunda yakıtın silindir duvarına çarpmadan hava içerisinde karışmasını sağlar. Böylece daha yüksek püskürtme basınçları kullanılabilir. Ayrıca silindir duvarı yakınındaki yakıt taneciklerinin hava içine karışması ve tutuşması sayesinde PM, CO ve HC salımlarında düşme görülebilir. Hava hareketlerinin istenen düzeyde kontrolü için yanma odası geometrisi, piston kafası geometrisi ve emme valfi geometrisi oldukça önemlidir (Prasad, Sharma, Anand ve Ravikrishna, 2011).

Son olarak, Miller Hava Şarj Sistemi olarak bilinen ve emme valfinin alt ölü nokta civarlarında kapatıldığı ve böylece sıkıştırma sonucu silindir içerisinde ortaya çıkan basıncın daha düşük değerlerde tutulduğu bir sistem de vardır. Bu sistemde silindir içi basınç düşük olduğu için yanma sonrası görülen sıcaklık ve basınç değerleri de düşük olmaktadır. Böylece, NO_x salımları indirgenebilmektedir (Holbecker ve Geist, 1998; Wright, 2005).

3.2.3 Yanma Odasına Su Gönderimiyle Egzoz Salımlarının Azaltılması

Son yıllarda dizel motorlar kaynaklı egzoz salımlarının azaltılması amacıyla deneysel çalışmalarda başvurulmuş ve olumlu sonuçlar alınan yöntemlerden biri de yanma odasına sıvı veya gaz fazında su gönderilmesidir (Parlak, Ayhan, Cesur ve Kökkülünk, 2013; Mello ve Mellor, 1999; Christensen ve Johansson, 1999). Yanma odasına su gönderimi 4 farklı yöntemle uygulanabilir. Bu yöntemler; emme havası içerisine su püskürtülmesi, suyun yanma odasına harici bir enjektörle doğrudan basılması, suyun yakıt devresi üzerinde yakıt içerisine karıştırılması ve yakıt olarak su-yakıt emülsiyonu kullanılması şeklindedir. Yanma odasına su gönderimi NO_x salımlarını azaltmaktadır, ancak genel olarak özgül yakıt harcamasını arttırmakta ve motor veriminin düşmesine sebep olmaktadır (Parlak, Ayhan, Cesur ve Kökkülünk, 2013).

Emme havası içerisine su püskürtülmesi, emme havasının nemlendirilmesi olarak da bilinir. Havanın nemlendirilmesinin NO_x salımlarını %50'ye kadar azalttığı görülmektedir. Bu sistemde su emme havası içine bir enjektör yardımıyla pulvarize olarak karıştırılır. Püskürtülen suyun tamamının yanma odasına küçük tanecikler olarak girmesi çok önemlidir. Suyun daha büyük parçalar veya damlalar halinde girmesi silindir duvarında yağ filminin zarar görmesine sebep olabilmektedir (Wright, 2005). Bu durum yağ içine su karışmasına sebep olabilmekte böylece makine parçalarının aşınma oranının artmasına sebep olmaktadır (Abd-Alla, Soliman, Badr, Abd-Rabbo, 2001; Kökkülünk, Gonca, Ayhan, Cesur, Parlak, 2013). Emme havası içeriğine katılan su emme manifoldunda korozyona sebep olabilmektedir (Parlak, Ayhan, Cesur ve Kökkülünk, 2013).

Yanma odası içine doğrudan su püskürtülmesi püskürtülen suyun alevin çok yakınına püskürtülebilmesi sebebiyle yanma sıcaklıklarını daha düşük seviyeye getirebilmektedir. Püskürtülen suyun silindir duvarlarına uzak olması da silindir duvarlarındaki yağ tabakasının bozulmasını engellemektedir. Suyun doğrudan püskürtülmesinin bir diğer avantajı da yanmaya katılan su-yakıt oranının istenen seviyede ayarlanabilir olması sebebiyle ilk hareket zorluklarının da ortadan kalkmasını

sağlamasıdır (Parlak, Ayhan, Cesur ve Kökkülünk, 2013; Ayhan, 2016). Doğrudan püskürtmenin bir diğer avantajı da suyun püskürtülme zamanlaması ani yanma evresine denk gelecek şekilde ayarlanabilmektedir. Böylece yaklaşık %60'a kadar varan NO_x salımı azaltılması sağlanırken, özgül yakıt harcamasının da daha az azalması sağlanır (Wright, 2005).

Su ve yakıtın emülsiyon olarak püskürtülmesi suyun yakıt devresine harici olarak eklenmesiyle veya tanklarda su-yakıt emülsiyonu hazırlanarak gerçekleştirilmektedir. Bazı deneylerde su ve yakıtın gravite farkından dolayı ayrılmaması için karışıma yüzey aktif bir kimyasal madde de katılmaktadır (Ayhan, 2016). Artık fuel oillerde ise ayrışma daha az olduğu için böyle bir ilaveye ihtiyaç olmamaktadır (Wright, 2005). Su ve yakıtın birlikte püskürtülmesi; suyun çok hızlı buharlaşması sebebiyle daha iyi atomizasyon sağlanmasına, yakıtın hava içerisinde daha küçük tanecikler halinde dağılabilmesine ve yanma odasında gerçekleşen reaksiyonlarının gerçekleşme hızlarının artmasını sağlamaktadır (Parlak, Ayhan, Cesur ve Kökkülünk, 2013; Ayhan, 2016; Tsukahara, Murayama ve Yoshimoto; 1982). Yakıt içerisine su karıştırılmasıyla NO_x salımları %60'a kadar varan oranlarda azaltılabilmektedir (Wright, 2005).

Yanma odasına çeşitli yöntemlerle su gönderimi NO_x salımlarını önemli ölçülerde azaltmaktadır. Bunun nedeni su püskürtülmesinin yanma sonu sıcaklıklarını düşürerek NO_x oluşumuna engel olmasıdır. Ancak bu sıcaklık düşüşü, yanmanın olabilecek en yüksek verimde gerçekleşmemesine sebep olmaktadır. Ayrıca silindir duvarlarının daha düşük sıcaklıkta olması sebebiyle dolaylı olarak tutuşma gecikmesi sürecinin uzaması ve sonucunda da CO ve HC salımlarının artması durumları ortaya çıkabilir.

3.2.4 Egzoz Gazı Resirkülasyonu Sistemi Kullanılarak Egzoz Salımlarının Azaltılması

Dizel motorlarda egzoz, yanma odasına hava içeriğinde girmiş ancak reaksiyona girmeden çıkan azot, yanma sonrası oluşan CO₂, yanma sonrası oluşan su buharı ve hava kirleticilerden oluşur. Egzoz gazının yanma sonrası soğutulmuş veya soğutulmadan, emme havası ile birlikte yeniden silindir içerisine verilmesi yanma

odasında bulunan oksijen oranını düşürür. Yanma odasında yanma öncesi bulunan oksijenin seyreltilmesi yanma sırasında ulaşılan maksimum sıcaklık ve basınç değerlerini düşürür (Hussein, Palaniradja, Alagumurthi ve Manimaran, 2012). Böylece NO_x salımları azaltılmış olur.

EGR sistemi kullanımında egzoz gazı içeriğindeki su buharı sebebiyle emme havası içerisine harici olarak su püskürtülmesi durumunda ortaya çıkan yan etkiler benzer şekilde görülür (Wright, 2005). Bu durum da silindir duvarlarında yağ filminin bozulması ve manifold bölgelerinde korozyon oluşumuna sebep olabilir. Soğutma yapılmayan EGR sistemi kullanımında verilen su gaz fazında olduğu için bu etkiler daha düşük oranlarda görülebilir.

EGR sisteminde geri döndürülen gaz silindir içerisine verilen hava miktarını azaltacağı için volumetrik verimini azaltır (Bose ve Maji, 2009). Ancak bu gazın soğutulmasıyla volumetrik verimin azalma oranı düşürülebilir. Bu durumda da yanma öncesi oluşan sıcaklık düşeceği için termal verim azalabilmektedir (Kusaka, Okamoto, Daisho, Kihara ve Saito, 2000).

EGR sisteminin kullanımı; yanma sonrası oluşan egzoz gazının bir kısmının yeniden yanma odasına gönderilmesi sebebiyle egzoz gazlarının miktarının azalmasına sebep olur. Böylece egzoz gazı içeriğindeki hava kirletici oranı değişmese bile salınan kirletici madde miktarı azalmış olur (Hussein, Palaniradja, Alagumurthi ve Manimaran, 2012).

EGR sistemi, genellikle düşük viskoziteli ve daha kaliteli yakıtların kullanıldığı dizel motorlar için daha etkilidir. Bu sebeple yüksek hızlı ve düşük devirli motorlarda kullanımı daha uygundur. Düşük devirli ve yüksek güçlü dizel motorlarda veya yakıt olarak artık fuel oil kullanan motorlarda EGR sistemi kullanımı PM ve is oluşumunu önemli ölçüde arttıracığı için sıklıkla tercih edilmemektedir (Wright, 2005).

EGR sisteminde egzoz gazını hangi oranda yeniden kullanılacağı da önemli bir konudur. Düşük yüklerde egzoz gazı içeriğinde bulunan yanmamış HC ve oksijen

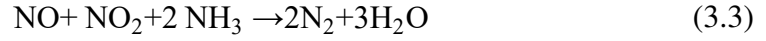
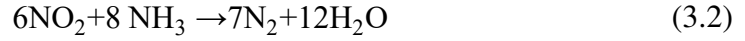
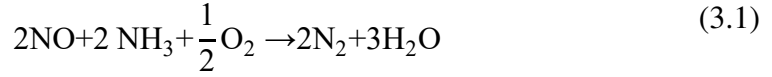
oranı daha yüksek olduğu için daha yüksek oranlarda gazın sirkülasyonu kullanılabilir (Hussein, Palaniradja, Alagumurthi ve Manimaran, 2012). Ancak, yük miktarının artması durumunda stokiyometrik orana göre daha fazla oksijen gerekeceği için EGR sirkülasyon oranının daha düşük seviyelerde tutulması gerekir (Zheng, Reader ve Hawley, 2004; Hussein, Palaniradja, Alagumurthi ve Manimaran, 2012).

Dizel motorların ilk çalışması sırasında silindir duvarlarının soğuk olması, tutuşma gecikmesi sürecinin daha uzun olması gibi durumlar yanmamış HC salımlarının da yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple özellikle motorun ilk çalışması sırasında EGR sistemi kullanımı silindir duvarının daha hızlı ısınmasını ve HC salımlarının düşmesini sağlar (Szybist, Boehman, Haworth ve Koga, 2007; Cui, Peng, Deng ve Shi, 2014).

3.2.5 Egzoz Gazı Son İşleme Sistemleri Kullanılarak Egzoz Salımlarının Azaltılması

Egzoz gazı son işleme sistemleri egzoz gazının yanma odasından çıkarıldıktan sonra atmosfere atılacağı baca veya egzoz çıkışına kadar iletildiği egzoz sistemi üzerinde yapılan işlemlerle hava kirleticilerin oranının azaltılmasını amaçlamaktadır. Bu kapsamda dizel motorlarda SCR (seçici katalitik redüksiyon), DOC (dizel oksidasyon katalisti), DPF (dizel partikül filtresi) ve deniz suyuyla yıkama kulesi (deniz suyu scrubber sistemi) gibi birçok alternatif yöntem kullanılmaktadır.

SCR sisteminde motordan çıkan egzoz gazı içerisine bir miktar üre veya amonyak (NH_3) ilave edilir. Normal şartlarda SCR sisteminde tepkimeye amonyak girer ancak amonyak depolanması zor ve aşındırıcı bir madde olduğu için sistemlerde sıklıkla üre kullanılır. Bu sistemlerde üre, yüksek sıcaklıktaki egzoz gazının içine karıştırıldığında oksidasyona uğrayarak amonyağa dönüşür. Doğrudan, egzoz gazına karıştırılan amonyak veya üre olarak karıştırıldıktan sonra ürenin yüksek sıcaklıklarda oksidasyonu sonucu ortaya çıkan amonyak aşağıda verilen denklemlerde gösterildiği gibi NO_x 'lerle tepkimeye girerek azot ve su oluşturur (Wright, 2005; Posada, Chambliss ve Blumberg, 2016; Johnson, 2014).



Yukarıda verilen denklemler incelendiğinde NO_x türevleri olan NO ve NO_2 bileşikleri amonyakla çeşitli oranlarda tepkimeye girerek azot ve su bileşikleri oluşturduğu görülmektedir. Sisteme verilen amonyak veya üre miktarı da oldukça önemlidir. Çünkü bu bileşikler gereğinden fazla miktarda verildiği durumlarda egzoz gazı içeriğinde tepkimeye girmemiş amonyak bulunacaktır (Wright, 2005). Bu duruma önlem alabilmek için egzoz gazı çıkışına yerleştirilen NO_x sensörleri kullanılmaktadır (Posada, Chambliss ve Blumberg, 2016). Böylece sisteme verilen amonyak veya üre miktarı egzoz gazı içeriğindeki NO_x miktarına göre ayarlanabilmektedir.

SCR sistemlerinde üre ve amonyak egzoz gazı içerisine püskürtülerek karıştırılmaktadır. Bu püskürtme kalitesinin yüksek tutulması da oldukça önemlidir. Çünkü düşük kaliteli bir püskürtme durumunda püskürtülen madde egzoz borusu çeperlerine yapışarak bu bölgelerde aşındırıcı etki gösterebilir (Wright, 2005).

Egzoz gazının sıcaklığı da SCR sistemleri için önemli bir parametredir. Eğer egzoz sıcaklığı çok yüksek olursa, püskürtülen veya oluşan amonyak NO_x bileşikleriyle reaksiyona girmek yerine yüksek sıcaklık sebebiyle oksidasyona uğrar. Düşük egzoz sıcaklıklarında ise sülfat oluşumları gözlemlenebilmektedir (Johnson, 2014; Chatterjee ve Rusch, 2014,).

SCR sistemlerinde gerçekleşen tepkimelerin hızını arttırmak için çeşitli katalizörler kullanılır. İçeriğine amonyak püskürtülmüş egzoz gazı bu katalizörlere geldiğinde tepkime hızları artar ve böylece egzoz gazı içeriğindeki NO_x indirgenmiş olur. Sistemlerde yaygın olarak kullanılan katalizörler, içeriğinde titanyum, vanadyum veya tungsten bulunduran bileşiklerden oluşur. Titanyum bazlı bileşiklerden oluşan katalizörler, sıcaklık değişimlerine uygundur. Vanadyum bazlı bileşiklerden oluşan

katalizörler ise yüksek aktivite ve seçiciliğe sahiptir (Demiröz, 2010; Posada, Chambliss ve Blumberg, 2016).

SCR sistemlerinin kullanımı NO_x salımlarını etkili bir şekilde azaltabilmektedir. Ayrıca bu sistemler, dizel motorların daha yüksek endike basınçlarda ve daha yüksek yanma sonu sıcaklıklarında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır (Wright, 2005; Posada, Chambliss ve Blumberg, 2016; Johnson, 2014). Bu durum yakıt harcamını azaltacağından dolayı SO_x salımlarının, yanma performansını arttıracığı için ise yanmamış HC, CO ve PM salımlarını azaltılmasını sağlayacaktır.

Egzoz gazları içeriğinde bulunan yanmamış HC, CO ve PM salımlarının indirgenebilmesi için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri DOC (dizel oksidasyon katalisti) yöntemidir. Bu yöntemde, yanma odasında yeterli zaman, oksijen veya sıcaklık bulamadığı için CO₂ ve H₂O'ya dönüşümü gerçekleşmemiş olan CO, HC veya diğer partiküler maddeler katalizörler varlığında hızlandırılmış reaksiyonlarla oksidasyona uğramakta ve böylece tam yanma sonucunda oluşması gereken ve doğaya daha az zararlı yanma ürünlerine dönüşmektedir (Keskin, 2009; Demiröz, 2010). Bu sistemlerde gerçekleşen tepkimelerin daha hızlı olarak oluşmasını sağlayan katalizör madde olarak genellikle platin, paladyum, rodyum gibi iyi oksidasyon özelliği göstermesinin yanında termal dayanımı da yüksek olan soy metaller kullanılmaktadır (Russell ve Epling, 2011).

DOC sistemi, yanma sırasında tamamlanmamış oksidasyon süreçlerinin tamamlanmasına olanak sağlayarak HC, CO ve PM salımlarını azaltıyor olsa da aynı zamanda yakıt içeriğinde bulunan ve yanma sırasında oksidasyona uğramamış olan kükürtün de oksidasyona uğramasına sebep olur (Russell ve Epling, 2011; Keskin, 2009). Bu durum SO_x salımlarının artmasına sebep olmaktadır.

Son yıllarda motor tasarımlarında ve yanma parametrelerinde yapılan iyileştirmeler, üretilen PM miktarının kaydadeğer oranlarda düşürülmesini sağlamasına rağmen tamamen engellenmesine yeterli olmamıştır (Russell ve Epling, 2011). Motordan çıkan egzoz gazı içeriğindeki PM'nin daha yüksek oranlarda

indirgenebilmesi için teknik olarak en uygun çözümlerden biri de DPF (dizel partikül filtresi) kullanımıdır (Keskin, 2009; Ntziachristos, Samaras, Zervas ve Dorlhene, 2005; Russell ve Epling, 2011; Preble, Dallmann, Kreisberg, Heiring, Harley ve Kirchstetter, 2015). Bu filtreler difüzyonal çöküntü, eylemsiz çöküntü, akışı engelleme gibi filtreleme yöntemleriyle PM salımlarında %90'a varan oranlarda azaltma yapabilmektedir (Preble, Dallmann, Kreisberg, Heiring, Harley ve Kirchstetter, 2015; Keskin, 2009). DPF özellikle PM salımının katı kısımları üzerinde çok etkilidir (Keskin, 2009).

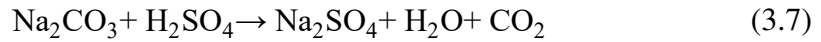
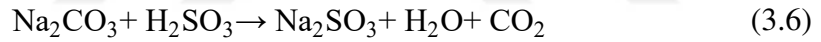
DPF kullanımında motor ve filtrenin zarar görmemesi için filtrelerde biriken partiküllerin filtreden uzaklaştırılması önemli bir süreçtir. Bu sürece dizel partikül filtrelerin rejenerasyonu denir (Demiröz, 2010; Ntziachristos, Samaras, Zervas ve Dorlhene, 2005; Preble, Dallmann, Kreisberg, Heiring, Harley ve Kirchstetter, 2015; Russell ve Epling, 2011). DPF rejenerasyon yöntemleri aktif ve pasif rejenerasyon olarak ikiye ayrılır. Aktif rejenerasyonda, motordan enerji sağlayarak, yakıt harcayarak veya elektrik kullanarak harici bir katkıyla partiküllerin oksidasyonu için uygun sıcaklık sağlanabilmektedir. Pasif rejenerasyonda ise çeşitli katalistler kullanılarak partiküllerin yanma sıcaklıklarını düşürülmekte böylece partiküllerin egzoz gazının sıcaklığında oksidasyona uğrayabilmesi sağlanmaktadır. Pasif rejenerasyon yöntemleri motorun çalışma süreci boyunca sürekli veya belli aralıklarla çalışabilirler (Demiröz, 2010).

Egzoz gazı içeriğindeki SO_x salımlarının indirgenebilmesi için ise geliştirilen çeşitli egzoz gazı temizleme sistemleri (scrubber sistemleri) vardır. Bu sistemler, motorun egzoz çıkışında, egzoz içeriğindeki SO_x bileşiklerinin deniz suyu içeriğindeki bileşiklerle, kimyasal işlem görmüş tatlı su içeriğindeki bileşiklerle veya bazı kuru kimyasallarla reaksiyona girmesi sağlanarak daha farklı bileşikler elde edilmesini; böylece motordan kaynaklı SO_x ve PM salımlarının azaltılmasını amaçlamaktadır (ABS, 2013; US EPA, 2011; Lloyd's Register, 2012). Bu sistemler içeriğinde su kullanılma durumuna bağlı olarak ıslak ve kuru sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır (Kılıç, 2015).

Egzoz gazı ıslak temizleme sistemlerinde SO_x bileşiklerinin su içerisinde çözünmesinden faydalanılmaktadır. İçeriğine su püskürtülen veya su içerisinde geçirilen egzoz gazı içerisindeki SO_x bileşiklerinin su içerisinde çözünmesiyle yüksek asidik özellikte bileşikler oluşur. Bu bileşiklerin oluşum denklemleri aşağıda verilmiştir.



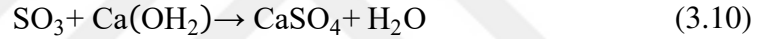
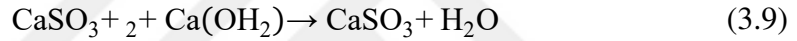
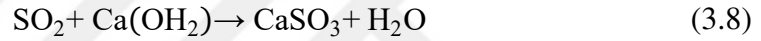
Yukarıda verilen denklemlerle ortaya çıkan sülfüroz asit (H₂SO₃) ve sülfirik asit (H₂SO₄) gibi güçlü asitler de deniz suyunun doğal alkalinliği veya içerisine genellikle sodyum hidroksit olmak üzere çeşitli katkı maddeleri katılarak alkalinitesi artırılan tatlı suyun alkalinitesi sayesinde tepkimeye girerek çeşitli sodyum sülfat tuzları oluşturmaktadır (ABS, 2013). Elde edilen sodyum sülfat tuzları deniz suyu içeriğinde de bulunan tuzlardır (ABS, 2013; US EPA, 2011; Lloyd's Register, 2012). Bu bileşiklerin oluşum denklemleri aşağıda verilmiştir.



Egzoz gazı ıslak temizleme sistemleri deniz suyunun veya tatlı suyun dolaşım özellikleri göre açık döngü sistemler ve kapalı döngü sistemler olmak üzere ikiye ayrılır (ABS, 2013; US EPA, 2011; Lloyd's Register, 2012; Kılıç, 2015; Homravella, Kılıçaslan, Perales ve Rüss, 2011). Açık döngü sistemlerinde kullanılacak su denizden veya başka bir su kaynağından alınıp eğer gerekliyse alkalinitesi yükseltildikten sonra sistemde kullanılmaktadır. Sistemde kullanımı tamamlanmış ve içeriğinde sülfat tuzları ile bazı partiküller karışmış olan yıkama suyu partiküllerden arındırılması için çeşitli ayrıştırma işlemlerine tabi tutulduktan sonra temizlenmiş olarak yeniden sistem dışına gönderilir (ABS, 2013; US EPA, 2011; Kılıç, 2015). Kapalı döngü sistemlerinde ise içeriğinde sülfat tuzları ile bazı partiküller karışmış olan yıkama suyu temizlendikten sonra yeniden sisteme dahil edilir. Çeşitli sebeplerle eksilen su miktarı

da harici olarak tamamlanır (ABS, 2013). Kapalı sistemler genellikle tatlı su kullanılan sistemlerdir (Kılıç, 2015).

Egzoz gazı temizleme sistemlerinde kullanılan bir diğer yöntem de egzoz gazlarının kuru temizlenmesidir. Bu yöntemde egzoz gazları suyla temas etmediği için soğutulmamaktadır. Böylece sistemin çıkışında egzoz gazlarının atık ısısından faydalanılabilmektedir. Kuru tip sistemlerde genellikle sönmemiş kireç granülleri kullanılır. Egzoz gazı içeriğindeki SO_x bileşikleri sönmemiş kireç (Ca(OH)₂) ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfat ve kalsiyum sülfat bileşiklerini oluşturmaktadır. Ayrıca oluşan kalsiyum sülfat bileşiklerini egzoz gazı içeriğinde mevcut olan oksijenle reaksiyona girerek kalsiyum sülfata dönüşebilmektedir (ABS, 2013; US EPA, 2011; Lloyd's Register, 2012). Bu bileşiklerin oluşum denklemleri aşağıda verilmiştir.



Yukarıda verilen denklemlerde elde edilen kalsiyum sülfat su ile birleştiğinde alçı taşı olmaktadır. Elde edilen artık madde kalsiyum sülfat olarak veya alçı taşı olarak depolanabilmektedir (ABS, 2013).

Egzoz gazı temizleme sistemleri incelendiğinde bu sistemlerin genellikle gemilerde veya denize kıyısı olan tesislerde kullanıldığı görülmektedir. Bu sistemler egzoz gazı içeriğindeki SO_x bileşiklerinin oranını %99'a varan oranlarda azaltabilmektedir (ABS, 2013).

BÖLÜM DÖRT

YAKIT PÜSKÜRTME STRATEJİSİNDE YAPILAN DEĞİŞİKLİKLERİN EGZoz SALIMLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİ İNCELEYEN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Dizel motorlarda yakıtın silindir içersine püskürtölme basıncı, püskürtme zamanlaması, püskürtme açısı ve kullanılan yakıtın fiziksel özellikleri gibi birçok parametre yanma kondisyonunu, motor performansı ve egzoz salımlarını etkiler. Literatürde bu parametrelerin etkilerinin deneysel olarak incelendiğı çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu bölümde bu çalışmalardan bazılarının amacı, yöntemi ve sonuçları irdelenmiştir.

