

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KLİNOPTİLOLİT TİPİ ZEOLİT UYGULAMALARININ DİZEL
BİR MOTORDA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Selahattin Özgür FIRAT

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Taşıt Dinamiği ve Kontrol Bilim Dalı

ŞUBAT 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

KLİNOPTİLOLİT TİPİ ZEOLİT UYGULAMALARININ DİZEL BİR MOTORDA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tez Yazarı

Selahattin Özgür FIRAT

Danışman

Prof. Dr. Hanbey HAZAR

ŞUBAT 2024

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Klinoptilolit Tipi Zeolit Uygulamalarının Dizel Bir Motorda Etkilerinin Araştırılması
Yazarı:	Selahattin Özgür FIRAT
İlk Teslim Tarihi:	12.01.2024
Savunma Tarihi:	12.02.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hanbey HAZAR Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	İmza Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Turan GÜRGENÇ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Tahsin YÜKSEL Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Klinoptilolit Tipi Zeolit Uygulamalarının Dizel Bir Motorda Etkilerinin Araştırılması” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

12.02.2024

Selahattin Özgür FIRAT



ÖNSÖZ

Dünyada ve ülkemizde, hava kirliliğine bağlı gelişen küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunları baş göstermeye başlamıştır. Sanayi devrimiyle birlikte artan fosil yakıt kullanımı, hava kirliliğine neden olmakla birlikte doğal dengeyi de bozmaktadır. Geçmişten günümüze hayatımızda büyük yer edinen içten yanmalı motorlar, bu durumun gerçekleşmesinde büyük pay sahibidir. Rezervleri sınırlı enerji kaynakları nedeniyle hem çevreci hem de verimleri yüksek motorların geliştirilmesi için çalışmalar sürmektedir.

Hazırlamış olduğum bu tez çalışmasında hava, 6 farklı zeolit ile hazırlanan filtrelerden geçirilerek içerisindeki azot moleküllerinin (N_2) seyreltilebileceği, hacimce oksijen (O_2) oranı yükselen havanın tek silindirli bir dizel motorunun emme manifolduna beslenmesiyle yanmanın iyileşeceği, bununla birlikte emisyon ve performans değerlerinde pozitif etki yapacağı düşünülmüştür.

Tez çalışmalarım boyunca akademik anlamda bizlere örnek olan, desteklerini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Hanbey HAZAR' a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Deney çalışmalarında ve tezin hazırlanmasında çok büyük emeği olan Arş. Gör. Hüseyin SEVİNÇ hocama teşekkürlerimi bir borç bilirim. Tez çalışmasına katkılarından ötürü Teknisyen Hamit Demir, Kimya Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Sinan SAYDAM, Kimya Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Ramazan ORHAN, İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Hikmet SİS' e teşekkür ederim. SEM ve EDX görüntüleme işlemlerinde yardımlarından dolayı İnönü Üniversitesi İBTAM Müdürü Dr. Öğr. Üyesi Ali Erdoğan ve Öğr. Gör. Tuba UTKU' ya şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu süreçte maddi ve manevi olarak her zaman destekçilerim olan annem ve ablama minnettarım. Bu tez çalışmamı benim bugünlere gelmem için fedakârlık eden ve her geçen gün yokluğunu daha fazla hissettiğim babama ithaf ediyorum.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **TEKF.21.38** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Selahattin Özgür FIRAT
ELAZIĞ, 2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. MOTORLU TAŞITLARIN OLUŞTURDUĞU ZARARLI EGZoz EMİSYONLARI	3
3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA EGZoz EMİSYONLARINI AZALTMA YÖNTEMLERİ ..	6
3.1. Yanma Öncesi Alınan Tedbirler.....	7
3.2. Yanma Sırası Alınan Tedbirler.....	8
3.3. Yanma Sonrası Alınan Tedbirler.....	11
4. ZEOLİT	12
4.1. Doğal Zeolit.....	12
4.2. Sentetik Zeolit	14
4.3. Zeolitlerin Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri.....	15
4.3.1. Moleküler Eleme Yeteneği.....	15
4.3.2. İyon Değiştirme Özelliği	16
4.3.3. Adsorpsiyon Özelliği.....	17
4.4. Zeolitlerde Modifiye Yöntemleri.....	18
4.5. Literatür Bulguları	21
5. MATERYAL VE METOT	24
5.1. Motor Test Düzeneği Ve Ölçüm Cihazları	25
5.1.1. Egzoz Emisyon Ölçüm Cihazı	27
5.1.2. Gürültü Ölçüm Cihazı	28
5.2. Oksijen Yoğunlaştırıcı Filtre (OYF).....	29
5.3. Deneylerde Kullanılan Zeolitler	30
5.3.1. Doğal Zeolit (DZ).....	30
5.3.2. Asit Modifiye Zeolit (AMZ)	32
5.3.3. İyon Değiştirilmiş Zeolit (İDZ)	33
5.3.4. Sentetik Zeolit (SZ).....	35
5.4. Taramalı Elektron Mikroskonu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X Işınları Spektrometresi (EDX)	35
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
6.1. Zeolitlerin SEM ve EDX Analizleri	37
6.1.1. Doğal Zeolit (DZ).....	37
6.1.2. Asit Modifiye Zeolit (AMZ)	37
6.1.3. Kalsiyum Modifiye Zeolit (KMZ)	39
6.1.4. Lityum Modifiye Zeolit (LMZ).....	40
6.1.5. 4A Sentetik Zeolit (4SZ)	41
6.1.6. 5A Sentetik Zeolit (5SZ)	42

6.2. OYF' nin Oksijen Yoğunlaştırma Kapasiteleri.....	43
6.3. Motor Deneyleri Sonuçları	44
6.3.1. Karbonmonoksit (CO).....	44
6.3.2. Hidrokarbon (HC)	46
6.3.3. Duman Yoğunluğu	48
6.3.4. Azot Oksit (NO _x)	50
6.3.5. Egzoz Gazı Sıcaklığı (EGS)	52
6.3.6. Titreşim	54
6.3.7. Gürültü	56
6.3.8. Silindir İçi Basınç.....	57
6.3.9. Fren Özgöl Yakıt Tüketimi (FÖYT)	59
6.3.10.Tork.....	60
7. SONUÇLAR.....	63
ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Klinoptilolit Tipi Zeolit Uygulamalarının Dizel Bir Motorda Etkilerinin Araştırılması

Selahattin Özgür FIRAT

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2024, Sayfa: xii + 74

Dünya nüfusundaki hızlı artışa paralel olarak insanların ulaşımına olan ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde ulaşım ihtiyacının önemli kısmını motorlu taşıtlar karşılamakta olup büyük kesimi petrol türevi yakıtları tüketmektedir. Küresel ısınma, iklim değişikliği ve çevre kirliliği sorunları nedeniyle içten yanmalı motora sahip taşıtların egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra dünya üzerindeki petrol kaynaklarının bir gün biteceği endişesi yanında yakıt verimliliği yüksek motorlar için çalışmalar sürmektedir.

Bu tez çalışmasında tek silindirli dizel bir motorun egzoz emisyonlarının iyileştirilmesinin yanı sıra motor performansının artırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla zeolit içeren bir filtre tasarlanarak oksijence yoğun hava elde edilmiştir. Havanın dizel motora beslenmesi sağlanarak performans ve emisyon değerlerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Oksijen yoğunlaştırıcı filtre içerisinde doğal ve sentetik zeolit çeşitlerinin bulunduğu 6 farklı zeolit kullanılmıştır. Doğal zeolitlerde oksijen yoğunlaştırma yeteneklerinin geliştirilmesi amacıyla asit, lityum ve kalsiyum modifiyeleri gerçekleştirilmiştir. Oksijen yoğunlaştırıcı filtre ile elde edilen oksijence yoğun hava, dizel motora beslenerek 10 farklı emisyon ve performans parametresi kayıt altına alınmıştır.

Elde edilen verilere göre zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma oranları büyükten küçüğe doğal zeolit, asit modifiye zeolit, kalsiyum modifiye zeolit, lityum modifiye zeolit, 4A sentetik zeolit, 5A sentetik zeolit olarak tespit edilmiştir. Motor deneyleri sonucunda tork, egzoz gazı sıcaklığı, silindir içi basınç, gürültü, titreşim ve NO_x değerlerinde artış, fren özgül yakıt tüketimi, CO, HC ve duman yoğunluğu değerlerinde düşüş elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zeolit, Dizel motor, Egzoz emisyonları, Motor performansı

ABSTRACT

Investigation of Effect Of Clinoptilolite Type Zeolite Applications in a Diesel Engine

Selahattin Özgür FIRAT

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

February 2024, Pages: xii + 74

In parallel with the rapid increase in the world population, people's need for transportation is increasing day by day. Today, a significant portion of transportation needs are met by motor vehicles, and most of them consume petroleum-derived fuels. Due to global warming, climate change and environmental pollution problems, it is important to improve the exhaust emissions of vehicles with internal combustion engines. In addition to the concern that the world's oil resources will one day run out, studies are continuing for engines with high fuel efficiency.

In this thesis study, it is aimed to improve the exhaust emissions of a single-cylinder diesel engine as well as to increase the engine performance. For this purpose, a filter containing zeolite was designed to obtain oxygen-dense air. It is aimed to improve performance and emission values by feeding air to the diesel engine. 6 different zeolites, including natural and synthetic zeolite types, were used in oxygen concentrator filter. Acid, lithium and calcium modifications have been carried out in natural zeolites in order to improve their oxygen concentrating abilities. The oxygen-dense air obtained by oxygen concentrator filter was fed to the diesel engine and 10 different emission and performance parameters were recorded.

According to the data obtained, the oxygen concentration rates of zeolites were determined as natural zeolite, acid modified zeolite, calcium modified zeolite, lithium modified zeolite, 4A synthetic zeolite, 5A synthetic zeolite from largest to smallest. As a result of the engine tests, an increase in torque, exhaust gas temperature, in-cylinder pressure, noise, vibration and NO_x values, and a decrease in brake specific fuel consumption, CO, HC and smoke density values were obtained.

Keywords: Zeolite, Diesel engine, Exhaust emissions, Engine performance

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Emisyon kontrol yöntemlerinin sınıflandırılması	6
Şekil 3.2. EGR oranının emisyonlara etkisi.....	8
Şekil 4.1. Doğal zeolit	13
Şekil 4.2. Türkiye’deki zeolit yatakları.	14
Şekil 4.3. Sentetik zeolit.....	15
Şekil 4.4. Zeolitın moleküler eleme yeteneği	16
Şekil 5.1. Test düzeneği	24
Şekil 5.2. Motor test düzeneği	26
Şekil 5.3. Deney motoru üzerindeki zenginleştirilmiş hava portu.....	27
Şekil 5.4. Egzoz emisyon ölçüm cihazı.....	27
Şekil 5.5. Gürültü ölçer	28
Şekil 5.6. OYF sistemi	29
Şekil 5.7. OYF sistemi şematik gösterimi	30
Şekil 5.8. Farklı tanecik çaplarındaki doğal zeolit	31
Şekil 5.9. (a) Eleme (shaker) ve (b) değirmen.....	32
Şekil 5.10. Kalsine zeolit.....	32
Şekil 5.11. Kalsiyum klorür (CaCl_2) ve lityum klorür (LiCl).....	34
Şekil 5.12. Zeolit modifikasyon ekipmanları	34
Şekil 5.13. Ticari olarak satın alınan sentetik zeolit	35
Şekil 5.14. SEM cihazı	36
Şekil 5.15. Altın kaplama işlemi sonrası zeolit numunelerinin görünüşleri	36
Şekil 6.1. DZ’ nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu	37
Şekil 6.2. DZ’ nin (a) 500X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri	37
Şekil 6.3. AMZ’ nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu	38
Şekil 6.4. AMZ’ nin (a) 500X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri	38
Şekil 6.5. KMZ’ nin (a) 2500X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu	39
Şekil 6.6. KMZ’ nin (a) 1000X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri	39
Şekil 6.7. LMZ’ nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu	40
Şekil 6.8. LMZ’ nin (a) 1000X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri	40
Şekil 6.9. 4SZ’ nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu	41
Şekil 6.10. 4SZ’ nin (a) 1000X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri	41

Şekil 6.11. 5SZ' nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu	42
Şekil 6.12. 5SZ' nin (a) 1000X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri.....	42
Şekil 6.13. Zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma oranları	43
Şekil 6.14. CO değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	45
Şekil 6.15. HC değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	47
Şekil 6.16. Duman yoğunluğu değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	49
Şekil 6.17. NO _x değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	51
Şekil 6.18. Egzoz gazı sıcaklığının zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri.....	53
Şekil 6.19. Titreşim değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	55
Şekil 6.20. Gürültü seviyesinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	56
Şekil 6.21. Silindir içi basınç değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	58
Şekil 6.22. FÖYT' nin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	59
Şekil 6.23. Tork değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri	61

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Bazı doğal zeolit çeşitlerinin özellikleri	13
Tablo 4.2. Zeolitlerin iyon değişim kapasiteleri	17
Tablo 4.3. Zeolitlerin Si/Al oranları.....	18
Tablo 5.1. Deney motoru teknik özellikleri	26
Tablo 5.2. Egzoz emisyon cihazı özellikleri	28
Tablo 5.3. Gürültü ölçerin özellikleri.....	28
Tablo 5.4. Sülfürik asidin teknik özellikleri.....	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Å : Angstrom

Kısaltmalar

OYF	: Oksijen yoğunlaştırıcı filtre
HFk	: Hava fazlalık katsayısı
EGS	: Egzoz gazı sıcaklığı
SCR	: Selective Catalyst Reduction (Seçici Katalitik İndirgeme)
EGR	: Exhaust Gas Recirculation (Egzoz Gazı Resirkülasyonu)
PM	: Partikül madde
DPF	: Diesel Particule Filter (Dizel Partikül Filtresi)
DZ	: Doğal zeolit
SZ	: Sentetik zeolit
AMZ	: Asit modifiye zeolit
KMZ	: Kalsiyum modifiye zeolit
LMZ	: Lityum modifiye zeolit
4SZ	: 4A sentetik zeolit
5SZ	: 5A sentetik zeolit
İDZ	: İyon değiştirilmiş zeolit
FÖYT	: Fren özgül yakıt tüketimi
FTV	: Fren termal verimliliği
SDM	: Standart dizel motor

1. GİRİŞ

Hava, dünyadaki tüm canlıların hayatta kalması ve gelişmesi için temel bir gereksinimdir. Hava kirliliği ise, hava içerisindeki bazı maddelerin insanların ve diğer canlıların sağlığına zarar verebilecek miktara çıkması olarak tanımlanmaktadır. Solunan havanın kalitesinin düşmesi, insan yaşamını etkilemekte, hatta tehlikeye atmaktadır. Hava kirliliğinin toplum sağlığı üzerindeki etkileri çeşitli kurum ve kuruluşlarca bildirilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından açıklanan verilere göre 2016 yılında 4.2 milyon kişinin ölüm sebebi hava kirliliği ile ilişkilendirilmektedir [1]. Hava kirliliği, doğal veya insan faaliyetleri nedeniyle zararlı gaz ve partiküllerin atmosfere salınmasından oluşur. Bu durumun temel kaynakları termik santraller, sanayi tesisleri ve motorlu taşıtlardır.

Teknolojik gelişme ve nüfus artışıyla birlikte insanların ulaşımına olan ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Ulaşım, insanların günlük yaşamını devam ettirebilmesi için önemli bir gereksinimdir. Dünyada ulaşım ihtiyacının büyük bir kısmını motorlu taşıtlar karşılamakta olup Türkiye’de sayıları 26 milyonu aşmıştır [2]. Günümüzde kullanılan karayolu taşıtlarının büyük bir kısmı petrol türevi yakıtları tüketmektedir. Motorlu taşıtlarda kullanılan petrol türevi yakıtlar, yanma esnasında oksijen ile reaksiyona girmesi sonucunda CO₂, CO, hidrokarbon (HC), su buharı (H₂O), partikül madde (PM) ve NO_x bileşiklerini oluşturmaktadır. Taşıtların oluşturduğu egzoz emisyonlarından kaynaklanan kirlilik, son yıllarda hava kirliliğine yol açan en önemli faktörlerden birisidir. Yapılan araştırmalarda hava kirliliğinin %50’ye yakın kısmını motorlu taşıtların oluşturduğu bildirilmiştir [3]. Açığa çıkan bu egzoz emisyonları doğada yok olmamakta, çeşitli şekillerde atmosfere karışarak hava, yağmur ve toprak kirliliğine neden olmaktadır. Bu kirlilikler insan sağlığı üzerinde olumsuz etki etmekte ve insan vücuduna karışarak çeşitli hastalıklara yol açmaktadır. Geçmişten günümüze motorlu taşıtların insan ve çevre sağlığına etkilerini azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve halen devam etmektedir.

Dünyada motorlu taşıt emisyonlarının sınırlandırılmasına yönelik ilk düzenleme 1968 yılında California’da uygulamaya konulmuştur [4]. Avrupa Birliği’ne üye olan ülkelerde 2014 yılından itibaren EURO 6 normları yürürlüktedir. Taşıt üreticileri bu yasal düzenlemelerin ardından çok daha düşük emisyon değerlerine sahip araç üretimi için çeşitli sistemler geliştirmişlerdir. Taşıtların yaydığı zararlı egzoz emisyonlarını azaltmak için yanma öncesi, yanma sırası ve yanma sonrasında olmak üzere çeşitli aşamalarda değişik önlemler alınmaktadır. Dizel motorlarda NO_x emisyonlarını azaltmak amacıyla egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) ve seçici katalitik indirgeme (SCR), PM emisyonlarını azaltmak amacıyla dizel partikül filtresi (DPF) birlikte kullanılmaktadır. Benzinli motorlarda ise yaygın olarak katalitik konvertörler kullanılmaktadır. En gelişmiş tip olan üç yollu konvertörler, üç ana kirletici olan NO_x, CO ve hidrokarbon (HC) emisyonlarını eş zamanlı olarak zararsız hale dönüştürebilmektedir.

Bir içten yanmalı motorun egzoz emisyonu, motor performansı ve yakıt tüketimine etki eden çeşitli parametreler bulunmaktadır. Yakıtın yanma odasında en yüksek verimde yakılması yakıt tüketimine, egzoz emisyonlarına ve motor performansına doğrudan etki etmektedir. Taşıt üreticileri artan çevre bilinci ve fosil yakıtların rezervlerinin azalması nedeniyle çeşitli zorluklarla karşı karşıya kalmıştır. Yakıt verimliliği yüksek ve çevreyi daha az kirleten içten yanmalı motorlara sahip taşıtları geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir. Literatürde dizel motor egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla emme manifolduna su enjeksiyonu [5], yakıt katkılarının eklenmesi [6], enjeksiyon basıncının ve zamanlamasının değiştirilmesi [7] gibi farklı teknik ve yöntemler olduğu görülmüştür. Bu çalışmalara ek olarak dizel motorlarda yanma odasına ilave oksijen sağlanması yöntemi dikkat çekmektedir. Bu işlem emme havasının veya yakıt akışının oksijenle zenginleştirilmesi ile mümkün olmaktadır.

Bir dizel motorda yanma odasına giren havadaki O_2 seviyesinin artırılmasıyla yakıtın yanma şartlarının iyileşeceği, yakıttan alınacak verimin yükselebileceği ve motorun atmosfere saldırdığı egzoz emisyonlarının azaltılabileceği düşünülmüştür. Bu hedefle motora oksijen seviyesi yüksek hava besleyebilecek bir sistem oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada atmosferik hava içerisindeki N_2 moleküllerini seyreltebilen ve oksijen seviyesi yüksek hava üretebilen oksijen yoğunlaştırıcı bir filtre (OYF) tasarlanmıştır. Filtre içerisinde N_2 moleküllerini yüksek basınç altında kendi yüzeyine adsorplama yeteneği olan zeolit materyali kullanılmıştır. Filtre çıkışında hacimce O_2 fazlalığı olan hava, 4 zamanlı tek silindirli dizel bir motorun emme havasına beslenmesi sağlanmıştır. Yanma odasına gönderilen O_2 oranı yüksek hava ile birlikte yanmanın iyileşeceği, bununla birlikte motorun performans ve emisyon değerlerinde iyileşme görüleceği düşünülmüştür.

Hacimce fazla O_2 üretebilecek olan OYF sistemine 6 farklı çeşitte zeolit eklenmiştir. Oluşturulan OYF sisteminin ürettiği zenginleştirilmiş hava, dizel motorun emme manifolduna dâhil edilen bir port vasıtasıyla verilmiştir. Motor egzoz emisyonları ve performansı üzerindeki etkilerinin anlaşılması amacıyla çeşitli ölçümler yapılmıştır. Deneysel çalışmada motor sabit 2000 d/dk hızda 1, 1.5, 2, 2.5, 3 kW yük koşullarında çalıştırılmış ve ölçümler alınmıştır. Egzoz emisyon parametrelerindeki değişimlerin incelenmesi amacıyla CO , HC , NO_x ve duman yoğunluğu ölçümleri alınmıştır. Performans parametrelerinde ise fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), tork, güç, EGS, titreşim ve gürültü değerleri kaydedilmiştir.

2. MOTORLU TAŞITLARIN OLUŞTURDUĞU ZARARLI EGZoz EMİSYONLARI

Dünyadaki enerji ihtiyacının önemli bir kısmını fosil yakıt ve türevleri karşılamaktadır. 1980 yılında dünya üzerindeki enerji tüketiminin yarısına yakın kısmını petrol, %25 payla kömür ve %19' luk kısım ile doğalgazın karşıladığı tahmin edilmektedir [8]. Petrol kullanımının bu denli yüksek olmasının en büyük sebeplerinden biri, sadece ülkemizde 25 milyonu aşkın sayısı nedeniyle içten yanmalı motorlara sahip karayolu taşıtları olduğu söylenebilir. İçten yanmalı motorlarda yakıtların yakılması sonucunda, çeşitli miktarda ve bileşenlerde emisyon adı verilen gazlar atmosfere salınmaktadır. Hava kirliliğinin en büyük nedenleri arasında olan egzoz emisyonlarının bileşenleri, NO_x, HC, PM, CO, CO₂ ve duman emisyonları şeklinde sıralanabilir [9].

NO, NO₂, N₂O ve N₂O₂ gibi gazların tümü NO_x olarak ifade edilmektedir. NO emisyonu insanlar için zehirli olan renksiz ve kokusuz bir gazdır. NO₂ gazı ise kıvılcık-kahverengi rengine oldukça reaktif bir gaz olup boğucu bir kokuya sahiptir ve yüksek oksitleyici özelliktedir. NO₂ gazlarının zehirleyici etkisi NO gazına kıyasla 5 kat daha fazladır [10]. Dizel motorlar yüksek sıkıştırma oranı ve termal verimi nedeniyle benzinli motorlara göre daha fazla NO_x emisyonu üretmektedir. Benzinli motorlarda atmosfere salınan 1 ton egzoz emisyonunun 18.42 kg'ı NO_x iken, dizel motorlarda bu miktar yaklaşık 123.71 kg civarında gerçekleşmektedir [11]. Benzinli motorlara göre avantajları bulunan dizel motorlarının kullanım alanlarının geniş olmaları, sayısal fazlalıklarına neden olmakla birlikte atmosfere salınan NO_x emisyonlarında da artışa sebebiyet vermektedir. NO_x emisyonları, yanma odasının sıcaklığının yaklaşık 1800 °C' ye ulaştığında N₂ ve O₂ 'nin birleşmesiyle oluşur. Yanma odası sıcaklığı 1800 °C'ye ulaşmadığında N₂ ve O₂, NO gazını meydana getirmeden egzoz sisteminden dışarı atılmaktadır [12]. NO_x oluşumunda yanma odasındaki sıcaklık artışının da önemli rolü vardır. NO_x emisyonlarında silindir içi sıcaklıktaki artışa bağlı olarak artış gelişmektedir. 1700 °C sıcaklığın üzerinde gerçekleşen %1 oranındaki her artışın, NO_x emisyonlarında %20 oranında artışa neden olduğu ifade edilmiştir [10]. NO_x oluşumlarının açıklanmasında en yaygın kabul gören mekanizma, Zeldovich tarafından önerilmiştir. NO 'nun ana kaynağı atmosferde bulunan N₂'nin oksidasyonudur. Ancak yakıt önemli miktarda N₂ içeriyorsa, NO bileşiklerinin ek bir kaynağıdır. Benzin önemsiz miktarda, dizel yakıtı olan motorin ise daha fazla N₂ içerir. Zeldovich mekanizması adı verilen denklemler şu şekildedir [13];





Hidrokarbon (HC) emisyonları silindir duvarının yakınında oluşan yetersiz sıcaklık sonucu yanmamış yakıtlardan, yakıtın eksik yanması ya da tutuşamamasından kaynaklanmaktadır. Bu emisyon tipi karter havalandırmasından buharlaşma yolu ile, hatalı hava-yakıt oranı, düşük kompresyon ve segman boşlukları nedenleriyle egzoz yolu ile atmosfere salınmaktadır. Benzinli motorlar sitokiyometrik orana yakın ya da bir miktar zengin karışımla çalışır. H/Y karışımının zenginleşmesiyle birlikte yanma kalitesinin düşmesi, benzinli motorlarda HC emisyonlarının yüksek olmasına neden olmaktadır. Dizel motorlar düşük seviyede HC emisyonu yaymaktadır ve bu emisyonlar dizel motorlarında genel olarak hafif yüklerde meydana gelmektedir [14]. Dizel motorlarda HC emisyonlarının oluşumuna yakıt tipi, motor ayarı ve tasarımı gibi birçok parametre etki etmektedir. Ayrıca egzoz gazındaki HC emisyonları düzensiz çalışma koşullarına bağlıdır. Motor devrinde yüksek düzeyde ani değişiklik, düzensiz enjeksiyon, aşırı meme boşluğu hacimleri ve enjektör iğnesinin sıçraması, önemli miktarda yanmamış yakıtın egzozla geçmesine neden olabilir [15]. HC emisyonları, diğer kirleticiler gibi insan ve çevre sağlığına zararlı etkilere sahiptir. Solunum yollarını tahriş edici ve bayıltma gibi etkileri vardır [16].

CO, havadan biraz daha yoğun, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Oksidasyon işleminin tam olarak gerçekleşmediği eksik yanmadan kaynaklanır. Bu durum içten yanmalı motorlarda büyük ölçüde H/Y karışımına bağlıdır. Yetersiz havanın bulunduğu durumlarda, H/Y karışımının zengin olduğu bölgede CO emisyonu yüksek oranda bulunur [17]. Özellikle zengin karışımların gerekli olduğu durumlarda, motorun ilk çalıştırma anında ve ani hızlanmalarda meydana gelebilir. Zengin karışımlarda hava eksikliği nedeniyle CO' nun tamamı CO₂' ye dönüşemez ve CO yoğunluğu görülür. Dizel motorların hava fazlalığıyla çalışması nedeniyle bu motorlarda CO oluşumu minimum olarak gerçekleşmektedir. Yanma odasında kalma süresi, türbülans, alev sıcaklığı ve O₂, CO' nun oluşumunda etkilidir. Atmosferde CO' nun CO₂'ye dönüşümü yavaştır ve bu süre yaklaşık 2 ile 5 ay arasında değişmektedir [18]. Kararlı bir gaz olan CO insanlarda akciğer tarafından solunur ve kan dolaşımına bulaşır. Kanda hemoglobine bağlanır ve O₂ aktarma kapasitesini azaltır. Kanda azalan O₂ oranının çeşitli organlarda, özellikle beynin ve kalbin işlevini etkilediği bilinmektedir [19].

Sanayi devrimiyle birlikte enerji ihtiyacının artışına paralel olarak atmosferdeki konsantrasyonu artan başta CO₂ olmak üzere sera gazları, yerküredeki iklim değişikliği ve küresel ısınma probleminin temel nedeni olarak gösterilmektedir. Dünyanın karşı karşıya kaldığı en önemli problemlerden biri olduğu ve yaşamı olumsuz yönde etkileyen sonuçlara neden olduğu bilinmektedir. Bu etkilerden başlıcaları sanayi devrimi öncesi seviyenin ortalama üzerinde 0.8 °C küresel sıcaklık artışı, deniz seviyesinin her on yılda bir 3.2 cm yükselmesi ve olağanüstü sıcak-soğuk hava olaylarıdır. 2100 yılına kadar küresel sıcaklığın 1,1 ile 6,4 °C artacağı ve deniz

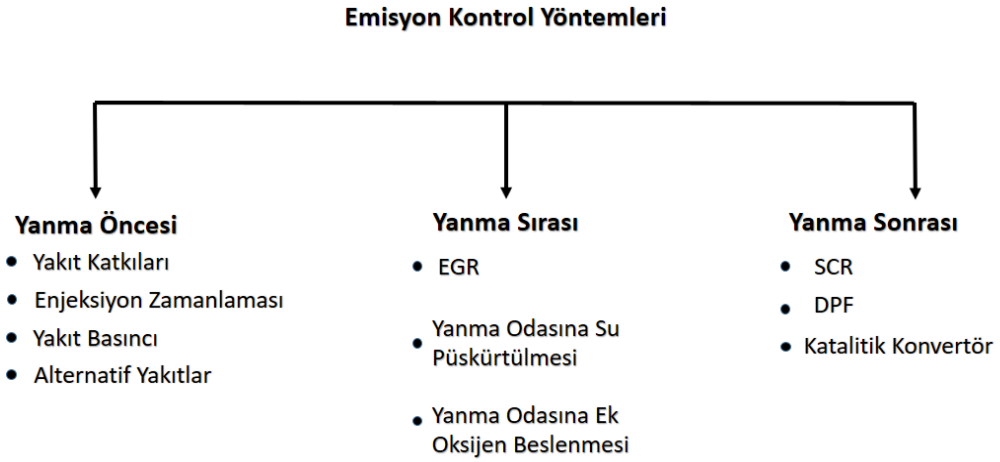
seviyesinin dünya genelinde 17 ile 58 cm arasında yükseliş gösterebileceği ifade edilmiştir [20]. Yerkürede CO₂ miktarındaki artışın kaynağının fosil yakıt tüketimi olduğu bilinmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre ulaşım sektörü, elektrik ve ısı üretimi sektörlerinden sonra en fazla karbon ayak izi salınımı yapan sektör olup, bu emisyonların %70' inden fazlası karayolu ulaşımı kaynaklıdır [21]. Bu nedenle taşıtlardan kaynaklı CO₂ salınımının azaltılması önem arz etmektedir.