Silindir içersine yakıt püskürtme basıncının değıştirilmesi ve bu değışikliklerin motor performansına ve egzoz salımlarına etkisi üzerine yapılan birçok çalışma mevcuttur. Çelikten (2003) yapmış olduğı çalışmada turboşarjlı, ön yanma odalı, 4 silindirli ve 4 zamanlı bir dizel motor üzerinde püskürtme basıncının 100 bar ile 250 bar arasında değışiminin egzoz salımları üzerine etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında dizel motorda çeşitli yüklerde tork, güç ve özgül yakıt harcamı değerleri ile egzoz salımları ölçölmüştür. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, tork ve güç değerlerinin en yüksek seviyeye ulaştığı püskürtme basıncının çalışmada kullanılan test motoru için 150 bar olduğı görölmüştür. Özgül yakıt harcamasının düşük devirlerde değışken olsa da yüksek devirlerde püskürtme basıncı arttıkça azaldığı görölmektedir. Tork, güç, özgül yakıt harcamı değerlerinin püskürtme basıncına göre değışim oranı motor yükü arttıkça daha da artmaktadır. Hava kirletici oranları incelendiğinde ise püskürtme basıncı arttıkça NO_x salımlarının 150 bar püskürtme basıncı üzerinde genel olarak arttığı, CO₂ salımlarının azaldığı SO₂ salımlarının yakıt harcamasına paralel olarak değıştiğı, CO salımlarının ise düşük devirlerde azalmasına rağmen yüksek devirlerde değışken davrandığı görölmektedir.

İçingör ve Altıparmak (2003) yapmış olduğı çalışmada 4 silindirli, 4 zamanlı direkt püskürtmeli bir dizel motor üzerinde 46 ile 61,5 arasında değışen setan sayısına sahip yakıtlar kullanıldığında püskürtme basıncının 100 bar ve 250 bar arasında değışiminin

motor performans parametrelerine ve egzoz salımlarına etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, yakıtın setan sayısının artırılmasının NO_x ve SO_x salımlarının azalmasına, CO ve PM salımlarının ise artmasına sebep olduğu görülmektedir. Ayrıca çalışmada 100 bar gibi düşük püskürtme basınçlarında PM salımlarının çok yükseldiği, 200 bar basıncında ise NO_x ve SO_x salımlarının oldukça düşük değerlere geldiği görülmektedir.

Sekmen, Çınar, Erduranlı ve Boran (2004) yapmış oldukları deneysel çalışmada tek silindirli, dört zamanlı ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda püskürtme basıncı 100 bar ve 300 bar arasında değiştirilmesinin motor performansı ve is emisyonlarına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Deney sonuçlarına göre, püskürtme basıncının artması ile motor gücü ve torkunda bir miktar artış, özgül yakıt harcamında ve PM salımlarında azalma görülmüştür. Ancak püskürtme basıncının belirli bir değerden daha fazla artırılması durumunda motor performansının olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir.

Puhan, Jegan, Balasubbramanian ve Nagarajan (2009) yapmış oldukları çalışmada 4,4 kW gücünde, tek silindirli, 4 zamanlı, hava soğutmalı bir dizel motorda yakıt püskürtme basıncının 200 bar ile 240 bar arasında değiştirilmesinin motor performansı ve egzoz salımlarına etkilerini incelemiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, püskürtme basıncının artırılmasının CO, HC ve PM salımlarını azalttığı saptanmıştır.

Gümüş, Sayın ve Çanakçı (2012) yapmış oldukları deneysel çalışmada yakıt olarak motorin ve motorin içine çeşitli oranlarda karıştırılmış biyodizel karışımları kullanan bir dizel motor üzerinde çeşitli yüklerde ve püskürtme basınçlarında özgül yakıt harcamasının ve egzoz salımlarının değişimleri gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, motor yükünün artmasıyla CO, yanmamış HC ve NO_x salımlarının arttığı, özgül yakıt harcamasının ise azaldığı görülmektedir. Motor yükünün sabit olduğu durumda, yakıt püskürtme basıncının 180 bar'dan 240 bar'a yükseltilmesi CO salımlarının 13 g/kW.h değerinden 4 g/kW.h değerine, yanmamış HC salımlarının ise 0,08 g/kW.h değerinden 0,06 g/kW.h değerine arttığı görülmektedir. Yakıt püskürtme basıncının 180 bardan 220 bara alınmasıyla NO_x salımlarının 1,6 g/kW.h

değerinden 1,4 g/kW.h değerine düştüğü, ancak püskürtme basıncı 240 bar'a getirildiğinde ise yeniden 1,6 g/kW.h değerine ulaştığı görülmektedir. Özgül yakıt harcamasının ise püskürtme basıncının 180 bardan 200 bara alınmasıyla 255 g/kW.h değerinden 235 g/kW.h değerine düştüğü, ancak püskürtme basıncı 240 bar'a getirildiğinde ise 290 g/kW.h değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, motorin içerisine çeşitli oranlarda biyodizel karıştırıldığında püskürtme basıncı değişimiyle özellikle özgül yakıt harcamı ve NO_x salımlarının daha farklı etkilendiği görülmektedir.

Reddy, Reddy ve Reddy (2012) yapmış oldukları çalışmada 3,72 kW gücünde, tek silindirli, 4 zamanlı, su soğutmalı, yakıt olarak motorin ve motorin içine çeşitli oranlarda karıştırılmış biyodizel karışımları kullanılan bir dizel motor üzerinde püskürtme basıncının 170 bar ile 220 bar arasında değişiminin motor performans parametreleri ve egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, %70 yükte CO ve yanmamış HC salımlarının en düşük seviyesinde olduğu yakıt püskürtme değeri 190 bar olarak görülmektedir. 190 bar püskürtme basıncında egzoz gazı içeriğindeki CO oranı %0,048 olarak ölçülmüş, bu değer 170 bar püskürtme basıncında %0,051'e, 220 bar püskürtme basıncında ise %0,062'ye kadar yükselmiştir. 190 bar püskürtme basıncındaki yanmamış HC salımlarının oranı ise 55 ppm olarak ölçülmüş, bu değer 170 bar püskürtme basıncında 62 ppm'e, 220 bar püskürtme basıncında 72 ppm'e kadar yükselmiştir.

Agarwal, Srivastava, Dhar, Maurya, Shukla ve Singh (2013) yapmış oldukları deneysel çalışmada tek silindirli, bir dizel motor üzerinde 2500 devir/dakika hızında, püskürtme basıncının 500 bar ile 1000 bar arasında değiştirildiği bir dizel motorda püskürtme basıncı ve püskürtme avansı değişimlerinin çeşitli motor performans parametrelerine ve egzoz salımlarına etkisini incelemiştir. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, püskürtme basıncının 500 bardan 1000 bara yükselmesiyle ortalama efektif basınç değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Sabit ortalama efektif basınç değerlerinde karşılaştırma yapıldığında ise püskürtme basıncının artmasıyla CO ve HC salımlarının arttığı, NO_x salımlarının ise azaldığı görülmektedir.

Agarwal ve diğer. (2015) yapmış oldukları çalışmada tek silindirli, elektronik enjeksiyon sistemine sahip, yakıt olarak motorin, motorin içerisine %10, %20, %50 oranlarında karıştırılmış Karanja biyodizeli kullanan bir dizel motor üzerinde 1500 devir/dakika hızında, püskürtme basıncının 300 bar ile 1000 bar arasında değişiminin ve püskürtme avansı değişiminin çeşitli motor performans parametrelerine ve egzoz salımlarına etkisini incelemiştir. Ayrıca çalışma kapsamında her bir püskürtme basıncı için optimum püskürtme zamanlaması ortaya çıkarılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, termal verimin en yüksek olduğu değerlerin yakalanabilmesi için püskürtme avanslarının, 300 bar püskürtme basıncı için 18°, 500 bar püskürtme basıncı için 12°, 750 bar püskürtme basıncı için 4,875° ve 1000 bar püskürtme basıncı için ise -2,625° olması gerektiği görülmüştür. Bu değerler dikkate alındığında deneyde kullanılan tüm yakıt tipleri için püskürtme basıncının 500 bar ve altında olduğu değerler için püskürtme basıncının yükselmesiyle özgül yakıt harcamasının düştüğü, 750 bar ve üstündeki değerlerde ise püskürtme basıncının yükselmesiyle özgül yakıt harcamasının yükseldiği görülmektedir. Hava kirletici oranları incelendiğinde ise püskürtme basıncının değişimine göre her bir basınç değerinde termal verimin en yüksek olduğu püskürtme avansı değerinde CO, HC ve NO_x salımlarının çok küçük oranlarda değişim gösterdiği görülmektedir. Ancak püskürtme basıncının değişimine göre püskürtme avansı ayarlaması yapılmadığı durumlarda ise püskürtme basıncının artmasıyla CO ve HC salımlarının azaldığı, NO_x salımlarının ise arttığı görülmektedir.

Yakıt püskürtme basıncı gibi püskürtme zamanlaması da egzoz salımlarını ve performans parametrelerini etkileyen önemli bir kavramdır. Püskürtme basıncı değişimi tutuşma gecikmesi sürecini ve böylece silindir içerisinde basıncın yükseleceği krank derecesini değiştireceği için püskürtme basıncının değiştirilmesiyle birlikte püskürtme zamanlamasının da değiştirilmesi deneylerde elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için önemli bir durumdur. Püskürtme zamanlamasının motorun birçok çalışma parametresine uygun dereceye getirilmesinin motor performansında ve egzoz salımlarında önemli bir rolü mevcuttur. Sayın, İlhan, Çanakçı ve Gümüş (2009) yapmış oldukları çalışmada tek silindirli, doğal emişli, 4 zamanlı, püskürtme zamanlaması üst ölü noktadan (ÜÖN) 20° öncesinde olan ve yakıt olarak motorin ve motorin içeriğine %15'e kadar çeşitli oranlarda metanol katılarak hazırlanan yakıt

karışımı kullanılan bir dizel motor üzerinde 4 farklı yük koşulunda püskürtme zamanlamasının ÜÖN'dan 15° öncesine ve ÜÖN'dan 25° öncesine alınmasının motor performanslarına ve egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerin sonucu incelendiğinde, yakıt içeriğindeki metanol miktarı arttıkça özgül yakıt harcamının ve NO_x salımlarının azaldığı, yanmamış HC ve CO salımlarının ise arttığı görülmüştür. Püskürtme zamanlamasının ÜÖN'nın 15° öncesine alınmasıyla NO_x salımlarının azaldığı, yanmamış HC, CO ve PM salımlarının ise arttığı; püskürtme zamanlamasının ÜÖN'nın 25° öncesine alınmasıyla ise NO_x salımlarının arttığı, yanmamış HC, CO ve PM salımlarının ise azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca püskürtme zamanlamasının erkene veya daha geçe alınmasının özgül yakıt harcamını arttırdığı ve termal verimi düşürdüğü saptanmıştır.

Mendonca ve Vas (2013) yapmış oldukları deneysel çalışmada 5,2 kW gücünde 4 zamanlı bir dizel motor üzerinde çeşitli yük şartlarında püskürtme zamanlamasının ÜÖN'dan 15,1° öncesine, ÜÖN'dan 20,5° öncesine ve ÜÖN'dan 25,5° öncesine alınmasının motor performanslarına ve egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde %80 motor yükünde CO ve HC salımlarının en düşük seviyede olduğu püskürtme zamanlaması ÜÖN'nın 20,5° öncesi olarak bulunmuştur. Bu püskürtme zamanlamasında CO salımı 12 ppm olarak ölçülürken püskürtmenin ÜÖN'nın 25,5° öncesine çekilmesiyle CO salımları 76 ppm'e ÜÖN'nın 15,1° öncesine alınmasıyla ise 80 ppm'e çıktığı görülmektedir. HC salımları için püskürtme zamanlaması ÜÖN'nın 20,5° öncesindeyken salım miktarı 7 ppm olarak ölçülürken ÜÖN'nın 25,5° öncesine çekilmesiyle HC salımlarının 22 ppm'e ulaştığı görülmüştür. Son olarak NO_x salımları incelendiğinde ise püskürtme zamanlaması ÜÖN'nın 20,5° öncesindeyken salım miktarı 105 ppm olarak ölçülürken ÜÖN'nın 25,5° öncesine çekilmesiyle HC salımlarının 480 ppm'e kadar ulaştığı, ÜÖN'nın 15,1° öncesine alınmasıyla salımların 170 ppm'e çıktığı görülmüştür.

Rostami, Ghobadian ve Kiani (2014) yapmış oldukları deneysel çalışmada farklı motor devirlerinde farklı püskürtme zamanlamalarının motor parametrelerine etkisini incelemiştir. Bu amaçla devir sayısı 1200, 1600, 2000 ve 2400 olduğu durumlarda püskürtmenin ÜÖN'dan 10° önce, ÜÖN'dan 15° önce ve ÜÖN'dan 20° önce

başlatılmasının motor parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerin sonucu incelendiğinde, enjeksiyon zamanlamasının erkene çekilmesinin silindir içerisinde görülen maksimum basıncı, maksimum sıcaklığı ve egzoz sıcaklığını arttırdığı görülmektedir. Bu durum NO_x salımlarının artmasına sebep olacaktır. Ayrıca motor hızı arttıkça özgül yakıt harcamasının da arttığı, tork değerinin de 2000 devir/dakika hızında en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir.

Ambrozik, Ambrozik, Kurczynski ve Lagowski (2014) yapmış oldukları çalışmada 33,6 kW gücünde, 3 silindirli, direkt püskürtmeli 2000 devir/dakika hızında maksimum güç değerine ulaşan ve yakıt olarak motorin ve yağ asidi metil esteri kullanılan bir dizel motor üzerinde püskürtme zamanlamasının ÜÖN'dan 13° öncesi, ÜÖN'dan 17° öncesi ve ÜÖN'dan 21° öncesi arasında değiştirilmesinin egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yapılan deneyler sonucunda, püskürtme zamanlaması değişiminin NO_x ve CO_2 salımlarını önemli ölçüde değiştirdiği, testte kullanılan dizel motorda üzerinde deneme yapılan değişik püskürtme zamanlamaları arasında püskürtmenin erkene alınmasıyla NO_x salımlarının arttığı, CO_2 salımlarının ise azaldığı görülmektedir. Ayrıca, yakıt olarak daha düşük ısı değere sahip olan biyodizel kullanıldığında aynı enerji ihtiyacını sağlayabilmek için tek püskürtmede silindire daha fazla yakıtın gönderilmesi gerekliliği sebebiyle daha yüksek basınçta yakıt gönderimi görülmektedir. Bu durum püskürtme basıncı ve penetrasyon kalitesini arttırmakta ancak NO_x salımlarını da önemli ölçüde arttırmaktadır.

Wamankar, Satapathy ve Murugan (2015) yapmış oldukları deneysel çalışmada 4,4 kW gücünde, tek silindirli, 4 zamanlı, 1500 devir/dakika hızında çalıştırılan bir dizel motor üzerinde püskürtme zamanlaması, püskürtme basıncı ve sıkıştırma oranının değiştirilmesinin egzoz salımlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada gerçekleştirilen deneylerin sonuçları incelendiğinde, püskürtme zamanlamasının değiştirilmesiyle CO ve HC salımlarının sırasıyla %16 ve %35 oranlarında azaltılabildiği görülmüştür. Ayrıca çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde HC ve CO salımlarının en düşük değerlerinin elde edilebilmesi için püskürtme basıncı ve püskürtme zamanlamasının

birlikte değiştirilerek motorun diğer parametreleriyle birlikte uygun değerlere alınması gerekli olduğu görülmüştür.

Gnansekaran, Saravanan ve Ilangkumaran (2016) yapmış oldukları çalışmada 4,4 kW gücünde, tek silindirli, 4 zamanlı, 1500 devir/dakika hızında çalıştırılan ve yakıt olarak motorin ve motorin içeriğine %20'ye kadar çeşitli oranlarda balık yağından elde edilmiş biyodizel katılarak hazırlanan yakıt karışımı kullanılan bir dizel motor üzerinde püskürtmenin ÜÖN'dan 21° önce, ÜÖN'dan 24° önce ve ÜÖN'dan 27° önce başlatılmasının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde, %80 yükte püskürtme zamanlaması ÜÖN'nın 21° öncesinden ÜÖN'nın 24° ve 27° öncesine alındığında termal verimin kademeli olarak düştüğü, egzoz sıcaklıklarının kademeli olarak yükseldiği, NO_x ve CO salımlarının yükseldiği görülmüştür. HC ve PM salımları ise 3 farklı püskürtme zamanlaması arasında çok düşük oranlarda değişim gösterdiği saptanmıştır.

Hoshmat, Banapurmath, Khandal, Gaitonde, Basavarajappa ve Yaliwal (2016) yapmış oldukları çalışmada 5,2 kW gücünde, tek silindirli, 4 zamanlı, direkt enjeksiyonlu, su soğutmalı bir dizel motor üzerinde püskürtme zamanlamasının ÜÖN'dan 19° öncesi ve ÜÖN'dan 27° öncesi arasında değiştirilmesinin egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre püskürtme zamanlamasının erkene çekilmesinin silindir içerisindeki maksimum basıncı düşürdüğü, tutuşma gecikmesi sürecinin uzamasını sağladığı, NO_x salımlarını yükselttiği, CO ve HC salımlarını ise düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Püskürtme basıncı ve püskürtme zamanlaması dışında kullanılan yakıtın çeşitli fiziksel özelliklerinin de egzoz salımları ve motor performansı üzerinde etkilerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Guangxin, Zhulin, Apeng, Shenghua ve Yanju (2013) yapmış oldukları çalışmada 26,1 kW gücünde, 2 silindirli, 4 zamanlı, direkt püskürtmeli ve yakıt olarak dimetil eter kullanılan bir dizel motor üzerinde yakıt püskürtme sıcaklığı değişiminin motor performansına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, yakıt sıcaklığının 20°C'den 40°C'ye çıkartılmasıyla motor gürültüsünün %12,2 azaldığı ve yakıt devresinde pompa ve enjektördeki yakıt

basıncının sırasıyla %7,2 ve %5,6 azaldığı saptanmıştır. Bu durumun sonucunda püskürtme gecikmesi ve enjeksiyon süresinde artış gözlemlenmiştir. Bu sebeple silindir içerisindeki maksimum basınç %5,4 oranında azalmıştır. Bu azalma aynı zamanda NO_x salımlarının da azalacağı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak özellikle yakıt sıcaklığının 40°C üzerinde olduğu durumlarda motor termal veriminin düştüğü görülmüştür. Bu durum da özgül yakıt harcamasının, CO, HC ve SO_x salımlarının artmasına sebep olacaktır.

Chen, Guo, Zhao, Xu ve Ma (2016) yapmış oldukları çalışmada 2 silindirli, doğal emişli, 4 zamanlı, direkt enjeksiyonlu 1500 devir/dakika ve 1800 devir/dakika hızlarında çalıştırılan ve yakıt olarak biyodizel kullanılan bir dizel motor üzerinde püskürtülen yakıt sıcaklığı değişiminin motor performansına ve egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yapılan deneylerin sonuçlarına göre, motor 1500 devir/dakika hızında çalıştırılırken yakıt sıcaklığının 25°C'den 40°C ve 55°C'e çıkartıldığında NO_x salımlarında sırasıyla %7,6 ve %9,1 azalma kaydedilmiştir. Motor 1800 devir/dakika hızında çalıştırılırken ise aynı yakıt sıcaklığı değişimlerinde NO_x salımlarının sırasıyla %2,3 ve %2,4 düştüğü gözlemlenmiştir. PM salımları karşılaştırıldığında ise motor hızının 1500 devir/dakika olduğu durumda yakıt sıcaklığının 40°C ve 55°C'e çıkartıldığında sırasıyla %29,1 ve %54,1 arttığı ve motor hızının 1800 devir/dakika olduğu durumda yakıt sıcaklığının 40°C ve 55°C'e çıkartıldığında sırasıyla %37,5 ve %113 arttığı görülmektedir.

Ahmed ve Chaichan (2012) yapmış oldukları deneysel çalışmada 4 silindirli, 4 zamanlı, direkt püskürtmeli, doğal emişli bir dizel motor üzerinde, motorda kullanılan yakıt içerisine çeşitli oranlarda, setan arttırıcı katkı maddesi 2-etil hekzil nitrat katılarak setan sayısının 48,5, 50, 52 ve 55 değerlerine çıkartılmasının özgül yakıt harcamı ve egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda, setan sayısının yükselmesiyle egzoz sıcaklıklarının düştüğü, özgül yakıt harcamasının %12,5, NO_x salımlarının %6 ve CO salımlarının %30 oranlarına kadar düştüğü saptanmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında setan sayısının yükselmesinin motor çalışma gürültüsünü de azalttığı saptanmıştır.

Velmurugan ve Gowtham (2012) yapmış oldukları çalışmada tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, 1500 devir/dakika hızında çalıştırılan bir dizel motorda yakıt olarak kullanılan motorin içerisine setan sayısı arttırıcı katkı maddesi olarak 1 ml, 3 ml ve 5 ml oranlarında 2-metil propan katılarak yakıtın setan sayısının yükseltilmesinin egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, yakıt içeriğinin katkı maddesi karıştırılması NO_x salımlarını %21 oranına kadar, HC ve CO salımlarını ise sırasıyla %17 ve %20 oranlarında azalttığı saptanmıştır.

Singh ve diğer. (2016) yapmış oldukları deneysel çalışmada 135 kW gücünde, 6 silindirli, Euro-III standartlarında, direkt püskürtmeli, turboşarjlı, su soğutmalı ve yakıt olarak biyodizel ve motorin karışımları kullanılan bir dizel motor üzerinde yakıta ait setan sayısı, oksijen içeriği, yağunluk gibi parametrelerdeki değişimlerin NO_x salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonucunda yakıtın setan sayısının, yoğunluğunun ve oksijen içeriğinin artmasının NO_x salımlarını da arttırdığı saptanmıştır. Ayrıca çalışmada motordaki silindir içi basınç arttıkça NO_x salımlarının arttığı görülmüştür.

Silindir içerisine püskürtülen yakıtın püskürtme açısı da silindir içerisindeki karışım oranını, tutuşma gecikmesini ve yanma performansını etkilediği için egzoz salımlarını da etkilemektedir. Bu konuyla ilgili de yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur. Kim, Kim, Lee ve Lee (2006) yapmış oldukları çalışmada tek silindirli, direkt püskürtmeli, elektronik enjeksiyon sistemine sahip, tasarım değerlerinde 60° püskürtme açısında yakıt püskürten bir dizel motorda püskürtme zamanlamasıyla birlikte püskürtme açısının değiştirilmesinin, EGR sistemi kullanımının ve sıkıştırma oranı değiştirilmesinin egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre püskürte zamanlamasının erkene alınmasının NO_x ve PM salımlarını önemli ölçüde azalttığı, püskürtme açısının düşürülmesinin ortalama efektif basıncı arttırdığı, tüm değişikliklerin optimizasyonuyla yüksek efektif basınç ve düşük No_x salımlarının sağlanabildiği saptanmıştır.

Kim, Yoon, Park ve Lee (2007) yapmış oldukları deneysel çalışmada bir dizel motorda püskürtme stratejisi değiştirilmesinin egzoz salımlarına ve motor

performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında pilot püskürtme, parçalı püskürtme ve ön karışimli püskürtme seçenekleri denenmiş ve denemeler sonucunda farklı püskürtme stratejilerinin yanma sıcaklığı, silindir içi basınçlar ve termal verim gibi motor performansını belirleyen parametreleri düşük oranda etkileyerek NO_x salımlarını önemli ölçüde düşürebildiği gözlemlenmiştir.

Yoon, Cha ve Lee (2010) yapmış oldukları çalışmada bir dizel motor üzerinde püskürtme açısının 156°'den 70° ve 60° alınması ve püskürtme zamanlamasının ÜÖN'dan 40° öncesi ile ÜÖN arasında değiştirilmesinin egzoz salımlarına ve motor performansına etkisini gözlemlemişlerdir. Ayrıca çalışma kapsamında çoklu püskürtme stratejisi kullanımı da incelenmiştir. Deney sonuçları, püskürtme açısının düşürülmesinin püskürtme zamanlamasının ÜÖN'dan 35° öncesine alındığı durumda efektif basıncı yükselttiği görülmüştür. Buna bağlı olarak NO_x salımlarının paralel bir şekilde yükseldiği görülmüştür. Ayrıca, çoklu püskürtme stratejisi kullanıldığında ikinci püskürtmede tutuşma gecikmesi sürecinin çok kısılması sebebiyle, NO_x salımlarının azaldığı görülmüştür.

Yakıt püskürtme parametrelerinde yapılan değişikliklerin motor performansı ve egzoz salımlarına etkisini konu alan birçok yüksek lisans ve doktora tezi de mevcuttur. Bu tezlerden örnekler verilecek olursa, Gümüş (2005) dizel motorlarda tutuşma gecikmesinin silindir basınç seviyelerine etkisini incelemiştir. Pireli (2006) ve Kaya (2010) yakıt olarak dizel ve biyodizel karışımı kullanılan bir dizel motorda, Kulakoğlu (2009) yakıt olarak dizel ve metanol karışımı kullanılan bir dizel motorda yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin motor performansı ve egzoz salımlarına etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca Vural (2009) küçük hacimli bir dizel motorda püskürtme avansı değişiminin, İlhan (2007) çift yakıtlı bir dizel motorda püskürtme avansı değişiminin, Goldwine (2008) ise başta püskürtme zamanlaması olmak üzere çeşitli parametre değişimlerinin motor performansı ve egzoz salımlarına etkilerini deneysel çalışmalarla incelemişlerdir.

Bu tez kapsamında 11,4 kW gücünde tek silindirli, doğal emişli, yakıt olarak EN 590 standartlarında motorin, DMA standartlarında marin tipi motorin ve bu yakıtlar

içeriğine çeşitli oranlarda artık RME 180 fuel oil katılarak hazırlanmış yakıt karışımları kullanılan bir dizel motor üzerinde püskürtme basıncı ve püskürtme zamanlaması değişimlerinin motor performansı ve egzoz salımları üzerine etkileri incelenmiştir.