Egzoz gazındaki partikül madde (PM) emisyonları yakıt ve yağlama yağındaki hidrokarbonların eksik yanmasından kaynaklanır. PM emisyonlarının oluşumu yakıt kalitesi, yağlama yağı kalitesi ve yanma sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. PM emisyonları benzinli motorlara oranla dizel motorlarda yaklaşık 6-10 kat daha fazla üretilmektedir [20]. Benzinle çalışan araçlardan kaynaklanan PM emisyonları, yanmamış yağlama yağı ve kül oluşturan yakıt ve yağ katkı maddelerinden kaynaklanır. Dizel yakıtlı araçlar tarafından salınan PM, yanma sırasında oluşan kurum, kurum üzerinde yoğunlaşmış veya adsorbe edilmiş ağır HC ve sülfatlardan oluşur [18]. Taşıtlardan kaynaklanan PM' ler genellikle partikül büyüklüğüne göre PM_{2,5} ve PM₁₀ olarak sınıflandırılır. PM_{2,5} aerodinamik çapı 2,5 µm'den küçük parçacık maddeler, PM₁₀, aerodinamik çapı 10 µm'den küçük olan parçacık maddelerdir. Küçük solunabilir boyutu, geniş yüzey alanı ve potansiyel toksisitesi nedeniyle PM, tehlikeli kirletici olarak kabul edilirler. PM toksik potansiyeli, solunum semptomları, akciğer fonksiyonunda bozulma ve kardiyovasküler hastalıklar dâhil olmak üzere ciddi olumsuz sağlık etkileriyle ilişkilendirilmiştir [22].

İs ya da duman olarak adlandırılan ve dizel motorlarında daha fazla görülen bu emisyon tipi, yakıtın eksik yanmasıyla meydana gelmektedir. İs, yanmaya katılmadan egzoz yoluyla dışarıya atılan yakıt olduğundan motor performansını ve ekonomisini olumsuz etkilerken, silindir yüzeyi ve segmanlarda aşınmayı hızlandırıcı etki eder [23]. Mavi veya gri duman, buharlaşan yağlama yağından kaynaklanır. Beyaz duman ise soğuk havalarda motorun ilk çalıştırılması esnasında gerçekleşir. Ba, Ca ve Mg gibi dizel yakıt katkı maddeleri duman emisyonlarını azaltmakta ancak PM sülfat emisyonlarını arttırdığı ifade edilmiştir [18].

3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA EGZOZ EMİSYONLARINI AZALTMA YÖNTEMLERİ

Günümüzde hava kirliliğinin başlıca sebeplerinden birisinin içten yanmalı motora sahip ulaşım araçlarının olduğu bildirilmektedir. İçten yanmalı motorların kullanımı sonucunda farklı durum ve koşullarda egzoz emisyonları meydana gelmektedir. Bir içten yanmalı motorun karter havalandırma sistemi, yakıt deposu, yakıt sistemi ve egzozundan atmosfere 100' ün üzerinde kirlenici emisyon salınımı tespit edilmiştir [24]. Küresel ısınma sorunu, olağanüstü hava olayları ve iklimsel değişiklikler nedeniyle atmosferi daha az kirlüten, yakıt verimliliği yüksek taşıtlara gereksinim vardır. İçten yanmalı motora sahip taşıtlarda egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla çeşitli yöntem ve teknikler geliştirilmiştir. Bunlar yanma öncesi, yanma esnası ve yanma sonrası olmak üzere 3 ana grupta değerlendirilebilir. Şekil 3.1' de emisyon kontrol yöntemleri gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Emisyon kontrol yöntemlerinin sınıflandırılması

Bir içten yanmalı motorun oluşturduğu emisyonları azaltmak amacıyla uygulanan metotlardan biri yanma öncesi emisyonların oluşumunu azaltıcı önlemlerin alınmasıdır. Genel olarak yakıt ve yakıt sistemi üzerindeki değişiklikleri kapsamaktadır. Diğer aşamada ise yanma esnasında, yanma olayını ve yanma sonucunu etkileyen çeşitli önlemleri belirtmektedir. Son aşama olan yanma sonrasında alınan önlemler ise egzoz devresi üzerine eklenen maliyeti yüksek ve karmaşık sistemlerle emisyonları zararsız hale dönüştürmeyi amaçlamaktadır.

3.1. Yanma Öncesi Alınan Tedbirler

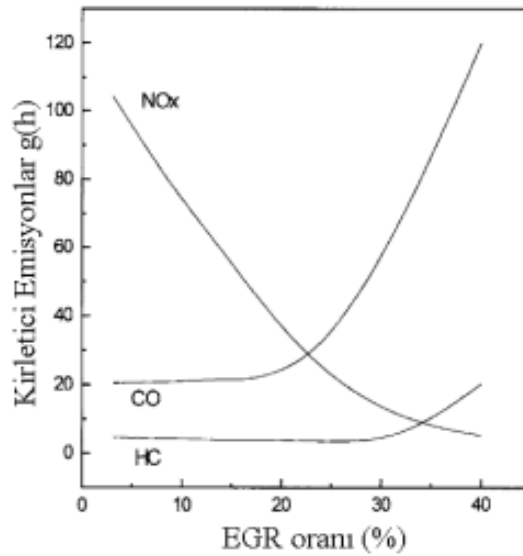
Yakıt enjeksiyonunun zamanlaması, basıncı ve içeriği motor performansı ve emisyonlarını önemli oranda etkilemektedir. Genel olarak enjeksiyon basıncının artırılması yakıtın daha iyi atomize olmasıyla birlikte yanmanın daha erken başlamasına ve daha iyi yakıt-hava karışımı elde edilmesini sağlar. Yanmanın uygun şartlarda gerçekleşmesiyle silindir içi sıcaklıkta artış olur ve NO_x oluşumunu kolaylaştırır [25].

Literatürde bu konuya dair pek çok çalışma olduğu görülmüştür. Agarwal ve ark. [26] tek silindirli 4 zamanlı dizel bir motorda değişik enjeksiyon basıncı ve zamanlamasının performans ve emisyon değerleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 500 ve 1000 bar olmak üzere 2 farklı basınçta yakıt enjeksiyonu gerçekleştirilerek emisyon ölçümü alınmıştır. Düşük enjeksiyon basıncında CO_2 , CO, HC ve NO_x emisyonlarında düşüş gözlemlendiği, kötüleşen atomizasyonla birlikte tutuşma gecikmesinin uzadığı ve fren özgül yakıt tüketiminde (FÖYT) artış olduğu bildirilmiştir. Yüksek enjeksiyon basıncında yanma süresinin kısaldığı ve ısı salınım hızında yükseliş olduğu, bu sebeple yüksek enjeksiyon basıncında NO_x emisyonlarında artış yaşandığı ifade edilmiştir. Enjeksiyon basıncının artmasının yanma süresini kısalttığından vurutuya sebep olduğu aktarılmıştır. Sayın ve Çanakçı [27], tek silindirli dizel bir motorda etanol katkılı dizel yakıtıyla birlikte enjeksiyon zamanlamasının değiştirilmesinin motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneyler farklı yük ve farklı etanol karışım oranlarında gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre yakıt içerisindeki etanol miktarı arttıkça fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) değerinde iyileşme, NO_x ve CO_2 emisyonlarında artış, CO ve HC emisyonlarında azalış kaydedildiği bildirilmiştir. Yakıt karışımındaki etanol miktarının artırılmasının, silindir içi maksimum sıcaklığın artmasına neden olduğu ve bununla birlikte NO_x emisyonunu önemli oranda arttırdığı ifade edilmiştir. FÖYT değerindeki iyileşme ile birlikte fren termal verimliliğinde (FTV) %18 oranında azalma yaşandığı bildirilmiştir. Bunun sebebinin etanolün dizel yakıtına göre alt ısı değerinin düşük olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Enjeksiyon zamanının ilerletilmesinin yakıt ve oksijen arasındaki reaksiyonun iyileşmesinden dolayı CO emisyonlarının azalmasına, yanmanın daha erken başlamasına ve CO_2 emisyonlarında artışa neden olduğu bildirilmiştir. Korakianitis ve ark. [28] doğalgaz yakıtını buji ateşlemeli ve kompresyon ateşlemeli iki motorda kullanarak performans ve emisyon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Doğalgaz yakıtlı buji ateşlemeli motorlar, benzin yakıtlı motorlara göre daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalışabileceği ve termal verimlilikte artış olabileceği ifade edilmiştir. Buji ateşlemeli motorda en yüksek güç seviyesinin ancak NO_x emisyonlarının maksimum olduğu noktada elde edildiğini bildirmişlerdir. Doğalgaz yakıtlı buji ateşlemeli motorda hacimsel verim kaybı sebebiyle benzin yakıtlı motora göre yaklaşık %10-15 arasında güç kaybı yaşandığı bildirilmiştir. Doğalgazın benzine göre yüksek hidrojen/karbon oranına sahip olması, benzinli motorlara kıyasla daha düşük CO_2 salınımı gerçekleştirdiği belirtilmiştir.

3.2. Yanma Sırası Alınan Tedbirler

İçten yanmalı motorlarda kirlenici emisyonların oluşumunu motor içerisinde azaltma yöntemlerinden birisi egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) uygulamasıdır. EGR, dizel motorlarda egzoz gazlarının bir kısmını silindirlere geri göndermek için tasarlanmış bir sistemdir. Egzoz manifoldundan alınan bir miktar egzoz gazı, soğutma işleminden sonra emme manifolduna geri gönderilir. EGR'nin NO_x emisyonunun azaltılmasına yönelik bilinen en iyi metot olduğu ifade edilmiştir [29].

EGR'nin amacı yanma havasını yanma sürecine dâhil olmayan ek bir termal kütle görevi gören inert bir gazla seyreltmektir. Sonuç olarak alev sıcaklığı azalır ve egzozdaki NO_x konsantrasyonu azalır. Alev sıcaklığı aynı zamanda emme manifoldu şarj sıcaklığının da bir fonksiyonu olduğundan, devridaim edilen egzozun şarj havasıyla karıştırılmadan önce soğutulması halinde daha fazla NO_x azaltımı elde edilebilir [30]. NO_x , NO ve NO_2 ' den oluşur ve her iki emisyon tipinin çevre sağlığına zararlı olduğu bilinmektedir. Ancak NO_2 ' nin daha toksik olduğu düşünülmektedir [31]. Dizel motorlar benzinli motorlara oranla yüksek derecede NO_x emisyonu üretmektedir ve dizel motorlarda bu emisyonun azaltılmasına daha fazla önem verilmiştir. NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla EGR oranının artırılması, diğer emisyonların artışına neden olabilir. Şekil 3.2' de EGR oranının diğer emisyonlara olan etkisi gösterilmektedir [29].



Şekil 3.2. EGR oranının emisyonlara etkisi

EGR ile egzoz gazlarının bir kısmı taze dolgu havasıyla birlikte yanma odasına geri gönderilerek yanma için gerekli O_2 oranını düşürür. Resirküle edilen egzoz gazı içerisinde bulunan su buharı ve CO_2 yanma sırasında ayrışır, yanma sürecini ve NO_x oluşumunu değiştirir. Özellikle

H₂O' nun endotermik ayrışması alev sıcaklığının düşmesine neden olur [32]. Emme havası karışımının özgül ısısı artar ve bunun sonucunda alev sıcaklığı düşer. Giriş havasındaki düşük O₂ miktarı ve düşük alev sıcaklığı ile birlikte NO_x oluşum reaksiyonlarının hızı azalmış olur [31]. EGR uygulamasında sıcak egzoz gazları, dolgu havasına karıştırılmasıyla hacimsel verimde düşüşe neden olması sebebiyle soğutulmayı gerekli kılmaktadır. EGR gazlarının bir miktar soğutulmasıyla hem yakıt tasarrufu hem de uygun seviyelerde NO_x emisyonu elde edilmektedir [33].

EGR' nin emisyonlara olan etkileri üzerine literatürde pek çok çalışma olduğu görülmektedir. Peng ve ark. [34], tek silindirli dizel bir motorda soğuk çalıştırma esnasında EGR' nin yanma ve emisyon üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Motorun ilk çalıştırma esnasında belirli bir miktarda EGR' nin verilmesinin motorun çalışmasına olumlu katkı edebileceği, ancak yanmanın istikrarlı hale kavuştuğunda aşırı miktarda EGR' nin tutuşma gecikmesinin uzamasına ve teklemlere yol açabileceği ifade edilmiştir. Soğuk çalıştırmada oluşan opak duman durumunun, EGR' nin eklenmesiyle önemli ölçüde azaltılabileceği bildirilmiştir. Daha fazla EGR' nin verilmesi durumunda motordaki aşırı kararsız yanma nedeniyle büyük oranda beyaz duman emisyonu görülmesine yol açtığı ifade edilmiştir. Abdelaal ve Hegab yaptıkları çalışmada [35], doğalgaz ve dizel yakıtı kullanan çift yakıtlı dizel bir motorda EGR kullanımının emisyon ve yanma olaylarına etkisini incelemişlerdir. Alınan sonuçlara göre EGR kullanımıyla dizel motorun silindir içi maksimum basıncının düştüğü, dolayısıyla motor ömrünün bu yolla uzatılabileceği belirtilmiştir. Çift yakıt kullanımıyla tutuşma gecikmesinin uzadığı, EGR kullanımıyla gecikme süresinin daha da uzadığı bildirilmiştir. Hoepke ve ark. [36], buji ateşlemeli bir motorda EGR' nin etkilerini incelemişlerdir. EGR ile birlikte yanmanın daha yavaş gerçekleştiği bildirilmiştir. Aynı zamanda ısı kaybının azalması ve özgül ısı oranının artması nedeniyle özgül yakıt tüketiminde iyileşme olduğu ifade edilmiştir. Değişken EGR oranlarında test edilen motorda özgül yakıt tüketiminde yaklaşık %5'lik bir iyileşme elde edildiği aktarılmıştır.

Literatürde yer alan, içten yanmalı motorda emisyonları azaltmaya yönelik yöntemlerden birisi ise su enjeksiyonudur. Düşük yakıt tüketimi, yüksek verim ve ağır hizmet şartlarında çalışması sebebiyle dizel motorlardan yakın zamanda vazgeçilmesi pek mümkün görünmemektedir. Günümüzde dizel motorlarına karşı artan sınırlamalar nedeniyle emisyonların azaltılmasına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Dizel motorlarda kullanılan emisyon azaltıcı sistemlerde maliyetlerin yüksek olması üreticileri alternatif yöntem kullanılmasına itmiştir. Bunların başında dizel motorlarına su enjeksiyonu gelmektedir. Literatür araştırmasında bu konuyla ilgili pek çok çalışma olduğu görülmektedir. Ayhan [37] yaptığı çalışmada bir dizel motorunda buhar ve suyun farklı yöntemlerle gönderilmesinin emisyon ve performans değerleri üzerinde etkisini incelemiştir. Su yanma odasına emülsife yakıt tekniğiyle, emme manifolduna sıvı fazda ve buhar fazda olmak üzere 3 farklı yöntemle gönderilmiştir. Emülsife yakıtla yapılan deneylerde motor moment ve efektif gücünde azalma, efektif verim, NO_x ve ÖYT gibi değerlerde

iyileşmeler olduğu bildirilmiştir. Ayrıca yakıtta %20' den fazla su katıldığında motorun ilk hareketinde zorlanmalar olduğunu, çalışmasında düzensizlikler olduğu aktarılmıştır. Motor emme havasına su enjeksiyonunda ise NO_x emisyonlarında azalma ile birlikte motor performans parametrelerinde iyileşme gözlemlendiği, bununla birlikte emme subabı ve manifoldunda korozyon gerçekleştiği ifade edilmiştir. Buhar enjeksiyonunda, su enjeksiyonuna oranla performans değerlerinde daha fazla iyileşme olduğu bildirilmiştir. Zhang ve ark. [38], dizel motoruna doğrudan su enjeksiyonunun motor performans parametrelerine olan etkilerini incelemişlerdir. Su enjeksiyonunun yanmayı geciktirme etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Sıkıştırma strokundaki su enjeksiyonuyla termal verimlilikte %4.08 oranında artış elde ettiklerini bildirmişlerdir. Tauzia ve ark. [39], suyun emme manifolduna enjeksiyonunun dizel bir motor üzerinde yanma ve emisyonlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Su enjeksiyonun yüksek oranlarda olmasıyla hem düşük hem de yüksek yük koşullarında NO_x emisyonlarında büyük oranda azalmalar elde edilebileceği ifade edilmiştir. Yüksek yüklerde EGR ile NO_x azaltma yöntemine göre su enjeksiyonun daha avantajlı olduğunu bildirmişlerdir.

Literatürde içten yanmalı motorlarda emisyonları azaltma yöntemlerinden birisi yanma odasına fazladan oksijen sağlanmasıdır. Dizel motorlar benzinli motorlara kıyasla yüksek oranda PM ve kurum emisyonları yaymaktadır. Oksijenle zenginleştirilmiş yanma, dizel motorlarda emisyonları ve performans parametrelerini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Yanma odasında fazladan oksijen bulunmasının sağlanması, emme havasının ya da yakıtın oksijence zenginleştirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Oksijence zengin yakıt kullanımında FÖYT değerinin negatif etkilendiği bildirilmiştir. Emme havasının oksijence zengin olduğu durumda ise FÖYT değerinde iyileşme ve güç çıkışında artış elde edildiği bildirilmiştir. Emme havasının oksijence zenginleştirilmesi, partikül emisyonlarını azaltmak ve termal verimliliğin iyileştirilmesi için etkili bir yöntemdir [40]. Baskar ve Senthilkumar [41], yaptıkları çalışmada bir dizel motorun emme havasının oksijen seviyesini %27 seviyesine çıkartarak motor üzerindeki değişiklikleri test etmişlerdir. Ek oksijen girişiyle yanma veriminin büyük ölçüde iyileştiği, ÖYT değerinde %5-12 arasında ve fren termal verimliliğinde (FTV) %4-8 aralığında iyileşme olduğu bildirilmiştir. Oksijenle güçlendirilmiş yanmayla birlikte partikül, duman, HC ve CO emisyonlarında yanmanın iyileşmesine bağlı düşüş görüldüğü bildirilmiştir. Li ve ark. [42], yakıt olarak kolza tohumu yağı kullanılan bir dizel motorda oksijen zenginleştirmesinin yanma ve performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Oksijen zenginleştirmesindeki amacın, yakıtın yüksek viskozitesi nedeniyle partikül emisyonlarındaki artışın sınırlanması olduğu ifade edilmiştir. Emme havasındaki oksijen oranı %24 seviyesine çıkarılmış ve sonuçlara göre yanma gecikmesinin kısaldığı, silindir içi tepe basıncın ve sıcaklığın sırasıyla %6 ve %9 oranında arttığı bildirilmiştir. Oksijen zenginleştirme oranının artırılmasının partikül, CO ve HC emisyonlarını azaltmasıyla birlikte NO_x emisyonunda artışa sebep olduğu ifade edilmiştir.

3.3. Yanma Sonrası Alınan Tedbirler

Yanma sonrası emisyon azaltıcı yöntemler, motor performansı üzerinde çok az etki ederek egzoz emisyonlarını sınır değerleri altına düşürmenin en kazançlı yoludur [43]. Bu yöntemler genel olarak kirletici emisyon oranı yüksek olan dizel motorlar üzerinde kullanılmaktadır. Genel olarak egzoz borusu üzerinde konumlandırılan bu sistemler Dizel Partikül Filtresi (DPF), Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) ve katalitik konvertörlerdir.

DPF, PM emisyonlarının azaltılmasında etkili bir yöntemdir. DPF' ler egzoz hattına takılır ve PM' yi derin yataklı filtreleme yoluyla toplar. Filtrede biriken PM, rejenerasyon adı verilen bir işlemle egzoz gazındaki oksitleyici maddeler tarafından periyodik olarak yakılır [44]. PM, dizel emisyonlarının en karakteristik özelliğidir ve dizel motorlu araçlarla ilişkilendirilen siyah dumandan sorumludur. DPF' ler 1999 yılından bu yana modern dizel motorlarda PM' yi azaltmak için kullanılmaktadır [45].

Yanma sonrası emisyon kontrolünde kullanılan diğer bir yöntem ise SCR' dir. Dizel motora sahip araçlarda kullanılan bu yöntemde Adblue ticari isimli sıvı, NO_x ile kimyasal reaksiyona girerek N₂, su buharı ve CO₂' ye dönüşmektedir [11]. SCR sistemi dizel egzoz sıvısı tankı ve pompası, SCR katalitik konvertör ve kontrol cihazından oluşur. AdBlue, NO_x dönüşümü için SCR sisteminde indirgeyici olarak kullanılır. SCR sisteminde NO_x' in ana dönüşüm denklemleri aşağıda verilmiştir [46].



İçten yanmalı motorlarda egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla kullanılan ekipmanlardan birisi katalitik konvertörlerdir. Katalitik konvertörler arasında üç yollu katalitik (TWC) konvertörler 1970 yılından bu yana en son teknolojidir. Üç yollu olarak adlandırılmasının temel sebebi üç ana kirletici olan NO_x, CO ve hidrokarbon (HC) emisyonlarını eş zamanlı olarak zararsız hale dönüştürebilmesidir. Üç yollu katalitik konvertör içerisindeki gerçekleşen kimyasal denklemler aşağıda verilmiştir [47].



4. ZEOLİT

Zeolitler, geniş yüzey alanlarına ve düzgün boşluklu içyapılarına sahip inorganik malzemelerdir. İçlerinde geniş boşluklar bulundurulur ve petek veya kafes benzeri yapılara benzer. 1765 yılında İsveçli mineralist Fredrik Cronstedt tarafından, ısıtıldığında patlayarak küçük parçalara ayrılması nedeniyle, eski Yunanca'da "kaynayan taş" anlamına gelen "zeolit" adını vermiştir. Zeolit kelimesi Yunanca zeo (kaynatmak) ve lithos (taş) kelimelerinden gelmektedir [48]. Zeolit, genellikle SiO_4 ve AlO_4 tarafından bir oksijen atomunun paylaşılmasıyla oluşturulan, üç boyutlu mikro gözenekli yapıya sahip, alkali veya alkali toprak metallerinden oluşan kristalimsi bir alüminosilikattır [49]. Doğal ve sentetik olmak üzere iki çeşit zeolit mevcuttur. Doğal zeolit (DZ) maden yataklarından cevher halinde çıkarılmaktadır. Sentetik zeolit (SZ) ise çok çeşitli kullanımlara sahip yüksek saflıkta kimyasallardır ve DZ' lere oranla çeşitli üstün özelliklere sahip zeolit çeşididir. DZ' ler SZ' ler ile karşılaştırıldığında uygun maliyetlidir ancak özellikleri daha az tutarlı olabilir [50]. SZ' ler Si/Al oranları ve atom dizilişleri bakımından değişiklik gösterir ve bu da yapı, işlev ve tür çeşitliliğine yol açar. Uluslararası Zeolit Birliği istatistiklerine göre zeolit iskeletlerinin 200'den fazla çeşidi bulunmaktadır [51]. Zeolitler kendilerine özgü fiziksel ve kimyasal nitelikleri nedeniyle tüm dünyada ilgi çekici bir materyal olmuştur.

Zeolitler düşük, orta ve yüksek silika olmak üzere 3 ana grupta sınıflandırılabilirler. Düşük silikalı zeolitler, diğer zeolitlere göre gözenek hacimleri en yüksek olanıdır. Ayırma ve saflaştırma işlemlerinde avantajlı bulunur. Orta silika zeolitler Si/Al oranı 2-5 arasındadır. Yüksek silikalı zeolitler, Si/Al oranı 5' den büyüktür ve hidrofobik yapıya sahiptir [52].

Zeolit malzemeleri eşsiz gözenek yapılarından dolayı yüksek termal ve hidrotermal stabilite, iyi iyon değişim performansı, yüksek özgül yüzey alanı ve yüksek gözenek hacmi gibi olağanüstü niteliklere sahiptir. Zeolitlerin bir diğer ayırt edici özelliği ise tutarlı gözenek ve kanal çaplarıdır. Bu özellikleri sebebiyle kristal yapısı, moleküler bir elek olarak işlev görmesini sağlar [53]. DZ' ler küçük moleküllerin giriş kanallarından geçebildiği ve büyük moleküllerin ise geçemediği moleküler elekler gibi davrandığından adsorpsiyon özellikleri benzersizdir [54]. Zeolitlerin etkinliği, kristal yapısı ve kimyasal bileşimi tarafından belirlenen fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır [50].

4.1. Doğal Zeolit

DZ, çeşitli jeolojik alanlarda ve volkanik kül, kil, biyojenik silis ve farklı kuvars formları gibi öncüllerden oluşur. 40'tan fazla DZ arasında en yaygın olanları mordenit, klinoptilolit, şabazit, eriyonit ve filipsittir [55]. Şekil 4.1' de zeolit çeşitlerinden olan DZ göstermektedir [56].



Şekil 4.1. Doğal zeolit

DZ' ler hidrotermaldir ve çoğunlukla volkanik kökenlidir. Magmatik ve metamorfik kayalarda bulunan kristalize formlarda olabileceği gibi tortul kayalarda birikmiş daha küçük çaplı taneler halinde de oluşabilirler [57]. DZ' ler arasında en faydalı olan çeşidin klinoptilolit olduğu belirtilmektedir. Tarımda katkı maddesi olarak da kullanılan klinoptilolitin, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirdiği bildirilmiştir [58]. Diğer DZ' lere göre yapısındaki mikro ve makro boşluklar nedeniyle klinoptilolitin yüzey alanı çok büyüktür. 1 gr klinoptilolitin yüzey alanının 10 m² civarında olduğu, gözenekli yapıları sebebiyle su, yağ ve gaz emme yeteneğinin yüksek olduğu ifade edilmiştir [59]. Bazı DZ çeşitlerinin fiziksel özellikleri Tablo 4.1.' de verilmiştir [58].

Tablo 4.1. Bazı doğal zeolit çeşitlerinin özellikleri

Zeolit Tipi	Gözeneklilik (%)	Isı Kararlılığı	İyon Değişim Kapasitesi (meq/g)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Kütle Yoğunluğu (g/cm ³)
Analsim	18	Yüksek	4.54	2.24-2.29	1.85
Şabazit	47	Yüksek	3.84	2.05-2.10	1.45
Klinoptilolit	34	Yüksek	2.16	2.15-2.25	1.15
Eriyonit	35	Yüksek	3.12	2.02-2.08	1.51
Höylandit	39	Düşük	2.91	2.18-2.20	1.69
Mordenit	28	Yüksek	4.29	2.12-2.15	1.70
Filipsit	31	Orta	3.31	2.15-2.20	1.58

Türkiye’ de zeolitin varlığı üzerine ilk keşif 1971 yılında yapılmış ve Gölpazarı-Göynük civarında bulunduğu bildirilmiştir [60]. Ülkemizde zeolit madeni üzerine detaylı etüdü yapılmış tek sahanın Manisa-Gördes yöresi olduğu belirtilmiştir ve Balıkesir-Bigadiç bölgesinde ise önemli zeolit yatakları olduğu tespit edilmiştir. Türkiye’de yaklaşık 50 milyon ton zeolit rezervi bulunmaktadır ve Batı Anadolu Bölgesi’nde bu rezervlerin büyük bir kısmı hölandit/klinoptilolitten oluşmaktadır [61]. Şekil 4.2’ de Türkiye’deki zeolit yatakları gösterilmiştir [60].



Şekil 4.2. Türkiye’deki zeolit yatakları.

4.2. Sentetik Zeolit

Zeolitler doğada mineral halinde bulundukları gibi, laboratuvar ortamında çeşitli işlemlerle yapısal özellikleri değiştirilebilmekte ve geliştirilebilmektedir. Sentetik zeolitler (SZ) üzerine bilinen ilk çalışmayı, 1930 yılı ortalarından sonra R.M. Barrer yapmıştır. 1948 yılında SZ türünü kesin olarak sentezlediği bildirmiştir. Bu gelişmeden sonra 1954 yılında Union Carbide şirketi ayırma ve saflaştırma işlemleri için yeni SZ’ leri ticari olarak pazarlamaya sunmuştur. 1962 yılında Mobil Oil şirketi, ham petrol işleme tekniklerinden olan hidrokarbon kraking yönteminde X tipi SZ’ nin kullanımını açıklamıştır [62].