BÖLÜM BEŞ

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde; tez kapsamında yapılan deneylerde kullanılan dizel motorun, ölçüm ekipmanlarının ve deneylerde kullanılan yakıtların özellikleri ile ölçümlerle elde edilen verilerin motor performans analizlerinde kullanılan verilere çevrilmesinde kullanılan hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Deneylerin yapılabilmesi için kullanılan düzeneğin genel görünümü Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Test düzeneği

5.1 Deneylerde Kullanılan Materyaller ve Yakıtlar

Bu bölümde yapılan deneylerde kullanılan dizel motor, enjektör püskürtme basıncını değiştirmek için kullanılan enjektör test cihazı ve deneyler sırasında kullanılan yakıtlarla ilgili bilgiler verilmiştir.

5.1.1 Dizel Motor

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde Anadolu Motor firması tarafından üretimi yapılan Antor marka 4 LD 820 model dizel motorun teknik özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Test motoru teknik özellikleri (Antor Motor, 2014)

Marka ve model	Antor 4 LD 820
Silindir sayısı	1
Silindir çapı	102 mm
Strok uzunluğu	100 mm
Çalışma prensibi	4 zamanlı
Sıkıştırma oranı	17:1
Maksimum motor hızı	3000 d/d
Maksimum motor gücü	13 kW
Maksimum tork	48 Nm (1600 d/d'da)
Soğutma	Hava soğutmalı
Maksimum yanma havası harcamı	53,4 m ³ /saat
Yakıt püskürtme	Direkt püskürtme
Yakıt püskürtme basıncı	190 – 200 bar
Yakıt püskürtme zamanlaması	ÜÖN'dan 22° - 24° öncesi

Yukarıda özellikleri verilen dizel motorda yakıt püskürtme basıncı ve yakıt püskürtme zamanlaması değerleri motora ait kılavuzda (Antor, 2014) belirtilen fabrika çıkış değerlerine uygun olarak kabul edilmiştir. Testlerde kullanılacak olan Antor marka 4LD 820 model dizel motora ait fotoğraf Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2 Test motoru

5.1.2 Enjektör Test Cihazı

Deneyler sırasında; test motoruna ait yakıt enjektörünün farklı basınçlarda yakıt püskürtülebilmesi için enjektör motor üzerinden sökülerek dizel motora ait kılavuza uygun şekilde püskürtme basıncı ayarlaması yapılmıştır. Bu ayarlama sırasında enjektörün püskürtme basıncı değerinin tespit edilebilmesi için fotoğrafı Şekil 5.3'te verilen el pompalı, 0-400 bar aralığında püskürtme yapılabilen, uygun basınç aralığında gliserin dolgulu standart manometreye ve 0,75 litrelik yakıt haznesine sahip bir enjektör test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.3 Enjektör test cihazı

5.1.3 Deneylerde Kullanılan Yakıtlar

Tez kapsamında EN 590 standartlarında motorin, DMA standartlarında marin tipi motorin ve DMA tipi deniz motorini içeriğine çeşitli oranlarda RME 180 artık denizcilik yakıtı katılarak hazırlanmış yakıt karışımları kullanılan bir dizel motor üzerinde püskürtme basıncı ve püskürtme zamanlaması değişimlerinin motor performansı ve egzoz salımları üzerine etkileri incelenmiştir. Deneyler için ihtiyaç duyulan yakıtlar Tüpraş İzmir Rafinerisi'nden numune olarak temin edilmiştir. Test sırasında kullanılan yakıtlar EN 590 standartlarında motorin, DMA standartlarında deniz motorini ve DMA tipi deniz motorini içeriğine %5 oranında RME 180 tipi artık

denizcilik yakıtı karıştırılarak hazırlanan yakıt karışımı (DMA95) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan yakıt karışımları ilgili oranlarda kütleli olarak karıştırılmıştır. Yakıtlara ait Tüpraş İzmir Rafinerisi laboratuvarlarında yapılan analiz sonuçları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2 Deneylerde kullanılan yakıtlara ait analiz sonuçları

	Birim	Test Yöntemi	EN 590	DMA	DMA95
Setan sayısı		EN 15195	62,4	---	---
		EN ISO 5165			
Setan indisi		EN ISO 4264	57,2	57,0	56,2
Yoğunluk (15°C)	kg/m ³	EN ISO 3675 EN ISO 12185	827,1	829,3	836,3
Kükürt oranı	mg/kg	EN ISO 20846 EN ISO 20884	9,9	---	---
	%	ISO 8754			
			---	0,097	0,28
Parlama noktası	°C	EN ISO 2719	60	60	60
%10 damıtma kalıntısındaki karbon oranı	%	EN ISO 10370	<0,1	<0,1	0,77
Kül oranı	%	EN ISO 6245	0,0016	0,0024	0,0040
Su oranı	mg/kg	EN ISO 12937	<0,1	<0,1	<0,1
Yağlama özelliği	micron	EN ISO 12156	436	430	409
Kinematik viskozite (40°C)	mm ² /sn	EN ISO 3104	2,785	5,499	14,410
Karbon oranı	%		86,2	86,2	86,2
Hidrojen oranı	%		13,60	13,55	13,42

Tabloda görüldüğü üzere deneylerde kullanılan yakıtlar arasında setan indisi, yoğunluk, sülfür oranı, %10 damıtma kalıntısındaki karbon oranı, yoğunluk ve kinematik viskozite konularında önemli oranlarda farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar püskürtme gecikmesi, tutuşma gecikmesi, motor performansı ve egzoz salımlarını önemli ölçüde etkileyen parametrelerdir. Bu parametrelerden kinematik viskozite ve yoğunluk sıcaklıkla değişmektedir. Sıcaklık değişimine göre değişen yoğunluk değeri aşağıda verilen ampirik formül kullanılarak hesaplanmıştır (Park, Yoon, Suh ve Lee, 2008).

$$\rho_{\text{ampirik}} = \alpha + \beta(T-15) \quad (5.1)$$

Burada;

ρ_{ampirik} : Hesaplanan yoğunluk

α : Yakıtın 15°C'deki yoğunluğu

β : Yakıtın 15°C'deki yoğunluğuna göre değişen katsayı

T: Yoğunluk hesaplaması yapılan sıcaklık olarak belirtilmiştir.

Yukarıdaki denklemde belirtilen β değeri deneylerle ölçülen yoğunluk değişimlerine göre belirlenmiş ve 15°C'deki yoğunluk değerlerine göre değişen kat sayılardır. Hesaplamalarda kullanılan β değeri seçiminde Park ve diğer. (2008) tarafından yapılan çalışmada hesaplanan katsayılar üzerinden ekstrapolasyon yapılarak elde edilen veriler kullanılmıştır. β değerleri EN590 için -0,746, DMA için -0,745 ve DMA95 için -0,726 olarak kullanılmıştır. Çeşitli sıcaklıklar için hesaplanan yoğunluk (ρ) değerleri Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 Deneylerde kullanılan yakıtların farklı sıcaklık değerleri için hesaplanan yoğunluklar

			Sıcaklık (°C)			
			20	30	40	50
EN 590	ρ	kg/m ³	823,7	815,91	808,45	800,99
DMA	ρ	kg/m ³	825,75	818,12	810,67	803,22
DMA95	ρ	kg/m ³	832,67	825,41	818,15	810,89

5.2 Deneylerde Kullanılan Ölçü Aletleri

Bu bölümde yapılan deneylerde kullanılan ve deney sonuçlarının daha düşük hatalarla elde edilmesini sağlayan dinamometre, egzoz gaz analizörü, yakıt debi ölçeri, ve hava debi ölçeri ekipmanları ile ilgili teknik bilgiler verilmiştir.

5.2.1 Motor Dinamometresi ve Yük Hücresi

Deneyler sırasında motorun çeşitli yük koşullarında çalıştırılabilmesi için motor şaftına bağlanan elektrikli bir dinamometre kullanılmıştır. Ayrıca dinamometre ile

motorun ilk hareket ihtiyacı da karşılanabilmektedir. Tablo 5.4'te deneylerde kullanılan motor dinamometresine ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 5.4 Motor dinamometresi teknik özellikleri

Marka	Kemsan A.Ş.
Model	KK 160
Motor tipi	Doğru akım motoru
Güç	22 kw
Dönme hızı	3000 d/d
Ağırlık	165 kg
Armatür gerilimi	300 V
Armatür akımı	55 A
Alan (field) gerilimi	200 V
Alan akımı)	3 A

Kullanılan dinamometre motorun istenen yükte çalıştırılabilmesini sağlamanın yanında, motorun hızının, sıcaklığının ve momentinin ölçülebilmesini sağlayan sensörlerle donatılmıştır. Şekil 5.4'te dinamometre ve üzerinde bulunan sensörlerin yer aldığı fotoğraf verilmiştir.



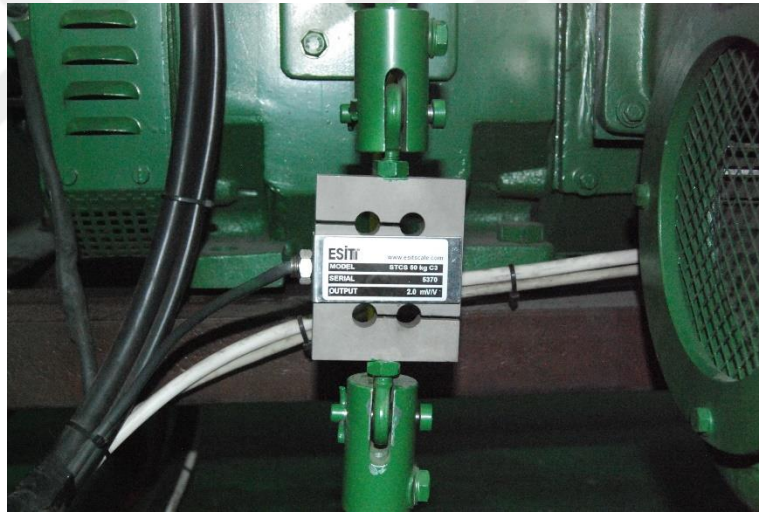
Şekil 5.4 Motor dinamometresi

Deneyler sırasında moment ölçümünün sağlanabilmesi için dinamometre üzerine bir adet yük hücresi yerleştirilmiştir. Yerleştirilen yük hücresiyle baskı kuvveti ölçümü yapılmaktadır. Yük hücresine ait teknik özellikler Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.5 Yük hücresi teknik özellikleri (Esit, 2017)

Yük hücresi markası	Esit A.Ş.
Yük hücresi modeli	STSC 50
Yük hücresi maksimum kapasitesi	50 kg
Yük hücresi hassasiyeti	1 g
Hata payı	$\leq \pm 0.05$

Deneylerde kullanılan ve dinamometre şaftına 25 cm uzaklığa monte edilmiş olan yük hücresinin fotoğrafı Şekil 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.5 Yük hücresi

5.2.2 Egzoz Gazı Analizörü

Deneylerde kullanılan dizel motordan çıkan egzoz gazı içeriğindeki hava kirleticilerin oranlarını ölçebilmek için CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂ ve O₂ gazlarının ölçümlerinin yapılabildiği teknik özellikleri Tablo 5.6’da verilen egzoz gaz analizörü kullanılmıştır.

Tablo 5.6 Egzoz gazı analizörü teknik özellikleri (Testo, 2017)

Egzoz gaz analizörü markası	Testo
Egzoz gaz analizörü modeli	350 Maritime
Sıcaklık ölçüm aralığı	-40°C - 1000°C
CO ölçüm aralığı	0 – 3000 ppm
CO ₂ ölçüm aralığı	0 - %40 (hacimsel)
NO ölçüm aralığı	0 – 3000 ppm
NO ₂ ölçüm aralığı	0 – 500 ppm
SO ₂ ölçüm aralığı	0 – 3000 ppm
O ₂ ölçüm aralığı	0 - %25 (hacimsel)
Hata payı (100 ppm'den daha yüksek oranlı ölçümler için)	≤ %1
Hata payı (100 ppm'den daha düşük oranlı ölçümler için)	≤ %2
Sıcaklık ölçüm hata payı	≤ ±5°C
Basınç ölçüm hata payı	≤ ±0,01 bar

Deneyler sırasında egzoz gazı içeriğinde bulunan hava kirleticilerin oransal değerleri ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan egzoz gazı analizörünün ve yardımcı ekipmanlarının fotoğrafı Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 Egzoz gazı analizörü ve yardımcı ekipmanları

5.2.3 Yakıt Debi Ölçeri

Deneylerde kullanılan yakıtın kütlesini, yoğunluğunu ve sıcaklığını çok düşük hata paylarıyla ölçebilmek için yakıt debi ölçeri kullanılmıştır. Kullanılan debi ölçer iki ana bölümden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi yakıtın debisinin, sıcaklığının ve yoğunluğunun belirlenmesinde kullanılan sensör bölümü ikincisi ise sensörlerle yapılan ölçümlerin veriye dönüştürüldüğü çevirici (converter) bölümüdür. Yakıt debi ölçerine ait teknik bilgiler Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7 Yakıt debi ölçeri teknik özellikleri (Krohne, 2013)

Yakıt debi ölçeri sensör ve çevirici markası	Krohne
Yakıt debi ölçeri sensör modeli	Optimass 3000
Yakıt debi ölçeri çevirici modeli	MFC 300
Sıcaklık ölçüm aralığı	-40 – 150 °C
Yoğunluk ölçüm aralığı	400 – 3000 kg/m ³
Debi ölçüm aralığı	0 – 22,5 litre/saat
Sıcaklık ölçüm hata payı	≤ ±1°C
Yoğunluk ölçüm hata payı	≤ ±2 kg/m ³
Debi ölçüm hata payı	≤%0,1 (sıvı ölçümleri için) ≤%0,5 (gaz ölçümleri için)
Basınç düşmesi	0,4591 bar

Yakıt debi ölçeri, ölçüm yapılan akışkanın basıncının düşmesine sebep olmaktadır. Tabloda gösterilen basınç düşmesi değeri 25°C’de 850 kg/m³ yoğunluğa sahip sıvı bir akışkan için yakıt debi ölçerinin kılavuzuna göre hesaplanmış olan değerdir. Sistem üzerinde harici bir yakıt pompası kullanılmaması sebebiyle bu yakıt düşmesini karşılamak üzere; deneylerde kullanılan yakıt tankları yakıt akış ölçerine göre 5 metre yükseğe monte edilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıt debi ölçerinin fotoğrafı Şekil 5.7’de, yakıt tankının fotoğrafı Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.7 Yakıt debi ölçeri



Şekil 5.8 Yakıt tankı

5.2.5 Nem ve Sıcaklık Ölçer

Deneyler sırasında kullanılan havanın nemliliğinin ölçülmesi için aşağıda özellikleri belirtilen nem ve sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Ekipmanın özellikleri Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8 Nem ve sıcaklık ölçer teknik özellikleri (Testo, 2012).

Nem ve sıcaklık ölçer markası	Testo
Nem ve Sıcaklık ölçer modeli	610
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	-10 – 50 °C
Nem ölçüm aralığı	% 0 – 100
Ölçüm Sıklığı	1 sn

5.3 Deneylerde Kullanılan Yöntemler

Tez kapsamında yapılan deneylerde tek silindirli bir dizel motorun farklı yakıtlarla çalıştırılması sırasında yakıt püskürtme basıncı ve zamanlamasında yapılan değişikliklerin motor performansına ve egzoz salımlarına etkisi araştırılmıştır. Motor performansı ve egzoz salımlarındaki değişiklikleri ölçmek için elektrikli dinamometre, yakıt debi ölçeri, yük hücresi ve egzoz gazı analizörü ekipmanları kullanılmıştır. Deneylere başlamadan önce test düzeneğinde yer alan tüm ölçüm ekipmanlarının kalibrasyonu yapılmıştır. Deneylerde kullanılan dizel motora ait deney kapsamında değiştirilen değişkenler hariç tüm parametrelerin tüm ölçümler sırasında sabit olması sağlanmıştır. Deneyler sırasında motorun ilk hareketi sonrası egzoz gazı sıcaklığının sabit kalana kadar yükselmesi beklenmiş, yapılması gereken ölçümler egzoz gazı sıcaklığının 3 dakika boyunca sabit kaldığı gözlemlendikten sonra yapılmıştır. Her bir ölçüm 3 farklı zamanda tekrarlanmış ve deneylerde kabul edilen değer, bu değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Yapılan 3 ölçümün ortalaması ile uç ölçüm değerleri arasındaki farkın ölçülen değer %3'ünden daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca deneyler sırasında deney laboratuvarında yeterli miktarda ve uygun kalitede hava olmasına dikkat edilmiştir.

İlk olarak, EN 590 standartlarında motorin, DMA deniz motorini ve DMA95 yakıtı ile çalıştırılan test motorunda yakıt püskürtme basıncı ve zamanlaması fabrika çıkış değerlerinde ve yakıt pompası üzerindeki kremayer dişli (indeks kolu) %100 konumundayken motorun 3000 devir/dakika hızına ulaşması sağlanmıştır. Ardından, motor dinamometre ile çeşitli yüklerde yüklenerek motor hızının 3000 devir/dakika değerinden kademeli olarak 1200 devir/dakika hızına kadar düşmesi sağlanmıştır. Bu durumda her 100 devir/dakika hız düşmesinde anlık motor momentini ölçülmüştür. Bu

ölçümler sonucunda en yüksek motor momentinin fabrika çıkış verilerinde belirtildiği gibi 1600 devir/dakika sağlandığı saptanmıştır. Bu motor hızında elde edilen maksimum tork değerleri yakıtlar bazında incelendiğinde elde edilen en düşük tork değerinin DMA95 yakıtı kullanımında 39,23 Nm olarak ölçüldüğü görülmüştür. Bu sebeple deneyler sırasında her bir yakıt tipi kullanımında eşit şartlarda karşılaştırma yapılabilmesi için ölçüm yapılan en yüksek tork değeri olarak bu değer kullanılmıştır. Her bir yakıt için 39,23, 29,42, 19,61 ve 9,81 Nm motor momentlerinde ölçümler alınmıştır.

Deneyler kapsamında en yüksek motor momentinin sağlandığı motor hızında ve yukarıda belirtilen motor momentlerinde test motorunda yakıt olarak EN 590 standartlarında motorin, DMA standartlarında deniz motorini ve DMA95 yakıtı kullanılırken yakıt püskürtme basıncının sırasıyla 180, 200, 220 bar ve yakıt püskürtme zamanlamasının sırasıyla ÜÖN'dan 25° öncesi, ÜÖN'dan 20° öncesi ve ÜÖN'dan 15° öncesi olarak ayarlandığı tüm kombinasyonlar için yakıt harcamı, egzoz gazı sıcaklığı, egzoz salımları, emme havası sıcaklığı ve emme havası nemliliği ölçülmüştür. Böylece yakıt püskürtme basıncı ve zamanlamasındaki değişimlerin motor performansı ve egzoz salımlarına etkilerini ortaya çıkartabilmek için gerekli ölçümler tamamlanmıştır.

5.4 Deney Sonuçları Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda çeşitli ölçüm ekipmanlarıyla yakıt harcamı, emme havası sıcaklığı ve nemliliği, egzoz gazı içeriğindeki hava kirleticilerin oranı, egzoz sıcaklığı, yakıt sıcaklığı, yük hücresi üzerinde okunan yük değeri verileri ölçülebilmıştır. Çeşitli püskürtme stratejilerinde ortaya çıkan motor performanslarının daha etkin bir şekilde karşılaştırılabilmesi için deneylerde elde edilen veriler kullanılarak motor momenti, motor gücü, özgül yakıt tüketimi ve hava sıcaklığı ile hava nemliliğine göre NO_x salım oranı düzeltme katsayısı bu bölümde gösterilen çeşitli formüllerle hesaplanmıştır.

Deney setinde bulunan yük hücresi dinamometre şaftı üzerine 25 cm uzaklığı sabitlenmiş ve çekme prensibiyle çalışan bir ölçüm ekipmanıdır. Yük hücresi motorun uygulamış olduğu çekme gücünü ağırlık birimi (kg) olarak ölçmektedir. Ölçülen bu değeri kullanılarak motor momentini hesaplayabilmek için aşağıda verilen formül kullanılmıştır.

$$M_e = m.g.l \quad (5.2)$$

Burada;

M_e : Motor momenti (Nm)

m : Yük hücresi üzerinden ölçülen değer (kg)

g : Yer çekimi ivmesi (m/sn^2)

l : Yük hücresinin bağlı olduğu moment kolu uzunluğu (m)

Yukarıdaki formülle motor momenti hesaplanabilmektedir. Fren gücü motor momentinin açısal hız ile çarpımına eşittir. Buna göre motorun ürettiği gücün hesaplanabilmesi için aşağıdaki şekilde elde edilen formül kullanılmıştır.

$$N_e = \omega.M_e = \frac{2.\pi.n.M_e}{60.1000} = \frac{M_e.n}{9549} \quad (5.3)$$

Burada;

N_e : Motor gücü (kW)

ω : Açısal hız (radyan/saniye)

n : Motor hızı (devir/dk)

Deneylerde kullanılan test düzeneğinde yakıt debi ölçeri ile anlık kütleli yakıt debisi (Q_m) ölçümü yapılabilmektedir. Bu veri kullanılarak özgül yakıt harcamasını hesaplayabilmek için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$b_e = \frac{Q_m}{N_e} . 10^3 \quad (5.4)$$

Burada;

b_e : Özgöl yakıt harcamı (g/kwh)

Q_m : Yakıt debi ölçeri ile ölçülen kütleli yakıt debisi (kg/saat)

Azot oksitlerin egzoz gazı içeriğindeki oranlarının ölçümünde emme havasının sıcaklık ve nemlilik koşullarına göre sapma olacağından dolayı ölçüm değerinin aşağıda verilen formülde elde edilen katsayı ile düzeltilmesi gereklidir. Bu katsayı MARPOL 73/78 (Denizlerin Gemilerden Kirlenmesini Önleme Uluslararası Sözleşmesi) kapsamında yayınlanan NO_x Teknik Kodu (2008) içeriğinde verilen yöntem, formüller ve katsayılarla hesaplanmıştır. Bu katsayı yalnızca azot oksitleri için kullanılmaktadır.

$$k_{\text{gaz}} = \frac{1}{1 - 0,0182 \cdot (H_a - 10,71) + 0,0045 \cdot (T_a - 298)} \quad (5.5)$$

Burada;

k_{gaz} : Düzeltme katsayısı

H_a : Emme havasının özgül nemi (g/kg)

T_a : Emme havasının Kelvin termometresine göre sıcaklığı (K)

Elde edilen düzeltme katsayısına göre NO ve NO₂ gazlarının egzoz gazı içeriğindeki oranları deney koşullarına göre aşağıda verilen formülle hesaplanmıştır.

$$c_{\text{gaz}} = c_{\text{ölçüm}} \cdot k_{\text{gaz}} \quad (5.6)$$

Burada;

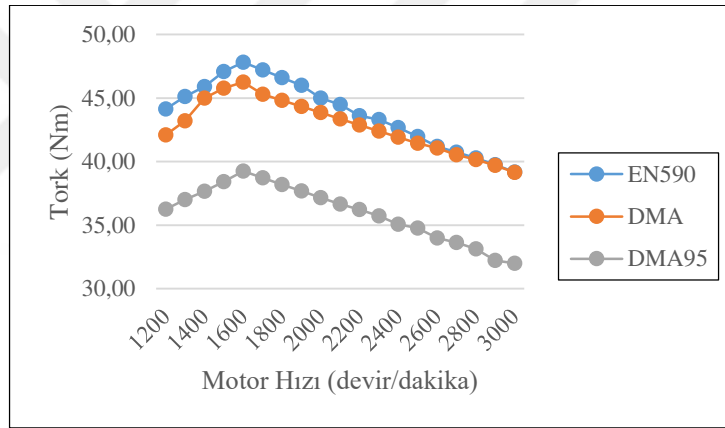
c_{gaz} : Egzoz gazı içeriğindeki azot oksitlerin düzeltilmiş oranı

$c_{\text{ölçüm}}$: Egzoz gazı içeriğindeki azot oksitlerin ölçülen oranı

BÖLÜM ALTI

DENEY SONUÇLARI VE BULGULAR

Deneyisel çalışmalarda test motorunun en yüksek tork değerine sahip olduğu motor hızında değişken motor yükleri altında sırasıyla yakıt püskürtme basınçları ve zamanlamaları değiştirilmiş ve her bir durumda egzoz salım miktarları ölçülmüştür. Deneyisel çalışmalar sırasında kullanılan dizel motorun en yüksek tork değerine sahip olduğu motor hızını saptamak için yakıt pompasının kremayer dişlisinin maksimum değerinde tutulduğu sırada dinamometre üzerinden yükleme yapılarak motor yükü ve dolaylı olarak hızı değiştirilmiş ve her bir hız değerinde elde edilen tork değeri yük hücresiyle ölçülmüştür. EN590 standartlarında motorin, DMA ve DMA95 yakıtları için ölçülen tork değerleri Şekil 5.1’de verilmiştir.