SZ’ ler, DZ’ lere göre daha düzenli gözenek yapıları ve daha yüksek termal stabiliteye sahip olmaları nedeniyle, DZ’ lere kıyasla çeşitli üstünlük ve avantajlara sahiptirler. SZ, DZ’ lere göre daha pahalıdır ancak ticari uygulamalarda SZ daha çok rağbet görmektedir. SZ birçok farklı sektörde farklı amaçlarda kullanılmaktadırlar. En çok bilinen SZ tipleri X ve A grubu SZ’ leridir. 13X HP tipi SZ O₂ üretiminde adsorbent olarak kullanılmaktadır. Diğer SZ tipleri ise nem alıcı, katalizör veya aktif karbon olarak kullanımları mevcuttur. Şekil 4.3’de sentetik zeolit gösterilmektedir [63].



Şekil 4.3. Sentetik zeolit

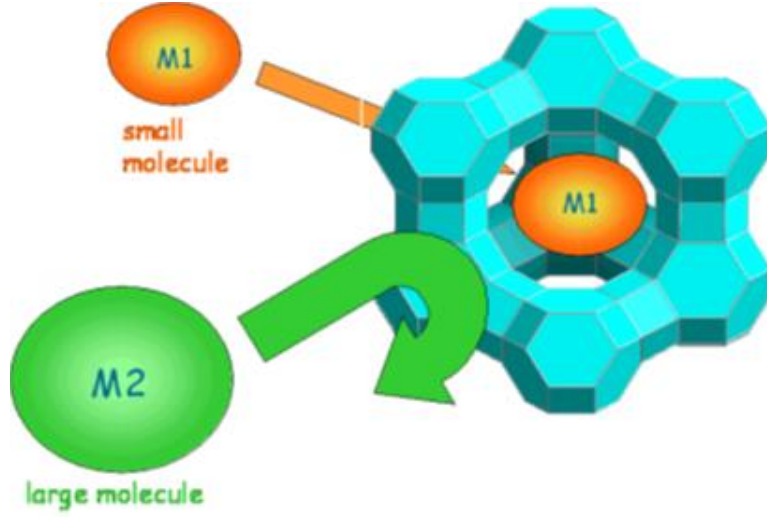
Oldukça geniş ve çeşitli kullanım alanına sahip olan sentetik zeolitler, kâğıt endüstrisi, inşaat sektörü, sağlık sektörü, maden ve metalürji gibi daha birçok farklı alanda moleküler elek gibi farklı kullanım şekillerine sahip oldukça etkin ve kullanışlı bir maddedir [63].

4.3. Zeolitlerin Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri

Zeolitlerin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri olan moleküler eleme, adsorpsiyon ve iyon değiştirme yetenekleri çok çeşitli alanlarda kullanılmasına neden olmuştur.

4.3.1. Moleküler Eleme Yeteneği

Zeolitler yapılarında su molekülleri bulundurmaktadır. Susuzlaştırma işlemiyle yapısındaki suyun uçurulması durumunda, su moleküllerinin ayrılması sonucu gözenekli boşluklar ortaya çıkar. Oluşan boşluklar kendi boyutlarından daha küçük moleküllerin geçişine izin vermektedir. Zeolitlerin bu yetenekleri sebebiyle 1932 yılında McBain tarafından moleküler elek adı verilmiştir [64]. Örneğin Zeolit 4A'nın gözenek çapı ortalama 4 Å olup bu boyuttan büyük bir molekül, zeolitin gözenegine girememektedir. Şekil 4.4'de zeolitin bu yeteneği şematik olarak göstermektedir [65].



Şekil 4.4. Zeolitin moleküler eleme yeteneği

Zeolitlerin moleküler eleme yeteneğinin ticari uygulamalarına;

- Doğalgaz kurutulması
- Karıştırılmış gazlardan yüksek saflıkta N_2 , O_2 , H_2 gazlarının üretimi
- PSA yöntemiyle O_2 üretimi
- LPG saflaştırılması ve tatlandırılması

gibi örnekler verilebilir [63].

4.3.2. İyon Değiştirme Özelliği

Zeolitlerin en önemli özelliği, katyon tutma kapasitesini ifade eden iyon değiştirme yeteneğidir. Zeolitlerin gözeneklerinde yer alan iyonlar çözelti içerisinde yük dengesi bozulmadan yer değiştirebilmektedir. Bu değişimin sonunda zeolitin gözenek çapları değişebilir. Bu durum zeolitlerin adsorpsiyon ve moleküler eleme yeteneklerini değiştirebilmekte birlikte zeolitlerin geniş kullanım alanlarına sahip olmalarını sağlamaktadır. DZ' lerin kanalları ağırlıklı olarak Na^+ , K^+ , Ca^{+2} ve H_2O ' nun yanı sıra eser miktarda Mg^{+2} , Ti^{+4} , Pd^{+2} , K^+ ve Ba^{+2} tarafından işgal edilir. Bunlar arasında olarak Na^+ , K^+ , Ca^{+2} ve Mg^{+2} , NH_4 iyonlarıyla değiştirilebilir. Değiştirilebilir katyonların türü ve yoğunluğu, boşlukların stabilitesini ve zeolitin termal davranışını etkiler [66]. Zeolit kafes yapısı çok stabildir ve gözeneklerdeki iyon ve molekül yapısı zayıftır. Zeolitik çerçeveye zarar vermeden uzaklaştırılabilirler. Negatif yüklü yüzeyi ve iç gözenekleri, kimyasal bileşimi ve ilginç özellikleri nedeniyle zeolitler ayırma, filtrasyon, iyon değişimi, kataliz ve adsorpsiyon proseslerinde kullanılabilir. DZ' ler yüksek katyon değişim kapasitesi (KDK), katyon

seçiciliği ve yüksek boşluk hacmi gibi değerli fizikokimyasal özelliklere sahip gözenekli malzemelerdir [67]. Tablo 4.2’de bazı zeolitlerin iyon değişim kapasiteleri verilmiştir [68].

Tablo 4.2. Zeolitlerin iyon değişim kapasiteleri

Mineral	Kimyasal Bileşim	İyon Değişim Kapasitesi (meq/g)
Analsim	$\text{Na}_{16} (\text{Al}_{16} \text{Si}_{32} \text{O}_{96}) 16\text{H}_2\text{O}$	4.54
Lavmontit	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8 \text{Si}_{46} \text{O}_{108}) 16\text{H}_2\text{O}$	4.25
Natrolit	$\text{Na}_{16} (\text{Al}_{16} \text{Si}_{24} \text{O}_{80}) 12\text{H}_2\text{O}$	5.26
Mordenit	$\text{Na}_8 (\text{Al}_8 \text{Si}_{40} \text{O}_{96}) 24\text{H}_2\text{O}$	2.29
Flipsit	$(\text{Na}, \text{K})_{10} (\text{Al}_{10} \text{Si}_{22} \text{O}_{64}) 24\text{H}_2\text{O}$	3.87
Eriyonit	$(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_9 (\text{Al}_9 \text{Si}_{27} \text{O}_{72}) 27\text{H}_2\text{O}$	3.12
Şabazit	$(\text{Ca}, \text{Na})_6 (\text{Al}_{12} \text{Si}_{24} \text{O}_{72}) 40\text{H}_2\text{O}$	3.81
Klinoptilolit	$(\text{K}_4 \text{Na}_4)(\text{Al}_8 \text{Si}_{40} \text{O}_{96}) 24\text{H}_2\text{O}$	2.54

DZ’ ler gram başına 3-4 meq’ a kadar iyon değişim kapasitesine sahip oldukları için çok iyi iyon değiştirici olarak sınıflandırılmaktadır. Sentetik iyon değiştiricilerle kıyaslandığında ekonomik olmaları sebebiyle daha çok tercih edilmektedirler. DZ’ lerin minerallerinin iyon değişimi açısından Na-formunun (klinoptilolit) en uygun olduğu görülmüştür. Klinoptilolit hiçbir alüminosilikat yapıda olmayan makro ve mikro boşluklara sahip olması nedeniyle yüzey alanı çok geniştir. 1 gram klinoptilolit yaklaşık 10 m² yüzey alanına sahiptir ve yapısındaki boşlukların su (% 90-135), yağ (85 cm³ /100 g) ve gaz emme kapasitesi oldukça yüksektir [59].

4.3.3. Adsorpsiyon Özelliği

Adsorpsiyon, bir ara yüzeyin yakınındaki bir sıvı fazda bulunan moleküllerin, atomların veya iyonların konsantrasyonundaki zenginleşme olarak tanımlanmaktadır. Adsorplanan moleküllere adsorbat veya sorbat adı verilir ve katı malzeme adsorban veya sorbent adını alır. Moleküllerin bu yüzeyi terk edip akışkan faza geri döndüğü zıt prosese desorpsiyon denir. Maksimum adsorpsiyon kapasitesi için adsorbanların yüksek bir spesifik yüzey alanına sahip olması gerekir. Gözeneklilik, malzemenin hacmi başına yüzey alanını artırır, dolayısıyla gözenekli malzemeler adsorban olarak yaygın bir seçimdir [69]. Çapı 100 nm’nin altında olan gözenekli malzemeler, nano gözenekli malzemeler olarak bilinir ve gözenek boyutlarına göre farklı gruplara ayrılabilir [70]:

- Mikro gözenekli, por çapı < 20 Å.
- Mezogözenekli, 20 Å < por çapı < 500 Å.
- Büyük gözenekli, 500 Å < por çapı

Öne çıkan gözenekli özellikleri ve kimyasal bileşimi nedeniyle zeolitler, hava kirliliğinin iyileştirilmesi, uçucu organik bileşiklerin uzaklaştırılması, gaz ayırma ve biyokütlenin katalitik dönüşümü vb. alanlarda kullanılan moleküler elekler ve katalizörler olarak görev yapabilir. Zeolitlerin özellikleri silika ve alüminyum içeriğinin oranına, yani silikanın alüminyuma oranına (Si/Al oranı) göre değişir. Si/Al oranı 2'den düşük olan düşük silikalı zeolitler mükemmel iyon değiştirme kapasitesine sahiptir [71]. Kimya endüstrisinde gaz ayırma işlemlerinde kriyojenik damıtma ve basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA) olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Hedef gaz türlerini yüksek basınçta adsorbe etmek için aktif karbon, zeolit ve moleküler elek gibi çok özel adsorplayıcı malzemeler kullanılmaktadır. 5A ve 13X tipi sentetik zeolitler, oksijen üretimi için hava ayırmada en yaygın kullanılan adsorbanlardır. Zeolitlerin benzersiz özellikleri, yüzeylerinin negatif yüklü oksitlerden oluşması gerçeğinden kaynaklanmaktadır [72].

Si/Al oranı zeolitlerin adsorpsiyon yeteneğini etkilemektedir. Si/Al oranının düşmesiyle zeolit adsorpsiyon kapasitesinin artmasının birbiriyle ilişkili olduğu ifade edilmiştir [73]. Bazı önemli doğal zeolit çeşitlerinin Si/Al oranları Tablo 4.3' de verilmiştir [74].

Tablo 4.3. Zeolitlerin Si/Al oranları

Zeolit Tipi	Genel Formül	Katyon	Si/Al Oranı
Klinoptilolit	$\text{Na}_6 \text{Al}_6 \text{Si}_{30} \text{O}_{72} \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$	Ca, Na, K	2,7–5,3
Eriyonit	$\text{Na}_2 \text{K}_2 \text{Mg}_{0,5} \text{Ca}_2 \text{Al}_9 \text{Si}_{27} \text{O}_{72} \cdot 27 \text{H}_2\text{O}$	Na, K	3–4
Flipsit	$\text{K}_2 \text{Ca}_{1,5} \text{NaAl}_6 \text{Si}_{10} \text{O}_{32} \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$	K, Ca, Na	1,3–2,9
Mordenit	$\text{Na}_8 \text{Al}_8 \text{Si}_{40} \text{O}_{96} \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$	Ca, Na	4,4–5,5
Şabazit	$\text{Ca}_2 \text{Al}_4 \text{Si}_8 \text{O}_{24} \cdot 13 \text{H}_2\text{O}$	Ca, K	1,4–2,8

4.4. Zeolitlerde Modifiye Yöntemleri

DZ cevherleri çeşitli işlemler uygulanarak yabancı maddelerden arındırıldıktan sonra kimyasal işlemlerde kullanılmaktadır. DZ' lerin kanallarındaki değiştirilebilir katyonların (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) yalnızca bir tür katyonla değiştirilmesi için bir tür ön işlem yapılır [75]. Bu işlemlerin geneline modifiye adı verilir ve bu işlemlerin sonucunda modifiye zeolit elde edilmiş olur. Modifiye zeolitler kimyasal işlemler sonucu elde edilirken, DZ' lere oranla yapıları daha düzgün olabilmektedir. Ayrıca DZ' lere adsorpsiyon kapasitesinin artırılması amacıyla asit modifiyesi uygulanmaktadır. Asit ile modifiye sonucunda yapıdaki katyonlar H^+ ile yer değiştirerek zeolit yüzeyinin farklılaşmasına neden olmaktadır. Bu değişiklik sonucunda bazı moleküllerin zeolit yüzeyine seçici adsorpsiyonu hızlandırılmaktadır. Bu işlem sonucunda yapıdan uzaklaşan

katyonlar zeolit yapısında boşluklar oluşturarak mikrogözenek alan ve hacimlerinde artışa neden olarak zeolit adsorpsiyon yeteneğini iyileştirmektedir [76]. DZ' ler yapısına doğal olarak saklanmış önemli miktarda Fe katyonu içermektedir ve yüksek sıcaklıkta kalsinasyon veya buharlama ile işlendiğinde elde edilen zeolit N_2O ayrışmasında, hidrokarbonların N_2O ile oksidasyonunda katalitik bir malzeme olarak kullanılabilir. Ancak DZ' lerin katalitik malzeme olarak kullanımı, termal ve hidrotermal kararsızlığı nedeniyle sentetik malzemelere kıyasla daha az çalışılmaktadır. Bu nedenle bunların kullanılabilmesi için DZ' lerin özelliklerinin basit inorganik tuzlar ve alkali bazlarla iyon değişimi, buharlama ve yüksek sıcaklıkta kalsinasyon gibi çeşitli yöntemlerle geliştirilmesi gerekir [66].

Bu tez çalışmasında zeolitler üzerinde asit modifikasyonu ve iyon değişimi olmak üzere iki farklı modifiye yönteminin uygulanması tercih edilmiştir. Literatürde zeolitlere asit modifiyesinin yapıldığı pek çok çalışma olduğu görülmüştür. Ertan ve Özkan [77] yaptıkları çalışmada Gördes yöresi zeolit numunelerine HCl, HNO_3 , H_2SO_4 ve H_3PO_4 olmak üzere farklı kuvvetlere sahip asitlerle modifiye etmişlerdir. Elde edilen zeolitlerin CO_2 ve N_2 adsorpsiyon yeteneklerini incelenmiştir. Asitle modifiye edilen zeolitlerin asit derişimine bağlı olarak Si/Al oranlarında artış olduğu bildirilmiştir. DZ' lerin gözenek hacmi ve yüzey alanları asit muamelesiyle birlikte artmıştır. Zayıf asit olan H_3PO_4 ile modifiyesinin, zeolit mikro gözenekli yapısını kristallığı azaltmadan artmasını sağladığı aktarılmıştır. Kuvvetli asitle muamele sonucu ise zeolit kristal yapısının bozulduğu bildirilmiştir. Özkan ve Ulku [78] yaptıkları çalışmada HCl ile muamele edilen zeolitlerin su buharı adsorpsiyon kapasitelerini incelemişlerdir. Asit derişimi ve çözelti sıcaklığının artmasıyla birlikte zeolit dealüminasyona uğradığı ve Si/Al oranında artış olduğu ifade edilmiştir. Asit modifiyesi sonucu DZ numunelerinin yüzey alanında artış olduğu bildirilmiştir. Bilgin [79] yaptığı çalışmada Gördes yöresi zeolitleri üzerinde modifiye işlemleri yaparak potansiyel hammadde olma durumunu incelemiştir. DZ üzerinde 5M asitle uygulanan modifikasyon sonucunda yaklaşık 7 kat artış olduğu bildirilmiştir. Ayrıca gözenek hacimlerinde de artış olduğu ifade edilmiştir. Wang ve ark. [80] DZ' ler üzerinde asit ile muamele uygulanmasının etkilerini incelemişlerdir. Zeolitlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin Si/Al oranına bağlı değiştiğini, buna göre bu oranın önem arz ettiğini ifade etmişlerdir. Düşük Si/Al oranının zeolit yüzeyinin hidrofilik olmasına, yüksek oran ise yüzeyin hidrofobik olmasına neden olduğu bildirilmiştir. Asit modifiyesi edilen zeolitlerin daha büyük özgül yüzey alanına, daha büyük gözenek hacmine ve hidrofobikliğe sahip olduğu ifade edilmiştir. DZ üzerinde yapılan asit muamelesinin Si/Al oranına etki oranını büyükten küçüğe sırasıyla asit muamele süresi, asit konsantrasyonu ve asit muamele sıcaklığı olduğu bildirilmiştir.

Literatür taraması yapıldığında DZ üzerinde iyon değişimi yapıldığı birçok çalışmaya rastlanılmıştır. Sakızcı ve Yörükoğulları [81] yaptıkları çalışmada klinoptilolit türü DZ üzerinde Li, Na, K, Mg ve Ca iyon değişiminin su adsorpsiyonu yetenekleri üzerindeki etkilerini

incelemişlerdir. İyon değişimi sonucu DZ' nin yüzey alanında artış olduğu bildirilmiştir. Klinoptilolit türü DZ' nin Li modifiyesi sonucu su adsorplama kapasitesinin yüksek olduğu ifade edilmiştir. Genel olarak bütün modifiye işlemleri sonucunda zeolitlerin su adsorplama kapasitelerinin arttığı bildirilmiştir. Özkırım [82] yaptığı çalışmada klinoptilolit türü DZ üzerinde farklı elementel tuz çözeltileriyle yaptığı iyon değişiminin etkilerini araştırmıştır. DZ' nin yoğunlukları, özgül yüzey alanları ve gözenek çapları azot adsorpsiyonu ile karakterize edilmiştir. Zeolit numunelerinin iyon değiştirilmiş formlarının hazırlanması için üç farklı normalitede (0,1, 0,5 ve 1 N lik) Na^+ , Li^+ , K^+ , Ca^{2+} ve Mg^{2+} çözeltileri kullanılmıştır. Zeolitlerin yüzey alanlarının iyon değişimi modifiyesi sonucunda arttığı bildirilmiştir. Oksijenin saf, ucuz ve etkili şekilde elde edilmesi için 0.1N Li formundaki klinoptilolit türü zeolit kullanılması uygun bulunduğu bildirilmiştir. Sakızcı [83] yaptığı çalışmada Türkiye' nin çeşitli bölgelerinde bulunan analsim türü zeolit doğal ve iyon değiştirilmiş halinin termal ve yapısal özelliklerini incelemiştir. Analsim türü DZ' nin gözenek çapının 1.6-4.2 Angstrom (Å) olduğu aktarılmıştır. Bu gözenek çapının moleküler elek olarak kullanılmaya yetebileceği ancak analsimin kanallarının oldukça dar olması nedeniyle moleküler elek ve katalizör olarak kullanılmaya uygun olmadığı belirtilmiştir. Analsim gibi küçük gözenekli zeolitlerde sadece küçük moleküllerin (ör. H_2 , He, H_2O) yapıya nüfuz edebileceği vurgulanmıştır. İyon değişimi sonucunda zeolitlerin yüzey alanında artış olduğu aktarılmıştır. Günel [84] yaptığı çalışmada klinoptilolit ve şabazit tipi DZ' ler üzerinde gerçekleştirdiği modifiyelerin etkilerini incelemiştir. DZ' leri Ag, K, Na, Mg, Ca ve farklı molaritede HCl çözeltileriyle modifiye işlemini gerçekleştirmiştir. Asit molaritesinin artmasıyla birlikte kristal örgüsünde meydana gelen deformasyondan ve dealüminasyondan dolayı klinoptilolit kristal özelliğinde azalma meydana geldiğini bildirmiştir. Klinoptilolit tipi zeolitlerde gerçekleştirilen modifikasyonlar sonucu BET yüzey alanı hesabında en yüksek değerin 1M HCl modifiyesinde elde edildiği bildirilmiştir. H^+ 'nin çok küçük bir katyon olmakla birlikte zeolit numunesinde porların açılmasına neden olduğu, değişebilir katyonların H^+ ile yer değiştirmesi, yapı içerisindeki safsızlıkların ortadan kalkması ve zeolit içerisindeki boşluklara ulaşılması sonucunda yüzey alanında artış yaşandığı aktarılmıştır.

Literatürde yer alan başka bir modifiye yöntemi ise baz (alkali) modifiyesidir. Zeolitlerin alkali ile modifiyesi silikat oluşumuna neden olur. Bu da Si/Al oranının düşmesine ve çerçevedeki katyonların bağlı konsantrasyonunun artmasına neden olmaktadır. Çerçeve içindeki daha yüksek negatif yük nedeniyle zeolit metal adsorpsiyon kapasitesi artmaktadır [85]. Literatürde alkali modifiyesinin yer aldığı pek çok çalışma görülmüştür. Ogura ve ark. [86] yaptıkları çalışmada ZSM-5 tipi zeolit üzerinde farklı derişimlerde NaOH tedavisinin etkilerini incelemişlerdir. Alkali tedavisi sonucunda zeolit taneciklerinin dış yüzeyinde çatlaklar oluştuğu ifade edilmiştir. Zeolit üzerindeki adsorpsiyon bölgelerinin sayısında ve mikrogözeneklilik oranlarında artış yaşandığı bildirilmiştir. Ateş [87] yaptığı çalışmada Türkiye' nin farklı yörelerinden alınan DZ numuneleri

üzerinde NaOH baz modifiyesinin etkilerini araştırmıştır. Modifikasyon işlemi sonucunda DZ numunelerinin iyon değiştirme kapasitelerinin arttığı bildirilmiştir. Baz modifiyesi sonucunda zeolitlerin kristal yapısında değişiklikler meydana geldiği ifade edilmiştir. Wang ve ark. [88] farklı konsantrasyonlardaki NaOH çözeltisi ile DZ numunelerini modifiye etmiş ve etkilerini incelemişlerdir. NaOH alkali tedavisinin Si/Al oranının azaltılması ve zeolitlerin katyon değişiminin artırılması açısından etkili, ucuz ve uygulanması kolay olduğu ifade edilmiştir. NaOH ile muamele edilen zeolit numunelerinin iyon değişim kapasitelerinin, NaOH konsantrasyonunun artmasıyla birlikte kademeli olarak arttığı bildirilmiştir.

4.5. Literatür Bulguları

Bu tez çalışmasında bir dizel motorun emme hattına oksijen yoğunlaştırıcı filtre (OYF) sistemi tarafından oksijence zenginleştirilmiş hava beslenmiş, motorun emisyon ve performans değerlerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bir içten yanmalı motorun emme havasında oksijence zenginleştirilmiş hava kullanılmasına dair literatürde pek çok çalışmaya rastlanılmıştır.

- Rajkumar ve Govindarajan [89] yaptıkları çalışmada tek silindirli dizel bir motorun emme havasındaki oksijen oranını çeşitli oranlarda değiştirilmesinin motor üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yanma odasına giren oksijen oranının artmasının yanma gecikmesini %6 oranında kısalttığı, silindir içi pik basınçta %12 oranında artış ve motorun yaydığı ısı salınımında %50' lik bir artış olduğu ifade edilmiştir.
- Jeevahan ve ark. [90], tek silindirli dizel bir motor üzerinde oksijen zenginleştirmesinin emisyon ve performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Emme havasının oksijen oranının %21'den %27' ye kadar farklı oranlarda test edildiği deneylerde motorun oluşturduğu emisyonlardan CO üzerinde %65, HC ile duman emisyonlarında % 23.1 azalış ve NO_x emisyonlarında %56 oranında artış kaydedildiği bildirilmiştir. FÖYT' de %6.8 ve termik verimde %3.75 oranında iyileşme yaşandığı ifade edilmiştir.
- Zhang vd. [91] dizel bir motorun emme havasının oksijen oranını değiştirerek emisyon ve motor performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Emme havasındaki oksijen oranının artışına bağlı olarak duman emisyonlarında önemli düşüşler olduğu bildirilmiştir.
- Cacua vd. [92] dizel çevrimli biyogaz yakıtlı bir motorun emme havasının oksijen oranını değiştirilmesinin motor üzerindeki etkilerini test etmişlerdir. Yanma odasına giren oksijen oranının artmasıyla birlikte silindir içi basınç ve termal verimlilikte artış yaşandığı bildirilmiştir.
- Abdelaal vd. [93] dizel çevrimine sahip doğalgaz ve dizel yakıtlı bir motorun emme havasındaki oksijen oranını arttırarak motor performansı ve emisyonlar üzerindeki değişimleri incelemişlerdir. Farklı yükler altında test edilen motorda tüm yüklerde fren

termal veriminde artış yaşandığı kaydedilmiştir. CO, HC ve duman emisyonlarında düşüş yaşandığı ancak NO_x emisyonlarında artış olduğu ifade edilmiştir.

- Porpatham ve ark. [94], tek silindirli buji ateşlemeli biyogaz yakıtlı bir motorun emme havasını oksijence zenginleştirmişlerdir. Emme havası oksijen oranının %23 seviyesine çıkarıldığında motor gücünde %7 ve fren termal verimliliğinde %1.8' lik artış gerçekleştirdiği ifade edilmiştir. HC emisyonlarında düşüş ve NO_x emisyonlarında artış olduğu bildirilmiştir.
- Çiçek [95] çalışmasında buji ateşlemeli LPG yakıtlı bir motorun emme havasına farklı oranlarda oksijen verilmiştir. Yapılan deneylerde yanmanın iyileşmesiyle birlikte motor momenti ve gücünde artış yaşandığı, emisyon tiplerinden CO parametrelerinde düşüş kaydedildiği, NO_x ve CO₂ emisyonlarında artış yaşandığı bildirilmiştir.
- Baskar ve ark. [96], çift silindirli bir dizel motorda oksijen zenginleştirmesi ve enjeksiyon basıncının değiştirilmesinin motor performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. FÖYT' deki en büyük düşüşün, giriş havası oksijen oranının %27 olduğu esnada %11 oranında gerçekleştiği bildirilmiştir. Aynı oksijen seviyesinde NO_x emisyonlarındaki değişimin yaklaşık 4 kat artışla gerçekleştiği ifade edilmiştir. Oksijen seviyesinin artışıyla birlikte fren termal verimliliğinde artış olduğu ve mekanik verimin sabit kaldığı bildirilmiştir.
- Dinesha ve ark. [97], farklı çeşitlerde biyodizel yakıtlı dizel motorun emme havasının oksijenle zenginleştirilmesinin emisyonlara olan etkilerini incelemişlerdir. Biyodizel yakıtıyla birlikte oksijen zenginleştirme işleminin, zenginleştirme olmayan biyodizel testlerine oranla daha iyi emisyon ve performans sonuçları sağladığı bildirilmiştir. Oksijen zenginleştirmesinin biyodizel yakıtının dezavantajlarını azaltmak için uygun bir yöntem olduğunu bildirmişlerdir. Emme havasındaki oksijenin artmasının duman emisyonlarında önemli düşüşler yarattığı ifade edilmiştir.
- Hazar ve ark. [98] yaptıkları çalışmada oksijence zenginleştirilmiş havayı, dizel bir motorun emme manifolduna beslemiş, motor performansı ve emisyonları üzerindeki değişimleri incelemişlerdir. Yanma odasında oksijen varlığının artması neticesinde yanmanın iyileştiği, CO, HC ve duman emisyonlarında önemli düşüşlerin kaydedildiği ifade edilmiştir. Oksijen zenginleştirmesi ile birlikte FÖYT değerinde %7.8 oranında iyileşme olduğu bildirilmiştir.
- Sezer ve ark. [99], tek silindirli benzinli bir motora karbüratör vasıtasıyla farklı basınçlarda saf oksijen eklenmesinin motor üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yanma veriminin artmasının hedeflendiği çalışmada, motora sabit basınçta oksijen takviyesiyle birlikte motor gücünde %6 ile %18 oranı aralığında artış olduğu ifade edilmiştir. İlave oksijen verilmesiyle yanma hızı, termik verim ve yanma sonu basıncının artışına bağlı olarak motor

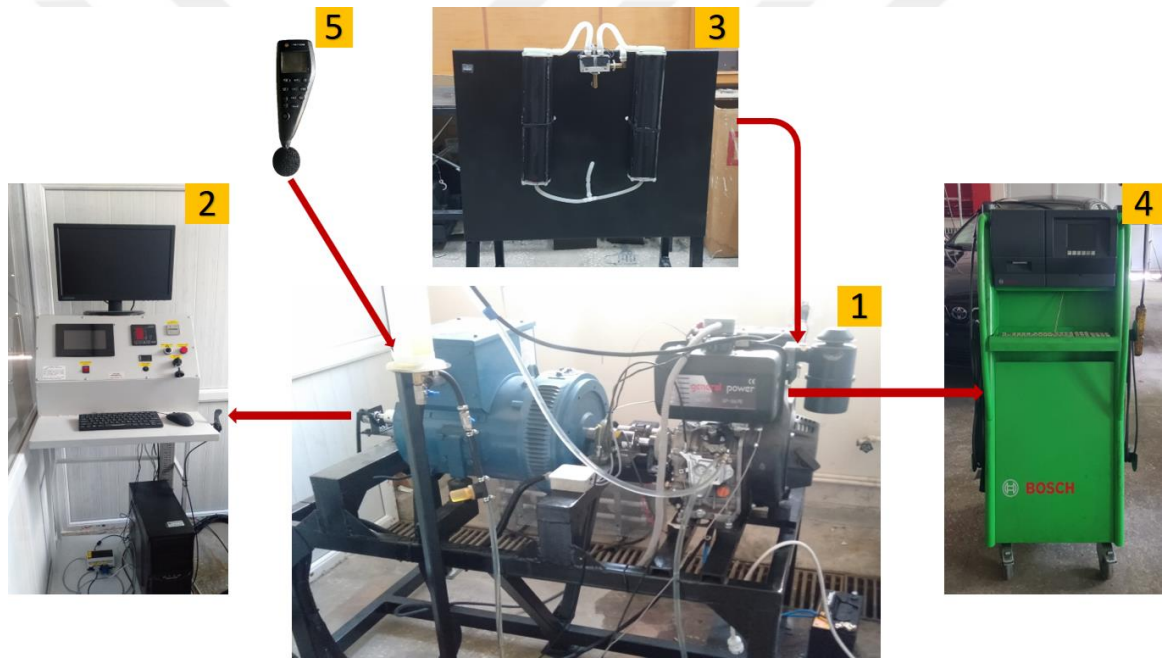
momentinde %4 ile %10 aralığında artış olduğu bildirilmiştir. Yanma veriminin iyileşmesi nedeniyle ÖYT değerinde %7.75-%11.25 aralığında düşüş gözlemlendiği aktarılmıştır.