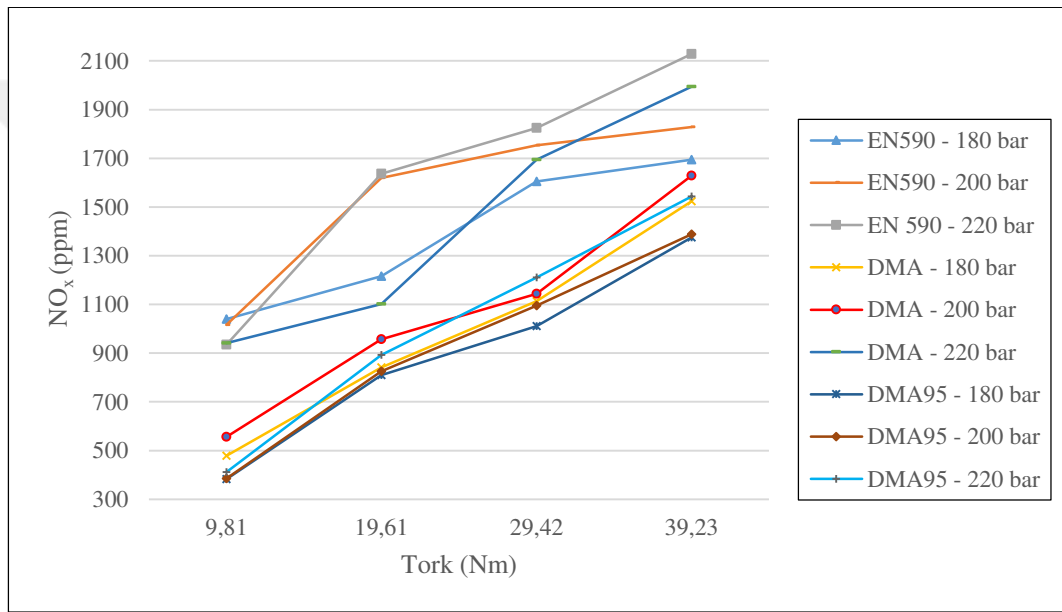
Şekil 6.1 Farklı yakıt tipleri ve değişken motor hızlarında elde edilen maksimum tork değerleri

Elde edilen ölçüm sonuçları incelendiğinde her bir yakıt tipi için elde edilen maksimum tork değerleri değişkenlik göstermektedir. Ancak deneylerde kullanılan tüm yakıtlar için en yüksek tork değerlerinin elde edildiği motor hızı 1600 devir/dakika olarak ölçülmüştür. Bu motor hızında elde edilen maksimum tork değerleri yakıtlar bazında incelendiğinde elde edilen en düşük tork değerinin DMA95 yakıtı kullanımında 39,23 Nm olarak ölçüldüğü görülmüştür. Bu sebeple deneyler sırasında her bir yakıt tipi kullanımında eşit şartlarda karşılaştırma yapılabilmesi için ölçüm yapılan en yüksek tork değeri olarak bu değer kullanılmıştır.

Tablo 6.1 Yakıt püskürtme basıncı değişiminin egzoz salımları ve dizel motor performansına etkisinin gözlemlendiği deney sonuçları

Ölçüm	Tork	Yakıt Tipi	Püskürtme Basıncı	NO _x	CO	SO ₂	CO ₂	O ₂	Egzoz Sıcaklığı	Yakıt Harcamı
	Nm		bar	ppm	ppm	ppm	%	%	°C	g/saat
104	9,81	EN590	180	1040	501		4,3	15,35	198	3039
103	19,61	EN590	180	1216	420		5,75	13,37	234	3129
102	29,42	EN590	180	1605	802		8,11	10,19	273,5	2787
101	39,23	EN590	180	1694	1112		9,93	7,99	279,9	2236
114	9,81	EN590	200	1016	399		4,34	15,4	197,9	3048
113	19,61	EN590	200	1619	386		5,1	13,95	243,1	3391
112	29,42	EN590	200	1753	721		7,74	10,65	277,8	2959
111	39,23	EN590	200	1828	992		9,69	8,22	291,5	2396
124	9,81	EN590	220	934	389		4,36	15,4	180,1	2774
123	19,61	EN590	220	1636	369		5,73	13,29	260	3455
122	29,42	EN590	220	1824	719		7,69	10,69	288,5	3084
121	39,23	EN590	220	2128	1051		9,6	8,33	313,1	2608
504	9,81	DMA	180	478	505	16	4,22	15,85	201,2	3189
503	19,61	DMA	180	841	451	26	5,32	14,23	249,5	3550
502	29,42	DMA	180	1114	875	32	7,34	11,64	281,1	3272
501	39,23	DMA	180	1524	1144	41	8,91	9,39	289,5	2718
514	9,81	DMA	200	556	488	14	3,89	16,55	206,6	3419
513	19,61	DMA	200	957	450	24	5,12	14,39	260	3741
512	29,42	DMA	200	1143	866	32	6,43	12,55	294,5	3696
511	39,23	DMA	200	1629	1080	38	8,68	9,61	308,1	2961
524	9,81	DMA	220	941	525	12	3,84	16,31	206,8	3373
523	19,61	DMA	220	1101	432	22	5,12	14,37	266,1	3824
522	29,42	DMA	220	1695	845	31	6,42	12,59	297,2	3742
521	39,23	DMA	220	1994	1055	34	8,61	9,48	325,1	3082
804	9,81	DMA95	180	382	1102	25	3,38	16,6	185,5	3079
803	19,61	DMA95	180	810	1025	80	5,01	14,97	261	3907
802	29,42	DMA95	180	1011	1318	112	6,85	12,64	286,4	3620
801	39,23	DMA95	180	1375	1884	130	8,26	10,49	300,2	3149
814	9,81	DMA95	200	385	985	21	3,99	16,02	186,7	2991
813	19,61	DMA95	200	826	965	78	4,86	15,12	265,1	4008
812	29,42	DMA95	200	1095	1210	111	6,23	13,31	285,2	3796
811	39,23	DMA95	200	1388	1643	124	8,14	10,58	306,4	3242
824	9,81	DMA95	220	412	985	19	3,77	16,26	191	3106
823	19,61	DMA95	220	893	924	76	5,09	14,87	238,2	3542
822	29,42	DMA95	220	1210	1135	102	6,18	13,37	295,6	3952
821	39,23	DMA95	220	1543	1587	124	7,98	10,68	303,8	3245

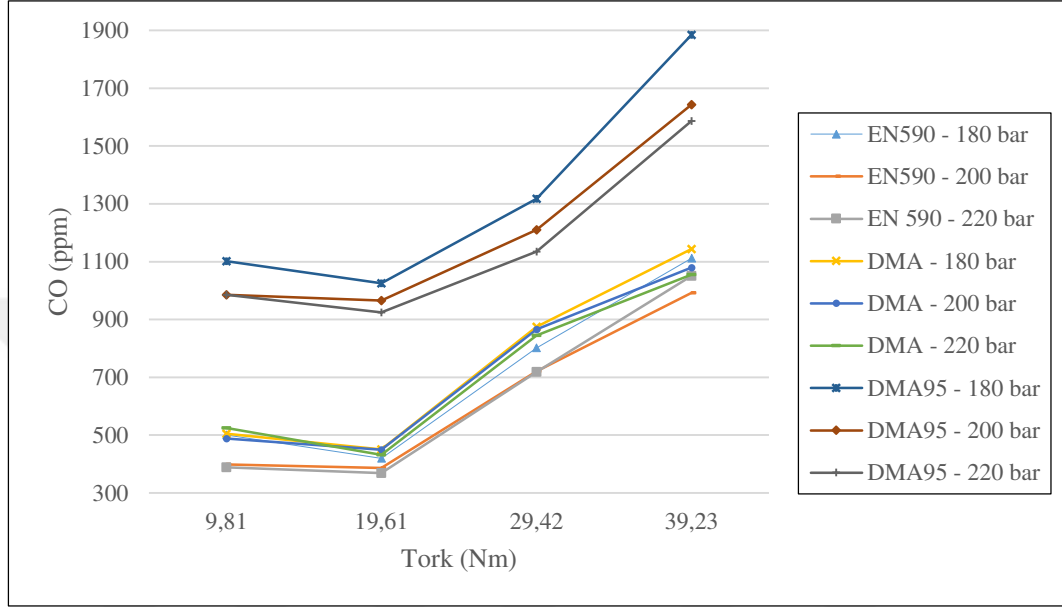
Tablo 6.1’de yakıt püskürtme basıncı değişiminin egzoz salımları ve motor performansına etkisinin gözlemlendiği deney sonuçları verilmiştir. Deneyler sırasında ÜÖN’nın 20° öncesine sabitlenmiş yakıt püskürtme zamanlamasında, sabit 1600 devir/dakika motor hızında, yakıt olarak EN 590 standartlarında motorin, DMA ve DMA95 yakıtları kullanılırken yakıt püskürtme basıncının 180 bar, 200 bar ve 220 bar olarak değiştirilmesinin motor performansı ve egzoz salımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Püskürtme basıncı değişiminin NO_x salımları üzerindeki etkilerini gösteren grafiğe Şekil 6.12’de yer verilmiştir.



Şekil 6.2 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin NO_x salımları üzerindeki etkileri

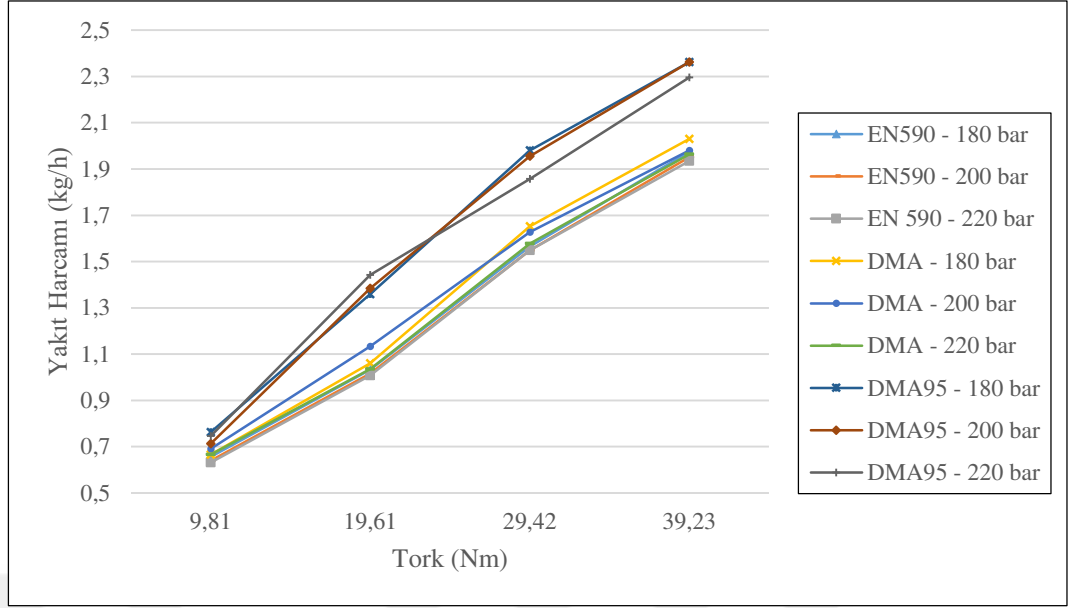
Şekil 6.2 incelendiğinde tüm yakıtlar için püskürtme basıncının artması NO_x salımlarının da artmasına sebep olmaktadır. Örneğin test motorunun fabrika çıkış değerlerinde belirtilen 200 bar püskürtme basıncında 39,23 Nm tork değerinde ölçülen NO_x salım oranı 1828 ppm olarak ölçülürken, bu oran püskürtme basıncının 180 bar’a alınmasıyla 1694 ppm’e düşmüş, püskürtme basıncının 220 bar’a alınmasıyla 2128 ppm’e kadar yükselmiştir. Yüksek tork değerlerinde tüm yakıt tipleri için püskürtme basıncı arttıkça NO_x salımlarının arttığı görülmektedir. Ancak silindir içersine gönderilen yakıt miktarının azaldığı düşük tork değerlerinde özellikle daha düşük kinematik viskoziteye sahip yakıtlarda püskürtme basıncının artmasıyla NO_x

salımlarının azaldığı görülmektedir. Motorun tork değerleri azaldıkça püskürtme basıncı değişiminin etkisiyle meydana gelen salım miktarlarındaki değişim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan yakıtın kinematik viskozitenin artmasıyla düzenli olarak daha düşük NO_x salım oranlarının ölçüldüğü dikkat çekmektedir.

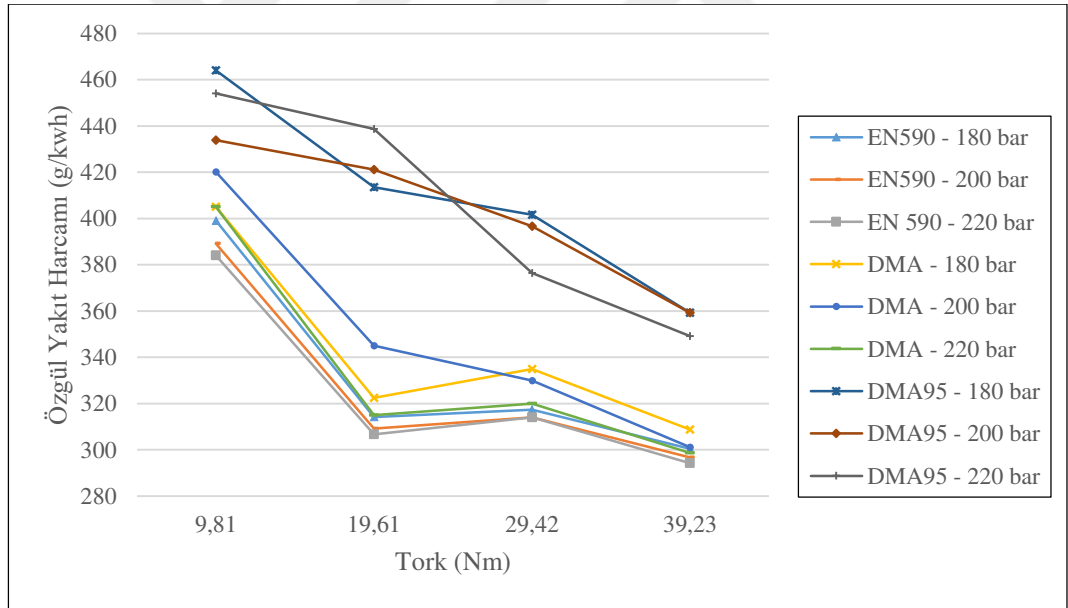


Şekil 6.3 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin CO salımları üzerindeki etkileri

Şekil 6.3 incelendiğinde yakıt püskürtme basıncının yükselmesiyle CO salımlarının genel olarak düştüğü gözlemlenmiştir. Özellikle düşük viskoziteli yakıtlarda değişim oranlarının daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Ek olarak tüm yakıt tipleri ve püskürtme basınçları için tork değeri düştükçe CO salım oranları da düşmektedir. Ancak motor yükünün çok düşük olduğu 9,81 Nm değerindeki CO salım oranlarının 19,61 Nm torkundaki salımlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Deneyler sırasında kullanılan yakıtların kinematik viskoziteleri yükseldikçe CO salım oranlarının da önemli ölçüde yükseldiği görülmektedir. Özellikle kinematik viskozitesi en yüksek olan DMA95 yakıtının kullanımında CO salımlarının çok önemli ölçüde yükseldiği görülmüştür. Ayrıca, ölçümler sırasında motorun ilk çalışma zamanında ve silindir içerisine gönderilen yakıt miktarlarının değiştirildiği durumlarda CO salım oranlarının çok yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür.



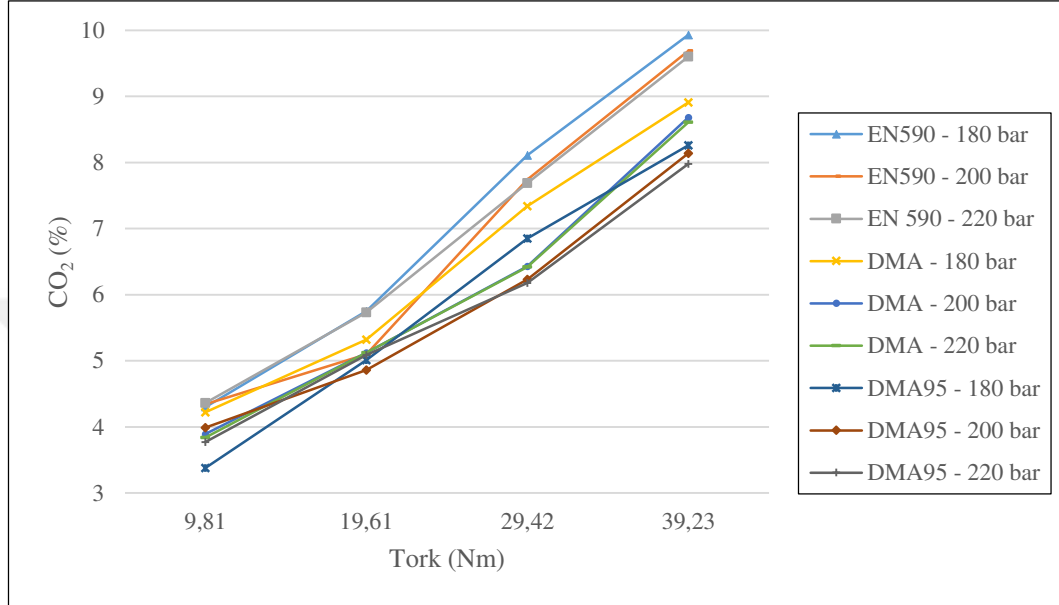
Şekil 6.4 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin yakıt harcamaları üzerindeki etkileri



Şekil 6.5 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin özgül yakıt harcaması üzerindeki etkileri

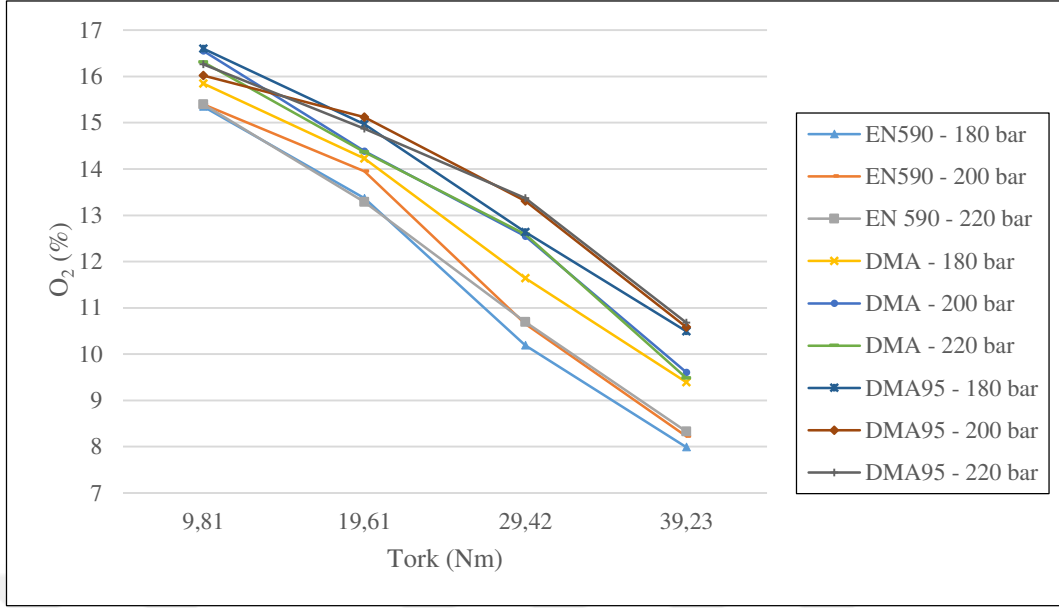
Şekil 6.4 ve Şekil 6.5 incelendiğinde yakıt püskürtme basıncındaki değişimlerin yakıt harcamaları üzerinde etkili olduğu görülmektedir. 39,23 Nm ve 29,42 Nm tork değerlerinde test motorunun fabrika çıkış değerlerinde belirtilen 200 bar yakıt püskürtme basıncının azaltılmasının genel olarak yakıt harcamasını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tork değeri azaldıkça tüm yakıt tipleri için özgül yakıt

harcamının arttığı görülmüştür. Ancak istisna olarak 19,61 Nm torkunda 29,42 Nm torkuna göre daha düşük özgül yakıt harcamı değerleri kaydedilmiştir. Son olarak kullanılan yakıtların kinematik viskozitelerindeki yükselmelerin özgül yakıt harcamını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür.



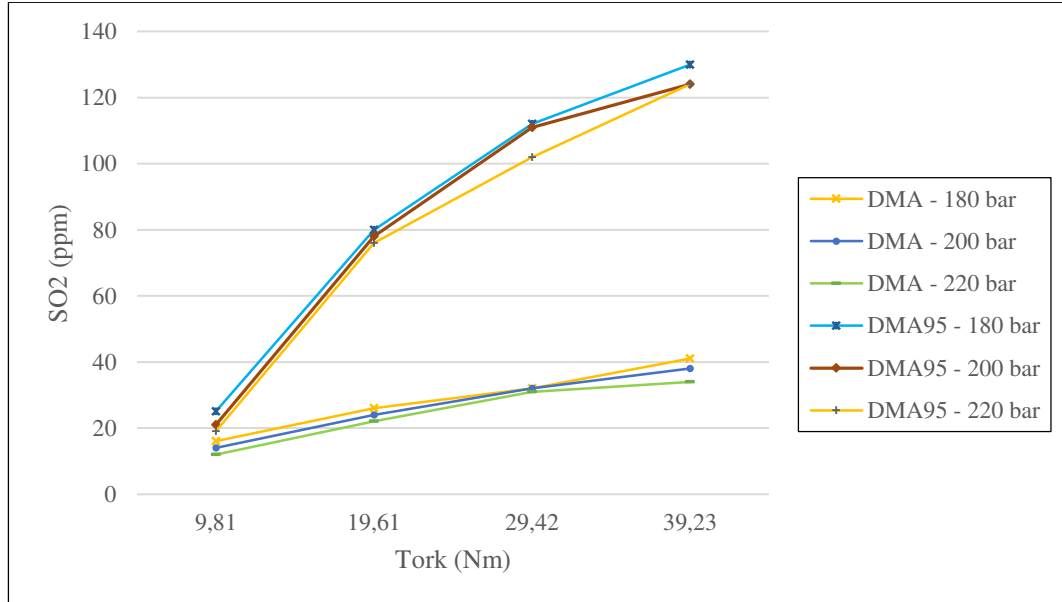
Şekil 6.6 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin CO₂ salımları üzerindeki etkileri

Şekil 6.6 incelendiğinde 39,23 Nm ve 29,42 Nm torklarında yakıt püskürtme basıncı arttıkça CO₂ salımlarını düşüğü gözlemlenmiştir. 19,61 Nm ve 9,81 Nm torklarında ise püskürtme basıncı değişiminin CO₂ salım oranları üzerinde doğrudan etkili olmadığı görülmektedir. Ayrıca motor yükü arttıkça, püskürtme basıncındaki değişimin CO₂ salımlarını etkileme oranının da arttığı görülmektedir. Son olarak kullanılan yakıtların kinematik viskozite değerleri yükseldikçe ortaya çıkan CO₂ salım oranlarının düşüğü gözlemlenmiştir.



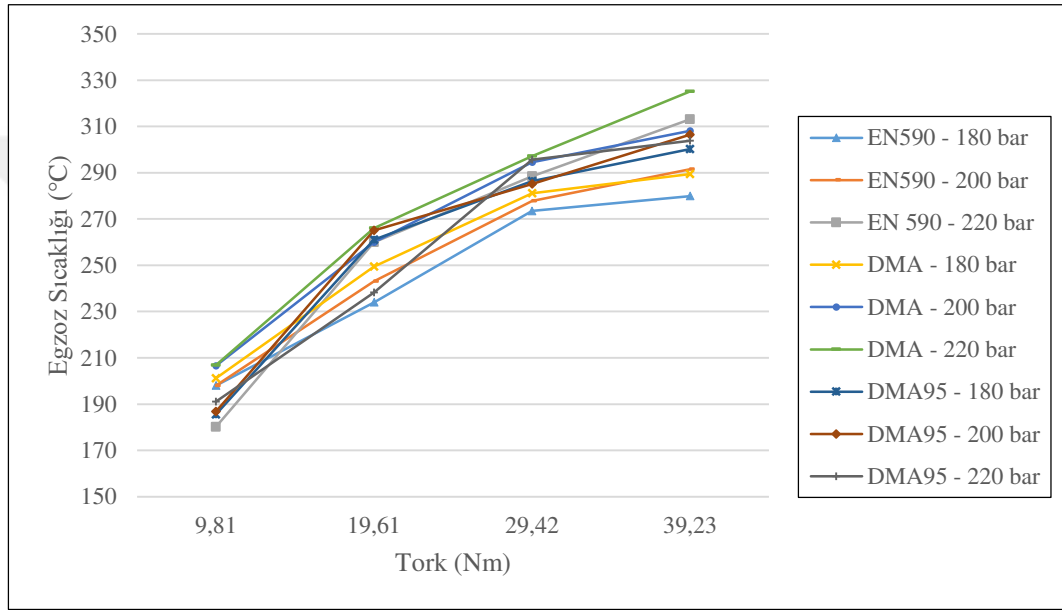
Şekil 6.7 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin O₂ salımları üzerindeki etkileri

Şekil 6.7’de gösterilen püskürtme basıncındaki değişimlerin O₂ salımları üzerindeki etkileri incelendiğinde, O₂ salımlarının CO₂ salımlarıyla ters orantılı olarak hareket ettiği görülmektedir. Ayrıca her bir yük durumunda salım yapılan CO₂ ve O₂ oranları toplamalarının motor yükü azaldıkça arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin SO₂ salımları üzerindeki etkileri

Şekil 6.8 incelendiğinde yakıt püskürtme basıncındaki değişimlerin SO₂ salımları üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Tüm yük durumları Şekil 6.4'te gösterilen yakıt harcamı grafiğinde olduğu gibi püskürtme basıncı arttıkça SO₂ salımlarının azaldığı görülmektedir. Ek olarak kullanılan yakıt içeriğindeki kükürt oranı arttıkça salım yapılan SO₂ oranının da belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Ayrıca, kükürt oranı 10 mg/kg olan EN 590 standartlarında motorin kullanımında egzoz gazı analizöründe SO₂ salımı ölçülememiştir.