- Subramaniam ve ark. [100], çeşitli biyodizel yakıtlarının kullanıldığı bir dizel motorun emme havasının oksijence zenginleştirilmesinin etkilerini incelemişlerdir. Biyodizel kullanılan motorun emme havasının oksijence zenginleştirilmesi sonrası FTV değerinde %8-10 arasında artış yaşandığı bildirilmiştir. Oksijen takviyesiyle birlikte HC emisyonlarında %60 oranında düşüş elde edildiği ifade edilmiştir. Oksijen zenginleştirme tekniğinin çeşitli parametrelerde iyileştirme etkisinin olduğu bildirilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalarda yanma odasındaki oksijen varlığı çeşitli oranlarda artırılmış olup motor üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmalar incelendiğinde yanma havasının oksijen oranının, harici bir oksijen kaynağından emme havasına beslenmesi suretiyle değiştirildiği görülmektedir. Bu tez çalışmasında literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, havanın bir filtre sisteminden geçirilmesi ile oksijence zengin hava elde edilmiş ve motora beslenmiştir. Havayı oksijence zenginleştirebilecek sistemde moleküler elek yeteneğine sahip zeolit malzemesi kullanılmıştır. Filtre konumundaki zeolit maddesi üzerinde çeşitli kimyasal işlemler uygulanmış ve literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

5. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında hava 6 farklı çeşitte zeolitle doldurulan OYF' den geçirilerek havadaki azot moleküllerinin seyreltilmesiyle elde edilen hacimce fazla oksijen dizel bir motora beslenmiştir. Yanma odasında fazla oksijen bulunmasını sağlayabilecek bu yöntemin dizel motor üzerindeki etkilerini öğrenmek amacıyla çeşitli ölçümler alınmıştır. Dizel motorun emisyon değerlerindeki değişimleri gözlemlemek amacıyla CO, CO₂, HC, NO_x ve duman emisyonları, performans değerlerindeki değişiklikleri anlamak amacıyla FÖYT, tork, EGS, titreşim, gürültü ve silindir içi basınç değerleri kayıt altına alınmıştır. Bu verilerin elde edilmesi amacıyla kullanılan ve tasarlanan test düzeneğinin Şekil 5.1' de şematik görüntüsü verilmiştir.



(1.Dizel Motor, 2.Bilgisayar, 3.OYF, 4.Egzoz Gazı Analiz Cihazı, 5.Gürültü Ölçer)

Şekil 5.1. Test düzeneği

Deneyin ilk aşamasında oksijen yoğunluğu yüksek havanın elde edilmesi amacıyla OYF sistemi tasarlanmıştır. İkinci aşamada tasarlanan OYF içerisine yerleştirilecek AMZ, KMZ ve LMZ' lerin modifiye işlemleri gerçekleştirilmiştir. OYF içerisine DZ, KMZ, LMZ, AMZ, 4SZ ve 5SZ yerleştirilerek oksijen yoğunlaştırma kabiliyetleri incelenmiştir. Yapılan ölçümlerde DZ kullanımında %20,9, AMZ kullanımında %23,18, KMZ kullanımında %23,65, LMZ kullanımında %24,28, 4SZ kullanımında %25,8 ve 5SZ kullanımında %27,36 oranında O₂ saflığı ürettiği tespit

edilmiştir. Üçüncü aşamada OYF' nin zenginleştirdiği havanın dizel motora verilebilmesi amacıyla emme manifoldu üzerine bir port montajı gerçekleştirilmiştir.

Diğer aşamada dizel motor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu safhada dizel motor üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmadığı standart emisyon ve performans parametre ölçümleri alınmıştır. Deneylerden önce dizel motor 20 dk rölanti devrinde çalıştırılmış ve normal çalışma sıcaklığına ulaştırılmıştır. Böylece test sonuçlarına etki edebilecek etkenlerin minimuma düşürülmesi amaçlanmıştır. Deneyler 2000 d/dk sabit devir ve değişken yük şartlarında, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 kW yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her yük şartında emisyon ve performans parametrelerinde birden fazla olması koşuluyla ölçümleri alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak parametreler üzerinde hata paylarının minimum olması amaçlanmıştır.

Bir diğer aşamada OYF' nin dizel motor ile birlikte kullanıldığı motor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen oksijence zengin hava, emme manifoldu üzerinde yer alan port vasıtasıyla dizel motora beslenmiştir. Deneyler 2000 d/dk sabit devir ve değişken yük şartlarında, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 kW yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerden önce dizel motor 20 dk rölanti devrinde çalıştırılmış ve normal çalışma sıcaklığına ulaştırılmıştır. Emisyon parametrelerinden CO, HC, NO_x ve duman yoğunluğu verileri her yük şartında birden fazla olması koşuluyla ölçümleri kayıt altına alınmıştır. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak parametreler üzerinde hata paylarının minimum olması amaçlanmıştır.

Bir diğer aşamada OYF' nin dizel motor performans değerlerine olan etkileri incelenmesi amacıyla motor performans deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden önce dizel motor 20 dk rölanti devrinde çalıştırılmış ve normal çalışma sıcaklığına ulaştırılmıştır. Deneyler 2000 d/dk sabit devir ve değişken yük şartlarında, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3 kW yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. FÖYT, tork, güç, EGS, titreşim ve gürültü değerleri ölçümleri aynı koşullarda tekrarlanmıştır. Her yük şartında birden fazla olması koşuluyla ölçümleri kaydedilmiştir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak parametreler üzerinde hata paylarının minimum olması amaçlanmıştır.

5.1. Motor Test Düzeneği Ve Ölçüm Cihazları

Yapılan çalışmada elektrikli dinamometre düzeneğine sahip motor test tezgâhı kullanılmıştır. Deney tezgâhında General Power marka, 4 zamanlı, tek silindirli, hava soğutmalı, direk enjeksiyonlu bir dizel motor bulunmaktadır. Deney tezgâhı bir bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Şekil 5.2'de test düzeneğinin görünümü verilmiştir.



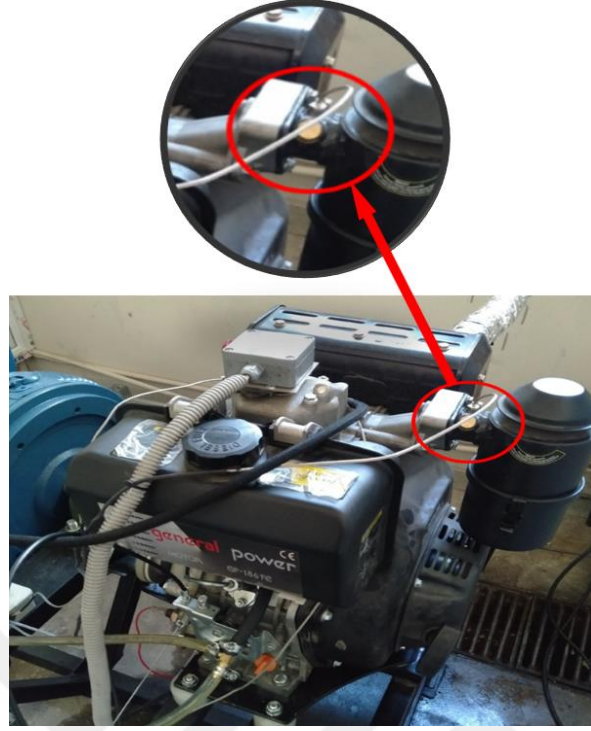
Şekil 5.2. Motor test düzeneği

Deney esnasında gerekli ölçümlerin alınabilmesi için deney tezgahı üzerine entegre halde çeşitli sensörler bulunmaktadır. Bunlar titreşim sensörü, motor sıcaklığı sensörü, silindir içi basınç sensörü ve EGS sensörüdür. Deney motoruna ait teknik özellikler Tablo 5.1’ de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deney motoru teknik özellikleri

Motor Adı	General Power CP186-FE
Strok Sayısı	4
Silindir Sayısı	1
Çap/Strok (mm)	86/70
Kurs Hacmi (cc)	406
Motor Devri (rpm)	3600
Maksimum Güç (hp)	10
Yakıt Tipi	Motorin
Soğutma Tipi	Hava Soğutmalı
Ağırlık (kg)	43

OYF sisteminin ürettiği zenginleştirilmiş havayı motora verebilmek amacıyla emme manifoldu üzerine bir port entegre edilmiştir. Şekil 5.3’de deney motoruna entegre edilen port gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Deney motoru üzerindeki zenginleştirilmiş hava portu

5.1.1. Egzoz Emisyon Ölçüm Cihazı

Deneylerde OYF sisteminin egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla Bosch marka egzoz emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz CO, HC, CO₂, duman yoğunluğu ve O₂ verilerini ölçebilmektedir. Şekil 5.4’de egzoz emisyon ölçüm cihazı gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Egzoz emisyon ölçüm cihazı

Tablo 5.2’ de egzoz emisyon cihazının özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.2. Egzoz emisyon cihazı özellikleri

Veriler	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Hassasiyeti
HC	0-9.999 ppm	1 ppm
CO	0-10 %	0.001 %
NO _x	0-5000 ppm	≤ 1 ppm
CO ₂	0-18 %	0.01 %
O ₂	0-21.7 %	0.01 %

5.1.2. Gürültü Ölçüm Cihazı

OYF sisteminin dizel motor üzerindeki etkilerini öğrenmek amacıyla deneylerde Testo marka gürültü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.5’ de cihazın görüntüsü, Tablo 5.3’ de ise cihazın teknik özellikleri verilmiştir.

**Şekil 5.5.** Gürültü ölçer**Tablo 5.3.** Gürültü ölçerin özellikleri

Ölçüm Aralığı	30-130 dB
Hassasiyet	±1.4 dB
Frekans Aralığı	20 Hz-8 kHz
Ölçüm Sıklığı	0.5 sn
Hafıza kapasitesi	31.000 adet
Güç Kaynağı	4 adet AA pil
Çalışma Sıcaklığı	0...+40 °C
Ağırlık	390 gr

5.2. Oksijen Yoğunlaştırıcı Filtre (OYF)

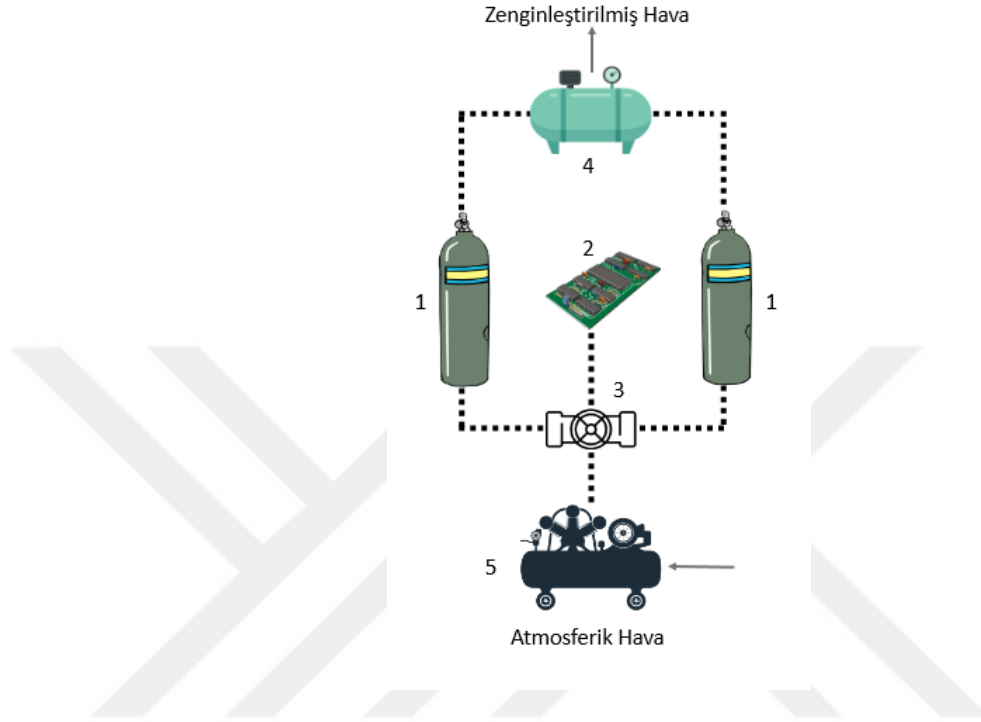
Çalışmada oksijen zengin havayı üretebilecek bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sisteme oksijen yoğunlaştırıcı filtre (OYF) adı verilmiştir. Oluşturulan sistem bir adet kompresör, iki adet kolon, ürün toplama tankı, valf ve kontrol kartından oluşmaktadır. Şekil 5.6'de tasarlanan OYF sistemi gösterilmektedir.



Şekil 5.6. OYF sistemi

OYF sisteminde havadaki azot moleküllerinin seyreltilmesiyle oksijen zengin hava elde edilmektedir. Tasarlanan OYF sistemi, uzun yıllardır gaz saflaştırma işlemlerinde kullanılan PSA (Pressure Swing Adsorption) yöntemine dayalı olarak çalışmaktadır. Bu yöntemle basınç altında azot moleküllerinin tutulup oksijen moleküllerinin açığa çıkarılması sağlanmaktadır. Havayı basınçlandırmak amacıyla bir kompresör, basınçlandırılan havanın tutulduğu 2 adet tüp, havanın yönlendirilmesi için bir elektronik vana ve devre kartı OYF sistemini oluşturmaktadır. Tasarlanan OYF sisteminin çalışma döngüsü iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada kompresör atmosferik havayı valfe gönderir. Valf, kontrol kartından aldığı emirle havayı içerisinde zeolit bulunan kolonlardan herhangi birisine gönderir. Kompresör, zeolit kolona gönderdiği havayı basınçlandırır. Kolon içerisindeki zeolitler, azot moleküllerini adsorbe ederek oksijen yoğunluğunun artmasını sağlar. Kolondaki hava yaklaşık 5s kalır. Daha sonra oksijen, ürün toplama tankına gönderilir. Birinci aşamanın sonunda valf yön değiştirerek kompresörün gönderdiği havayı diğer zeolit kolonuna yönlendirir. Aynı esnada birinci kolonun basıncı düşer ve azot molekülleri atmosfere salınır. İkinci aşamada ise aynı işlem diğer zeolit kolonunda gerçekleşmektedir. Ürün toplama tankından alınan zenginleştirilmiş hava, dizel motor üzerinde yer alan port vasıtasıyla emme

manifoldundan yanma odasına gönderilmiştir. Yanma odasına giren oksijen moleküllerinin miktarının artmasının dizel motor üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 5.7’de OYF sisteminin şematik hali verilmiştir.



(1. Zeolit Kolonları, 2. Kontrol Kartı, 3. Valf, 4. Ürün Toplama Tankı, 5. Kompresör)

Şekil 5.7. OYF sistemi şematik gösterimi

5.3. Deneylerde Kullanılan Zeolitler

OYF, azot moleküllerini adsorbe ederek havadaki oksijen yoğunluğunu arttırmayı sağlayan bir yöntemdir. OYF’ de adsorbent olarak hazır satın alınan ve üzerinde çeşitli modifikasyonlar uygulanan DZ’ ler kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında doğal zeolit (DZ), asit modifiye zeolit (AMZ), lityum modifiye zeolit (LMZ), kalsiyum modifiye zeolit (KMZ), 4A sentetik zeolit (4SZ) ve 5A sentetik zeolit (5SZ) olmak üzere 6 farklı çeşitte zeolit adsorbent kullanılmıştır.

5.3.1. Doğal Zeolit (DZ)

Çalışmada doğal zeolit (DZ) türlerinden klinoptilolit tipi doğal zeolit kullanılmıştır. Bu türün tercih edilme nedeni, Türkiye’de oldukça fazla madeni yatakların bulunması [101], ekonomik olmaları [81] ve hava kirletici olarak nitelendirilen gazları adsorplayıcı yeteneğe sahip olmalarıdır

[102]. Klinoptilolit bir diğ er önemli tercih nedeni oksijen zenginleştirme yeteneğine sahip olmasıdır [60].

Çalışmada kullanılan DZ, Manisa-Gördes yöresinde faaliyet gösteren Rota Madencilik firmasından temin edilmiştir. Satın alınan zeolit n fraksiyon çapı 1.6-3 mm arasında olup %90-95 arası saflık oranıyla klinoptilolit türü DZ olduğu belirtilmiştir [103]. şekil 5.8’de farklı tanecik boyutlarına sahip DZ numuneleri gösterilmektedir.



şekil 5.8. Farklı tanecik çaplarındaki doğal zeolit

Satın alınan DZ’lerin OYF sisteminde oksijen yoğunlaştırma kabiliyetinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli işlemler uygulanmıştır. İlk aşamada zeolitlerin tanecik çaplarının uygun boyuta getirilmesi amacıyla değirmende kırma işlemi, kırılan zeolit taneciklerinin üniform boyutlara ayrılması amacıyla eleme işlemi uygulanmıştır. Elde edilen zeolitler hava almayan desikatörlerde muhafaza edilmiştir.

Zeolitler üzerinde kırma-eleme işlemleri, İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. şekil 5.9’ da eleme ve değirmen makinelerine ait bir kesit verilmiştir.



Şekil 5.9. (a) Eleme (shaker) ve (b) değirmen

Diğer aşamada DZ içerisinde bulunan su moleküllerini uçurmak amacıyla kalsinasyon işlemi uygulanmıştır. DZ' ler 550 °C 'deki kül fırını içerisinde 4 saat kalsine edilmiştir. Böylece DZ' nin OYF üzerinde kullanılabilir hali elde edilmiştir. Şekil 5.10' da kalsine edilen DZ gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Kalsine zeolit

5.3.2. Asit Modifiye Zeolit (AMZ)

Çalışmada kullanılan diğer zeolit türü asit modifiyeli zeolittir (AMZ). Yapısal durumlarını iyileştirmek amacıyla zeolitler üzerinde kuvvetli asit olarak nitelendirilen sülfürik asit (H_2SO_4) ile muamele gerçekleştirilmiştir. Asit ile muamele edilen zeolitlerin mikro-makro gözeneklerinin

sayısı ve dolayısıyla özgül yüzey alanı arttırılabildiği ifade edilmiştir [81]. Çalışmada kullanılan sülfürik asidin teknik özellikleri Tablo 5.4’ de verilmiştir.

Tablo 5.4. Sülfürik asidin teknik özellikleri

Kimyasal Adı	Sülfürik Asit (H ₂ SO ₄)
CAS NO	7664-93-9
Kimyasal Formülü	H ₂ SO ₄
Saflık (%)	97.2
Yoğunluk	1.836
Kaynama Noktası (°C)	310
Molekül Ağırlığı (g/mol)	98.079

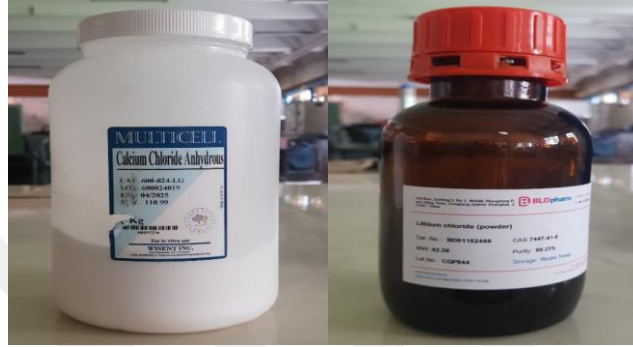
Deneyssel çalışmada 0.85-1.18 mm aralığındaki tanecik boyutlu kalsine edilen DZ’ ler kullanılmıştır. Asit modifiye işlemi için 1L’lik 2N H₂SO₄ çözeltisi içerisine 100 g zeolit eklenmiş, manyetik karıştırıcılı yuvalı ısıtıcıda geri soğutucu altında 98 °C’ de 2 saat kaynatılmıştır. Elde edilen zeolitler süzölmüş ve kaynama sıcaklığındaki saf su ile 2-3 kez yıkanmıştır. Daha sonra zeolitler 110 °C sıcaklıktaki etüv fırınında 16 saat kurumaya bırakılmıştır. Böylece AMZ elde edilmiştir [82].

5.3.3. İyon Değiştirilmiş Zeolit (İDZ)

Çalışmada asit ile modifiye edilen zeolitler (AMZ) üzerinde yapılarının iyileştirilmesi amacıyla kalsiyum (Ca) ve lityum (Li) iyon değişimi gerçekleştirilmiştir. Zeolit yapısında her bir alüminyum (Al) atomu, değişebilir bir katyonla (Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, vs.) dengelenmesi gereken bir negatif yük getirir. Çerçeve içinde bulunan değişebilir katyonlar, zeolitlerin adsorpsiyon ve termal özelliklerinde çok önemli bir rol oynamaktadır [78]. İyon değişimi ile zeolitlerin özgül yüzey alanı, özgül hacim, gözenek çapı gibi değerlerin değişmesi mümkündür.

Zeolitler üzerinde iki farklı element ile iyon değişimi yapılmıştır. Kalsiyum modifiye zeolit (KMZ) formunun hazırlanması için, asit ile modifiye edilen zeolit numunelerinden 100g zeolit 1L 0.5N Ca çözeltisi içerisinde, manyetik karıştırıcılı yuvalı ısıtıcıda geri soğutucu altında 98 °C’ de 2 saat kaynatılmıştır. Elde edilen zeolitler süzölmüş ve kaynama sıcaklığındaki saf su ile 2-3 kez yıkanmıştır. Daha sonra zeolitler 110 °C sıcaklıktaki etüv fırınında 16 saat kurumaya bırakılmıştır. Böylece zeolitın kalsiyum modifiye hali elde edilmiştir [82].

Zeolitlerin lityum formunun (LMZ) hazırlanması için asit ile modifiye edilen zeolit numunelerinden 100g zeolit 1L 0.1N Li çözeltisi içerisinde, manyetik karıştırıcılı yuvalı ısıtıcıda geri soğutucu altında 98 °C’ de 2 saat kaynatılmıştır. Elde edilen zeolitler süzölmüş ve kaynama sıcaklığındaki saf su ile 2-3 kez yıkanmıştır. Daha sonra zeolitler 110 °C sıcaklıktaki etüv fırınında 16 saat kurumaya bırakılmıştır. Böylece zeolitlerin lityum modifiye hali elde edilmiştir. İyon değişimi için kullanılan kimyasallar Şekil 5.11’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Kalsiyum klorür (CaCl_2) ve lityum klorür (LiCl)

Deneylerde manyetik karıştırıcılı yuvalı ısıtıcı, şilifli cam balon ve geri soğutucu kullanılmıştır. Zeolit numuneleri üzerinde gerçekleştirilen tüm modifikasyon işlemleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarları’nda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.12’ de zeolit modifiye işlemlerinin yapıldığı bir kesit verilmiştir.



Şekil 5.12. Zeolit modifikasyon ekipmanları

5.3.4. Sentetik Zeolit (SZ)

OYF' nin oksijen yoğunluklu hava üretebilmesi amacıyla içerisine adsorbent olarak boncuk formuna sahip, 1.6-2.6 mm boyut aralığında 4A ve 5A sentetik tipi zeolit kullanılmıştır. SZ' ler DZ' lere oranla yüksek maliyetlidir. Bunun sebebinin SZ' lerin laboratuvar ortamlarında hizmet edeceği amaca uygun şekilde sentezlenmesinin olduğu düşünülmektedir. 4A ve 5A tip SZ tercih edilmesinin ana sebebi, karıştırılmış gaz akımlarından yüksek saflıkta O₂, N₂ ve H₂ gazlarının üretiminde kullanılabilmesidir [63]. Literatürde bu tip SZ' lerin hava ayırma işlemlerinde de kullanıldığı görülmüştür [72].

Deneylerde kullanılmak üzere ticari olarak satın alınan boncuk formuna sahip SZ' ler Şekil 5.13' de gösterilmektedir.



Şekil 5.13. Ticari olarak satın alınan sentetik zeolit

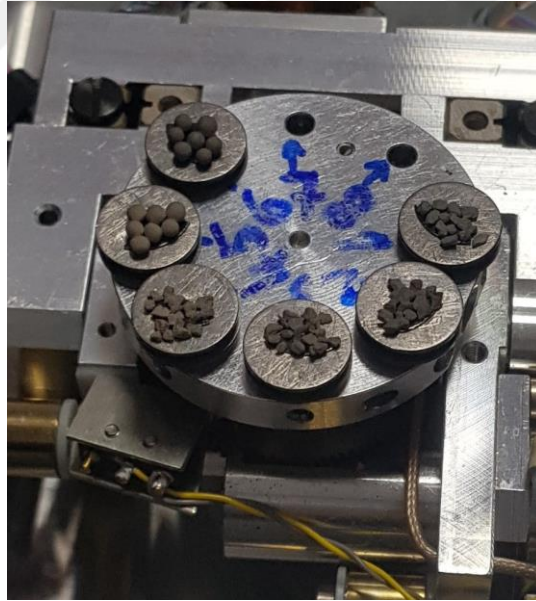
5.4. Taramalı Elektron Mikroskonu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X Işınları Spektrometresi (EDX)

Zeolitlerin yapısı hakkındaki incelemeler İnönü Üniversitesi İBTAM bünyesinde bulunan LEO EVO 40 marka model Scanning Electron Microscope (SEM) cihazıyla gerçekleştirilmiştir. SEM cihazı ile zeolit numuneleri üzerinde yapısal analizler yapılmıştır. Cihaz üzerinde entegre bulunan Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (EDX) yöntemiyle zeolit numuneleri üzerinde elementel analizler yapılmıştır. Şekil 5.14'de SEM cihazı gösterilmektedir.



Şekil 5.14. SEM cihazı

Zeolit numunelerine, SEM cihazına yerleştirilmeden önce kaplama cihazında altın kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.15’ de altın kaplama işlemi sonrası zeolit numunelerinin görüntüsü verilmiştir.