Şekil 6.9 Yakıt püskürtme basıncının değiştirilmesinin egzoz gazı sıcaklığı üzerindeki etkileri

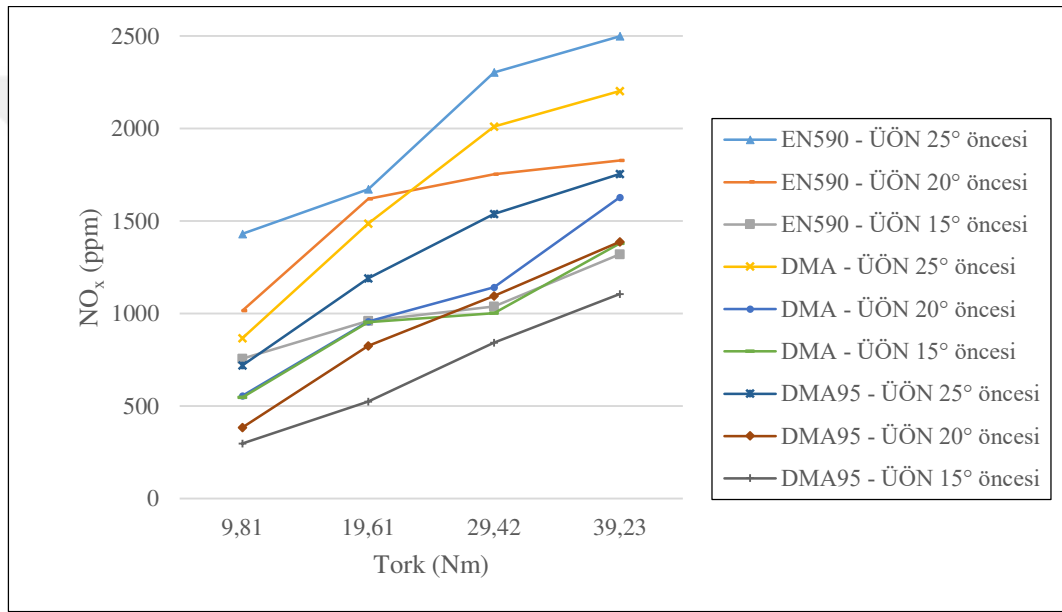
Şekil 6.9 incelendiğinde yakıt püskürtme basıncının yükselmesiyle egzoz gazı sıcaklıklarının değiştiği görülmektedir. Genel olarak incelendiğinde yüksek motor yüklerinde püskürtme basıncı arttıkça egzoz gazı sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Düşük yüklerde ise daha düzensiz bir değişim vardır. Özellikle düşük yüklerde ve yüksek püskürtme basınçlarında egzoz gazı sıcaklığının çok düşük değerlerde ölçüldüğü saptanmıştır.

Tablo 6.2'de yakıt püskürtme zamanlaması değişiminin egzoz salımları ve motor performansına etkisinin gözlemlendiği deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.2 Yakıt püskürtme zamanlaması değişiminin egzoz salımları ve motor performansına etkisinin gözlemlendiği deney sonuçları

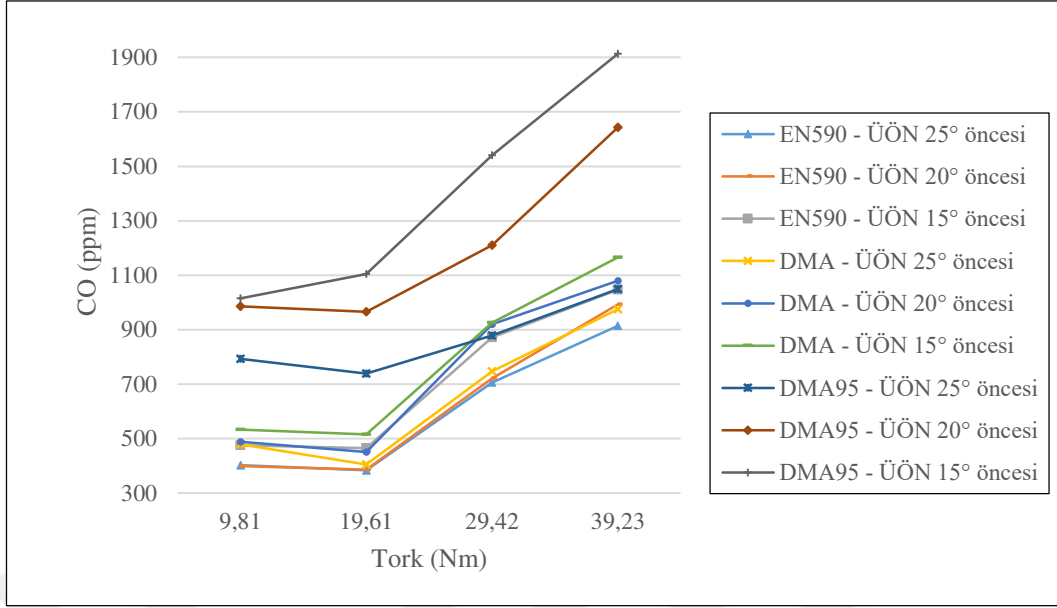
Ölçüm	Tork	Yakıt Tipi	Püskürtme Zamanlaması	NO _x	CO	SO ₂	CO ₂	O ₂	Egzoz Sıcaklığı	Yakıt Harcamı
	Nm			ppm	ppm	ppm	%	%	°C	kg/saat
214	9,81	EN590	ÜÖN 25°Öncesi	1431	402		4,5	15,31	188	0,70
213	19,61	EN590	ÜÖN 25°Öncesi	1672	383		5,31	13,6	255,1	1,16
212	29,42	EN590	ÜÖN 25°Öncesi	2303	706		7,86	10,2	285,9	1,61
211	39,23	EN590	ÜÖN 25°Öncesi	2499	914		9,85	8,17	304,7	2,06
114	9,81	EN590	ÜÖN 20°Öncesi	1016	399		4,34	15,4	197,9	0,64
113	19,61	EN590	ÜÖN 20°Öncesi	1619	386		5,1	13,95	243,1	1,02
112	29,42	EN590	ÜÖN 20°Öncesi	1753	721		7,74	10,65	277,8	1,55
111	39,23	EN590	ÜÖN 20°Öncesi	1828	992		9,69	8,22	291,5	1,95
314	9,81	EN590	ÜÖN 15°Öncesi	756	475		4,13	15,54	196,7	0,66
313	19,61	EN590	ÜÖN 15°Öncesi	961	464		5,01	14,26	232,1	1,11
312	29,42	EN590	ÜÖN 15°Öncesi	1038	871		7,59	11,22	261,5	1,59
311	39,23	EN590	ÜÖN 15°Öncesi	1321	1047		9,12	8,51	281,6	2,03
414	9,81	DMA	ÜÖN 25°Öncesi	868	478	15	4,13	16,44	206,7	0,76
413	19,61	DMA	ÜÖN 25°Öncesi	1487	404	27	5,16	14	245,3	1,18
412	29,42	DMA	ÜÖN 25°Öncesi	2011	747	33	7,11	12,02	292,5	1,65
411	39,23	DMA	ÜÖN 25°Öncesi	2203	975	42	8,88	9,56	313,2	2,15
514	9,81	DMA	ÜÖN 20°Öncesi	556	488	14	3,89	16,55	206,6	0,69
513	19,61	DMA	ÜÖN 20°Öncesi	957	450	24	5,12	14,39	260	1,13
512	29,42	DMA	ÜÖN 20°Öncesi	1143	920	32	6,43	12,55	294,5	1,63
511	39,23	DMA	ÜÖN 20°Öncesi	1629	1080	38	8,68	9,61	308,1	1,98
614	9,81	DMA	ÜÖN 15°Öncesi	548	532	16	3,55	16,6	161,5	0,72
613	19,61	DMA	ÜÖN 15°Öncesi	954	515	28	4,94	14,55	231,1	1,14
612	29,42	DMA	ÜÖN 15°Öncesi	1002	925	35	6,25	12,78	277,6	1,73
611	39,23	DMA	ÜÖN 15°Öncesi	1380	1165	42	8,43	9,8	291,4	2,12
714	9,81	DMA95	ÜÖN 25°Öncesi	721	792	31	4,02	15,9	222,7	0,75
713	19,61	DMA95	ÜÖN 25°Öncesi	1190	739	80	5,08	14,95	275,1	1,41
712	29,42	DMA95	ÜÖN 25°Öncesi	1538	878	121	6,36	13,1	289,6	2,07
711	39,23	DMA95	ÜÖN 25°Öncesi	1754	1049	128	8,43	10,29	314,5	2,40
814	9,81	DMA95	ÜÖN 20°Öncesi	385	985	21	3,99	16,02	186,7	0,71
813	19,61	DMA95	ÜÖN 20°Öncesi	826	965	78	4,86	15,12	265,1	1,38
812	29,42	DMA95	ÜÖN 20°Öncesi	1095	1210	111	6,23	13,31	285,2	1,96
811	39,23	DMA95	ÜÖN 20°Öncesi	1388	1643	124	8,14	10,58	306,4	2,36
914	9,81	DMA95	ÜÖN 15°Öncesi	298	1015	30	3,61	16,22	159,4	0,79
913	19,61	DMA95	ÜÖN 15°Öncesi	524	1104	80	4,85	15,2	228,7	1,42
912	29,42	DMA95	ÜÖN 15°Öncesi	843	1541	114	5,37	14,02	259,4	2,08
911	39,23	DMA95	ÜÖN 15°Öncesi	1106	1913	132	7,87	10,64	294,2	2,42

Deneyler sırasında 200 bar sabit yakıt püskürtme basıncında, sabit 1600 devir/dakika motor hızında, yakıt olarak EN 590 standartlarında motorin, DMA ve DMA95 yakıtları kullanılırken yakıt püskürtme zamanlamasının ÜÖN'nin 25° öncesi, ÜÖN'nin 20° öncesi, ÜÖN'nin 15° öncesine alınmasının motor performansı ve egzoz salımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Genel olarak tüm deneylerde püskürtme zamanlamasının erkene alınmasıyla motor vuruntusunun arttığı gözlemlenmiştir. Püskürtme zamanlaması değişiminin NO_x salımları üzerindeki etkilerini gösteren grafiğe Şekil 6.10'da yer verilmiştir.



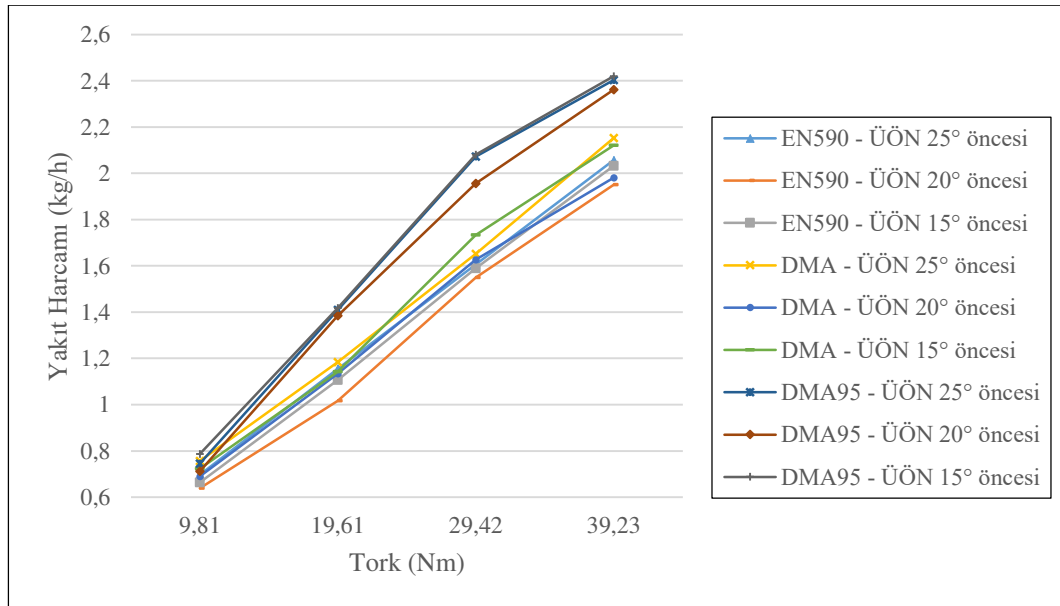
Şekil 6.10 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin NO_x salımları üzerindeki etkileri

Şekil 6.10 incelendiğinde yakıt püskürtme zamanlamasının geri alınmasıyla (püskürtme avansının arttırılmasıyla) NO_x salımlarının düzenli bir şekilde arttığı görülmüştür. Özellikle düşük kinematik viskoziteye sahip yakıtların kullanımında püskürtme zamanlamasının erkene alınması yüksek oranlarda NO_x salımı yapılmasına sebep olmuştur. Örneğin EN 590 standartlarında motorin kullanımında püskürtme zamanlamasının ÜÖN'nin 25° öncesine alınması NO_x salımlarının 2499 ppm'e kadar yükselmesine sebep olduğu görülmüştür.

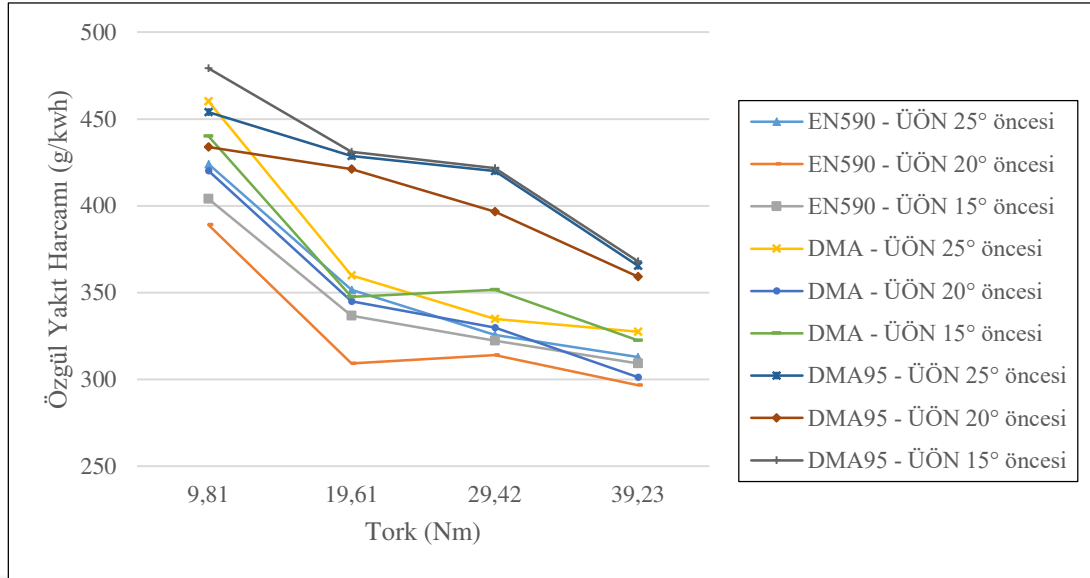


Şekil 6.11 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin CO salımları üzerindeki etkileri

Şekil 6.11’de görüldüğü üzere yakıt püskürtme zamanlamasının erkene alınmasıyla CO salımlarının düzenli bir şekilde azaldığı görülmüştür. Ek olarak tüm yakıt tipleri ve püskürtme zamanlamaları için tork değeri düştükçe CO salım oranları da düşmektedir. Ancak motor yükünün çok düşük olduğu 9,81 Nm değerindeki CO salım oranlarının 19,61 Nm torkundaki salımlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

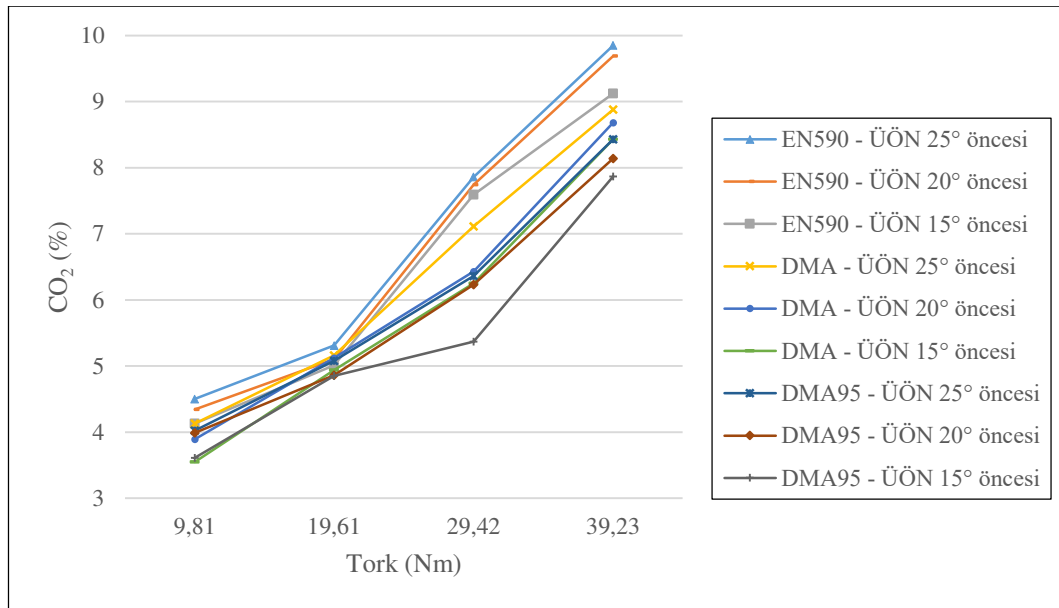


Şekil 6.12 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin yakıt harcamaları üzerindeki etkileri



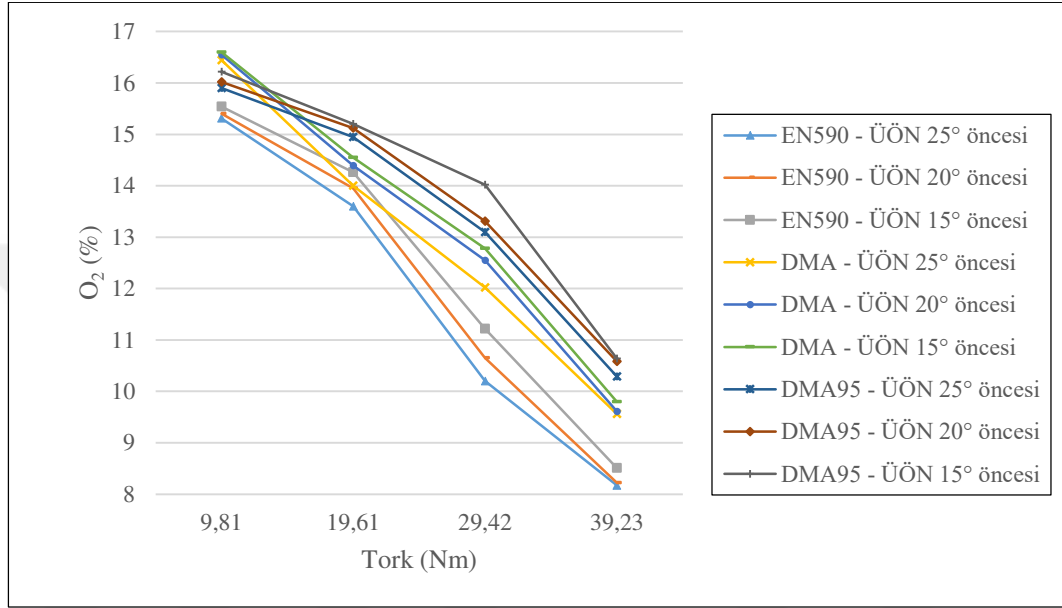
Şekil 6.13 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin özgül yakıt harcamı üzerindeki etkileri

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 incelendiğinde, 39,23 Nm ve 29,42 Nm tork değerlerinde test motorunun fabrika çıkış değerlerinde belirtilen ÜÖN'nin 20° öncesi püskürtme zamanlaması değerinin öncesine veya sonrasına alınmasının genel olarak yakıt harcamasını artırttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tork değeri azaldıkça tüm yakıt tipleri için özgül yakıt harcamasının arttığı görülmüştür.



Şekil 6.14 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin CO₂ salımları üzerindeki etkileri

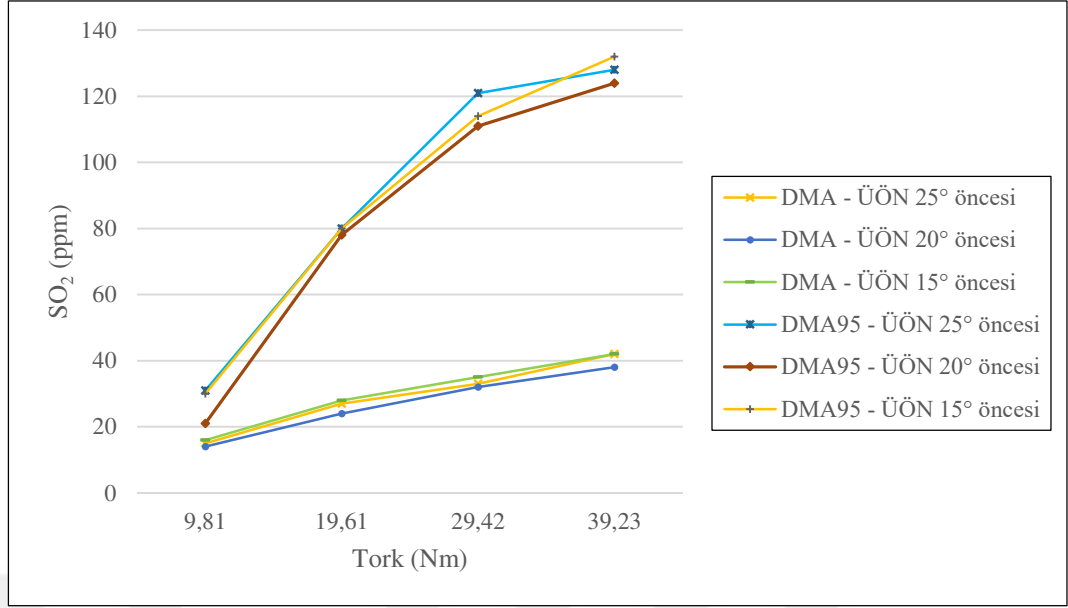
Şekil 6.14 incelendiğinde yakıt püskürtme zamanlamasının erkene alınmasıyla CO₂ salımlarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Düşük yüklerde salım miktarlarındaki düşüş oranının daha düşük olduğu saptanırken yüksek yüklerde daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca kullanılan yakıtın kinematik viskozitesinin yükselmesinin CO₂ salım oranlarını önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür.



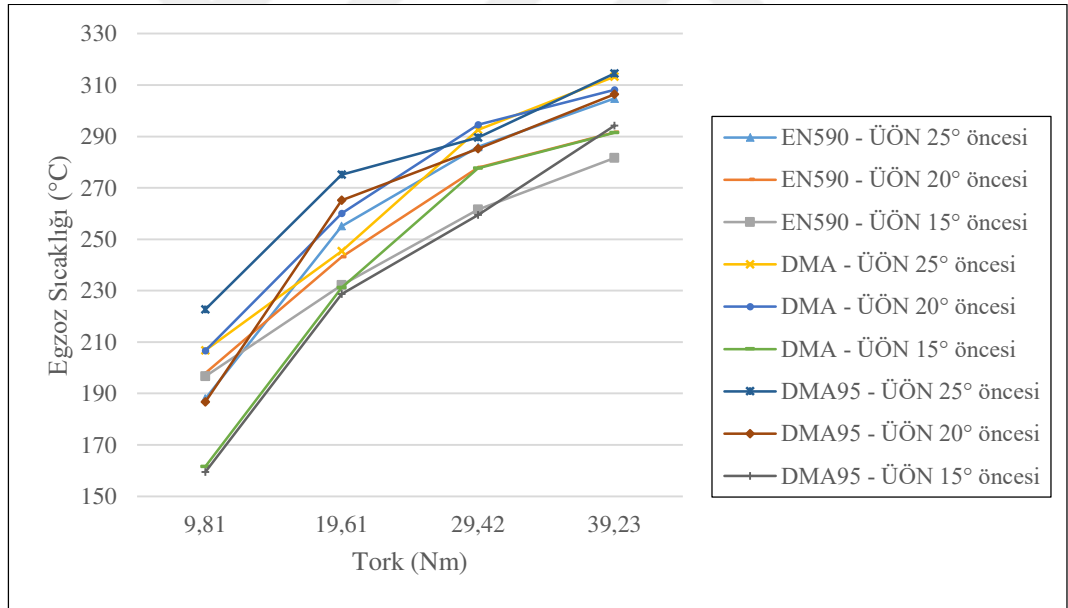
Şekil 6.15 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin CO₂ salımları üzerindeki etkileri

Şekil 6.15'te gösterilen püskürtme zamanlamasındaki değişimlerin O₂ salımları üzerindeki etkileri incelendiğinde, O₂ salımlarının CO₂ salımlarıyla ters orantılı olarak hareket ettiği görülmektedir. Ayrıca her bir yük durumunda salım yapılan CO₂ ve O₂ oranları toplamalarının motor yükü azaldıkça arttığı gözlemlenmiştir.

Aşağıda verilen Şekil 6.16 incelendiğinde yakıt püskürtme zamanlamasındaki değişimlerin SO₂ salımları üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Tüm yük durumları Şekil 6.12'de gösterilen yakıt harcamı grafiğinde olduğu gibi püskürtme basıncı arttıkça ve azaldıkça SO₂ salımlarının arttığı görülmektedir. Ek olarak kullanılan yakıt içeriğindeki kükürt oranı arttıkça salım yapılan SO₂ oranının da belirgin şekilde arttığı görülmektedir.