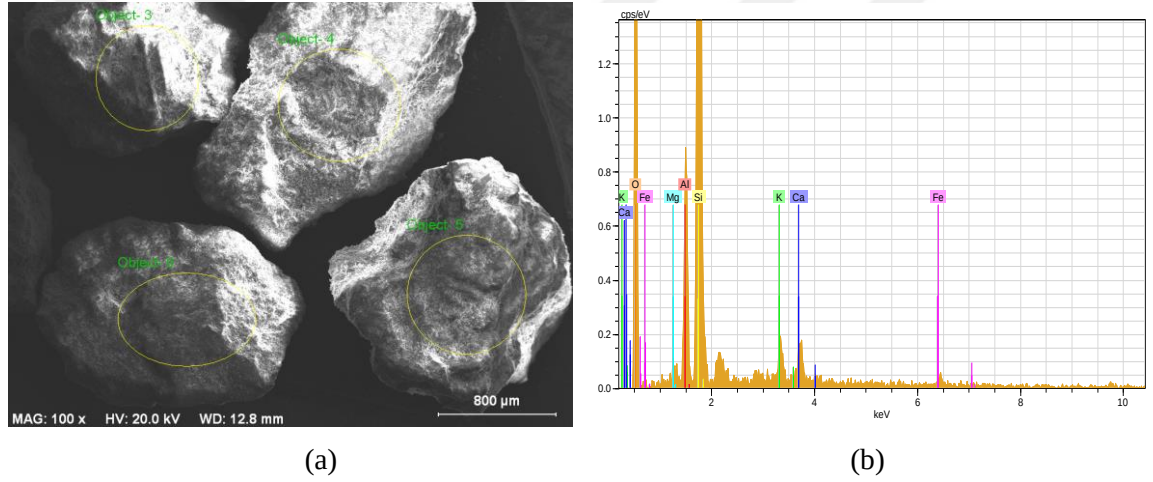
Şekil 5.15. Altın kaplama işlemi sonrası zeolit numunelerinin görünüşleri

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

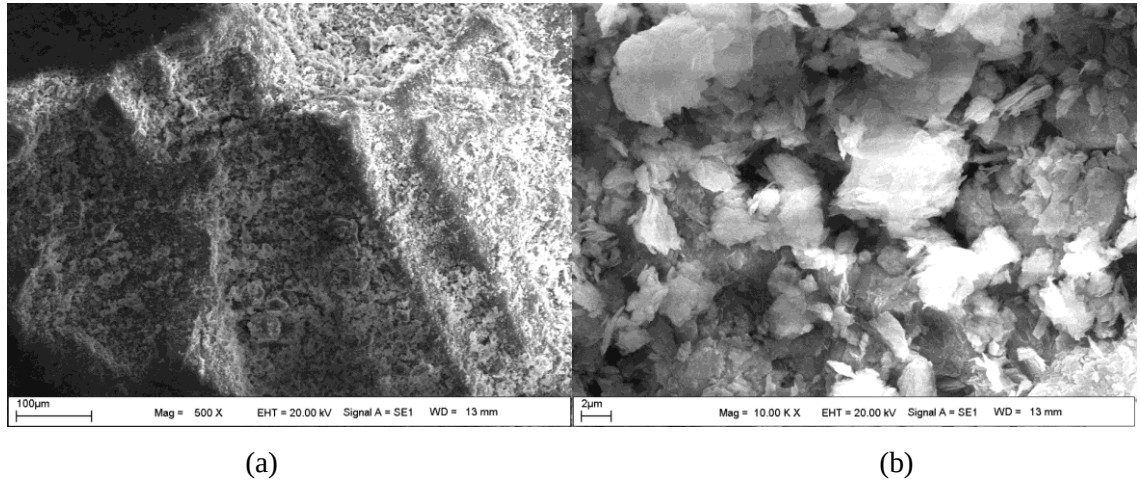
6.1. Zeolitlerin SEM ve EDX Analizleri

6.1.1. Doğal Zeolit (DZ)

Klinoptilolit türü DZ' nin Şekil 6.1 (a)'da 100 kat büyütülmüş SEM görüntüsü, Şekil 6.1 (b)'de ise aynı taneciklerin EDX spektrum görüntüsü verilmiştir. EDX analiz verilerine göre DZ' nin ağırlıkça %60.63 O, %21.1 Si, %4.07 Al, %1.53 Ca, %1.25 Fe, %1.21 K ve %0.25 oranında Mg atomlarından oluşmaktadır. DZ' nin Si/Al oranı 5.18'dir. Şekil 6.2' de DZ' nin farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri gösterilmektedir.



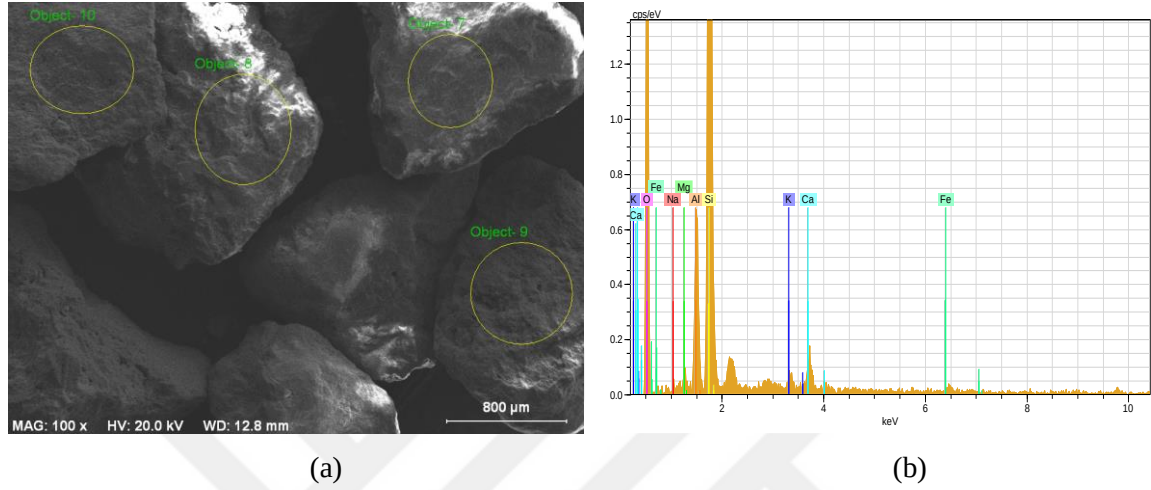
Şekil 6.1. DZ' nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu



Şekil 6.2. DZ' nin (a) 500X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri

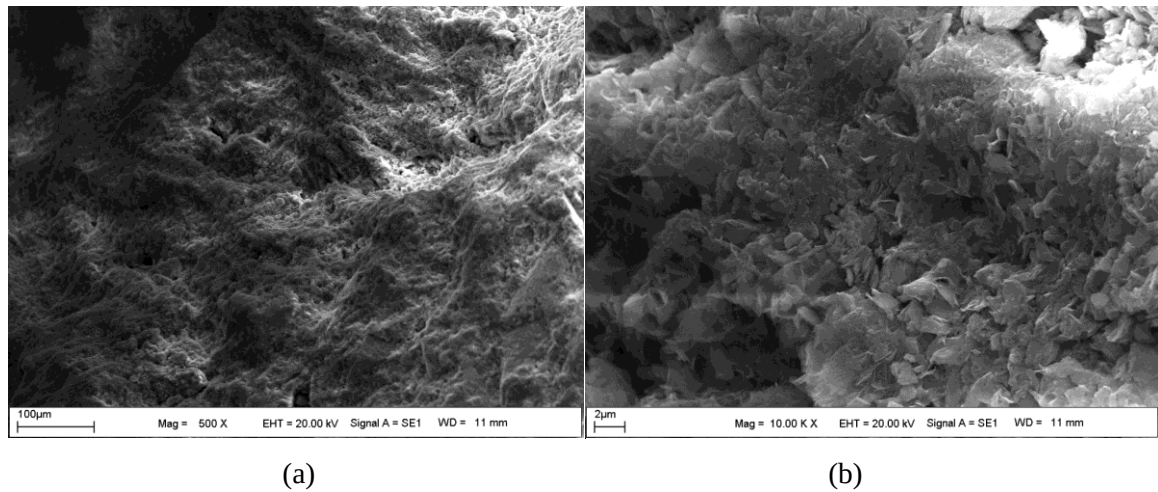
6.1.2. Asit Modifiye Zeolit (AMZ)

Çalışmada DZ üzerinde asit ile uygulanan muamele sonucu asit modifiye zeolit (AMZ) elde edilmiştir. Asidin DZ üzerindeki etkilerini öğrenmek amacıyla SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Alınan verilere göre DZ üzerinde fiziksel ve kimyasal etkiler olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.3’ de AMZ’ nin SEM görüntüsü ve EDX spektrumu verilmiştir.



Şekil 6.3. AMZ’ nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu

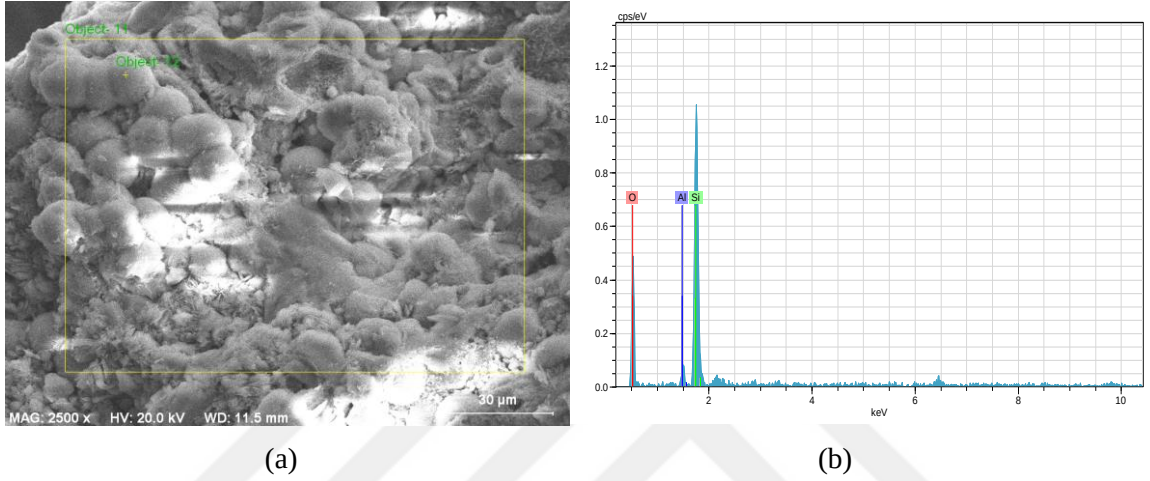
EDX verileri incelendiğinde AMZ’ nin ağırlıkça %66.67 O, %24.95 Si, %4.58 Al, %1.51 Ca, %1.31 Fe, %0.59 K, %0.29 Mg ve %0.09 Na içerdiği tespit edilmiştir. Asit ile muamele sonucunda DZ’ nin Si/Al oranı 5.44’e yükseldiği, DZ’ ye oranla artış olduğu görülmüştür. Görüntüler incelendiğinde kuvvetli asit muamelesi sonucunda zeolit yüzey yapısında değişiklikler oluşturduğu görülmektedir. Asit muamelesinin zeolit yüzeyinde gözenekli yapıyı arttırdığı düşünülmektedir. Şekil 6.4’ de AMZ’ nin farklı oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 6.4. AMZ’ nin (a) 500X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri

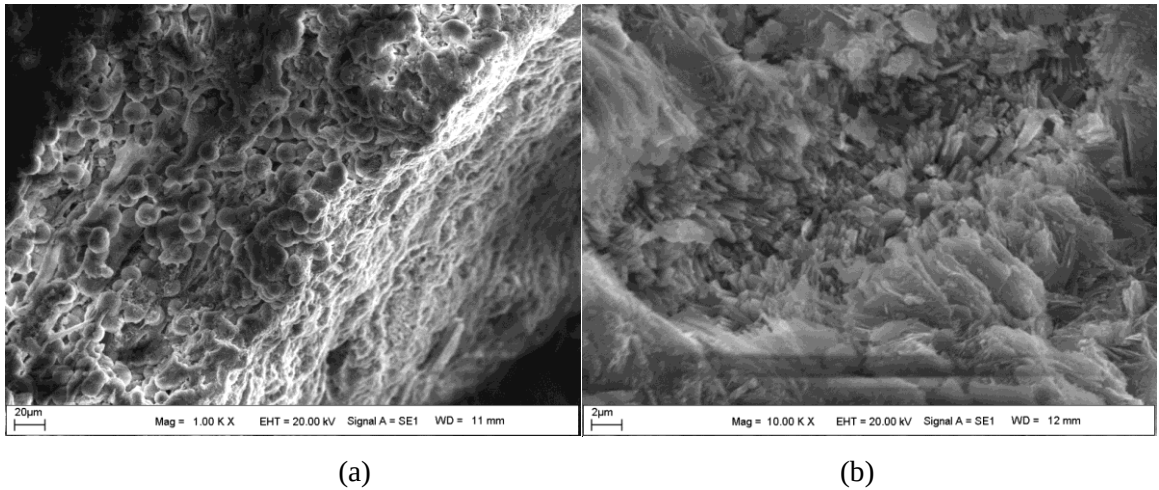
6.1.3. Kalsiyum Modifiye Zeolit (KMZ)

Bu tez çalışmasının deney aşamasında kullanılan bir diğer zeolit çeşidi kalsiyum modifiye zeolittir (KMZ). Asit ile muamele edilen DZ'lerin tekrar kalsiyum klorür (CaCl_2) çözeltisi ile modifiye edilmesi yoluyla elde edilmiştir. Kalsiyum modifiye işleminin zeolit üzerindeki etkilerinin öğrenilmesi amacıyla SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Şekil 6.5' de KMZ'lerin SEM görüntüsü ve EDX spektrum analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.5. KMZ' nin (a) 2500X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu

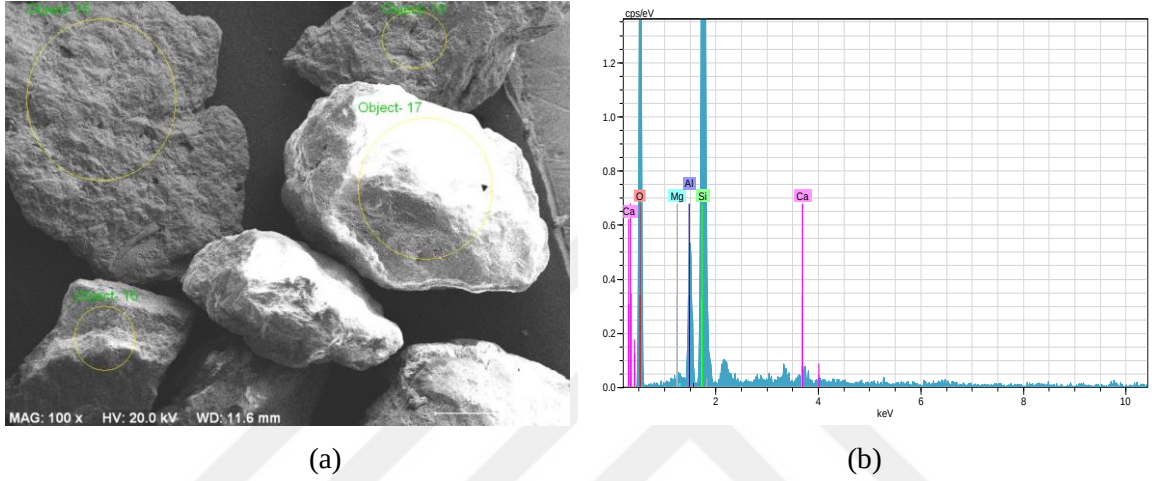
EDX verileri incelendiğinde KMZ' nin ağırlıkça %56.23 O, %42.73 Si ve %1.04 oranında Al atomları içerdiği tespit edilmiştir. KMZ' nin Si/Al oranı 41.08'dir. DZ' ye oranla Si/Al oranı yaklaşık 7 kat artmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde kalsiyum modifiyesinin zeolitın fiziksel yüzeyinde değişiklikler yarattığı görülmektedir. Şekil 6.6' da KMZ' nin farklı oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.6. KMZ' nin (a) 1000X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri

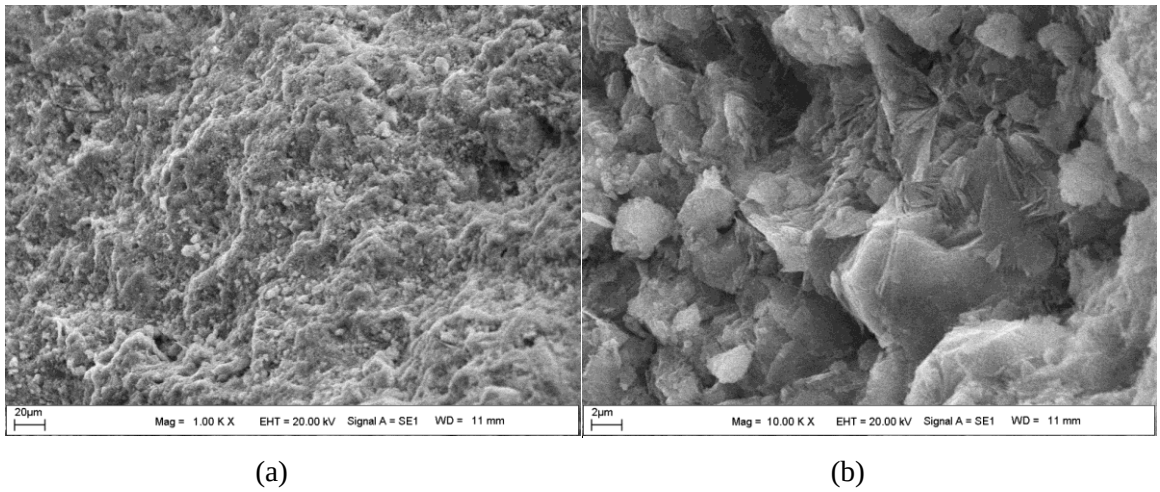
6.1.4. Lityum Modifiye Zeolit (LMZ)

Deneyisel çalışmalarda kullanılan diğer zeolit çeşidi lityum modifiye zeolittir (LMZ). Asitle modifiye edilen DZ' lerin lityum klorür (LiCl) çözeltisi ile tekrar modifiye edilmesi ile LMZ elde edilmiştir. Lityum modifiye işleminin zeolitler üzerindeki etkilerinin öğrenilmesi amacıyla SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Şekil 6.7' de LMZ' lerin SEM görüntüsü ve EDX spektrum analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.7. LMZ' nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu

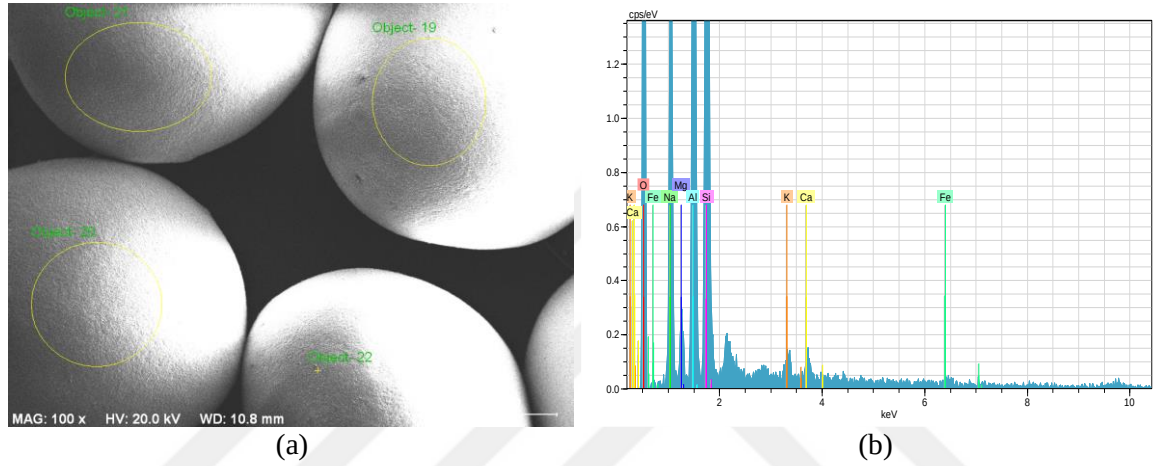
EDX verileri incelendiğinde LMZ' nin ağırlıkça %70.19 O, %25.08 Si, %3.76 Al, %0.83 Ca ve %0.13 Mg atomları içerdiği tespit edilmiştir. LMZ' nin Si/Al oranı 6.67' dir. Lityum modifiyesinin zeolit yüzeyinde çeşitli etkiler bıraktığı tespit edilmiştir. Şekil 6.8' de LMZ' nin farklı oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.8. LMZ' nin (a) 1000X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri

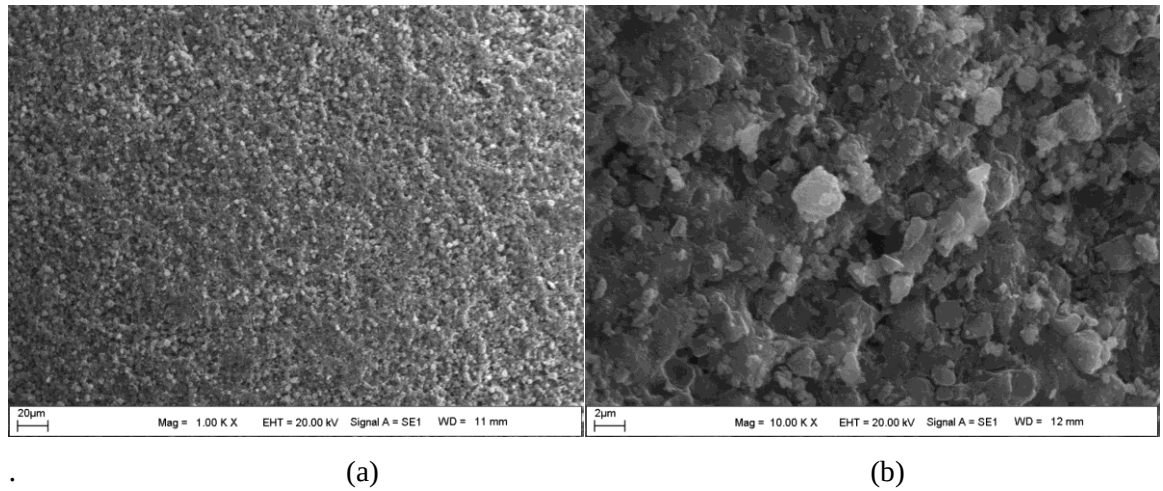
6.1.5. 4A Sentetik Zeolit (4SZ)

Bu çalışmada oksijence zenginleştirilmiş havanın elde edilmesi amacıyla, ticari olarak satılan 4A sentetik zeolit (4SZ) kullanılmıştır. SZ' ler DZ' lere kıyasla yüksek özgül yüzey alanına ve düzenli kanal yapılarına sahiptirler. N₂ gazına karşı seçiciliği nedeniyle tıp sektöründe oksijen üretiminde 13X HP tipi SZ' ler daha çok tercih edilmektedir. Deneylerde OYF içerisine 4SZ yerleştirilerek oksijen yoğunlaştırma hedeflenmiştir. Şekil 6.9' da 4SZ' lerin SEM görüntüsü ve EDX spektrum analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.9. 4SZ' nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu

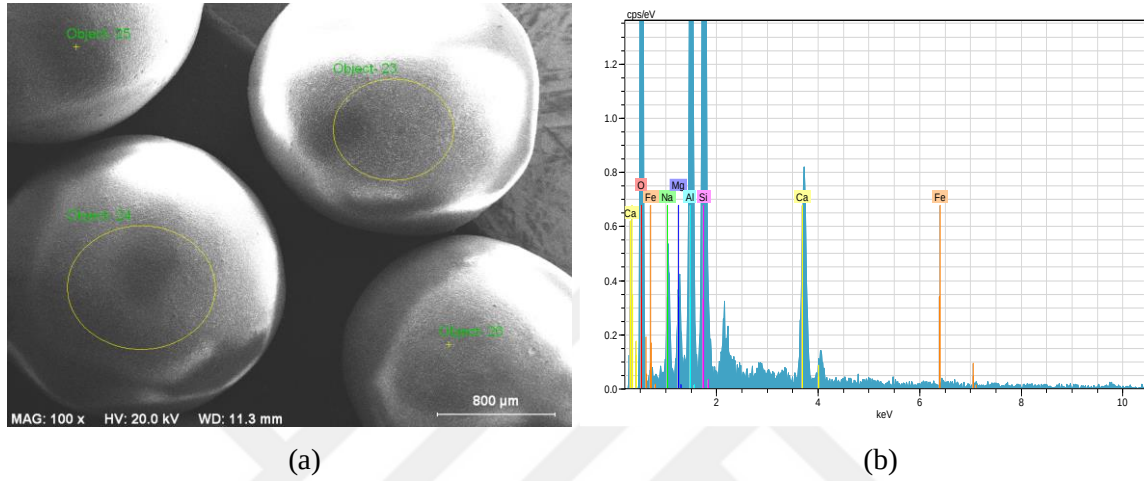
EDX verileri incelendiğinde 4SZ' nin ağırlıkça %54.35 O, %15.37 Si, %12.4 Al, %10.61 Na, %1.05 Fe, %0.94 Mg, %0.6 Ca ve K atomları içerdiği tespit edilmiştir. 4SZ' nin Si/Al oranı 1.23' tür. Şekil 6.10' da 4SZ' nin farklı oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.10. 4SZ' nin (a) 1000X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri

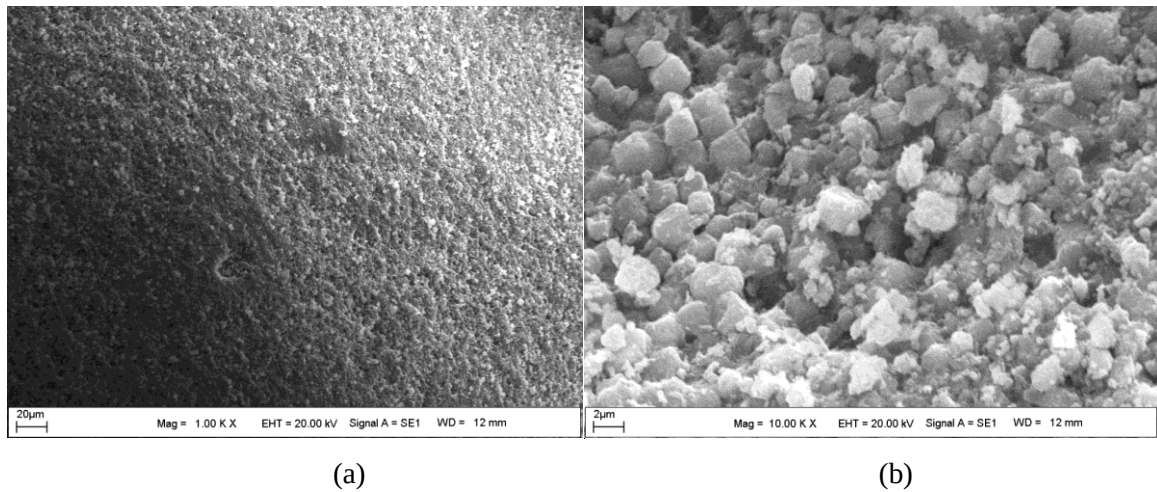
6.1.6. 5A Sentetik Zeolit (5SZ)

Deneylerde kullanılan SZ çeşitlerinden bir diğeri 5A sentetik zeolittir (5SZ). Bu zeolit çeşidi ticari olarak satın alınmıştır. Farklı amaçlarda kullanımı olan bu zeolit tipinin oksijen yoğunlaştırma kapasitesi incelenmiştir. Şekil 6.11’ de 5SZ’ lerin SEM görüntüsü ve EDX spektrum analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.11. 5SZ’ nin (a) 100X büyütmede SEM görüntüsü ve (b) EDX analiz spektrumu

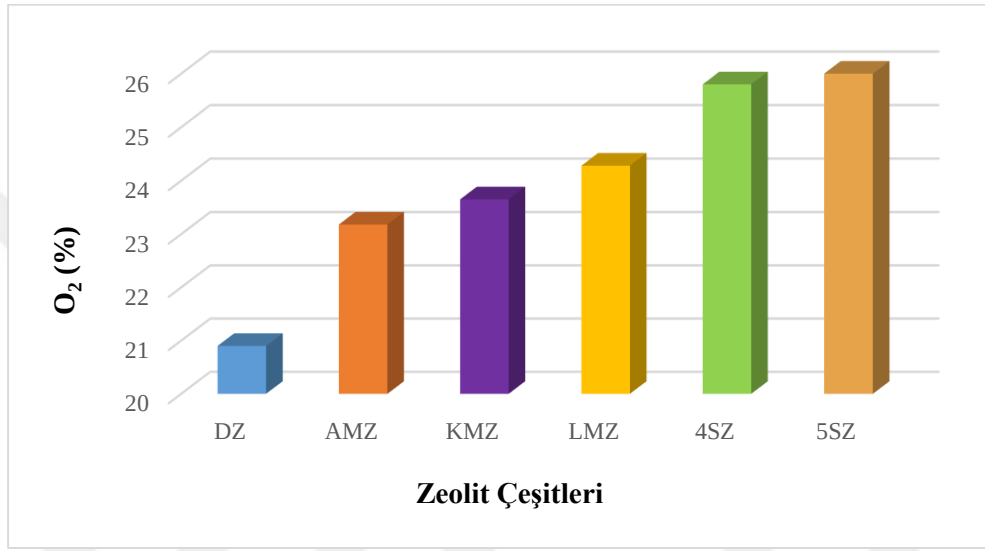
EDX verileri incelendiğinde 5SZ’ nin ağırlıkça %59.76 O, %16 Si, %12.64 Al, %5.99 Ca, %3.06 Na, %1.83 Mg ve %0.71 Fe atomları içerdiği tespit edilmiştir. 5SZ’ nin Si/Al oranı 1.26’ dır. Şekil 6.12’ de 5SZ’ nin farklı oranlarda büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.12. 5SZ’ nin (a) 1000X, (b) 10.000X büyütmede SEM görüntüleri

6.2. OYF' nin Oksijen Yoğunlaştırma Kapasiteleri

OYF, PSA yöntemine dayalı olarak havanın kapalı bir sistemde basınçlandırılıp, havadaki azot moleküllerinin adsorbe edilmesiyle oksijen yoğunluğu fazla havanın üretilmesini amaçlamaktadır. OYF içerisinde adsorbent olarak 6 farklı zeolit çeşidi kullanılmıştır. Her bir zeolit çeşidi, zeolit kolonlarına ayrı ayrı yerleştirilerek oksijen yoğunlaştırma yetenekleri ölçülmüştür. Şekil 6.13' de zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma oranları verilmiştir.