Şekil 6.16 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin SO₂ salımları üzerindeki etkileri



Şekil 6.17 Yakıt püskürtme zamanlamasının değiştirilmesinin egzoz sıcaklıkları üzerindeki etkileri

Şekil 6.17 incelendiğinde yakıt püskürtme zamanlamasının erkene alınmasıyla egzoz gazı sıcaklıklarının genel olarak yükseldiği görülmektedir. Özellikle püskürtme zamanlamasının ÜÖN 15° öncesine alındığı durumlarda egzoz sıcaklıklarının çok düştüğü görülmektedir.

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

Günümüzde artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji enerji talebinin artması sonucunu doğurmuştur. Artan enerji talebinin karşılanması için son dönemlerde alternatif ve çevreci enerji üretim yöntemlerine yönelim olsa da içten yanmalı motorlarla enerji üretiminin gelecek dönemde de en yaygın enerji üretim yöntemi olacağı öngörülmektedir. Bu durumun temel sebepleri içten yanmalı motorların yüksek termal verimi, ilk kurulum maliyetlerinin nispeten düşük olması, dünya çapında yaygınlaşmış olması ve çevresel faktörlerden oldukça az etkilenmesi olarak sıralanabilir.

İçten yanmalı motorlar, çeşitli avantajlarına karşın sebep olmuş oldukları egzoz salımları sebebiyle hava kirliliğinin temel sebeplerinden biridir. Küresel ısınmanın etkilerinin gözlemlenmeye başladığı günümüzde içten yanmalı motorlar kaynaklı hava kirliliğinin azaltılabilmesi oldukça kritik bir gerekliliktir. Bu sebeple uluslararası kuruluşlar, karar verici mekanizmalar ve devletler tarafından içten yanmalı motorların egzoz salımlarının ve yakıt harcamalarının azaltılması, enerji verimliliği yüksek motorlar üretilmesi ve kullanılan yakıtların çevreye daha az zarar verecek içeriğe sahip olmaları konularında önemli yaptırımlar ve zorunluluklar getirmektedir. İçten yanmalı motorlar, standart çalışma koşulları altında bu yaptırımlara ve standartlara uygun olsa da motorun çalışma performansını etkileyen çeşitli parametrelerdeki değişimler salım yapılan hava kirletici oranlarını da etkilemektedir. Bu sebeple motorlarda yanma kondisyonunu etkileyen parametrelerin analizi oldukça önemlidir.

Dizel motorlarda yanma performansını etkileyen, yakıt püskürtme stratejisiyle ilgili değişiklikler, emme havası üzerinde yapılan değişiklikler gibi dış kaynaklı etkenler yanma sonucu salım yapılan hava kirletici oranlarını etkilemektedir. Bu değişikliklerin etkilerini inceleyen birçok akademik çalışma da mevcuttur. Bu çalışmalar yakıt püskürtme stratejileriyle ilgili olarak püskürtme basıncının, püskürtme zamanlamasının, yakıt tipinin, yakıta ait fiziksel özelliklerin, yakıt püskürtme açısının ve yakıt püskürtme oranlarının değiştirilmesinin motor performansı ve egzoz salımları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Bu çalışmada yakıt olarak EN590 standartlarına uygun motorin, DMA standartlarına uygun deniz motorini ve DMA yakıtı içeriğine %5 oranında RME 180 artık yakıtı karıştırılarak hazırlanmış yakıt karışımı kullanılan bir dizel motor üzerinde her bir yakıt için püskürtme basıncı ve püskürtme zamanlaması değişimlerinin motor performansı ve egzoz salımları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

Çalışmanın altıncı bölümünde yer verilen deney sonuçlarından elde edilmiş olan bulgular incelendiğinde püskürtme basıncı ve püskürtme zamanlamasının motor performansı ve egzoz salımları üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular çalışmanın ikinci ve üçüncü bölümlerinde yer verilen bilgiler ışığında yorumlanabilmektedir.

Araştırmanın bulguları ikinci ve üçüncü bölümlerde yer verilen bilgiler ışığında aşağıda maddeler halinde yorumlanmıştır.

1. Yakıt püskürtme basıncının artırılması yüksek motor yüklerinde NO_x salımlarının artmasına sebep olmaktadır. Bu durumda, yakıt püskürtme basıncının artmasıyla yakıtın silindir içerisine daha küçük damlacıklar halinde verilebilmesi sebebiyle tutuşma gecikmesi sürecinde daha iyi yakıt hava karışımı sağlanmakta ve böylece ani basınç yükselmesi evresinde ulaşılan maksimum sıcaklık ve basınçlar yüksek olmaktadır. Ani basınç evresinde yüksek sıcaklıklara ulaşılması “Zeldovich Mekanizması” ile açıklandığı gibi silindir içerisine verilen hava içeriğindeki azotun oksidasyona uğramasına olanak sağlamaktadır. Bu sebeple ani basınç yükselmesi periyodunda daha yüksek oranda yakıt hava karışımı olması daha yüksek NO_x salımları oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca püskürtme basıncının artmasıyla daha küçük tanecikler halinde püskürtülen yakıtın tutuşma gecikmesi süreci de kısalmaktadır.

2. Yakıt püskürtme basıncının artırılması düşük yüklerde NO_x salımlarının daha düşük olmasına sebep olmaktadır. Bu durumda, püskürtme basıncının artmasıyla yakıtın silindir içerisine daha küçük tanecikler halinde ve daha az miktarda verilmesi

sebebiyle çapları küçülen ve miktarı azalan, böylece ataletleri azalan yakıt damlacıkları yanma odasında silindir duvarına kadar ulaşamamakta böylece piston kafası çevresinde ve silindir duvarı yüzeyine yakın bölgelerde yakıtla karışmamış hava bölgeleri oluşması sonucu doğmaktadır. Bu durum özellikle düşük kinematik viskoziteye sahip DMA ve DMA95 yakıtlarının kullanımında yanma verimini düşürmekte ve yakıt hava karışım kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple yakıt püskürtme basıncının artması düşük yüklerde NO_x salımlarının azalmasına sebep olabilmektedir.

3. Yakıt püskürtme basıncının artmasıyla CO salımlarının genel olarak düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi püskürtme basıncının artması sonucu silindir içerisine verilen yakıtın hava ile karışma kalitesinin artmasıdır. Karışım kalitesi arttıkça yakıt içeriğinden gelen karbon atomlarının oksidasyonu için yanma odasında daha uzun zaman kalmaktadır. Böylece karbon atomları daha yüksek oranda oksidasyona uğrayabilmekte ve CO_2 oluşum oranının artması sağlanmaktadır. CO salımları yakıt ve hava karışım oranının ve yanma kalitesinin düşük olduğu durumlarda karbon atomlarının yeterli miktarda oksidasyona uğrayamaması sebebiyle oluşmaktadır. Ayrıca silindir içerisinde hava miktarının düşük olması da CO salımlarının artmasına sebep olabilmektedir.

4. Deney sonuçlarında motor yükü düştükçe CO salım oranlarının da düştüğü görülmektedir. Ancak motor yükünün çok düşük olduğu 9,81 Nm değerindeki CO salım oranlarının 19,61 Nm torkundaki salımlarına göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bunun sebebi düşük yüklerde silindir içerisine verilen yakıtın daha az miktarda olması sebebiyle silindir içerisinde özellikle silindir duvarı ve piston kafası çevresinde yanmamış hava kütleleri oluşmasıdır. Başka bir şekilde söylenecek olursa silindir içerisine verilen havanın bir kısmı yanmaya katılmaktadır. Bu durumda yakıt içeriğindeki karbon miktarının yeterli düzeyde oksidasyona uğraması için gerekli hava miktarı yanmaya katılamamaktadır. Bu durum CO salımlarının artmasına sebep olabilmektedir.

5. Yakıt püskürtme basıncının test motorunun fabrika çıkış değeri olan 200 bar'dan 180 bar'a düşürülmesi yakıt harcamını arttırmaktadır. Bunun sebebi püskürtme basıncı düştükçe yakıt hava karışım kalitesinin azalması ve böylece yanma veriminin düşmesidir. Yanma veriminin düşmesi, aynı gücü karşılamak için motorun daha fazla yakıt harcamasına sebep olmaktadır. Püskürtme basıncının 220 bar değerine getirilmesiyle yakıt harcamalarında düşük miktarda da olsa azalma görülmektedir. Özellikle düşük yüklerde bu oranın düşük olmasının sebebi püskürtme basıncının artışı sonucu tanecik çapları küçülen ve ataletleri azalan yakıt taneciklerinin silindir duvarı çevresine ulaşamaması sebebiyle yeterli miktarda hava ile buluşamaması durumunda yanmamış HC artıkları olarak silindirden atılmasıdır.

6. 19,61 Nm tork yükünde 29,42 Nm torkuna göre daha düşük özgül yakıt harcamı değerleri kaydedilmiştir. Bunun sebebi 19,61 Nm motor yükünde silindir içerisine verilen yakıt miktarının daha yüksek oranda yakıt hava karışımı sağlayabilmesidir. 19,61 Nm yükünde 29,42 Nm yüküyle aynı miktarda hava içeriğine daha az miktarda yakıt püskürtülmesi, püskürtülen yakıtın da silindir içerisinde yeterli oranda dağılabilmesi sebebiyle daha iyi yakıt hava karışımı sağlanabilmiştir. Bunun bir diğer göstergesi yük başına düşen CO salımlarının da 19,61 Nm yükünde 29,42 Nm yüküne göre daha düşük olmasıdır.

7. Yakıt püskürtme basıncı arttıkça özellikle yüksek yüklerde CO₂ salımlarının da düştüğü görülmektedir. CO₂ salımları yakıt içeriğindeki karbon atomlarının oksidasyonu sonucu oluşmaktadır. Dolayısıyla yakıt harcamalarının düşmesi CO₂ salımlarını da düşürmektedir. Ancak, özellikle düşük yüklerde çeşitli sebeplerle karbon atomlarının yeterli miktarda oksidasyona uğrayamaması sonucu CO ve HC salımları gözlemlenebilmektedir. Bu hava kirletici maddelerin egzoz gazı içeriğindeki oranların artması yanma verimini düşürdüğü gibi CO₂ salımlarının da azalmasına sebep olmaktadır. Püskürtme basıncı arttıkça yakıt hava karışım kalitesinin artması sebebiyle motor verimi yükselmekte, yakıt harcamı azalmakta böylece CO₂ salımları da azalmaktadır.

8. Yakıt püskürtme basıncının artmasıyla özellikle yüksek motor yüklerinde egzoz gazı sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Bunun sebebi püskürtme basıncının artmasıyla tutuşma gecikmesi sürecinde daha iyi yakıt hava karışımı sağlanması sonucu ani basınç yükselmesi periyodunda daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmasıdır. Yanma sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar yükseldikçe egzoz sıcaklığının da yükseldiği görülmüştür.

9. Deneyler sırasında tüm yakıtlar için püskürtme zamanlamasının erkene alınması motor vuruntusunu arttırmıştır. Bunun sebebi püskürtme zamanlamasının erkene alınması sonucu tutuşma gecikmesi sürecinde daha yüksek oranda yakıt hava karışımının sağlanması böylece ani basınç yükselmesi evresinde ulaşılan maksimum basınçların çok artmasıdır.

10. Püskürtme zamanlamasının erkene çekilmesi NO_x salımlarının artmasına sebep olmuştur. Bunun sebebi motor vuruntusunun da sebebi olan ani basınç yükselmesi evresinde daha fazla yakıtın oksidasyona uğraması, tutuşma gecikmesi sürecinin kısılması ve böylece daha yüksek yanma sıcaklıklarına ulaşılabilmiş olmasıdır.

11. Püskürtme zamanlamasının erkene alınmasının CO salımlarının azalmasına sebep olduğu görülmüştür. CO salımları yakıt ve hava karışım oranının ve yanma kalitesinin düşük olduğu durumlarda karbon atomlarının yeterli miktarda oksidasyona uğrayamaması sebebiyle oluşmaktadır. Püskürtme zamanlamasının erkene alınmasıyla yakıt hava karışımının oluşabilmesi için daha uzun zaman kalmakta böylece daha iyi yakıt hava karışımı sağlanabilmektedir. Bu sebeple yakıt içeriğinden gelen karbon atomları daha yüksek oranlarda oksidasyona uğrayabilmekte böylece CO salım miktarları düşmektedir.

12. Yakıt püskürtme zamanlamasının erkene veya daha geçe alınması yakıt harcamalarını arttırmıştır. Püskürtme basıncı erkene alındığında ani basınç yükselmesi evresi sonucu ulaşılan basınç değerleri artmaktadır. Bu durumda yanma verimi yükselmiş olsa da termal verim düşmektedir. Bu sebeple yakıt harcamı da artmaktadır.

Püskürtme basıncı daha geç krank açısına alındığında ise yanmamış HC salımlarında ve CO salımlarında artış meydana geldiği için yanma verimi düşmektedir ve yakıt harcamaları artmaktadır.

13. Yakıt püskürtme zamanlamasının erkene alınmasıyla CO₂ salımlarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi püskürtme zamanlamasının erkene alınması sonucu yakıt içeriğindeki karbon atomlarının oksidasyonu için yeterli zaman oluşmasıdır. Böylece tutuşma gecikmesi süreci kısaltmakta, CO ve HC salımları azalmaktadır. Ek olarak yakıt harcamı da artmakta olduğu için CO₂ salımları artmaktadır.

14. Yakıt püskürtme zamanlamasının erkene alınması sonucu egzoz sıcaklıklarının yükseldiği görülmektedir. Bunun sebebi ani basınç yükselmesi evresinde daha yüksek oranda yakıt hava karışı sağlanması sonucu bu evrede daha yüksek silindir içi sıcaklıklara ulaşılabilmesidir.

15. Hem yakıt püskürtme basıncı hem de yakıt püskürtme zamanlaması değişimlerinde O₂ salımlarının CO₂ salımlarıyla ters orantılı olarak hareket ettiği gözlemlenmektedir. Yanma sırasında oksidasyonu sağlayan O₂ silindir içerisine hava ile birlikte gönderilmektedir. Deneylerin yapıldığı sabit motor devrinde silindir içerisine giren teorik hava miktarı değişmemektedir. Hava içeriğindeki O₂ yanma sonucunda CO₂, CO, SO₂ ve NO_x'e dönüşerek veya değişime uğramadan O₂ olarak çıkmaktadır. Çıkan bileşikler arasında CO₂ ve O₂ diğer bileşiklere göre çok daha yüksek orandadır. Bu sebeple CO₂ salım miktarı ile O₂ salım miktarları ters orantılı olarak hareket etmektedir.

16. Hem yakıt püskürtme basıncı hem de yakıt püskürtme zamanlaması değişimlerinde SO₂ salımlarının aynı yakıt kullanımında yakıt harcamalarına paralel olarak hareket ettiği gözlemlenmiştir.

17. Yakıt içeriğindeki kükürt oranı arttıkça SO₂ salımlarının da paralel olarak arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, SO₂ salımlarının yakıt içeriğindeki kükürtün

oksidasyona uğraması sonucu oluşmasıdır. Yakıt içeriğindeki kükürt miktarı arttıkça yanma sonucu oluşan SO₂ miktarı da benzer oranlarda artmaktadır. Ayrıca deneyler sırasında kükürt oranı çok düşük olan EN590 standartlarında motorin kullanımı sırasında SO₂ salımı ölçülememiştir.

18. Dizel motorun ilk çalışması sırasında yüksek oranlarda CO salımı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi motorun soğuk olduğu durumlarda özellikle silindir duvarı yüzeyinde alev sönmeleri meydana gelmesidir.

19. Deneyler sırasında kullanılan yakıtların kinematik viskoziteleri arttıkça NO_x salımlarının düzenli olarak azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi yakıtların kinematik viskozitesi arttıkça püskürtme sonrası daha büyük tanecikler halinde silindire verilmesidir. Bu durumda yakıt hava karışımı daha düşük oranlarda sağlanabilmekte böylece ani basınç yükselmesi evresinde daha az miktarda yakıt tutuşabilmektedir. Böylece NO_x salım oranları azalmaktadır.

20. Yakıtın kinematik viskozitesi yükseldikçe CO salımlarında da artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi, yüksek viskoziteli yakıtların düşük oranda yakıt hava karışımı sağlamasıdır. Karışım kalitesi düştükçe karbon atomlarının oksidasyon kalitesi de düşmekte böylece daha yüksek oranlarda CO salımları meydana gelmektedir.

21. Kinematik viskozitesi yüksek olan yakıtların kullanımı durumunda özgül yakıt harcamalarının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi kinematik viskozitesi yüksek olan yakıtların daha düşük kalitede yakıt hava karışımı sağlaması sonucu yanma veriminin düşmesidir. Böylece termal verim de düşmektedir. Ayrıca deneylerde kullanılan yakıtların alt ısı değerleri de yakıt harcamaları konusunda etkili bir parametredir. Ancak deneylerde kullanılan yakıtların alt ısı değerleri bilinmemektedir.

22. Kinematik viskozitesi yüksek olan yakıtların kullanımında CO₂ salımlarının düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi, silindir içerisinde yakıt hava karışımı oranının azalması sonucu karbon atomlarının yeterli oranda oksidasyona uğrayamaması

sebebiyle CO ve çeşitli HC oluşumlarına dönüşmesidir. Bu durumda yakıt harcamı artmasına rağmen CO₂ salım oranları azalmaktadır. Ayrıca kullanılan yakıtın kinematik viskozitesi yükseldikçe özellikle DMA95 yakıtında çok yüksek oranda HC salımı yapıldığı tahmin edilmektedir.

Deney sonuçları ve yorumlar yakıt püskürtme basıncı ve zamanlamasındaki değişimlerin motor performansı ve egzoz salımları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Deney sonuçları incelendiğinde test motoru olarak kullanılan dizel motorun yüksek güçler için en yüksek verime sahip ve en az egzoz salımlarının olduğu püskürtme zamanlaması ve püskürtme basıncının fabrika çıkış değerleri olan 200 bar püskürtme basıncı ve ÜÖN'nin 20° öncesi püskürtme zamanlaması olduğu görülmektedir. Ancak düşük yüklerde özellikle püskürtme zamanının erkene çekilmesinin egzoz gazı salımlarının azaltılması konusunda daha etkili olduğu görülmektedir.

Kullanılan yakıtların kinematik viskozitelerinin düşmesi ve setan sayılarının yükselmesi de yanma verimini arttırmakta ve egzoz salım miktarlarını azaltmaktadır. Ancak yine de kullanılan yakıt tipine uygun püskürtme basıncı ve zamanlamasının ayarlanması da ilgili yakıtın egzoz salımlarının azaltılmasını sağlamaktadır.

Dizel motorların sabit devirde ve düşük yüklerde kullanıldığı durumlarda püskürtme basıncı ve zamanlamasının düzenlenmesiyle egzoz salımlarının azaltılabileceği görülmüştür. Örneğin gemilerin liman yanaşma ve kalkışları sırasında düşük yüklerde kullanımı sırasında püskürtme değişkenlerinin kullanılan motora uygun şekilde ayarlanmasıyla gemilerin liman sahasında sebep oldukları hava kirliliğinin azaltılması sağlanabilir.

Çalışma kapsamında elde edilen deney sonuçları, literatür taraması bölümünde incelenen çalışmaların sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Püskürtme basıncı değişiminin egzoz salımı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmaların tamamında püskürtme basıncı artmasının tutuşma gecikmesi sürecini kısalttığı ve böylece NO_x salımlarını arttırırken CO ve HC salımlarını azalttığı görülmektedir. Püskürtme

zamanlamasının değiştirildiği çalışmalarda da püskürtme zamanlamasının erkene alınmasının ani basınç yükselmesi evresinde tutuşan yakıt miktarını arttırdığı böylece NO_x salımlarını arttırdığı; bu durumda artan yakıt hava karışım kalitesiyle de CO ve HC salımlarının azalttığı görülmektedir. Bu çalışmada farklı olarak düşük yüklerdeki egzoz salım oranlarındaki değişimler de detaylı bir şekilde incelenmiş ve düşük yüklerde uygun püskürtme stratejileri hakkında yorumlar yapılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan çeşitli yakıtların motor performansına ve egzoz salımlarına etkilerinin de incelendiği deneysel çalışmaların sonuçları literatür taraması bölümünde yer verilen ve yüksek kinematik viskoziteye sahip biyodizel vb. yakıtların kullanıldığı çalışmaların sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Bu çalışmanın bu konudaki farklılığı denizcilik endüstrisinde kullanılan yakıtlar üzerine yapılan bir deneysel çalışma olmasıdır.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda deney düzeneğinden kaynaklı çeşitli kısıtlar bulunmaktadır. Bu kısıtların ilki ölçüm yapılan tüm ekipmanların beşinci bölümde belirtildiği oranlarda ölçüm hatası oranlarına sahip olmasıdır. Bu sebeple elde edilen ölçümler hata payı içerebilmektedir. Bir diğer kısıt ise deneylerde kullanılan egzoz gazı analizörünün HC salımlarını ölçememesidir. Bu sebeple deneysel çalışmalar sonunda elde edilen veriler yorumlanırken HC salımlarının değişimi yakıt harcamı, CO salımları ve CO₂ salımları göz önünde bulundurularak tahmin edilmiştir. Bir diğer kısıt ise emme havası debisinin veya egzoz gazı debisinin ölçülebilmesidir. Bu sebeple egzoz gazı içeriğindeki hava kirletici maddelerin oranları hacimsel oranlar üzerinden incelenmiştir. Oysa daha iyi bir karşılaştırma yapılabilmesi için hava kirletici miktarları g/kw.h cinsinden hesaplanması gereklidir.

Gelecek alışmalarda HC salımlarının ölçülebilmesiyle daha iyi bir karşılaştırmalı analiz yapılabilir. Kullanılan yakıtların ısıtılması yoluyla kinematik viskozitelerinin eşitlenmesi sağlanarak farklı yakıtların daha etkin karşılaştırması yapılabilir. Ayrıca, emme havası veya egzoz gazının debisinin ölçülmesiyle hava kirleticilerin kütleel salım miktarları da hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

ABS (American Bureau of Shipping). (1984). *Notes on heavy fuel oil*. 03 Aralık 2016, http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rulesandguides/current/other/31_heavyfueloil/pub31_heavyfueloil.pdf.

ABS (American Bureau of Shipping). (2013). *Exhaust gas scrubber systems. Status and guidance*. 04 Mart 2017, http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/2013/Scrubber_Advisory.pdf.

Abd-Alla, G. H., Soliman, H. A., Badr, O. A. ve Abd-Rabbo, M. F. (2001). Effects of diluent admissions and intake air temperature in exhaust gas recirculation on the emissions of an indirect injection dual fuel engine. *Energy Conversion and Management*, 42 (8), 1033-1045.

Açma, E., Oktaybaş, C., Sönmez, Ş. (2002). Petrol endüstrisinde kullanılan hidroişlem katalizör atıklarından metalik değerlerin geri kazanılması. *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 2002 (3), 38-46.

Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 233-271.

Agarwal, A. K., Dhar, A., Gupta, J. G., Kim, W., Choi, K., Lee, C. S., Park, S. (2015). Effect of fuel injection pressure and injection timing of Karanja biodiesel blends on fuel spray, engine performance, emissions and combustion characteristics. *Energy Conversion Management*, 91, 302-314.

Agarwal, A. K., Srivastava, D. K., Dhar, A., Maurya, R. K., Shukla, P. C. ve Singh, A. P. (2013). Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions

and performance characteristics of a single cylinder diesel engine. *Fuel*, 111, 374-383.

Ahmed, S. T. ve Chaichan, M. T. (2012). Effect of fuel cetane number on multi-cylinders direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 8 (1), 65-75.

Alakel, H. (2008). *Bir dizel motorda biyodizel, dizel ve etanolün motor performansına etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay.

Albayrak, S., (2014). *Biyodizelin tek silindirli bir dizel motorun performans, emisyon ve titreşimlerine olan etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Ambrozik, A., Ambrozik, T., Kurczynski, D. ve Lagowski, P. (2014). The influence of injection advance angle on fuel spray parameters and nitrogen oxide emissions for a self-ignition engine fed with diesel oil and FAME. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23 (6), 1917-1923.

Antor Motor. (2014). *Lombardini 3-4 series diesel motor service manual*. 10 Nisan 2017, http://service.lombardinigroup.it/documents/Manuali%20Officina/English/Work%20Shop%20Manual%20GR%203_4%20matr%201-5302-556.pdf.

Arkas Bunker. (2017). *Bunker hakkında*. 20 Ocak 2017, <http://www.arkasbunker.com/bunker-hakkinda.html>.

ASE (Institute of Automotive Service Excellence). (2007). *Changes in diesel fuel*. 17 Ocak 2017, http://www.biodiesel.org/docs/ffs-performace_usage/service-technician's-guide-to-diesel-fuel.pdf.

ASTM (American Society for Testing and Materials). (2017). *Detailed overview*. 15 Ocak 2017, https://www.astm.org/ABOUT/full_overview.html.

ASTM D1250-08. (2013). *Standard guide for use of the petroleum measurement tables*. 01 Ocak 2017, <https://www.astm.org/Standards/D1250.htm>.

ASTM D1298-12b, (2012). *Standard test method for density, relative density, or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method*. 02 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D1298.htm>.

ASTM D1796-11. (2016). *Standard test method for water and sediment in fuel oils by the centrifuge method*. 27 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D1796.htm>.

ASTM D189-06. (2014). *Standard test method for Conradson carbon residue of petroleum products*. 26 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D189.htm>.

ASTM D2274-14. (2014). *Standard test method for oxidation stability of distillate fuel oil (Accelerated method)*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D2274.htm>.

ASTM D240-14, (2014). *Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter*. 30 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D240.htm>.

ASTM D2500-16b. (2016). *Standard test method for cloud point of petroleum products and liquid fuels*. 30 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D2500.htm>.

ASTM D2622-16. (2016). *Standard test method for sulfur in petroleum products by wavelength dispersive x-ray fluorescence spectrometry*. 27 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D2622.htm>.

ASTM D2709-16. (2016). *Standard test method for water and sediment in middle distillate fuels by centrifuge*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D2709.htm>.

ASTM D2890-92. (2013). *Standard test method for calculation of liquid heat capacity of petroleum distillate fuels*. 30 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D2890.htm>.

ASTM D341-09. (2009). *Standard practice for viscosity-temperature charts for liquid petroleum products*. 10 Nisan 2017, <https://www.astm.org/Standards/D341.htm>.

ASTM D3828-16a. (2016). *Standard test methods for flash point by small scale closed cup tester*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D3828.htm>.

ASTM D396-16. (2016). *Standard specification for fuel oils*. 27 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D396.htm>.

ASTM D4052-15. (2015). *Standard test method for density, relative density, and API gravity of liquids by digital density meter*. 02 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D4052.htm>.

ASTM D445-15a. (2015). *Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids*. 27 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D445.htm>.

ASTM D4529-01. (2011). *Standard test method for estimation of net heat of combustion of aviation fuels*. 30 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D4529.htm>.

ASTM D4530-15. (2015). *Standard test method for determination of carbon residue (Micro method)*. 27 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D4530.htm>.

ASTM D473-07. (2012). *Standard test method for sediment in crude oils and fuel oils by the extraction method*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D473.htm>.

ASTM D4737-10. (2016). *Standard test method for calculated cetane index by four variable equation*. 27 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D4737.htm>.

ASTM D4740-04. (2014). *Standard test method for cleanliness and compatibility of residual fuels by spot test*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D4740.htm>.

ASTM D4807-05. (2015). *Standard test method for sediment in crude oil by membrane filtration*. 26 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D4807.htm>.

ASTM D4809-13. (2013). *Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter (Precision method)*. 30 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D4809.htm>.

ASTM D482-13. (2013). *Standard test method for ash from petroleum products*. 04 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D482.htm>.

ASTM D5001-10. (2014). *Standard test method for measurement of lubricity of aviation turbine fuels by the ball-on-cylinder lubricity evaluator*. 19 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D5001.htm>.

ASTM D5002-16. (2016). *Standard test method for density and relative density of crude oils by digital density analyzer*. 02 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D5002.htm>.

ASTM D524-15. (2015). *Standard test method for Ramsbottom carbon residue of petroleum products*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D524.htm>.

ASTM D5453-16. (2016). *Standard test method for determination of total sulfur in light hydrocarbons, spark ignition engine fuel, diesel engine fuel, and engine oil by ultraviolet fluorescence*. 27 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D5453.htm>.

ASTM D56-16a. (2016). *Standard test method for flash point by tag closed cup tester*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D56.htm>.

ASTM D5771-15. (2015). *Standard test method for cloud point of petroleum products (Optical detection stepped cooling method)*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D5771.htm>.

ASTM D5772-15. (2015). *Standard test method for cloud point of petroleum products (Linear cooling rate method)*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D5772.htm>.

ASTM D5773-15. (2015). *Standard test method for cloud point of petroleum products (Constant cooling rate method)*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D5773.htm>.

ASTM D6079-11. (2016). *Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the high-frequency reciprocating rig*. 19 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D6079.htm>.

ASTM D613-16a. (2016). *Standard test method for cetane number of diesel fuel oil*. 27 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D613.htm>.

ASTM D6217-11. (2016). *Standard test method for particulate contamination in middle distillate fuels by laboratory filtration.* 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D6217.htm>.

ASTM D6447-09. (2014). *Standard test method for hydroperoxide number of aviation turbine fuels by voltammetric analysis.* 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D6447.htm>.

ASTM D6890-16. (2016). *Standard test method for determination of ignition delay and derived cetane number of diesel fuel oils by combustion in a constant volume chamber.* 27 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D6890.htm>.

ASTM D7170. (2016). *Standard test method for determination of derived cetane number of diesel fuel oils - fixed range injection period, constant volume combustion chamber method.* 27 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D7170.htm>.

ASTM D7668-14a. (2014). *Standard test method for determination of derived cetane number of diesel fuel oils - ignition delay and combustion delay using a constant volume combustion chamber method.* 27 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D7668.htm>.

ASTM D7688-11. (2016). *Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the high-frequency reciprocating rig by visual observation.* 19 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D7688.htm>.

ASTM D86-16a, (2016). *Standard test method for distillation of petroleum products and liquid fuels at atmospheric pressure.* 02 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D86.htm>.

ASTM D92-16a. (2016). *Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D92.htm>.

ASTM D93-16a. (2016). *Standard test methods for flash point by Pensky-Martens closed cup tester*. 31 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D93.htm>.

ASTM D97-16. (2016). *Standard test method for pour point of petroleum products*. 27 Aralık 2016, <https://www.astm.org/Standards/D97.htm>.

ASTM D975-16a. (2016). *Standard specification for diesel fuel oils*. 27 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D975.htm>.

ASTM D976-06. (2016). *Standard test method for calculated cetane index of distillate fuels*. 27 Kasım 2016, <https://www.astm.org/Standards/D976.htm>.

Attri, V. K., Sharma, V. K., Singh, S. K. ve Saraswat, M. (2015). Effect of compression ratio on performance and emissions of diesel on a single cylinder four stroke VCR engine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5 (1), 94-102.

Ayhan, V. (2016). Direkt enjeksiyonlu bir dizel motoruna buhar ve farklı yöntemlerle su gönderiminin performans ve NO_x emisyonlarına etkilerinin incelenmesi. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 20 (3), 463-471.

Banapurmath, N. R., Tewari, P. G. ve Hosmath, R. S., (2008). Performance and emission characteristics of a DI compression ignition engine operated on Honge, Jatropha and sesame oil methyl esters. *Renewable Energy*, 33, 1982-1988.

Bapu, B. R. R., Saravanakumar, L. ve Prasad, B. G. (2017). Effects of combustion chamber geometry on combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with calophyllum inophyllum methyl ester. *Journal of Energy Institute*, 90, 82-100.

Barsamian, A. (2009). *Methods to Determine Diesel Cetane Number*. 17 Kasım 2016. <http://my.umbc.edu/system/shared/attachments/b648e10cc6325219467472e020aa3861/59816b86/groupdocuments/000/001/958/c6e81542b125c36346d9167691b8bd09/Methods%20to%20Determine%20Diesel%20Cetane%20Number.pdf?1334854177>.

Bastiani, S., (2008). *Effects of biodiesel fuel blends on the performance and emissions of diesel engines*. Yüksek Lisans Tezi, Florida Atlantic University, Florida.

Batts, B. D. ve Fathoni A. Z. (1991). A literature review on fuel stability studies with particular emphasis on diesel oil. *Energy & Fuels*, 5, 2-21.

Bennett, S. (2010). *Modern diesel technology: Diesel engines*. Kanada: Delmar, Cengage Learning Products.

Binder, K. B. (2010). Diesel engine combustion. K. Mollenhauer ve H. Tschöke, (Ed.), *Handbook of diesel engines* içinde (61-75). Berlin: Springer-Verlag.

Bine Information Service. (2016). *Steel pistons for more efficient diesel engines*. 02 Ocak 2017, http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2016/Projekt_14_2016/ProjektInfo_1416_internetx_engl.pdf.

Boothroyd, D., (2001). Forgotten hero - The man who invented the two stroke engine. *The-vu Online Magazine, Nisan 2001*. 06 Kasım 2016, <http://www.the-vu.com/2001/04/the-man-who-invented-the-two-stroke-engine/>.

Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A. (1995). *İçten yanmalı motorlar*. Ankara: Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları.

Bose, P. K. ve Maji, D. (2009). An experimental investigation on engine performance and emissions of a single cylinder diesel engine using hydrogen as inducted fuel

and diesel as injected fuel with exhaust gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 4847-4854.

Braun, S., Appel, L. G. ve Schmal, M. (2004). The pollution from diesel engine - The particulate matter current experiences and future needs. *Quimica Nova*, 27 (3), 472-482.

Breneol, A. (b.t.). *Marine fuel stability and compatibility - Issues, tests and management*. 02 Ocak 2017, <https://lubes.exxonmobil.com/MarineLubes-En/Files/marine-fuel-stability-and-compatibility.pdf>.

BSI Group. (2017). *European standards and the UK*. 19 Ocak 2017, <https://www.bsigroup.com/LocalFiles/en-GB/EUREF.pdf>.

Cataluna, R. ve Silva, R. (2012). Effect of cetane number on specific fuel consumption and particulate matter and unburned hydrocarbon emissions from diesel engines. *Journal of Combustion*, 2012, 28 Şubat 2017, <https://www.hindawi.com/journals/jc/2012/738940/>.

CEN (Avrupa Standardizasyon Komitesi). (2017). *Who we are?* 18 Ocak 2017, <https://www.cen.eu/about/Pages/default.aspx>.

Challen, B. ve Baranescu, R., (1999). *Diesel engine reference book*. (2. Baskı). Delhi: Replika Press.

Chatterjee, D. ve Rusch, K. (2014). SCR technology for off-highway (large diesel engine) applications. I. Nova ve E. Tronconi (Ed.), *Urea-SCR technology for deNO_x after treatment of diesel exhausts* içinde (33-59). New York: Springer.

- Chen, H., Guo, Q., Zhao, X., Xu, M. I. ve Ma, Y. (2016). Influence of fuel temperature on combustion and emission of biodiesel. *Journal of the Energy Institute*, 89, 231-239.
- Chen, P., Wang, W., 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.
- Chevron. (2007). *Diesel Fuels Technical Review*. 02 Aralık 2016, <https://www.chevron.com/media/chevron/operations/documents/diesel-fuel-tech-review.pdf>.
- Christensen, M. ve Johansson, B. (1999). Homogeneous charge compression ignition with water injection. *Processes of Diesel Engine Combustion*, 44.
- CIMAC (The International Council on Combustion Engines). (2013). *Guideline for the operation of marine engines on low sulphur diesel*. 20 Ocak 2017, http://www.cimac.com/cms/upload/workinggroups/WG7/CIMAC_SG1_Guideline_Low_Sulphur_Diesel.pdf.
- Cooper, J. (2015). *Fuels Europe statistical report 2015*. 19 Ocak 2017, <https://www.fuelseurope.eu/uploads/Modules/Resources/fuelseurope-statistical-report-2015.pdf>.
- Cordtz, R., Schramm, J. ve Rabe, R. (2013). Investigating SO₃ formation from the combustion of heavy fuel oil in a four-stroke medium-speed test engine. *Energy & Fuels*, 27, 6279-6286.
- Coutinho, J. A. P., Mirante, F., Ribeiro, J. C., Sansot, J. M. ve Daridon, J. L. (2002). Cloud and pour points in fuel blends. *Fuel*, 81, 963-967.

Cui, Y., Peng, H., Deng, K. ve Shi, L. (2014). The effects of unburned hydrocarbon recirculation on ignition and combustion during diesel engine cold starts. *Energy*, 64, 323-329.

Çengel, Y. ve Boles, M. A., (2008). *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik* (5. Baskı). (A.Pınarbaşı, Çev.). İzmir: Güven Yayınevi.(Orjinal çalışma basım tarihi 2004).

Çelikten, İ. (2003). An experimental investigation of the effect of the injection pressure on engine performance and exhaust emission in indirect injection diesel engines. *Applied Thermal Engineering*, 23, 2051-2060.

Datta, A. ve Mandal, B. K. (2016). Effect of compression ratio on the performance, combustion and emission from a diesel engine using palm biodiesel. *AIP Conference Proceedings*, 1754, 17 Şubat 2017, <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4958396>.

Debnath, B. K., Saha, U. K. ve Sahoo, N. (2015). A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 196-211.

Demirbaş, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, 50, 14-34.

Demiröz, G. (2010). *Seçici katalitik indirgeme sisteminin ağır taşıt motorlarında kullanımının optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Deniz, O. (2008). *İçten yanmalı motorlar ders notları*. 14 Ekim 2016, <http://www.yildiz.edu.tr/~odeniz/Ders%20Kitabi.pdf>

- Dieselnet. (2017). *Emission standards*. 16 Ocak 2017, <https://www.dieselnet.com/standards/>.
- Diez, A. ve Zhao, H. (2010). Effect of dwell angle of split injection in a single-cylinder optical diesel engine. *Journal of Automobile Engineering*, 224, 815-828.
- Dunn, R. O. (2008). Effect of temperature on the oil stability index. *Energy & Fuels*, 22, 657-662.
- Dünya Enerji Konseyi. (2016). *World energy scenarios 2016*. 21 Mart 2017, https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Scenarios-2016_Full-report.pdf.
- EIA (US Energy Information Administration). (2016). *Glossary*. 17 Ocak 2017, https://www.eia.gov/tools/glossary/index.cfm?id=N#no2_dist.
- El- Mahallawy, F. ve El-Din Habik, S. (2012). *Fundamentals and technology of combustion*. Oxford: Elsevier Science.
- Eliçin, A. K. (2011). *Biyodizel yakıtla çalıştırılan küçük güçlü bir dizel motorun performans ve emisyonuna giriş hava basıncı etkisinin deneysel olarak araştırılması*. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- EN 15195. (2014). *Liquid petroleum products. Determination of ignition delay and derived cetane number of middle distillate fuels by combustion in a constant volume chamber*. 26 Kasım 2016, <https://www.en-standard.eu/din-en-15195-liquid-petroleum-products-determination-of-ignition-delay-and-derived-cetane-number-dcn-of-middle-distillate-fuels-by-combustion-in-a-constant-volume-chamber/>.
- EN 15751. (2014). *Fatty acid methyl ester (FAME) fuel and blends with diesel fuel - Determination of oxidation stability by accelerated oxidation method*. 31 Aralık

2016, <https://www.en-standard.eu/csn-en-15751-automotive-fuels-fatty-acid-methyl-ester-fame-fuel-and-blends-with-diesel-fuel-determination-of-oxidation-stability-by-accelerated-oxidation-method/>.

EN 16144. (2012). *Liquid petroleum products - Determination of ignition delay and derived cetane number (DCN) of middle distillate fuels - Fixed range injection period, constant volume combustion chamber method*. 27 Kasım 2016, <https://www.en-standard.eu/din-en-16144-liquid-petroleum-products-determination-of-ignition-delay-and-derived-cetane-number-dcn-of-middle-distillate-fuels-fixed-range-injection-period-constant-volume-combustion-chamber-method/>.

EN 16715. (2010). *Liquid petroleum products. Determination of ignition delay and derived cetane number (DCN) of middle distillate fuels. Ignition delay and combustion delay determination using a constant volume combustion chamber with direct fuel injection*. 27 Kasım 2016, <https://www.en-standard.eu/din-en-16715-liquid-petroleum-products-determination-of-ignition-delay-and-derived-cetane-number-dcn-of-middle-distillate-fuels-ignition-delay-and-combustion-delay-determination-using-a-constant-volume-combustion-chamber-with-direct-fuel-injection/>.

EN 590. (2009). *Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods*. 27 Kasım 2016, <https://www.en-standard.eu/din-en-590-automotive-fuels-diesel-requirements-and-test-methods/>.

EN ISO 3104. (1994). *Petroleum products - Transparent and opaque liquids - Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity*. 01 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=8252

EN ISO 4264. (2007). *Petroleum products - Calculation of cetane index of middle-distillate fuels by the four-variable equation*. 27 Kasım 2016, <https://www.en-standard.eu/din-en-iso-4264-petroleum-products-calculation-of-cetane-index-of-middle-distillate-fuels-by-the-four-variable-equation-iso-4264-2007-amd-1-2013-includes-amendment-2013/>.

EN ISO 5165. (1998). *Petroleum products - Determination of the ignition quality of diesel fuels - Cetane engine method*. 27 Kasım 2016, <https://www.en-standard.eu/iso-5165-petroleum-products-determination-of-the-ignition-quality-of-diesel-fuels-cetane-engine-method/>.

EN 12662. (2014). *Determination of contamination in middle distillates*. 30 Aralık 2016, <https://www.en-standard.eu/search/?q=EN12662>.

Esit. (2017). *STSC Technical Specifications*. 11 Nisan 2017, http://www.esit.com.tr/en/urun/load_cells/175/stsc.

European Union Law Publications. (2004). Legislation no: 146. *The Official Journal of the European Union*, 47, 1-107.

Exxonmobil. (2017). *Exxonmobil marine distillate fuel*. 20 Ocak 2017, <https://www.exxonmobil.com/English-US/Commercial-Fuel/pds/GLXXExxonMobil-Marine-Distillate-Fuel>.

Farazmand, S., Ehsani, M. R., Shadman, M. M., Ahmadi, S., Veisi, S. ve Abdi, E. (2016). The effects of additives on the reduction of the pour point of diesel fuel and fuel oil. *Petroleum Science and Technology*, 34 (17), 1542-1549.

Flagan, R. C. ve Seinfeld, J. H. (1988). *Fundamentals of air pollution engineering*. New Jersey: Prentice Hall Inc.

- Getman, F.H. (1936). Samuel Morey a pioneer of science in America. *Osiris*, 1. 278-302.
- George, S., Balla, S. ve Gautam, M. (2007). Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear. *Wear*, 262, 1113-1122.
- Gnansekaran, S., Saravanan, N. ve Ilangkumaran, M. (2016). Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on fish oil biodiesel. *Energy*, 116, 1218-1229.
- Goldwine, G., (2008). *The effect of fuel injection profile on diesel engine performance*. Doktora Tezi, Ben-Gurion University of the Negev, İsrail.
- Greenbaum, D. S. (2013). Sources of air pollution: Gasoline and diesel engines. K. Straif, A. Cohen ve J. Samet (Ed.), *Air Pollution and Cancer* içinde (49-62). Lyon: IARC Scientific Publications.
- Grenning, W., (1991). History of the Otto-Langen engine. *Gas Engine Magazine*, Şubat 1991. 06 Kasım 2016, <http://services.eng.uts.edu.au/~johnd/icengines/history%20of%20the%20otto.pdf>.
- Guangxin, G., Zhulin, Z., Apeng, Z., Shenghua, L. ve Yanju, W. (2013). Effects of fuel temperature on injection process and combustion of dimethyl ether engine. *Journal of Energy Resources Technology*, 135.
- Guo, M., Song, W. ve Buhain, J., (2015). Bioenergy and biofuels: History, status and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725.
- Gümüş, M. (2005). *Dizel motorlarında tutuşma gecikmesinin silindir basınç seviyesine etkisi*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Gümüş, M., Sayın, C. ve Çanakçı, M. (2012). The impact of fuel injection pressure on the exhaust emissions of a direct injection diesel engine fueled with biodiesel–diesel fuel blends. *Fuel*, 95, 486-494.

Habibullah, M., Fattah, M. R., Masjuki, H. H. ve Kalam, M. A. (2015). Effects of palm-coconut biodiesel blends on the performance and emission of a single-cylinder diesel engine. *Energy and Fuels*, 29, 734-743.

Han, S., Wang, P., Wang, Y., Song, Y. ve Ren, T. (2010). Impact of alkyl methacrylate–maleic anhydride–alkyl methacrylate terpolymers as cold flow improver on crystallization behavior of diesel fuel. *Process Safety and Environmental Protection*, 88, 41-46.

Hazar, H. ve Öner, C. (2004). Dizel ve benzin motorlarında vuruntu ve etkileri. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 3 (1), 169-172.

Hazrat, M. A., Rasul, M. G. ve Khan, M. M. K. (2015). Lubricity improvement of the ultra-low sulfur diesel fuel with the biodiesel. *Energy Procedia*, 75, 111-117.

Heinze, P., Gadd, P., Guttman, H., Hall, D. E., Mercogliano, R. Mann, N. ve diğer. (1996). *Diesel fuel/engine interaction and effects on exhaust emissions. Concawe Technical Report 96/60*. <https://www.concawe.eu/publications/220/40/Report-no-96-60>.

Herfatmanesh, M. R. ve Zhao H. (2014). Experimental investigation of hydraulic effects of two-stage fuel injection on fuel-injection systems and diesel combustion in a high-speed optical common-rail diesel engine. *International Journal of Engine Research*, 15 (1), 48-65.

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

Holbecker, R. ve Geist, M. (1998). *Exhaust emissions reduction technology for Sulzer marine diesel engines: General aspects*. İsviçre: Wartsila NSD.

Hombravella, A., Kılıçaslan, A., Perales, J. Ve Rüss, C. (2011). Study of exhaust gas cleaning systems for vessels to fulfill IMO III in 2016, 11 Mart 2017, <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13745/Mem%20ria.pdf?sequence=1>.

Hoshmat, R. S., Banapurmath, N. R., Khandal, S. V., Gaitonde, V. N., Basavarajappa, Y. H. ve Yaliwal, V. S. (2016). Effect of compression ratio, CNG flow rate and injection timing on the performance of dual fuel engine operated on honge oil methyl ester (HOME) and compressed natural gas (CNG). *Renewable Energy*, 93, 579-590.

Hussein, J., Palaniradja, N., Alagumurthi, N. ve Manimaran, R. (2012). Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance and emission characteristics of a three cylinder direct injection compression ignition engine. *Alexandria Engineering Journal*, 51, 241-247.

IBIA (International Bunker Industry Association). (b.t.). *Vanadium and sulphur in marine diesel oils*. 27 Aralık 2016, <http://ibia.net/wp-content/uploads/2014/06/Vanadium-Sulphur-in-Marine-Fuels.pdf>

IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü). (2017). *International convention for the prevention of pollution from ships*. 20 Ocak 2017, [http://www.imo.org/en/about/conventions/listof_conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-\(marpol\).aspx](http://www.imo.org/en/about/conventions/listof_conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx).

India BEE (India Bureau of Energy Efficiency). (b.t.). *Fuels and combustion*. 04 Aralık 2016, <http://www.em-ea.org/guide%20books/book-2/2.1%20fuels%20and%20combustion.pdf>.

IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli). (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories - Volume 2: Energy*. 04 Aralık 2016, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>.

IRENA (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı). (2017). *Rethinking energy 2017: Accelerating the global energy transformation*. International Energy Agency: Abu Dhabi.

Ishida, M., Ueki, H. ve Sakauguo, D. (1997). Prediction of NO_x reduction rate due to port water injection in a DI diesel engine. *Journal of Fuels and Lubricants*, 106 (4).

ISO 10370. (2014). *Crude petroleum and fuel oils - Petroleum products - Determination of carbon residue - Micro method*. 30 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=57081.

ISO 12156. (2016). *Diesel fuel - Assessment of lubricity using the high-frequency reciprocating rig*. 19 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail-ics.htm?csnumber=65227.

ISO 12185. (1996). *Crude petroleum and petroleum products -- Determination of density - Oscillating U-tube method*. 02 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=21124.

ISO 12205. (1995). *Petroleum products - Determination of the oxidation stability of middle-distillate fuels*. 31 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=21187.

ISO 12937. (2000). *Petroleum products - Determination of water - Coulometric Karl Fischer titration method.* 01 Ocak 2017,
http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=2730.

ISO 13736. (2013). *Determination of flash point - Abel closed-cup method.* 31 Aralık 2016,
http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=54734.

ISO 1928. (2009). *Solid mineral fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value.* 30 Kasım 2016,
http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=41592.

ISO 20846. (2011). *Petroleum products - Determination of sulfur content of automotive fuels - Ultraviolet fluorescence method.* 27 Aralık 2016,
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=51774.

ISO 20884. (2011). *Petroleum products - Determination of sulfur content of automotive fuels - Wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry.* 27 Aralık 2016,
http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=51814.

ISO 2592. (2000). *Determination of flash point - Cleveland open cup method.* 31 Aralık 2016,
http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=22057.

ISO 2719. (2016). *Determination of flash point - Pensky & Martens closed cup method.* 31 Aralık 2016,

[http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?
csnumber=62263.](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=62263)

ISO 3015. (1992). *Petroleum products - Determination of cloud point*. 30 Aralık 2016,
[http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumbe
r=8095.](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=8095)

ISO 3016. (1994). *Petroleum products - Determination of pour point*. 27 Aralık 2016,
[http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumbe
r=20721.](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=20721)

ISO 3405. (2011). *Petroleum products - Determination of distillation characteristics
at atmospheric pressure*. 02 Aralık 2016,
[http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/
catalogue_detail.htm?csnumber=44095.](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=44095)

ISO 3675. (1998). *Crude petroleum and liquid petroleum products - Laboratory
determination of density - Hydrometer method*. 02 Aralık 2016,
[http://www.iso.org/iso/home/store/
catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=26326.](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=26326)

ISO 3679. (2015). *Determination of flash no-flash and flash point - Rapid equilibrium
closed cup method*. 31 Aralık 2016,
[http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/
catalogue_detail.htm?csnumber=61924.](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=61924)

ISO 3735. (1999). *Crude petroleum and fuel oils - Determination of sediment -
Extraction method*. 30 Aralık 2016
[http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=25980.](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=25980)

ISO 4262. (1993). *Petroleum products - Determination of carbon residue - Ramsbottom method*. 30 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=20777.

ISO 6245. (2001). *Petroleum products - Determination of ash*. 04 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=31156.

ISO 6615. (1993). *Petroleum products - Determination of carbon residue - Conradson method*. 30 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=20865.

ISO 8217. (2010). *Petroleum products - Fuels (class F) - Specifications of marine fuels*. 01 Aralık 2016, http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=59479.

İçingür, Y. ve Altıparmak, D. (2003). Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions. *Energy Conversion and Management*, 44, 389-397.