Şekil 6.13. Zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma oranları

OYF çıkışındaki havanın O₂ oranlarının DZ kullanımında % 20.99, AMZ kullanımında %23.18, KMZ kullanımında %23.65, LMZ kullanımında 24.28, 4SZ kullanımında %25.8 ve 5SZ kullanımında %27.36 oranında olduğu tespit edilmiştir.

DZ' nin oksijen yoğunlaştırma kapasitesi %20.99 olarak ölçülmüştür. Deneylerin gerçekleştirildiği ortamdaki oksijen oranının %20.98 olduğu tespit edilmiş olup DZ' nin belirgin bir oksijen yoğunlaştırması gerçekleştiremediği görülmüştür. DZ üzerinde kalsinasyon işlemi haricinde herhangi bir modifiye işlemi yapılmamıştır. DZ üzerinde yapılan modifikasyonlar sonucunda zeolit mikrogözenek alan ve hacimlerinde artışa bağlı olarak zeolit adsorpsiyon yetenekleri geliştirildiği bilinmektedir [76]. DZ ile elde edilen sonucun sebebinin, kalsinasyon işlemi sonucunda yüzey alanının ve gözenek hacminin azot adsorpsiyonu için yetersiz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

AMZ ile ölçülen maksimum oksijen yoğunlaştırma oranı %23.18' tir. AMZ, DZ' ye oranla %10.4 daha fazla oksijen yoğunlaştırmıştır. Asit ile modifiye edilen zeolitlerin özellikleri asit derişimine, temas süresine ve çözelti sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Asit modifiyesinin zeolit numunlerinde porların açılmasına, yapı içerisindeki safsızlıkların ortadan kalkmasına ve

zeolit içerisindeki boşlukların artmasına neden olduğu ifade edilmiştir [84]. Asit muamelesiyle DZ' nin, gözenek hacmi ve alanının arttığı ve bununla birlikte azot adsorpsiyon kapasitesinin iyileştiği bildirilmiştir [104]. AMZ' nin oksijen yoğunlaştırma yeteneğinin DZ' ye oranla daha yüksek olmasının nedeninin, yapısal özelliklerinin gelişmesi olduğu düşünülmektedir.

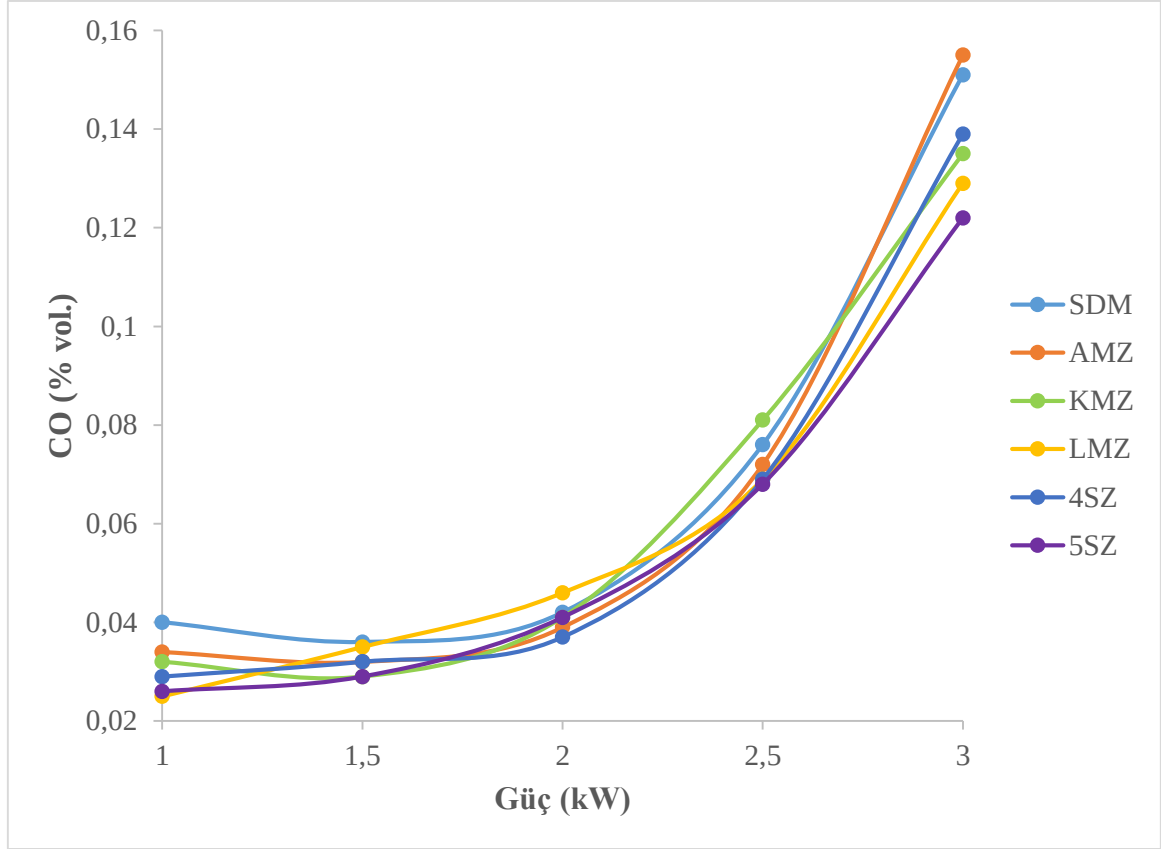
KMZ kullanımıyla OYF çıkışından %23.65 oranında oksijen yoğunluğu elde edilmiştir. Bu oran, DZ' ye göre %12.7 daha fazladır. LMZ kullanımında ise %24.28 oranında oksijen yoğunluğu tespit edilmiştir. DZ ile LMZ' nin oksijen yoğunlaştırma kapasiteleri incelendiğinde LMZ kullanımında %15.7 daha fazla oksijen yoğunluğu elde edilmiştir. Literatürde yer alan [66] çalışmada iyon değişimi sonucunda zeolitlerin gözenek çaplarının değiştiği, adsorpsiyon ve moleküler eleme yeteneklerinin iyileştirildiği ifade edilmiştir [66].

OYF' de adsorbent olarak kullanılan diğer zeolit çeşitleri, hazır olarak satın alınan 4A (4SZ) ve 5A (5SZ) sentetik zeolitleridir. 4SZ kullanımında OYF çıkışında %25.8 ve 5SZ kullanımında ise %27.36 oranlarında oksijen yoğunluğu ölçülmüştür. SZ' ler DZ' lere oranla daha yüksek oranda oksijen yoğun hava üretmiştir. Bunun sebebinin SZ' lerin büyük yüzey alanına sahip olması sebebiyle azot moleküllerini daha fazla adsorbe ettiği düşünülmektedir. Oksijen üretiminde kullanılan SZ' lerin Si/Al oranı genel olarak 1 veya 1'e yakın olduğu görülmüştür. Düşük silika oranlı SZ' ler yapısında daha fazla Al atomu içermektedir ve adsorpsiyon kabiliyetinin daha yüksektir. Düşük Si/Al oranının özgül yüzey alanıyla ilişkili olduğu bildirilmiştir [105]. Si/Al oranının düşmesiyle zeolitin adsorpsiyon kapasitesinin artmasının birbiriyle ilişkili olduğu ifade edilmiştir [73].

6.3. Motor Deneyleri Sonuçları

6.3.1. Karbonmonoksit (CO)

CO emisyonları düşük motor yüklerinde, düşük yerel silindir içi sıcaklıkları ve zayıf H/Y karışımı bölgelerinde yanma reaksiyonlarının kararsız kalması nedeniyle oluşmaktadır. Diğer bir neden ise motor yüklerinin yüksek olduğu esnada yakıtın zenginleşmesi ve karbonun tamamını karbondioksit'e dönüştürecek oksijenin bulunmamasıdır [106]. Yanma odasındaki karışımlarda daha fazla oksijen içeriği, yakıt açısından zengin bölgelerdeki oksijen-yakıt oranını artırır ve bu da daha iyi bir ön karışımli yanmaya yol açar. Bu, daha fazla karbon molekülünün yanmasına izin verir ve CO gazı yerine CO₂ gazı açığa çıkarak daha tam bir yanmaya neden olur [107]. Dizel motorlarda CO emisyonları benzinli motorlara oranla daha az üretilmektedir. Bunun sebebinin dizel motorların hava fazlalığı ile çalışacak şekilde tasarlanmış olmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 6.14' de farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin CO emisyonu değerlerine etkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.14. CO değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

Grafik incelendiğinde motor yükünün artmasıyla birlikte CO emisyonları önce yatay bir seyir izlemiş ve ardından yükseliş göstermiştir. Düşük motor yüklerinde silindir içi sıcaklığa bağlı olarak yanma veriminin düşük kalması, CO₂ oluşum reaksiyonlarını olumsuz etkilediği ve CO emisyonu oluşumunu arttırdığı düşünülmektedir. Motor yükünün artmasıyla beraber CO emisyonlarında artış olduğu görülmektedir. Motor yükünün silindir içi sıcaklık ile yanma verimini arttırdığı bilinmektedir ve bununla birlikte CO emisyonlarında düşüş beklenmektedir. Ancak motor yükünün artışıyla birlikte silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarının artmasının yerel zengin karışım bölgeleri oluşturduğu, yeterli oksijen bulunamaması sonucu CO' nun CO₂' ye dönüşmemesi sonucu CO emisyonlarında artış yaşandığı düşünülmektedir. Literatürde buna benzer sonuçların yer aldığı çalışmalar bulunmaktadır [108].

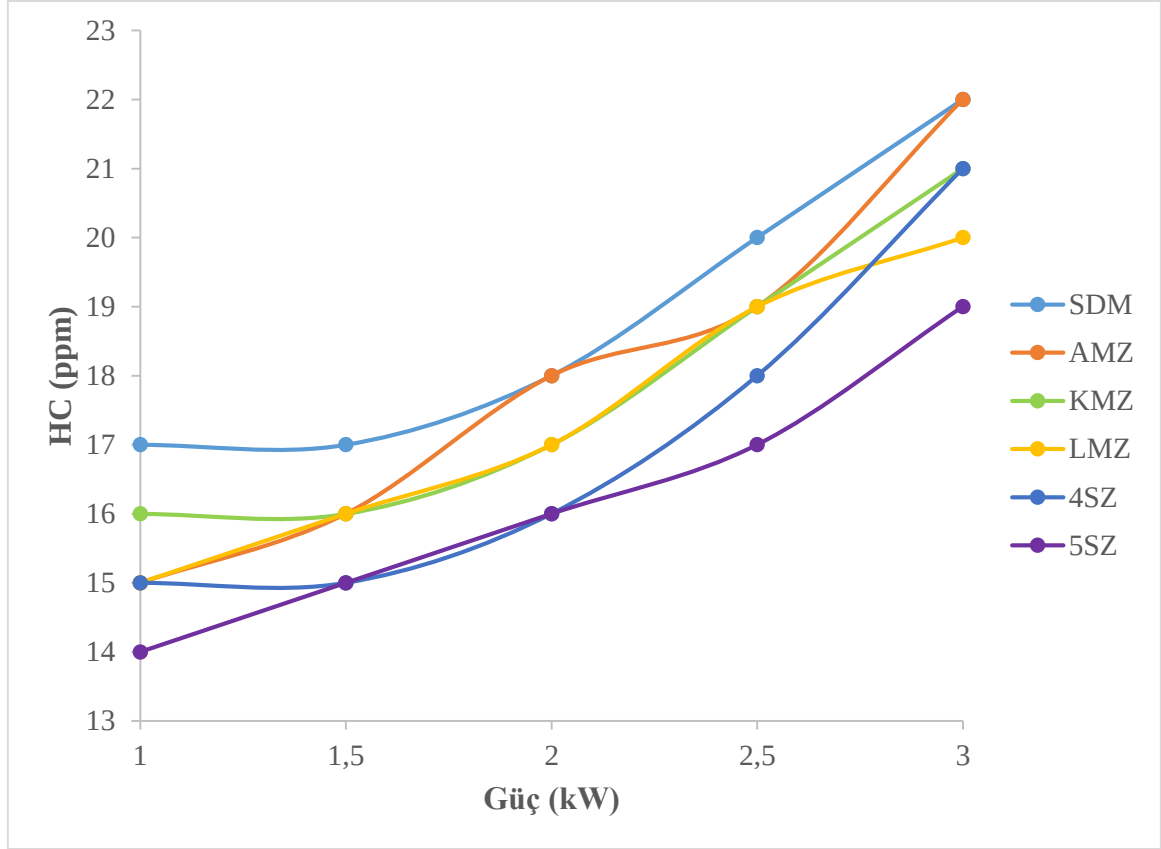
Grafikte OYF sisteminin CO emisyonlarını azaltıcı etkisi olduğu tespit edilmiştir. Artan motor yüküyle doğru orantılı şekilde CO emisyonlarının azaldığı görülmektedir. CO emisyonlarındaki en büyük düşüş, en yüksek motor yükünde elde edilmiştir. Artan motor yüküyle beraber yanma odasına enjekte edilen yakıt miktarının arttığı bildirilmiştir [109]. Yanma odasındaki yakıt miktarının artmasına bağlı olarak zengin yanma meydana geldiği, yakıtın tutuşma gecikmesi süresinin uzadığı ve yanmanın eksik gerçekleştiği düşünülmektedir. Bunun neticesinde

yanma sonu sıcaklığının düştüğü ve CO emisyonlarının arttığı düşünülmektedir. OYF ile yanma odasına gönderilen oksijence yoğun havayla tutuşma gecikmesinin kısaldığı, yanma veriminin iyileşmesine bağlı yanma sonu sıcaklığının arttığı, CO₂ oksidasyon reaksiyonları için yeterli oksijen miktarının sağlanmasıyla birlikte CO emisyonlarında azalma yaşandığına inanılmaktadır. Literatürde buna benzer sonuçların alındığı çalışmalar bulunmaktadır [109] [110].

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre CO emisyonları üzerindeki etkisi sırasıyla %7.17, %9.16, %10.9, %13.53 ve %17.31 oranında azalış gerçekleştirdiği hesaplanmıştır. OYF' de kullanılan tüm zeolit çeşitlerinin CO emisyonlarını azalttığı görülmüştür. Yanma odasındaki oksijen varlığı oranının CO emisyonlarının oluşumunu etkilediği düşünülmektedir. CO emisyonlarına en küçük etkiyi AMZ, en büyük etkiyi ise 5SZ gerçekleştirmiştir. Bunun sebebi olarak 5SZ' nin diğer zeolitler arasında moleküler yapısının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Modifikasyon işlemi yapılan zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma kapasitelerinin SZ' lerin gerisinde kaldığı, bununla birlikte CO emisyonlarını azaltıcı etkilerinin de oksijen yoğunlaştırma oranları ile orantılı olduğu görülmektedir. Modifiye zeolitlerle elde edilen sonuçların sebebinin özgül yüzey alanlarının küçük olması ve gözenek çaplarının oksijen yoğunlaştırma işleminde yetersiz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.3.2. Hidrokarbon (HC)

Yakıtların silindir içi yanması, egzoz kirleticilerinin oluşumunun yanı sıra motor performansı ve emisyonlarını da etkileyen en önemli süreçlerden biridir. HC emisyonları yakıtın eksik yanmasından ve yakıt sistemindeki buharlaşmalardan kaynaklanmaktadır. HC emisyonlarının oluşumundaki en büyük sebepler silindir içerisinde sıvı yakıt kalması, yağın yanma odasına sızması, subap yatak boşluklarındaki sızıntılar ve soğuk çalışma şartlarıdır. Yanma odasında oluşan alevlerin soğuk silindir cidarlarına çarpmasının alevin söndürdüğü, bununla birlikte yakıtın yanması için gerekli oksidasyon reaksiyonlarının kötüleşmesi sonucu HC emisyonlarında artış gerçekleştiği bildirilmiştir [29]. Şekil 6.15' de farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin HC emisyonlarına olan etkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.15. HC değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

Grafik incelendiğinde motor yükünün artması sonucunda HC emisyonlarının önce yatay devam ettiği ve daha sonrasında yükselişe geçtiği görülmüştür. Motor yükünün artmasıyla birlikte silindir içerisine gönderilen yakıt miktarının arttığı ve silindir içi sıcaklığın yükseldiği ifade edilmiştir [111]. Bunun sonucunda yanma reaksiyonlarının iyileştiği, silindir içerisindeki yakıtın tam yandığı ve HC emisyonlarında yatay seyir yol açtığı düşünülmektedir. Silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarının artması sonucu yakıtın tutuşması için gerekli birim oksijen miktarının azaldığı, homojen H/Y karışımının gerçekleşememesi sonucu yakıtın eksik yandığı ve HC emisyonlarında artış gerçekleştiği düşünülmektedir. Literatürde benzer sonuçların elde edildiği çalışmalar görülmüştür [112] [108] [100].

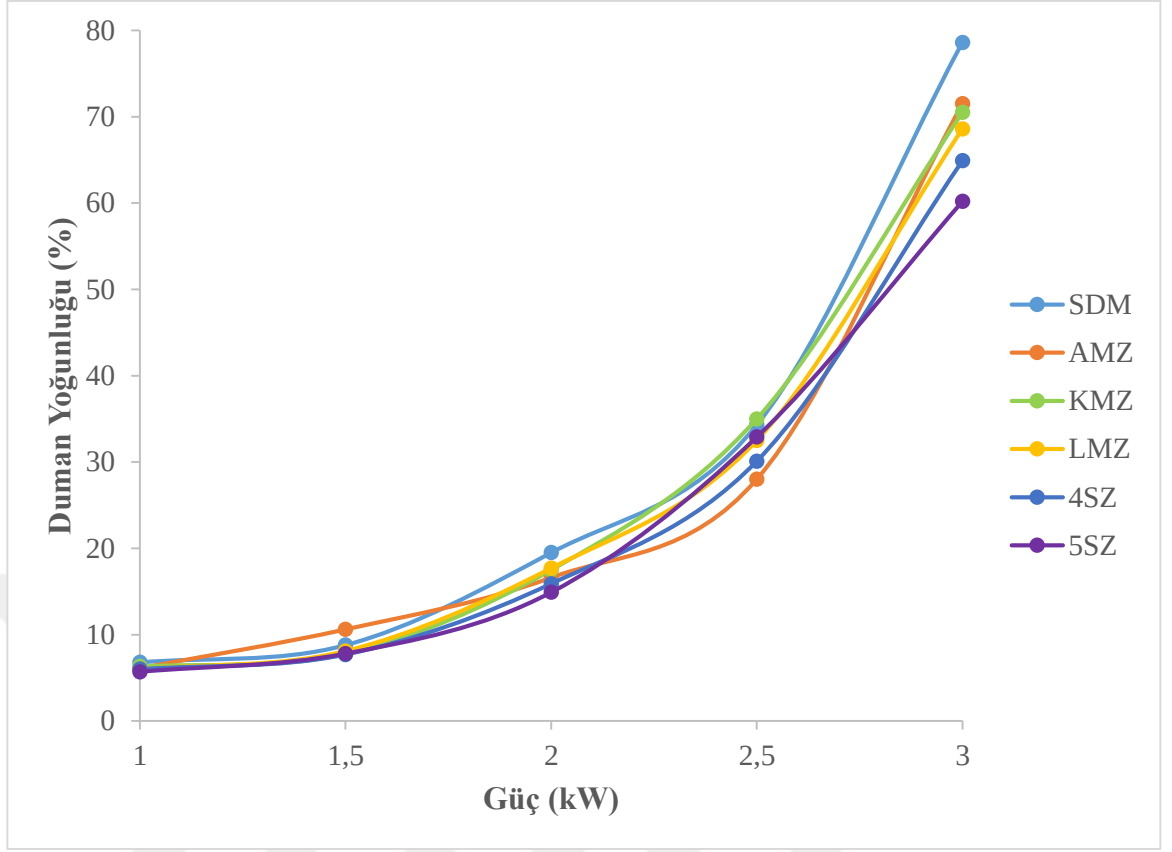
OYF sistemi ile HC emisyonlarında azalma olduğu grafiklerde görülmektedir. OYF' de kullanılan tüm zeolit tiplerinin HC emisyonlarında azalma gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. HC emisyonlarındaki en büyük düşüş oranı, motor yükünün en yüksek olduğu anda gerçekleşmiştir. Motor yükünün artması sonucu silindir içerisine daha fazla yakıt gönderildiği bilinmektedir. Enjekte edilen yakıt miktarının artması sonucu yakıtın yanması için gerekli yanma süresinin de uzadığı bildirilmiştir [109]. OYF ile yanmanın erken başladığı ve tutuşma gecikmesinin azaldığı düşünülmektedir. OYF' nin yanma odasında bulunan yakıtın tam yanmasına katkı sağladığı ve HC

emisyonlarında iyileşmeye neden olduğu düşünülmektedir. Yanma odasında bulunan oksijen oranının artmasıyla yanma odasında homojen H/Y karışımı elde edildiği, yanmanın iyileşmesiyle yanma odası sıcaklığının yükseldiği ve yanmanın iyileşmesiyle HC emisyonlarında azalma yaşandığı düşünülmektedir. Literatürde buna benzer sonuçların alındığı çalışmalar görülmüştür [89] [92].

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre HC emisyonları üzerinde sırasıyla %4.52, %5.37, %7.45, %9.83 ve %13.83 oranında azalış gerçekleştirdiği hesaplanmıştır. HC emisyonlarına en küçük etkiyi AMZ, en büyük etkiyi ise 5SZ gerçekleştirmiştir. 5SZ' nin diğer zeolit tiplerine oranla en büyük oksijen yoğunlaştırma oranına sahip olduğu gibi HC emisyonlarında da en büyük iyileştirmeyi gerçekleştirmiştir. Bunun sebebi olarak 5SZ' nin diğer zeolitlere göre moleküler yapısının daha gelişmiş ve gözenek çaplarının oksijen yoğunlaştırma işlemine daha uygun olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak oksijen ayırma işlemlerinde gözenek boyutunun etkisinin baskın faktör olmadığı bildirilmiştir [113].

6.3.3. Duman Yoğunluğu

Dizel motorlarda karakteristik bir emisyon türü olan duman emisyonları eksik yanma nedeniyle oluşur. Duman oluşumu genellikle yakıt püskürtmenin orta bölgesinde, ağırlıklı olarak yüksek sıcaklıkta H/Y karışımının zengin bölgesinde meydana gelmektedir [114]. Duman emisyonunun oluşumu motorun durumuna, yanma odasının tipine ve yakıtın özelliklerine bağlıdır [115]. Duman emisyonları homojen olmayan karışımlarda meydana gelmektedir [112]. Şekil 6.16' de farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin duman yoğunluğu emisyonlarına olan etkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Duman yoğunluğu değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

Grafikteki veriler incelendiğinde duman emisyonlarının motor yüküyle doğru orantılı şekilde arttığı görülmektedir. Duman emisyonlarında 2.5 kW motor yükünden itibaren keskin bir şekilde artış olduğu tespit edilmiştir. Motor yükünün artması nedeniyle silindir içerisine enjekte edilen yakıtın arttığı, dolayısıyla yakıt açısından daha zengin alanların oluştuğu ve eksik yanmanın meydana geldiği düşünülmektedir. Motor yükündeki artışla aynı miktardaki hava için enjekte edilen yakıt miktarının arttığı, bununla birlikte daha düşük oksidasyon reaksiyonlarının gerçekleştiği ve duman emisyonlarında artış yaşandığı düşünülmektedir. Literatürde buna benzer sonuçların yer aldığı çalışmalar görülmektedir [108].

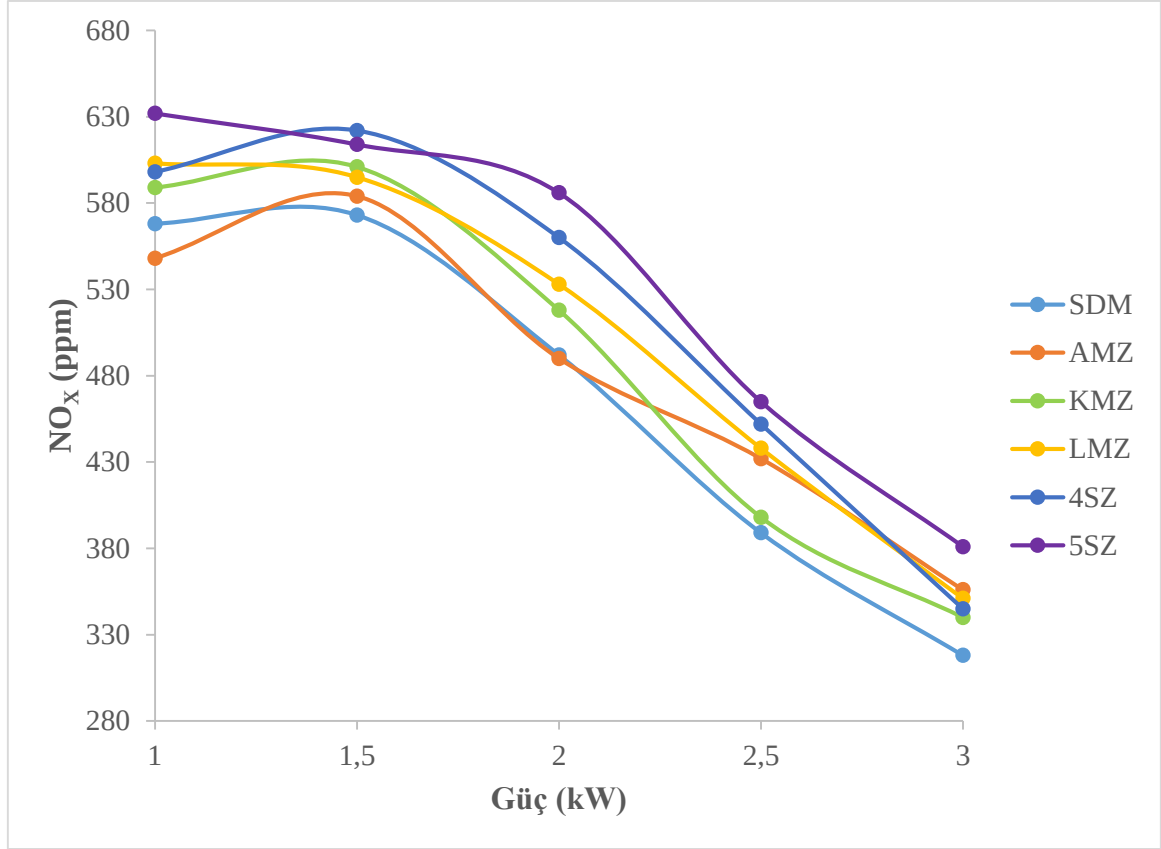
OYF ile gerçekleştirilen emisyon ölçüm deneyleri sonucunda her yük miktarında duman emisyonlarında düşüşler elde edilmiştir. Duman emisyonlarındaki en büyük düşüş oranı, motor yükünün en yüksek olduğu esnada gerçekleşmiştir. Motor yükünün en yüksek olduğu anda silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarının arttığı, birim yakıt başına düşen hava miktarının azalması sonucunda yakıtın tutuşmasının geciktiği ve yanmanın eksik olarak tamamlandığı düşünülmektedir. OYF ile silindir içerisinde daha fazla oksijen molekülü bulunması sağlanmıştır. Oksijenle zenginleştirilmiş yanma sonucunda yanmanın erken başladığı ve tutuşma gecikmesinin azaldığı düşünülmektedir. Böylelikle oksijen yoğunlaştırılmış havanın yanmanın tam olarak

gerçekleşmesine katkı sağladığı ve duman emisyonlarında azalma yaşandığına inanılmaktadır. Literatürde buna benzer sonuçların alındığı çalışmalar görülmüştür [89].

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre duman yoğunluğu emisyonlarını sırasıyla %6.42, %7.44, %9.38, %14.48 ve %15.72 oranında azalttığı tespit edilmiştir. OYF' de kullanılan tüm zeolit tipleri duman emisyonlarında düşüş gerçekleştirmiştir. Duman emisyonlarındaki minimum düşüş AMZ ile maksimum düşüş ise 5SZ ile kaydedilmiştir. Bu zeolit çeşitlerinin oksijen yoğunlaştırma kapasiteleri ve deney sonuçları göz önüne alındığında 5SZ' nin diğer zeolit çeşitlerine göre daha etkin verim sağladığı tespit edilmiştir. Duman yoğunluğu değerlerindeki alınan sonuçlardaki farklılığın, zeolitlerin moleküler yapısındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. 5SZ' nin diğer zeolitlere göre moleküler yapısının daha düzenli ve gözenek çaplarının azot adsorpsiyonuna daha uygun olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.3.4. Azot Oksit (NO_x)

Genel olarak yanma süreçlerinde termal NO_x , yakıt NO_x ve anlık NO_x olmak üzere üç ana NO_x kaynağı vardır. Yüksek sıcaklığa bağlı olan termal NO_x oluşumu, silindir içi yanmadan kaynaklanan en önemli kaynak olarak kabul edilmektedir. NO_x 'in oluşum hızı öncelikle yanma (alev) sıcaklığının, azot moleküllerinin bu sıcaklıkta kalış süresinin ve yanma odasındaki reaksiyon bölgelerindeki oksijen içeriğinin bir fonksiyonudur. [116]. NO_x emisyonları yanma sıcaklığından, lokal O_2 konsantrasyonundan ve kalış süresinden etkilenir [111]. Silindir içerisindeki yanma sırasında, oksijen atomları yüksek sıcaklıklarda ayrışır ve nitrojen moleküllerinin NO ve NO_2 'ye oksidasyonu olan zincirleme reaksiyonu başlatır. Bu nedenle yerel sıcaklık, oksijen ve nitrojen atomlarının konsantrasyonu ve oksijen-nitrojen reaksiyonları için mevcut olan süre, NO_x oluşumu için önemli parametrelerdir [117]. NO_x emisyonlarının silindir içi sıcaklık ve oksijen konsantrasyonu ile doğrudan orantılı olduğu bildirilmiştir [13]. Şekil 6.17' de farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin NO_x emisyonlarına olan etkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.17. NO_x değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

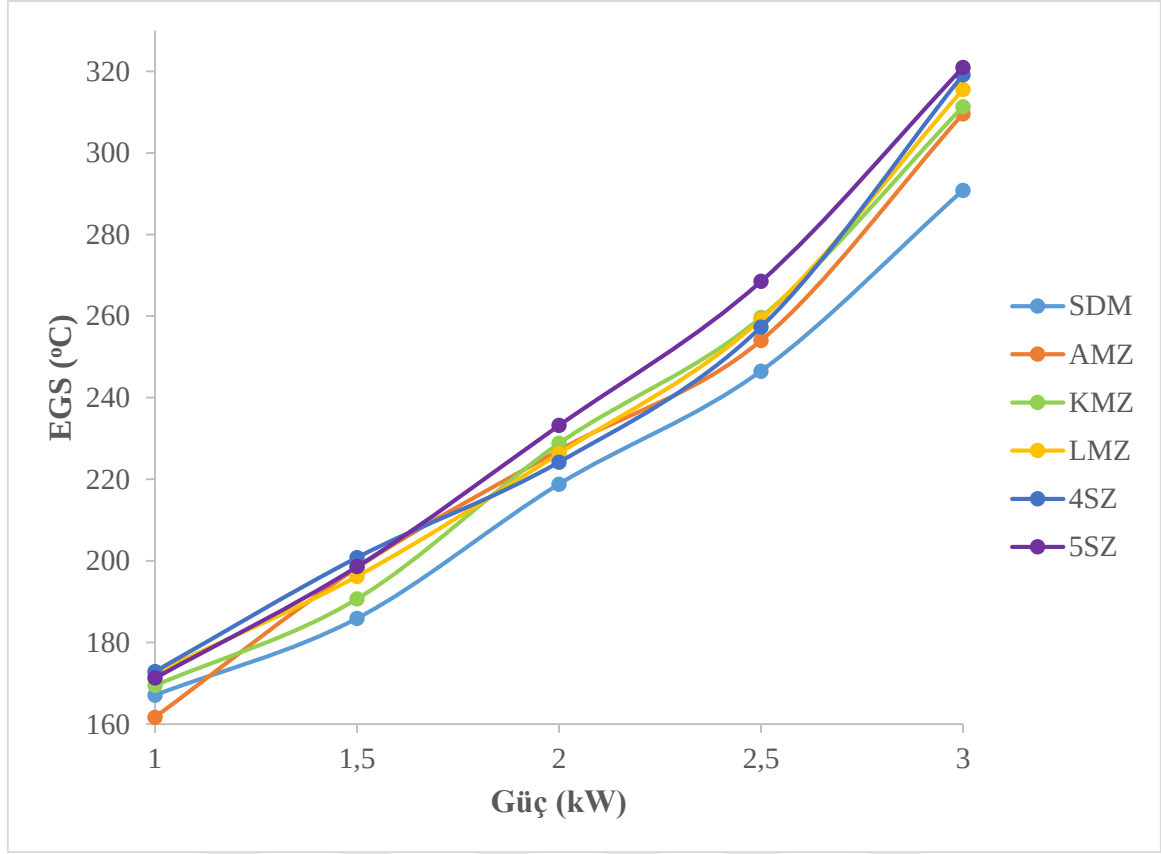
Grafikte motora yüklenen yükün artmasıyla beraber NO_x emisyonlarının önce yatay şekilde devam ettiği ve sonrasında motor yüküyle doğru orantılı olarak düşüşe geçtiği görülmektedir. Düşük motor yüklerinde silindir içi sıcaklığın düşük kaldığı ve NO_x oluşumunda etkili olduğu düşünülmektedir. Motor yükünün artmasının silindire daha fazla yakıt enjekte edilmesine ve bu durumun daha yüksek yanma sonu sıcaklığına artışa neden olduğu bildirilmiştir [111]. Motora verilen yük miktarının artmasının silindir içindeki yanma verimini iyileştirdiği bildirilmiştir [118]. Yanma sonu sıcaklığının NO_x emisyonlarını ciddi şekilde etkilediği bilinmektedir [10]. Bu durumlarla birlikte motor yükünün artmasının NO_x emisyonlarında artışa neden olması beklenmektedir. Ancak deneylerde elde edilen sonuçlara göre motor yükündeki artış, NO_x emisyonlarında düşüşe sebep olmuştur. Bunun sebebinin artan motor yüküyle beraber silindir içindeki H/Y oranının azalmasından kaynaklandığı bildirilmiştir [119]. Motora yüklenen yük miktarının artmasının yanma odasındaki O₂ konsantrasyonunu azalttığı ve CO emisyonlarında artışa neden olduğu düşünülmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde CO emisyonlarının maksimum olduğu durumun, motor yükünün en yüksek olduğu esnada gerçekleşmesi bu durumu desteklemektedir.

OYF sistemi ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda tüm yüklerde NO_x emisyonlarının arttığı belirlenmiştir. OYF ile motorun yanma odasındaki oksijen mevcudiyeti arttırılmıştır. Bu durumun daha kısa tutuşma gecikmesi elde edilmesine ve alev sıcaklığının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Yüksek alev sıcaklığının NO_x emisyonlarında artışa neden olduğu bildirilmiştir [41]. OYF ile NO_x emisyonlarındaki en büyük artış oranı, 2 kW motor yükünde elde edilmiştir. Silindir içi yanmanın en verimli olduğu anın, 2 kW motor yükünde gerçekleştiği düşünülmektedir. Egzoz gazındaki NO_x emisyonlarının maksimum olduğu esnada yanma veriminin de en yüksek noktada olduğu bildirilmiştir [110]. OYF ile silindir içerisine gönderilen oksijence yoğun havanın yanmanın iyileşmesine neden olduğu, yanma sonu sıcaklığını artırdığı, azot ve oksijen moleküllerinin NO_x bileşimini oluşturması için yeterli sıcaklığı oluşturduğu ve NO_x emisyonlarında artışa neden olduğu düşünülmektedir.

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre NO_x emisyonları üzerinde sırasıyla %4.19, %4.62, %8.26, %10.46 ve %15.37 oranında artışa neden olduğu kaydedilmiştir. OYF' de kullanılan tüm zeolit çeşitlerinin NO_x emisyonlarını arttırdığı görülmektedir. Yanma odasındaki oksijen varlığı oranının NO_x emisyonlarının oluşumunda etkili rol oynadığı düşünülmektedir. NO_x emisyonlarına minimum etkiyi en düşük oksijen yoğunlaştırma kapasitesine sahip AMZ, maksimum etkiyi ise en yüksek oksijen yoğunlaştırma kapasitesine sahip olan 5SZ gerçekleştirmiştir. NO_x emisyonlarında alınan farklı sonuçların ana nedeninin zeolitlerin kanal yapısı, gözenek çapı, Si/Al oranı ve moleküler yapısı gibi etkenlerden kaynaklandığına inanılmaktadır. 5SZ' nin modifiye edilen zeolitlere oranla daha düzenli kanal yapısı ve yüksek gözeneklilik oranına sahip olduğu, bu nedenle yüksek oranda oksijen yoğunlaştırma oranı gerçekleştirdiği düşünülmektedir. Modifiye işlemleri incelendiğinde lityum modifiyesinin zeolit yüzey alanını, gözenek hacmini ve boyutunu geliştirme açısından asit ve kalsiyum modifiyesine oranla daha etkili olduğu anlaşılmıştır.

6.3.5. Egzoz Gazı Sıcaklığı (EGS)

Motorun egzoz gazı sıcaklığı (EGS), yakıtta bulunan ısı enerjisinin kullanımını ifade etmektedir. Daha yüksek EGS, motorun zayıf termal verimliliğini temsil etmektedir. Yakıtın tam olarak yanmaması ve yanma sürecinde ısının uygun şekilde kullanılamaması sonucu egzoz gazında kalarak sıcaklığın yükselmesine neden olur. Motor performansını arttırmak için egzoz gazı sıcaklığı mümkün olduğunca minimum olmalıdır [120]. Şekil 6.18' de farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin EGS' ye olan etkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.18. Egzoz gazı sıcaklığının zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

Grafik incelendiğinde yük oranının artmasına paralel olarak EGS değerleri de artmıştır. Literatürde yer alan [112] çalışmada düşük motor yüklerinde daha küçük yakıt miktarının yanması nedeniyle düşük silindir içi sıcaklıkları yaşandığı ifade edilmiştir. Motor yükünün artması sonucu motorun aynı gücü üretebilmesi için daha fazla yakıt enjekte edildiği, bunun sonucu silindir içi pik basıncın ve yanma sonu sıcaklığının arttığı düşünülmektedir.

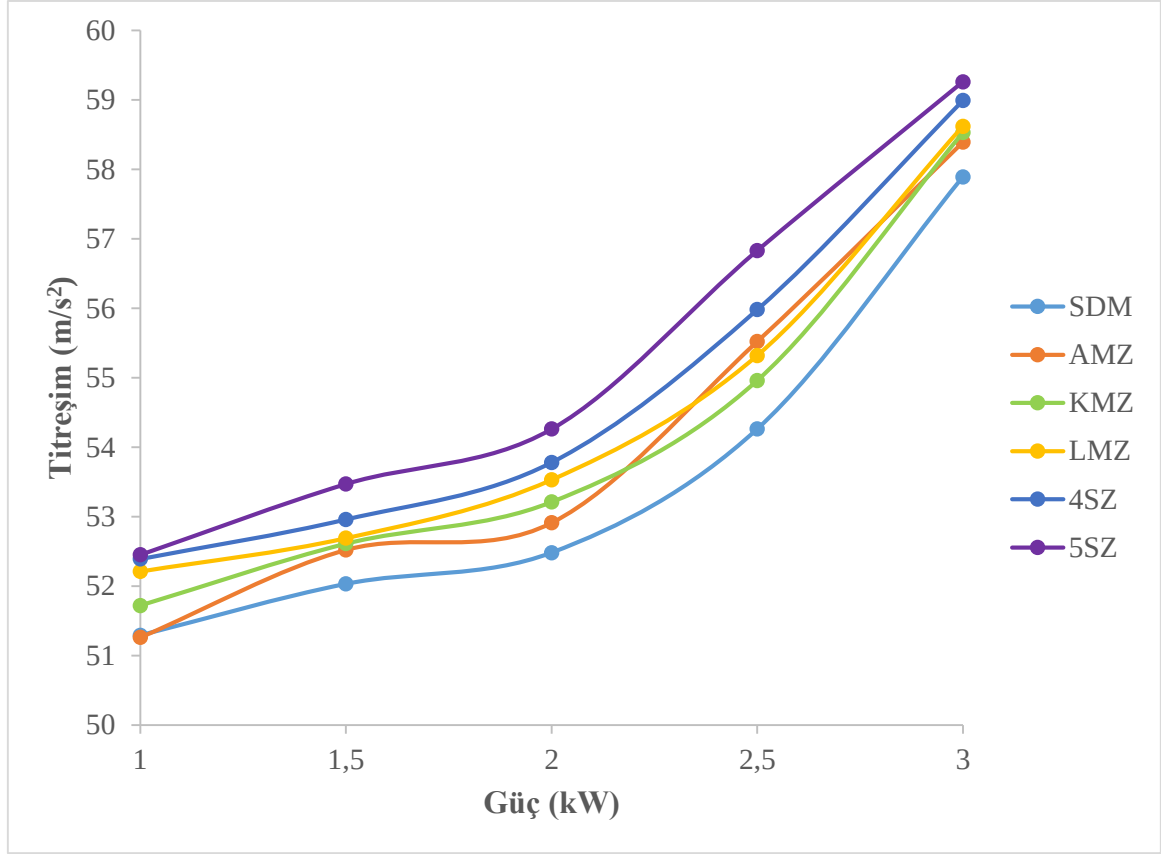
Grafikteki verilere göre OYF' nin her yük değerinde EGS' nin artışına sebep olduğu görülmüştür. OYF' de kullanılan tüm zeolit tiplerinde EGS değerlerinde yükselme kaydedilmiştir. OYF ile yanma odasındaki oksijen mevcudiyetinin artmasıyla birlikte tutuşma gecikmesinin kısaldığı ve alev sıcaklığının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Verimli bir yanmanın gerçekleşmesiyle birlikte daha fazla ısı enerjisinin açığa çıktığı düşünülmektedir. Literatürdeki oksijen yoğunlaştırma çalışmalarında benzer sonuçlar olduğu görülmüştür [41] [98] [112].

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre EGS' ye etkisi sırasıyla %3.34, %4.19, %5.16, %5.61 ve %7.04 olarak artış gerçekleştirdiği hesaplanmıştır. EGS parametrelerinde elde edilen farklı değerlerin sebebinin, OYF' de kullanılan zeolit çeşitlerinin farklı derecede oksijen yoğunlaştırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. EGS değerlerindeki artış ile zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma kapasitelerinin paralel olduğu görülmektedir. Literatürde

yer alan çalışmada [41] yanma odasındaki oksijen yoğunluğunun artışına bağlı olarak alev hızı ve ısı yayılım hızının arttığı ifade edilmiştir. EGS performans parametresine en az oranda etki eden zeolit tipi AMZ, en fazla oranda etki eden zeolit tipinin ise 5SZ olduğu tespit edilmiştir. OYF içerisinde kullanılan zeolit tipleri arasında en yüksek oksijen yoğunluğu 5SZ ile elde edilmiştir. EGS değerlerinde oluşan bu farklılığın sebebinin 5SZ' nin diğer zeolitlere göre daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olması ve gözenek çaplarının azot adsorpsiyonuna daha uygun olduğu düşünülmektedir.

6.3.6. Titreşim

İçten yanmalı motorlarda titreşimler motor bileşenlerinin ileri-geri ve dönme momentlerinden ve yanma odasındaki yanmadan kaynaklanır. Motordan kaynaklanan titreşim, esas olarak yanma basınçlarından, daha yüksek sıkıştırma oranlarından kaynaklanır ve motor gövdesine zarar verir. Titreşim ve motor gürültüsü, esas olarak yanma işlemi sırasında silindir basıncındaki değişiklik nedeniyle oluşur. Motorun biyel kolu, silindir kapağı, piston gibi bileşenleri nedeniyle oluşan motor titreşimlerinin ana kaynağı silindir basıncındaki değişimdir [121]. Yanma nedeniyle oluşan titreşimler motor gövdesinin diğer kısımları tarafından kontrol edildiğinden yanma odası içindeki yanma, motor titreşimini oluşturan en önemli nedendir [122]. Şekil 6.19' da farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin titreşim değerlerine etkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Titreşim değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

Grafik incelendiğinde motor yükü ile titreşim değerleri arasında paralel oranda artış gerçekleşmiştir. Motora verilen yük miktarının artması sonucu yanma odasına gönderilen yakıt miktarını arttırdığı, silindir içi sıcaklığın yükseldiği ve artan yanma sonu basıncının daha büyük titreşim enerjisi üretilmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

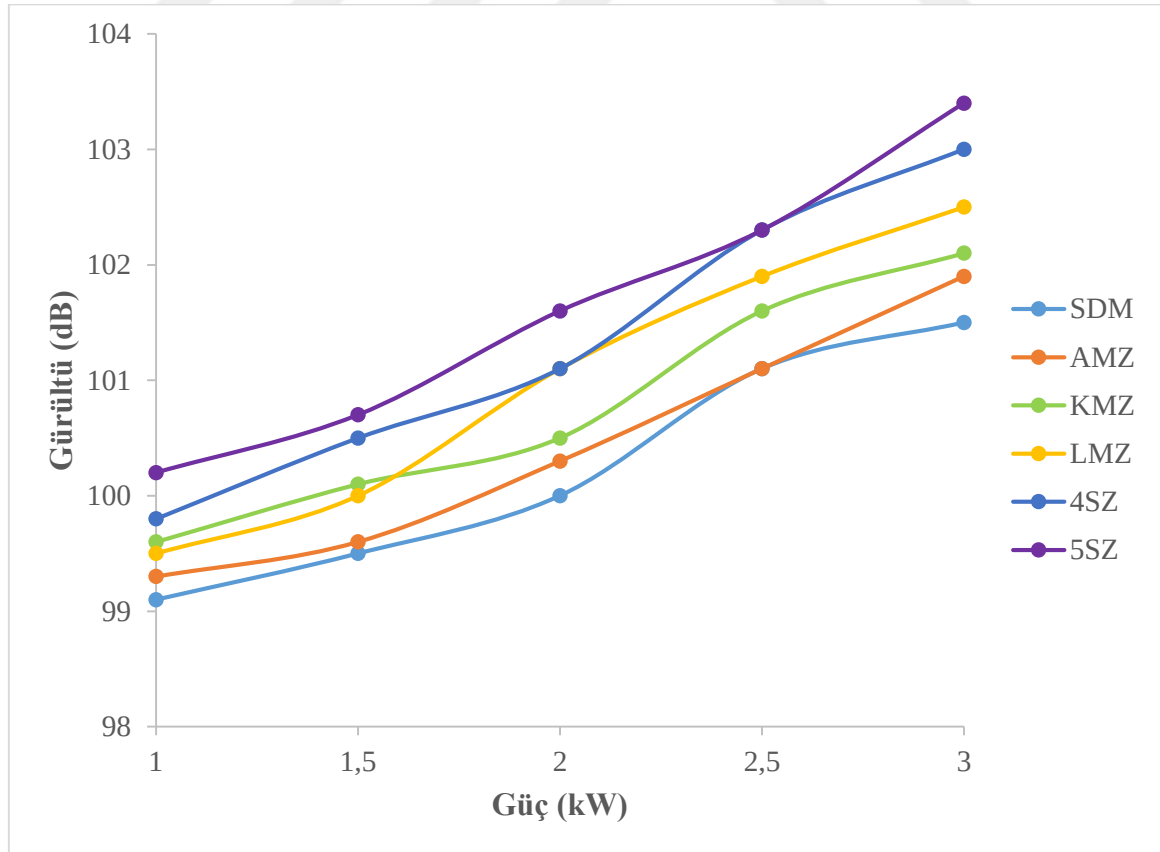
Deney sonuçlarına göre OYF sisteminin motor titreşim değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. OYF' nin motora sağladığı oksijence yoğun havanın yanma karakteristikleri üzerinde çeşitli etkiler yarattığına inanılmaktadır. Oksijence yoğun hava ile gerçekleşen yanma sonucunda daha kısa tutuşma gecikmesi elde edildiği, bununla birlikte alev sıcaklığının yükseldiği ve silindir içi maksimum sıcaklık ve basınç değerlerinde artış gerçekleştiği düşünülmektedir. Artan silindir içi basıncın motor üzerindeki hareketli parçaları üzerindeki kuvvetleri arttırdığı ve motor bloğundaki titreşim miktarını yükselttiği düşünülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda titreşim değerlerinde buna benzer şekilde artışların yaşandığı görülmüştür [123].

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre titreşim değerlerine etkisi sırasıyla %0.97, %1.14, %1.65, %2.29 ve %3.1 oranında artış gerçekleştirdiği hesaplanmıştır. Grafik incelendiğinde zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma kapasiteleri ile titreşim değerlerindeki artışın paralel olduğu görülmektedir. Titreşim değerlerinde en büyük değişimi

gerçekleştiren zeolit tipinin, aynı zamanda en yüksek oksijen yoğunluğu elde edilen zeolit olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak 5SZ' nin diğer zeolitler arasında moleküler yapısının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Titreşim değerlerine en düşük etkiyi gerçekleştiren AMZ' nin SZ' lere oranla yüzey yapısının oksijen yoğunlaştırma işlemi için yeterli kapasiteye sahip olmadığı düşünülmektedir.

6.3.7. Gürültü

İçten yanmalı motorlardaki gürültü seviyesi, silindir içi basınç, silindir içi basınç artışı ve ısı yayılım oranı değerlerine bağlı olarak değişen mekanik kuvvetlerle güçlü bir şekilde ilişkilidir. Silindir içi basınç artışı doğrudan yanma odası duvarını etkileyerek motor bloğunda titreşimlere neden olur. Ortaya çıkan titreşim ortamda gürültüye neden olur [124]. Silindir basıncının yükselmesi ve ısı yayılım karakteristiği gibi yanma özellikleri motordan çıkan gürültüde önemli rol oynamaktadır. İçten yanmalı motorlarda yanma, mekanik ve egzoz gürültüleri olmak üzere 3 ana gürültü kaynağı bulunmaktadır. Isı salınım hızı ne kadar yüksek olursa yanma gürültüsü o kadar yüksek gerçekleşmektedir [109]. Şekil 6.20' de farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin gürültü değerlerine etkileri gösterilmiştir.



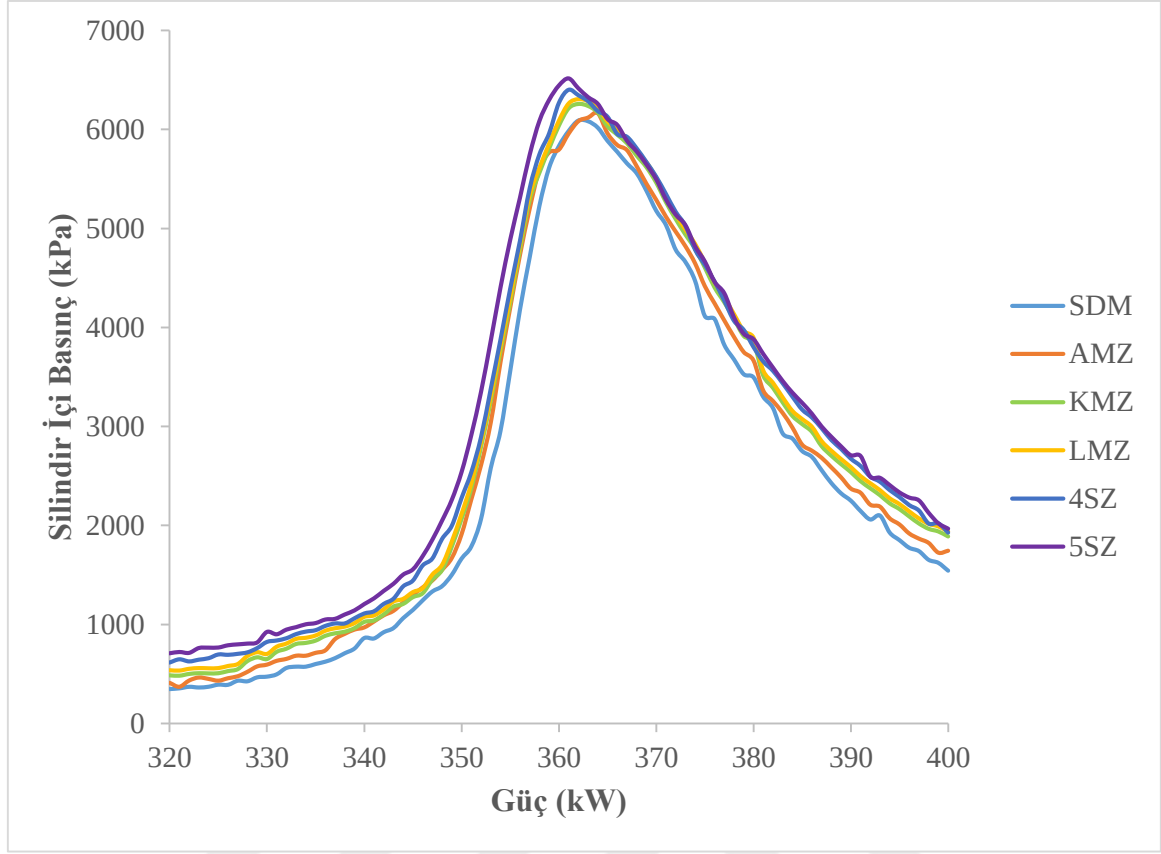
Şekil 6.20. Gürültü seviyesinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

Grafik incelendiğinde yük oranındaki artışla birlikte motorun ürettiği gürültü miktarı seviyesinin arttığı görülmektedir. Düşük motor yüklerinde silindir içi basıncı düşük olarak gerçekleşmektedir. Motor yükünün artması sonucunda silindir içerisine enjekte edilen yakıt miktarının arttığı bilinmektedir. Bunun sonucunda yanma odasında zengin karışımla yanma gerçekleştiği ve silindir içi basıncın yükseldiği düşünülmektedir. Literatürde yer alan [109] çalışmada motora verilen yükün artmasının sonucu olarak daha fazla ısı salınım hızı elde edildiği ve yanma gürültüsünü arttığı ifade edilmiştir. Tüm bunlara ek olarak artan motor yükünün motor içerisindeki hareketli elemanların birbiri arasındaki sürtünme kuvvetinin artmasına ve motor gürültüsünün artmasına neden olduğu düşünülmektedir.

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre gürültü seviyesine etkilerinin sırasıyla %0.19, %0.53, %0.75, %1.09 ve %1.39 oranında artış gerçekleştirdiği hesaplanmıştır. Bunun sebebinin yanma odasındaki oksijen yoğunluğunun artmasıyla tutuşma gecikmesinin azaldığı, yanma basıncının arttığı, yanma veriminin iyileşmesine bağlı açığa çıkan ısıнын arttığı ve yanma gürültüsünün arttığı düşünülmektedir. OYF' de kullanılan AMZ, KMZ ve LMZ' nin motorun gürültü seviyesinde önemli bir değişiklik gerçekleştirmedeği tespit edilmiştir. Gürültü değerlerinde en yüksek değişikliklere neden olan 4SZ ve 5SZ' nin diğer zeolitlere göre en yüksek oranda oksijen yoğunluğu gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin 4SZ ve 5SZ' nin diğer zeolitlere göre moleküler yapısının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üzerinde modifikasyon işlemi gerçekleştirilen diğer zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma kapasitelerinin SZ' lerin gerisinde kaldığı motor performans parametrelerinde de görülmektedir. Diğer zeolitlerle elde edilen sonuçların sebebinin özgül yüzey alanlarının küçük olması ve gözenek çaplarının oksijen yoğunlaştırma işleminde yetersiz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.3.8. Silindir İçi Basıncı

İçten yanmalı motorlarda silindir içi pik basınç, içten yanmalı bir motorun silindiri içerisinde genleşme fazı sonrasında elde edilmektedir. Silindir basıncı esas olarak ön karışım aşamasında yanan yakıtın oranına ve yakıtın havayla iyi karışabilme yeteneğine bağlıdır [125]. Şekil 6.21' de farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin silindir içi basınca olan etkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.21. Silindir içi basınç değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

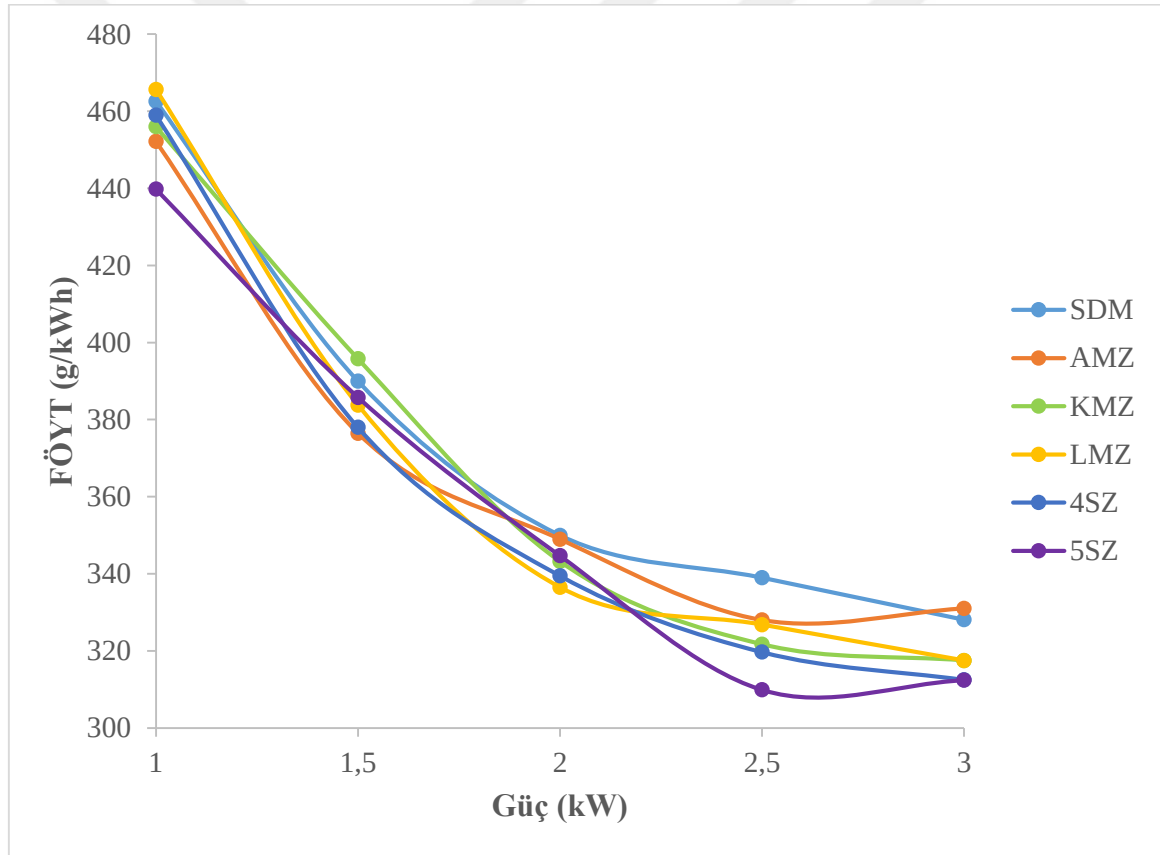
Grafik incelendiğinde SDM' ye oranla OYF' nin silindir içi basınç değerlerinde artış gerçekleştirdiği görülmektedir. OYF' de kullanılan tüm zeolit çeşitleri ile silindir içi basınçta artış elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere OYF ile yanma odasına gönderilen oksijence yoğun havanın silindir içerisindeki yanma olaylarını etkilediği tespit edilmiştir. Yanma odasında oksijence yoğunlaştırılmış havayla birlikte yanmanın erken başladığı, tutuşma gecikmesi süresinin azaldığı, yerel yakıt açısından zengin bölgeleri azalttığı, yakıtın silindir içerisinde tam yanmasını sağlayarak silindir içi sıcaklığı ve basıncı yükselttiğine inanılmaktadır. Literatürde buna benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür [89].