İlhan, M. (2007). *Çift yakıtlı (dizel ve metanol) bir dizel motorda püskürtme avansının performans ve emisyonlara etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

İlkfer (2009). *Düşük sülfürlü ve ultra düşük sülfürlü yakıtlar, yağlama ve yağlamayı iyileştirici katkıları üzerine bazı düşünceler*. 19 Aralık 2016, <http://ilkfer.com.tr/wp-content/uploads/2016/07/163.pdf>.

Janardhan, N., Krishna, M. V. S. M., Reddy, K. ve Prasad, N. G. (2014). Effect of injection timing on exhaust emissions and combustion characteristics of direct injection diesel engine with high grade insulated combustion chamber. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 3 (12), 213-221.

Johnson, T. V. (2014). Review of selective catalytic reduction (SCR) and related technologies for mobile applications. I. Nova ve E. Tronconi (Ed.), *Urea-SCR technology for deNO_x after treatment of diesel exhausts* içinde (3-27). New York: Springer.

Kaliveer, V., D'Silva, R. S., Kumar, P. ve Raju, K. (2015). Effect of compression ratio on the performance and emission characteristics of CI engine for a blend of soapnut oil, cottonseed oil methyl ester and diesel. *Energy and Power*, 5, 15-18.

Kass, M. D., Thomas, J. F., Wilson, D., Lewis, S. A. ve Sarles, A. (2005). Assessment of corrosivity associated with exhaust gas recirculation in a heavy-duty diesel engine. *2005 SAE World Congress Publications*.

Kaya, M. (2010). *Biyodizel-dizel karışımı kullanılan bir dizel motorda püskürtme basıncının performans ve emisyonlara etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Keskin, A. (2009). Dizel motorlarında partikül madde emisyon kontrolü ve gelişmeler. *5th International Advanced Technologies Symposium Proceedings*. 11 Mart 2017, http://iats09.karabuk.edu.tr/press/default_en.asp.

Khan, M. A. H., Qidwai, M. O. ve Chausalkar, A. (2014). Effect of variable ignition and injection timing on emission characteristics of SI engine using CNG and HCNG as fuel. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 4 (1), 83-94.

- Khidr, T. T., Doheim M. M. ve El-Shamy A. A. (2015). Pour point depressant of fuel oil using non-ionic surfactants. *Petroleum Science and Technology*, 33, 1619-1626.
- Kılıç, İ. (2015). *Kara ve deniz taşımacılığında egzoz gazı emisyon değerlerinin karşılaştırılması: Türkiye için durum değerlendirmesi*. Denizcilik Uzmanlık Tezi, Samsun Liman Başkanlığı, Samsun.
- Kim, M. Y., Kim, J. K., Lee, C. S. ve Lee, J. H. (2006). Effect of compression ratio and spray injection angle on HCCI combustion in a small DI diesel engine. *Energy & Fuels*, 20, 69-76.
- Kim, M. Y., Yoon, S. H. ve Park, K. H. (2007). Effect of multiple injection strategies on the emission characteristics of dimethyl ether (DME)-fueled compression ignition engine. *Energy & Fuels*, 21, 2673-2681.
- Kolb, T. (1990). *Experimentelle und theoretische untersuchungen zur minderung der nox- emission technischer feuerungen durch gestufte verbrennungsführung*. Doktora Tezi, Universitat Karlsruhe, Almanya.
- Kökkülünk, G., Gonca, G., Ayhan, V., Cesur, İ. ve Parlak, A. (2013). Theoretical and experimental investigation of diesel engine with steam injection system on performance and emission parameters. *Applied Thermal Engineering*, 54, 161-170.
- Krohne. (2013). *Optimass 3000 technical datasheet*. 12 Nisan 2017, http://cdn.krohne.com/dlc/TD_OPTIMASS3000_en_131105_4000651202_R08.pdf.
- Kulakoğlu, T. (2009). *Dizel-metanol karışımı kullanılan bir dizel motorda püskürtme basıncının performans ve emisyonlara etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

- Kurre, S. K., Pandey, S. ve Saxena, M. (2013). Effect of compression ratio on diesel engine performance and emission with diesel ethanol blends. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4 (10), 775-779.
- Kusaka, J., Okamoto, T., Daisho, Y., Kihara, R. ve Saito, T. (2000). Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual-fueled with natural gas. *JSAE Review*, 21 (4), 489-496.
- Kutlar, A. O., Ergeneman, M. Arslan, M. ve Mutlu, M. (1992). *Taşıtların egzozundan kaynaklanan kirleticiler*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Küçükşahin, F. (2008). *Dizel motorları teorisi*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Lajqi, N. B., Baxhaku, B. I. ve Lajqi, S. B. (2009). *Effect of intercooler on turbocharged diesel engine performance*. 20 Şubat 2017 <http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2009/110-TMT09-166.pdf>.
- Lakshminarayanan, P. A. ve Aghav, Y. V. (2010). *Modelling diesel combustion*. New York: Springer.
- Lee, R. J., Pedley, J., Hobbs, C. (1998). Fuel Quality Impact on Heavy Duty Diesel Emissions: A Literature Review. *International SAE Journal of Fuel and Lubricants*, 107 (4).
- Leedham, A., Caprotti, R., Graupner, O. ve Klaua, T. (2004). Impact of fuel additives on diesel injector deposits. *2004 Powertrain & Fluid System Conference & Exhibition Publications*.
- Lejda, K. ve Wos, P. (2012). *Fuel injection in automobile engineering*. Rijeka: Intech.

Li, D., Zhen, H., Xingcai, L., Wu-gao, Z. ve Jian-guang, Y. (2005). Physico-chemical properties of ethanol–diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. *Renewable Energy*, 30, 967-976.

Lloyd's Register. (2012). *Understanding exhaust gas treatment systems. Guidance for shipowners and operators*. 10 Mart 2017, http://www.alfalaval.com/globalassets/documents/microsite/puresox/understanding_exhaust_gas_treatment_systems.pdf.

Mamat, R., Abdullah, N. R., Xu, H., Wyszynski, M. L. ve Tsolakis, A. (2010). Effect of boost temperature on the performance and emissions of a common rail diesel engine operating with rapeseed methyl ester. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2010 (2), 1581-1585.

Matsson, A. ve Andersson, S. (2002). The effect of non-circular nozzle holes on combustion and emission formation in a heavy duty diesel engine. *Journal of Fuels and Lubricants*, 111 (4).

McConnell, C. S. (2016). Nicephore Niepce. *Salem Press Biographical Encyclopedia*.
14 Ekim 2016, Research Starters Online Veritabanı.
<http://eds.b.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=1&sid=cc366dbe-5173-4a7f-b530-b8b98155814f%40sessionmgr106&hid=119&bdata=Jmxhbm9dHImc2l0ZT1lZHMtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=88807359&db=ers>

McNeil, I. (1990). *An encyclopedia of the history of technology*. New York: Routledge

Meier, E. D. (1898). Diesel's rational heat motor. *Journal of Franklin Institute*, 146 (4), 241-264.

Mello, J. P. ve Mellor, A. M. (1999). NO_x emissions from direct injection diesel engines with water/steam dilution. *Journal of Fuels and Lubricants*, 108 (4).

- Melton, D. L. (2017). *Understanding military specifications and standards requirements*. 15 Ocak 2017, <http://businessdevelopmentzone.com/documents/Understanding%20Military%20Specification%20&%20Standard%20Requirements.pdf>.
- Mendonca, S. ve Vas, J. P. (2013). Influence of injection timing on performance and emission characteristics of simarouba biodiesel engine. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3 (4), 1-6.
- Michelet, H. (1965). *L'Inventur Isaac De Rivaz*. Paris: Imprimerie Pillet Martigny.
- Montemayor, R., Collier, M. ve Lazarczyk, G. (2002). Precision and equivalence of automatic and manual flash point apparatus. *Journal of Testing and Evaluation*, 30 (1), 74-85.
- Monyem, A., (1998). *The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions*. Doktora Tezi, Iowa State University, Iowa.
- Moon, F. C. (2014). *Social networks in the history of innovation and invention*. New York and London: Springer.
- Musculus, M. P. B. ve Dietz J. (2005). *Effects of diesel fuel combustion modifier additives on in-cylinder soot formation in a heavy-duty DI diesel engine*. 22 Ocak 2017, <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2005/050189.pdf>.
- NO_x Teknik Kodu. (2008). Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines. 17 Nisan 2017, [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.177\(58\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.177(58).pdf).

- Nguyen, K. B., Dan, T., Asano, I. (2014). Combustion, performance and emission characteristics of direct injection diesel engine fueled by Jatropha hydrogen peroxide emulsion. *Energy*, 74, 301-308.
- Norman, A. ve Corinchock, J. D. (2007). *Diesel technology fundamentals service repair* (3. Baskı). Illinois: The Goodheart-Willcox Company.
- Ntziachristos, L., Samaras, Z., Zervas, E. ve Dorlhene, P. (2005). Effects of a catalysed and an additized particle filter on the emissions of a diesel passenger car operating on low sulphur fuels. *Atmospheric Environment*, 39, 4925-4936.
- Nuran, M. (2015). *Gemi makineleri işletme mühendisliği ekonomisi: Alternatif enerji kaynakları için karşılaştırılmalı maliyet analizi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları.
- Omidvarborna, H., Kumar, A. ve Kim, D. S. (2014). Characterization of particulate matter emitted from transit buses fueled with B20 in idle modes. *Journal of Environmental Chemical Cleaning*, 2, 2355-2342.
- Öcal, M., (2007). Setan sayısı hakkında 6 soru. *Mühendis ve Makina*, 48, 24-25.
- Özer, S. (2010). *Bütanol kullanımının dizel motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Özer, S. (2015). *Pirina yağından fuzel yağı ile biyodizel üretimi ve dizel motor performans ve emisyonlarına etkisi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- Park, S. H., Yoon, S. H., Suh, H. K. ve Lee, C. S. (2008). Effect of the temperature variation on properties of biodiesel and biodiesel-ethanol blends fuels. *Oil & Gas Science and Technology*, 63, 737-745.
- Parlak, A., Ayhan, V., Cesur, İ. ve Kökkülünk, G. (2013). Investigation of the effects of steam injection on performance and emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester. *Fuel Processing Technology*, 116, 101-109.
- Payri, F., Desantes, J. M. ve Benajes, J. (2015). Compression ignition engines: State of the art and current technologies, future trends and development. J. Yan, (Ed.), *Handbook of clean energy systems - Volume 2* (5. Baskı) içinde (975-1010). Chennai: John Wiley & Sons Ltd.
- Pireli, E. (2006). *Biyodizel ve dizel yakıtı ile çalışan tek silindirli bir dizel motorda püskürtme basıncının performansı*. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
- Posada, F., Chambliss, S. ve Blumberg, K. (2016). *Cost of emission reduction technologies for heavy duty diesel vehicles*. 11 Şubat 2017, http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_costs-emission-reduction-tech-HDV_20160229.pdf.
- Prasad, B. V. V. S. U., Sharma, C. S., Anand, T. N. C. ve Ravikrishna, R. V. (2011). High swirl-inducing piston bowls in small diesel engines for emission reduction. *Applied Energy*, 88, 2355-2367.
- Preble, C. V., Dallmann, T. R., Kreisberg, N. M. Heiring, S. V., Harley, R. A. ve Kirchstetter, T. W. (2015). Effects of particle filters and selective catalytic reduction on heavy duty diesel drayage truck emissions at the Port of Oakland. *Environmental Science & Technology*, 49, 8864,8871.

- Pucher, H. (2010). Gas exchange and supercharging. K. Mollenhauer ve H. Tschoeke (ed.), *Handbook of diesel engines* içinde (31-60). Berlin: Springer Verlag.
- Puhan, S., Jegan, R., Balasubbramanian, K. ve Nagarajan G. (2009). Effect of injection pressure on performance, emission and combustion characteristics of high linolenic linseed oil methyl ester in a DI diesel engine. *Renewable Energy*, 34, 1227-1233.
- Rahman, M. M., Kamil, M. ve Bakar, R. A. (2011). Engine performance and optimum injection timing for 4-cylinder direct injection hydrogen fueled engine. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 734-751.
- Raheman, H. ve Ghadge, S. V. (2007). Performance of compression ignition engine with mahua (*Madhuca indica*) biodiesel. *Fuel*, 86, 2568-2573.
- Ramalingam, S., Rajendran, S. ve Nattan, R. (2015). Influence of injection timing and compression ratio on performance, emission and combustion characteristics of Annona methyl ester operated diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 54, 295-302.
- Rand, S. J. (Ed.). (2003). *Significance of tests for petroleum products*, (7. Baskı). ABD: ASTM International.
- Reddy, C. V. S., Reddy, C. E. ve Reddy, K. H. (2012). Effect of fuel injection pressures on the performance and emission characteristics of DI diesel engine with biodiesek blends cotton seed oil methyl ester. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 13 (1), 139-149.
- Reşitoğlu, İ. A., (2010). *Atık yağlardan üretilmiş biyodizelin dizel motor performans ve emisyonuna etkisinin deneysel olarak araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin.

- Rostami, S., Ghobadian, B. ve Kiani, M. K. D. (2014). Effect of the injection timing on the performance of a diesel engine using diesel-biodiesel blends. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 10, 1945-1958.
- Rounce, P. L. (2011). *Engine performance and particulate matter speciation for compression ignition engines powered by a range of fossil and biofuels*. Doktora Tezi, University of Birmingham, School of Engineering, UK.
- Russell, A. ve Epling, W. S. (2011). Diesel oxidation catalysts. *Catalysis Reviews*, 53 (4), 337-423.
- Saanum, I. (2008). *Experimental study of hydrogen as a fuel additive in internal combustion engines*. 04 Aralık 2016, <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/233353>.
- Sandu, V. (2014). Improving diesel engine performance by air to air intercooling. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, 7 (56), 19-24.
- Sanjay, M., Simanta, B. ve Kulwant, S. (1995). Paraffin problems in crude oil production and transportation, a review. *SPE Production & Facilities*, 10 (1), 50-54.
- Saravanan, S., Nagarajan, G., Anand, S. ve Sampath, S. (2012). Correlation for thermal NO_x formation in compression ignition (CI) engine fuelled with diesel and biodiesel. *Energy*, 42, 401-410.
- Sayın, C., İlhan, M., Çanakçı, M. ve Gümüş, M. (2009). Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel-methanol blends. *Renewable Energy*, 34, 1261-1269.

- Schmelzer, J. P., Zanutto, E. D. ve Fokin, V. M., (2005). Pressure dependence of viscosity. *The Journal of Chemical Physics*, 122.
- Schmid, M., Leipertz, A. ve Fettes, C. (2002). Influence of nozzle hole geometry rail pressure and pre-injection vaporisation and combustion in a single-cylinder transparent passenger car common rail engine. *Journal of Fuels and Lubricants*, 111 (4).
- Sekmen, Y., Çınar, C., Erduranlı, P. ve Boran, E. (2004). Dizel motorlarında enjeksiyon basıncı ve maksimum yakıt miktarının motor performansı ve duman emisyonlarına etkilerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 7, 321-326.
- Selvan, V. A. M., Anand, R.B. ve Udayakumar, M. (2009). Combustion characteristics of diesohol using biodiesel as an additive in a direct injection compression ignition engine under various compression ratios. *Energy & Fuels*, 23, 5413-5422.
- Sherrat, M. (2005). *Flash point testing - The definitive test method*. 01 Ocak 2017, http://www.stanhope-seta.co.uk/ssl_downloads/brochures/flashpoint-definitive_test_method.pdf.
- Shrinivasa, T., (2012). Rudolf Diesel - The rational inventor of a heat engine. *Resonance*, 17, (4), 319-320.
- Sitkei, G. (1964). *Kraftstoffaufbereitung und verbrennung bei dieselmotoren*. Berlin: Springer-Verlag.
- Smil, V., (2010). *Two prime movers of globalization the history and impact of diesel engines and gas turbines*. London: The MIT Press.
- Speight, J. G. (2002). *Handbook of petroleum product analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Speight, J. G. (2015). *Handbook of petroleum product analysis* (2. Baskı). Wyoming: John Wiley & Sons, Inc.

Shell. (2008). *Shell energy scenarios to 2050*. 17 Mayıs 2017, [http://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/new-lenses-on-the-future/earlier-scenarios/_jcr_content/par/tabbedcontent/tab_1449164856/textimage.stream/1447230546089/a919b8b6bc79106bb50a4c4a92a4572785ebc5500b0a8110b9e5a40a1e64f36a/shell energy-scenarios2050.pdf](http://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/new-lenses-on-the-future/earlier-scenarios/_jcr_content/par/tabbedcontent/tab_1449164856/textimage.stream/1447230546089/a919b8b6bc79106bb50a4c4a92a4572785ebc5500b0a8110b9e5a40a1e64f36a/shell-energy-scenarios2050.pdf).

Singh, D., Subramanian, K. A., Juneja, M., Singh, K., Singh, S., Badola, R. ve Singh, N. (2016). Investigating the effect of fuel cetane number, oxygen content, fuel density, and engine operating variables on NO_x emissions of a heavy duty diesel engine. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36 (1), 214-221.

Sirvio, K., Niemi, S., Heikkilä, S. ve Hiltunen, E. (2016). The effect of sulphur content on B20 fuel stability. *Agronomy Research*, 14 (1), 244-250.

Stipanovic, A. J. (2003). Hydrocarbon base oil chemistry. G. E. Totten, (Ed.), *Fuels and lubricants handbook: Technology, properties, performance and testing* içinde (169-185). ABD: ASTM International.

Stone, R. (1992). *Introduction to internal combustion engines* (2. Baskı). London: The Macmillan Press.

Sutton, J. A. ve Fleming, J. W. (2008). Towards accurate kinetic modelling of prompt NO formation in hydrocarbon flames via the NCN pathways. *Combustion and Flame*, 154, 630-636.

- Swamy, L. R., Chandrashekar, T. K., Banapurmath, N. R. ve Nashipudi, P. (2014). Effect of injection timing, combustion chamber shapes and nozzle geometry on the diesel engine performance. *Universal Journal of Petroleum Sciences*, 2, 74-95.
- Szybist, J. P., Boehman, A. L., Haworth, D. C. ve Koga, H. (2007). Premixed ignition behavior of alternative diesel fuel-relevant compounds in a motored engine experiment. *Combustion and Flame*, 149 (1-2), 112-128.
- Szybist, J. P., Boehman, A. L., Taylor, J. D. ve McCormick, R. L. (2005). Evaluation of formulation strategies to eliminate the biodiesel NO_x effect. *Fuel Processing Technology*, 86, 1109-1126.
- Tat, M. E., Gerpen, J. H. ve Wang, P. S. (2004). Fuel property effects on injection timing, ignition timing and oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines. *The Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological Systems*. 11 Şubat 2017, http://web.cals.uidaho.edu/biodiesel/files/2013/08/Trans-50_4_1123.pdf.
- Taylor, C. F. (1989). *Internal combustion engines*. ABD: International Textbook Company.
- Tauzia, X. ve Maiboom, A. (2013). Experimental study of an automotive diesel engine efficiency when running under stoichiometric conditions. *Applied Energy*, 105, 116-124.
- Testo. (2012). *Sıcaklık ve nem ölçüm cihazı*. 14 Nisan 2017, <https://media.testo.com/media/1e/ea/799a567e662f/testo-610.pdf>.
- Testo. (2017). *Testo 350 maritime instruction book*. 11 Nisan 2017, <http://www.testo350.com/downloads/350/literature-manuals/2-%20testo%20350%20Instruction%20Manual.pdf>.

TS EN 590 + A1. (2010). *Otomotiv yakıtları – dizel (motorin) – gerekler ve deney yöntemleri*. 31 Aralık 2016, <http://www.tuvasas.com.tr/ihaleler/tr/teknik/65eb72cd8cf23ffe3deae9b267d2749e.pdf>.

Tschoeke, H., Graf, A., Stein, J., Krüger, M., Schaller, J. Breuer, N. ve diğer. (2010). Diesel engine exhaust emissions. K. Mollenhauer ve H. Tschoeke (ed.), *Handbook of diesel engines* içinde (417-487). Berlin: Springer Verlag.

Tsukahara, M., Murayama, T. ve Yoshimoto, Y. (1982). Influence of fuel properties on the combustion in diesel engine driven by the emulsified fuels. *The Japan Society of Mechanical Engineering Journal*, 25, 612-619.

Tufte, E. D. (2014). *Impacts of low load operation of modern four-stroke diesel engines in generator configuration*. Yüksek Lisans Tezi, The Norwegian University of Science and Technology, Norveç.

Tziourtzioumis, D. N. (2012). *Experimental Investigation of the steady state and transient operation of Diesel Engines fuelled by high percentage biodiesel blends*. Doktora Tezi, University of Thessaly, Selanik.

UDHB (Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı). (2017). *1978 protokolü ile değişik, 1973 tarihli denizlerin gemiler tarafından kirletilmesinin önlenmesine ait uluslararası sözleşme*. 20 Ocak 2017, <http://imo.udhb.gov.tr/TR/19Marpol.aspx>.

US EIA (Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi Yönetimi). (2016). *International energy outlook 2016*. 27 Mayıs 2017, [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf).

US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı). (2011). *Exhaust gas scrubber washwater effluent*. 05 Mart 2017, https://www3.epa.gov/npdes/pubs/vgp_exhaust_gas_scrubber.pdf.

US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı). (2017a). *Sulfur dioxide basics*. 12 Şubat 2017, <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#effects>.

US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı). (2017b). *Acid rains*. 14 Şubat 2017, <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>.

Van Helden, A. K., Valentijn, M. C. ve Van Doorn, H. M. J. (1989). Corrosive wear in crosshead diesel engines. *Tribology International*, 22 (3), 189-193.

Velji, A., Lüft, M. ve Merkel, S. (2010). Mixture formation, combustion and pollutant emissions in high-speed direct injection diesel engines. H. Zhao, (Ed.), *Advanced direct injection combustion engine technologies and development - Volume 2: Diesel engines içinde* (105-155). Cambridge: Woodhead Publishing.

Velmurugan, K. ve Gowthamn, S. (2012). Effect of cetane improver additives on emissions. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2 (5), 3372-3375.

Verduzco, R., Rodriguez, J. E. ve Jacob, J. A. R. (2012). Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. *Fuel*, 91, 102.

Vural, E. (2009). *Küçük hacimli bir dizel motorunda değişik avanslardaki püskürtmenin motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.

Wallace, G. H. (b.t.). *European diesel fuel - A review of changes in product quality 1986-1989*. 02 Ocak 2017, https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/Merge/Vol-35_4-0005.pdf.

- Walsh, M. P. (2004). The impact of fuel parameters on vehicle emissions. 11 Ocak 2017, <http://walshcarlines.com/pdf/Sinopec%202004.pdf>.
- Wamankar, A. K., Satapathy, A. K. ve Murugan, S.. (2015). Experimental investigation of the effect of compression ratio, injection timing & pressure in a DI (direct injection) diesel engine running on carbon black-water-diesel emulsion. *Energy*, 93, 511-520.
- Wang, X., Huang, Z., Kuti, O. A., Zhang, W. ve Nishida, K. (2010). Experimental and analytical study on biodiesel and spray characteristics under ultra high injection pressure. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31 (4), 659-666.
- Wang, X. ve Lefebvre, A. H. (1988). Influence of fuel temperature on atomization performance of pressure swirl atomizers. *Journal of Propulsion and Power*, 4 (3), 222-227.
- Wei, S., Wang, F., Leng, X., Liu, X. ve Ji, K. (2013). Numerical analysis on the effect of swirl ratios on swirl chamber combustion system of DI diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 75, 184-190.
- Wharton, A. J. (1991). *Diesel engines* (3. Baskı). Oxford: Butterworth- Heinemann Ltd.
- Williams, R., Hamje, H., Zemroch, P. J., Clark, R., Samaras, Z., Dimaratos, A. ve diğer. (2016). *Transportation Research Procedia*, 14, 3149-3158.
- Winkler, M.F. (2003). Introduction to marine petroleum fuels. G.E. Totten, (Ed.), *Fuels and lubricants handbook: Technology, properties, performance and testing* içinde (115-145). ABD: ASTM International.

- Woodyard, D. (2004). *Pounder's marine diesel engines and gas turbines* (8. Baskı). Oxford: Elsevier Butterworth- Heinemann.
- Wright, A. A. (2005). *Exhaust emissions from combustion machinery* (2. Baskı). İngiltere: Imarest.
- Wu, Z., Zhou, X., Liu, X., Ni, Y., Zhao, K., Peng, F. ve diğer. (2016). Investigation on the dependence of flash point of diesel on the reduced pressure at high altitudes. *Fuel*, 181, 836-842.
- Yadollahi, B. ve Baroomand, M. (2013). The effect of combustion chamber geometry on injection and mixture preparation in a CNG direct injection SI engine. *Fuel*, 107, 57-62.
- Yaşar, F. (2016). *Yosun yağından biyodizel üretimi ve bir dizel motorunda alternatif yakıt olarak kullanılması*. Doktora Tezi, Batman Üniversitesi, Batman.
- Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM), (b.t.). *Isıl değer ve enerji tasarrufu*. 04 Aralık 2016, http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/en_tasarrufu/uetm/ts13.html.
- Yoon, S. H., Cha, J. P., Lee, C. S. (2010). An investigation of the effects of spray angle and injection strategy on dimethyl ether (DME) combustion and exhaust emission characteristics in a common-rail Diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 91, 1364-1372.
- Yu, R. C., Wong, V. W. ve Shahed, S. M. (1980). Sources of Hydrocarbon Emissions from Direct Injection Diesel Engines. *1980 Automotive Engineering Congress and Exposition*.
- Zeldovich, Y. B. (1946). The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *Acta Physicochemica USRR*, 21, 577-628.

Zheng, M., Reader, G. T. ve Hawley, J. G. (2004). Diesel engine exhaust gas recirculation - A review on advanced and novel concepts. *Energy Conversion and Management*, 45 (6), 883-900.