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre silindir içi pik basınçta %1.8, %2.57, %3.52, %4.14 ve %5.33 oranında artış gerçekleştirdiği hesaplanmıştır. Silindir içi basınç parametrelerinde elde edilen farklı değerlerin sebebinin, OYF' de kullanılan zeolit çeşitlerinin farklı derecede oksijen yoğunlaştırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Silindir içi basınç değerlerine en büyük katkının 5SZ ile en düşük katkının ise AMZ ile elde edildiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin 5SZ' nin diğer zeolit çeşitlerine kıyasla daha yüksek oksijen yoğunluğu gerçekleştirmesi olduğu düşünülmektedir. Bütün sonuçlar ve oksijen yoğunlaştırma

oranları göz önüne alındığında 5SZ' nin modifiye zeolitlere oranla daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

6.3.9. Fren Özgöl Yakıt Tüketimi (FÖYT)

Özgöl yakıt tüketimi, motorun yakıtın içerdiği enerjiyi kullanarak güç üretme yeteneğinin ölçüsüdür. Motor performansını optimize etmek amacıyla, istenen güç çıkışı için motorun özgül yakıt tüketiminin en aza indirilmesi gerekir. Fren özgül yakıt tüketimi büyük ölçüde yakıt parçacıklarının yayılmasına veya motor silindiri içindeki homojen yükün oluşumuna bağlıdır [120]. Şekil 6.22' de farklı zeolitlerle doldurulmuş OYF' nin farklı yükler altında FÖYT değerlerine olan etkileri verilmiştir.



Şekil 6.22. FÖYT' nin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

Grafikteki değerlere göre 1 kW ile 2.5 kW yük değerleri arasında, yük miktarının artmasıyla birlikte FÖYT' de düşüş gözlemlenmiştir. Motor yükünün artmasının yakıt ile oksijen moleküllerinin temasını kolaylaştırması sebebiyle silindir içi sıcaklığı yükseldiği, buna bağlı olarak yanma odası şartlarının iyileşmesiyle daha istikrarlı bir yanma gerçekleştiği, motor yükünün artmasının tutuşma gecikmesi süresini kısalttığı ve yanmayı iyileştirici etki ettiği düşünülmektedir.

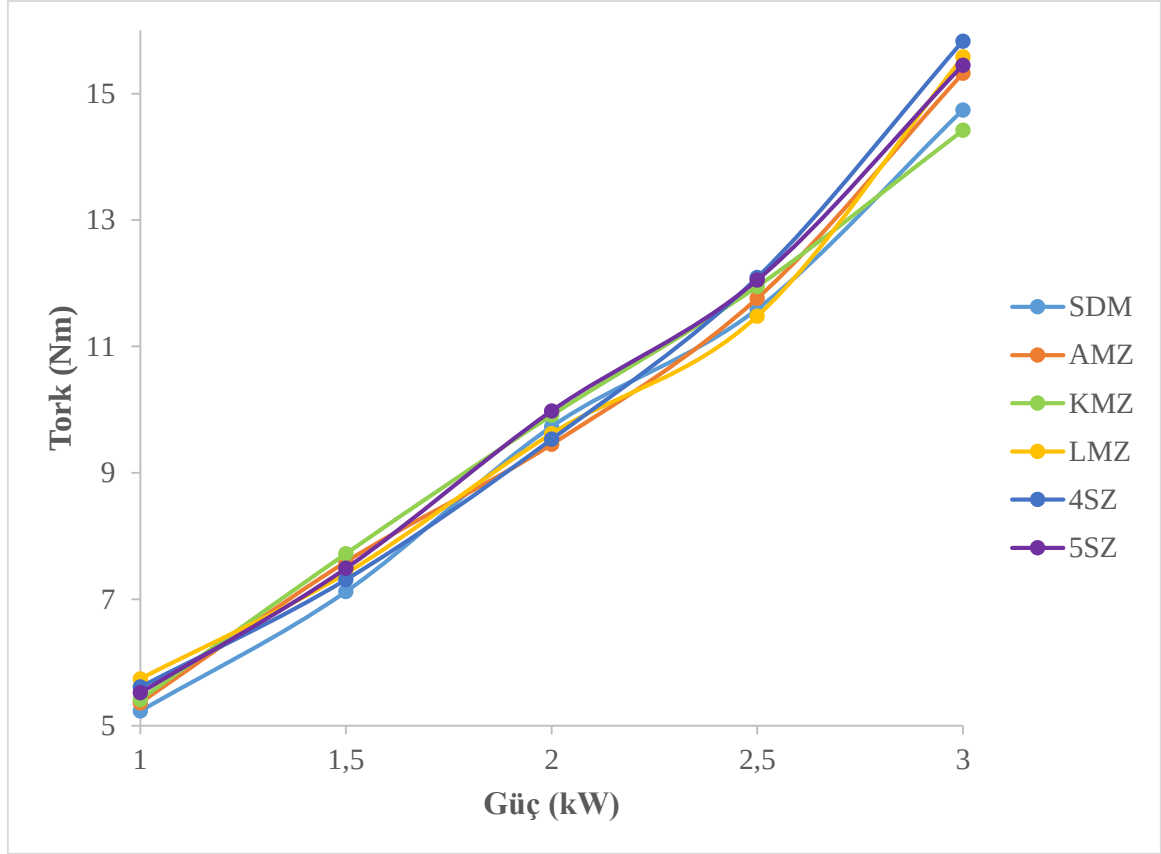
3 kW motor yükünde ise FÖYT değerlerinde hafif artış görülmüştür. Bunun sebebinin yüksek motor yüklerinde bir önceki çevrimden kalan gazların oranının arttığı ve yanma odasındaki yetersiz oksijen varlığına bağlı olarak yanmanın kötüleştiği düşünülmektedir. Literatürde benzer sonuçların elde edildiği çalışmalar olduğu görülmüştür [118].

Grafikteki veriler incelendiğinde OYF' nin FÖYT parametrelerine olumlu etki ettiği görülmüştür. OYF' de kullanılan 5 farklı zeolitin her yük değerinde etkisi farklı olmuştur. OYF ile elde edilen oksijence yoğunlaştırılmış havanın yanma odasına beslenmesinin yanma verimini iyileştirdiği düşünülmektedir. Bununla birlikte yanma odasında oksijen mevcudiyetinin artmasının tutuşma gecikmesinin azalmasına, daha yüksek yanma sonu sıcaklığına, yakıtın yanma oranının artmasına ve FÖYT değerlerinde azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [98] [99] [100].

SDM' ye göre AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında FÖYT değerlerindeki düşüş sırasıyla %1.67, %2.04, %2.32, %3.46 ve %4.17 oranında elde edilmiştir. FÖYT oranlarındaki düşüşler göz önüne alındığında en büyük iyileştirmeyi 5SZ' nin gerçekleştirdiği görülmüştür. Yüksek motor yüklerinde oksijence yoğunlaştırılmış havanın etkileri daha açık şekilde görülmektedir. Daha yüksek motor yüklerinde yanmanın olumsuz etkilendiği, OYF ile yanma odasında bulunan oksijenin artmasıyla birlikte yanmanın iyileştiği düşünülmektedir. Buna bağlı olarak FÖYT parametrelerinde elde edilen farklı değerlerin sebebinin, OYF' de kullanılan zeolit çeşitlerinin farklı derecede oksijen yoğunlaştırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. FÖYT' de en büyük iyileştirme oranı 5SZ ile en düşük iyileştirme oranı ise AMZ ile elde edilmiştir. Bütün sonuçlar ve oksijen yoğunlaştırma oranları göz önüne alındığında 5SZ' nin modifiye zeolitlere oranla daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

6.3.10. Tork

İçten yanmalı motorlarda tork motordan üretilen döndürme kuvveti veya momenti ifade eder. Bu dönme kuvveti motorun silindirlerinde yanma işlemi sonucunda oluşur ve birim olarak Newton metre (Nm) cinsinden ifade edilir. Tork, motorun performansını belirleyen önemli bir ölçüttür. Şekil 6.23' de farklı zeolit çeşitleriyle doldurulmuş OYF sisteminin tork değerlerine etkileri gösterilmiştir.



Şekil 6.23. Tork değerlerinin zeolit tiplerine ve motor yüklerine bağlı değişimleri

Grafik incelendiğinde yük oranlarındaki artışla tork değerlerinde de artış olduğu belirlenmiştir. Yük oranının artmasıyla birlikte motor torkunun artmasının yanma sonucu sıcaklığındaki artışa paralel olarak ideal bir yanmanın gerçekleştiği düşünülmektedir. Literatürde yer alan [112] çalışmada motor yükünün artmasının çevrim başına daha fazla yakıt enjeksiyonuna yol açarak silindir içi sıcaklığı arttırdığı bildirilmiştir. Bununla birlikte yanma veriminin iyileştiği ve silindir içi basıncın yükselmesiyle beraber motorun ürettiği tork miktarında artışa neden olduğu düşünülmektedir.

Şekildeki verilere göre OYF' nin tork değerleri üzerinde pozitif etki ettiği tespit edilmiştir. OYF' de kullanılan 5 farklı zeolit tipinin her yük değerinde tork değerlerine etkisi farklı olmuştur. OYF ile yanma odasındaki oksijen varlığının artması sonucu tutuşma gecikmesinin kısaldığı, yanma prosesinin erken başlamasıyla daha tamamlanmış bir yanma elde edildiği düşünülmektedir. Bununla birlikte yanma sonu basıncının yükseldiği ve motorun ürettiği tork değerlerinde artış yaşandığı düşünülmektedir. Literatürde yer alan [110] çalışmada benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

OYF sisteminde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımının SDM' ye göre tork değerlerine sırasıyla %2.32, %2.93, %3.48, %3.91 ve %4.41 oranında pozitif katkı sağladığı

hesaplanmıştır. Tork değerlerine en büyük katkının 5SZ ile en düşük katkının ise AMZ ile elde edildiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin 5SZ' nin diğer zeolitlere oranla daha üstün oksijen yoğunluğu gerçekleştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Grafikte motor yükünün artmasıyla OYF' nin etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Motor yükünün artmasının belirli oranda yanmayı iyileştirdiği bilinmektedir. Ancak daha yüksek motor yüklerinde motor, aynı gücü üretmesi için daha fazla yakıt enjeksiyonuna ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte daha zengin bir karışımla yanma olacağından yanmanın eksik olarak gerçekleşeceği düşünülmektedir. OYF' nin yanma odasına daha fazla oksijen sağlamasıyla zengin karışım durumlarında ideal yanmanın gerçekleşmesine katkı sağladığı düşünülmektedir. OYF' nin yanma sonu basıncını arttırdığı, aynı yakıttan daha fazla enerji elde edildiği ve tork değerlerinde artış yaşandığı düşünülmektedir.



7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında tek silindirli dizel bir motorun performansını iyileştirmek ve egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla farklı zeolit çeşitlerinin adsorbent olarak kullanıldığı, PSA yöntemine dayalı çalışan bir filtre sistemi tasarlanmıştır. Filtre çıkışında elde edilen oksijence yoğun hava, dizel motorun emme manifolduna konumlandırılan bir port vasıtasıyla motora beslenmiştir. Bunun sonucunda silindir içerisindeki yanmanın iyileşeceği, motorun performans parametrelerinin iyileşeceği ve emisyon değerlerinin azalacağı düşünülmüştür. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Tasarlanan OYF sisteminde zeolitler ile havadaki azot moleküllerinin zeolit yüzeylerine adsorplanabildiği ve oksijence yoğun hava elde edilebildiği tespit edilmiştir.
- DZ' ler üzerinde gerçekleştirilen asit ve iyon modifikasyon işlemleri sonucunda zeolitlerin oksijen yoğunlaştırma kapasitelerinde iyileştirmeler elde edilmiştir. OYF çıkışındaki havanın O₂ oranları DZ kullanımında % 20.99, AMZ kullanımında %23.18, KMZ kullanımında %23.65, LMZ kullanımında 24.28, 4SZ kullanımında %25.8 ve 5SZ kullanımında %27.36 oranında olduğu tespit edilmiştir.
- OYF sisteminin dizel motorundaki etkilerini öğrenmek amacıyla 10 farklı parametrede ölçümler alınmıştır. OYF sistemi ile tork, EGS, silindir içi basınç, gürültü, titreşim ve NO_x parametrelerinde artış, FÖYT, CO, HC ve duman parametrelerinde ise düşüş yaşandığı hesaplanmıştır.
- CO değerlerindeki düşüş, AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %7.17, %9.16, %10.9, %13.53 ve %17.31 olduğu hesaplanmıştır.
- HC değerlerindeki düşüş, AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında %4.52, %5.37, %7.45, %9.83 ve %13.83 oranında olduğu hesaplanmıştır.
- Duman yoğunluğu değerlerindeki düşüş, AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %6.42, %7.44, %9.38, %14.48 ve %15.72 olduğu hesaplanmıştır.
- NO_x değerlerindeki artış, OYF içerisinde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %4.19, %4.62, %8.26, %10.46 ve %15.37 oranında olduğu hesaplanmıştır.
- EGS değerlerindeki artış, OYF içerisinde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %3.34, %4.19, %5.16, %5.61 ve %7.04 oranında olduğu hesaplanmıştır.
- Titreşim değerlerindeki artış, OYF içerisinde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %0.97, %1.14, %1.65, %2.29 ve %3.1 oranında olduğu hesaplanmıştır.

- Gürültü değerlerindeki artış, OYF içerisinde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %0.19, %0.53, %0.75, %1.09 ve %1.39 oranında olduğu hesaplanmıştır.
- Silindir içi pik basınç değerlerinde artış, OYF içerisinde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %1.8, %2.57, %3.52, %4.14 ve %5.33 oranında olduğu hesaplanmıştır.
- FYT değerlerindeki düşüş AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %1.67, %2.04, %2.32, %3.46 ve %4.17 oranında olduğu hesaplanmıştır.
- Tork değerlerinde artış, OYF içerisinde AMZ, KMZ, LMZ, 4SZ ve 5SZ kullanımında sırasıyla %2.32, %2.93, %3.48, %3.91 ve %4.41 oranında olduğu hesaplanmıştır.



ÖNERİLER

İklim değışikliği, çevre kirliliği, küresel ısınma gibi sorunların baş gösterdiği günümüzde içten yanmalı motorların ağırlıklı olarak yer aldığı otomotiv sektörü çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Çevre kirliliğine karşı artan bilinç nedeniyle içten yanmalı motora sahip taşıtların egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra petrol kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle yakıt enerjisini verimli şekilde kullanan motorların geliştirilmesi için çalışmalar sürmektedir. Bu tez çalışmasında zeolit materyali yardımıyla silindir içerisindeki yanma olayının iyileştirilmesine yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir ve yapılan işlemlerle motor performansındaki artışın yanı sıra egzoz emisyonlarında düşüş olacağı öngörülmüştür. Elde edilen veriler göz önünde bulundurulduğunda gerçekleştirilen deneysel çalışmanın, farklı yöntem ve materyallerle ileri noktalara taşınabileceği düşünülmektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilebilecek bazı teknik ve yöntemler şu şekilde sıralanabilir;

- Zeolitlerin çeşitli kimyasallarla yapısının değıştirilebileceği ve yeteneklerinin geliştirilebileceği görülmüştür. Zeolitlerin farklı tanecik boyutunda modifikasyonları yapılabilir. Zeolitler üzerinde farklı iyonlarla iyon değışimi ve farklı asitlerle modifikasyonu gerçekleştirilebilir. İyon değışiminde ve asit modifiyesinde çözeltilerin derişimi değıştirilerek zeolit üzerindeki etkileri değerdendirilebilir.
- Modifikasyon işlemlerinde kullanılan ekipman sayısı arttırılabilir ve birim zamanda daha fazla miktarda modifiye zeolit elde edilebilir.
- Farklı doğal zeolit türleri üzerinde modifikasyon işlemleri gerçekleştirilebilir.
- OYF sistemi üzerinde değışiklikler yapılarak oksijence yoğun havanın oranı arttırılabilir. Bununla birlikte deney motoruna daha fazla oksijence yoğun hava gönderilebilir ve bunun motor üzerindeki etkileri incelenebilir. Farklı sentetik zeolit türleri adsorbent olarak kullanılabilir.
- OYF sisteminde adsorbentlerin yerleştirildiği tüp sayısı arttırılarak daha fazla oksijence yoğun hava debisi elde edilebilir.
- Bu tez çalışmasında zeolitlerin dizel motor üzerinde yanma esnasındaki etkileri incelenmiştir. Zeolitlerin adsorpsiyon kapasitesi, termal ve hidrotermal dayanıklılık yetenekleri sayesinde yanma sonrasında egzoz emisyonlarının azaltılmasında kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.who.int/data/gho/publications/world-health-statistics>, Erişim: 30.01.2023, (n.d.).
- [2] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Kasim-2022-45714>, Erişim: 30.01.2023, (n.d.).
- [3] Z. İlkılıç Aytaç, C. İlkılıç, Dizel Motorlarında Zararlı Egzoz Emisyonlarının Azaltılmasının Araştırılması, in: SETSCI, 2019: pp. 520–528. <https://doi.org/10.36287/setsci.4.6.148>.
- [4] Milli Eğitim Bakanlığı (2011), Motorlu Araçlar Teknolojisi Egzoz Emisyon Kontrolü, Ankara, n.d.
- [5] X. Ma, F. Zhang, K. Han, Z. Zhu, Y. Liu, Effects of intake manifold water injection on combustion and emissions of diesel engine, *Energy Procedia* 61 (2014) 777–781. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.963>.
- [6] M. Gürü, U. Karakaya, D. Altıparmak, A. Alicılar, Improvement of Diesel fuel properties by using additives, *Energy Convers. Manag.* 43 (2002) 1021–1025. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00094-2).
- [7] G.R. Kannan, R. Anand, Effect of injection pressure and injection timing on DI diesel engine fuelled with biodiesel from waste cooking oil, *Biomass and Bioenergy* 46 (2012) 343–352. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.08.006>.
- [8] A.H. Çermikli, H. Öztürkler, Dünya Enerji Tüketimi: 1980-2005 Döneminde Enerji Tüketimindeki Değişim, n.d.
- [9] F. Kelen, Motorlu Taşıt Emisyonlarının İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerine Etkileri, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg. 19 (2014) 80–87. <http://dergipark.ulakbim.gov.tr/yyufbed/article/view/5000153916>.
- [10] İ. Aslan, İ. Reşitoğlu, Dizel Motorlarda Yanma Sonucu Oluşan NO_x Emisyonları ve SCR Teknolojisi, n.d.
- [11] N. Anar, P. Bayram, Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) Sistemi Ve Araçlara Adaptasyonu, *J. Polytech.* (2018). <https://doi.org/10.2339/politeknik.403973>.
- [12] S. Sap, H. Hazar, E. Sap, M.C. Oner, C. İlkılıç, Examination of Exhaust Emissions of a Gasoline Engine Coated with Chromium Carbide (Cr₃C₂) Coated in the Combustion Chamber and Exhaust Pipe, n.d.
- [13] J.B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, 1988.
- [14] M. Zheng, M.C. Mulenga, G.T. Reader, M. Wang, D.S.K. Ting, J. Tjong, Biodiesel engine performance and emissions in low temperature combustion, *Fuel* 87 (2008) 714–722. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2007.05.039>.
- [15] F. Payri, V.R. Bermúdez, B. Tormos, W.G. Linares, Hydrocarbon emissions speciation in diesel and biodiesel exhausts, *Atmos. Environ.* 43 (2009) 1273–1279. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.029>.
- [16] B. Güney, H. Küçüksarıyıldız, Taşıt Emisyonlarının Mikroyapı Analizi, Afyon Kocatepe Univ. J. Sci. Eng. 19 (2019) 884–893. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.594476>.
- [17] C.W. Wu, R.H. Chen, J.Y. Pu, T.H. Lin, The influence of air–fuel ratio on engine performance and

- pollutant emission of an SI engine using ethanol–gasoline-blended fuels, *Atmos. Environ.* 38 (2004) 7093–7100. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2004.01.058>.
- [18] S. Bhandarkar, “Minimization of Vehicular pollution at NE-Karnataka Road Transport Corporation-Gulbarga by the use of CNG in place of diesel fuel” *The Challenges Of Urban Transports In India And Remedial Measures View project Vehicular Pollution, Their Effect on Human H, Veh. Eng* 51 (2010) 6120–6130. www.seipub.org/ve33.
- [19] M. Kampa, E. Castanas, Human health effects of air pollution, *Environ. Pollut.* 151 (2008) 362–367. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2007.06.012>.
- [20] I.A. Reşitoğlu, K. Altinişik, A. Keskin, The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems, *Clean Technol. Environ. Policy* 17 (2015) 15–27. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>.
- [21] G. Civelekoğlu, Y. Bıyık, Investigation of Carbon Footprint Change Originated from Transportation Sector, *Bilge Int. J. Sci. Technol. Res.* (2018). <https://doi.org/10.30516/bilgesci.427359>.
- [22] B. Güney, A. Aladağ, Microstructure and chemical analysis of particulate matter from diesel-fuelled vehicle emissions, *El-Cezeri J. Sci. Eng.* 8 (2021) 287–298. <https://doi.org/10.31202/ecjse.835542>.
- [23] Y. Sekmen, C. Çınar, P. Erduranli, E. Boran, P. Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü, G. Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü, Z. Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü, Ş. Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi, Dizel Motorlarında Enjeksiyon Basıncı ve Maksimum Yakıt Miktarının Motor Performansı ve Duman Emisyonlarına Etkilerinin İncelenmesi, 2004.
- [24] İ. Batmaz, Buji Ateşlemeli Motorlarda Yakıtı Hidrojen İlavesinin Motor Performansına Ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi *Experimental Analysis Of The Effect Of Hydrogen Addition To The Fuel On Performance And Exhaust Emissions In Spark Ignition Engines*, 2007.
- [25] B. Mohan, W. Yang, S.K. Chou, Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines - A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 28 (2013) 664–676. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.051>.
- [26] A.K. Agarwal, D.K. Srivastava, A. Dhar, R.K. Maurya, P.C. Shukla, A.P. Singh, Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine, *Fuel* 111 (2013) 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.016>.
- [27] C. Sayin, M. Canakci, Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine, *Energy Convers. Manag.* 50 (2009) 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.007>.
- [28] T. Korakianitis, A.M. Namasivayam, R.J. Crookes, Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions, *Prog. Energy Combust. Sci.* 37 (2011) 89–112. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.04.002>.
- [29] A. Uyumaz, E. Yılmaz, H. Solmaz, S. Polat, Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler, 2017. <https://www.researchgate.net/publication/329091501>.
- [30] R. Moos, B. Reetmeyer, A. Hürland, C. Plog, Sensor for directly determining the exhaust gas recirculation rate-EGR sensor, *Sensors Actuators, B Chem.* 119 (2006) 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.11.055>.
- [31] D. Agarwal, S.K. Singh, A.K. Agarwal, Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine, *Appl. Energy* 88

- (2011) 2900–2907. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.01.066>.
- [32] A. Maiboom, X. Tauzia, J.F. Hétet, Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine, *Energy* 33 (2008) 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.08.010>.
- [33] H. İbrahim Akolaş, A. Kaleli, K. Bakirci, Dizel Motorlarda EGR Gazlarının Soğutulmasında Harici Elektronik Kontrollü Soğutma Stratejisinin BSFC ve NOx Emisyonlarına Etkisi, 2020.
- [34] H. Peng, Y. Cui, L. Shi, K. Deng, Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions during cold start of direct injection (DI) diesel engine, *Energy* 33 (2008) 471–479. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.014>.
- [35] M.M. Abdelaal, A.H. Hegab, Combustion and emission characteristics of a natural gas-fueled diesel engine with EGR, in: *Energy Convers. Manag.*, 2012: pp. 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.05.021>.
- [36] B. Hoepke, S. Jannsen, E. Kasseris, W.K. Cheng, EGR Effects on Boosted SI Engine Operation and Knock Integral Correlation, *Int. J. Engines* 5 (2012) 547–559. <https://doi.org/10.2307/26278380>.
- [37] V. Ayhan, Direkt enjeksiyonlu bir dizel motoruna buhar ve farklı yöntemlerle su gönderiminin performans ve NOx emisyonlarına etkilerinin incelenmesi, (2016) 463–471. <https://doi.org/10.16984/soaufenbilder.71773>.
- [38] Z. Zhang, Z. Kang, L. Jiang, Y. Chao, J. Deng, Z. Hu, L. Li, Z. Wu, Effect of direct water injection during compression stroke on thermal efficiency optimization of common rail diesel engine, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017: pp. 1251–1258. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.514>.
- [39] X. Tauzia, A. Maiboom, S.R. Shah, Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine, *Energy* 35 (2010) 3628–3639. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.007>.
- [40] C.D. Rakopoulos, D.T. Hountalas, T.C. Zannis, Y.A. Levendis, Operational and Environmental Evaluation of Diesel Engines Burning Oxygen-Enriched Intake Air or Oxygen-Enriched Fuels: A Review, 2004. https://www.jstor.org/stable/44740884?seq=1&cid=pdf-reference#references_tab_contents.
- [41] P. Baskar, A. Senthilkumar, Effects of oxygen enriched combustion on pollution and performance characteristics of a diesel engine, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* 19 (2016) 438–443. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.08.011>.
- [42] H. Li, P. Biller, S.A. Hadavi, G.E. Andrews, G. Przybyla, A. Lea-Langton, Assessing combustion and emission performance of direct use of SVO in a diesel engine by oxygen enrichment of intake air method, *Biomass and Bioenergy* 51 (2013) 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.039>.
- [43] A.S. Ayodhya, K.G. Narayanappa, An overview of after-treatment systems for diesel engines, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25 (2018) 35034–35047. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3487-8>.
- [44] L. Ntziachristos, Z. Samaras, E. Zervas, P. Dorlhène, Effects of a catalysed and an additized particle filter on the emissions of a diesel passenger car operating on low sulphur fuels, *Atmos. Environ.* 39 (2005) 4925–4936. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.040>.
- [45] B. Guan, R. Zhan, H. Lin, Z. Huang, Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines, *J. Environ. Manage.* 154 (2015) 225–258. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.027>.

- [46] H.S. Latha, K.V. Prakash, M. Veerangouda, D. Maski, K.T. Ramappa, A Review on SCR System for NO_x Reduction in Diesel Engine, *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 8 (2019) 1553–1559. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.180>.
- [47] E. Kritsanaviparkporn, F.M. Baena-Moreno, T.R. Reina, Catalytic Converters for Vehicle Exhaust: Fundamental Aspects and Technology Overview for Newcomers to the Field, *Chem.* 3 (2021) 630–646. <https://doi.org/10.3390/chemistry3020044>.
- [48] N.E.R. Zimmermann, M. Haranczyk, History and Utility of Zeolite Framework-Type Discovery from a Data-Science Perspective, *Cryst. Growth Des.* 16 (2016) 3043–3048. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6b00272>.
- [49] R.E. Fletcher, S. Ling, B. Slater, Violations of Löwenstein’s rule in zeolites, *Chem. Sci.* 8 (2017) 7483–7491. <https://doi.org/10.1039/c7sc02531a>.
- [50] F. Bahmanzadegan, A. Ghaemi, Modification and functionalization of zeolites to improve the efficiency of CO₂ adsorption: A review, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 9 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100564>.
- [51] C. Cao, W. Xuan, S. Yan, Q. Wang, Zeolites synthesized from industrial and agricultural solid waste and their applications: A review, *J. Environ. Chem. Eng.* 11 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110898>.
- [52] E. Kianfar, A. Mahler, Zeolites: properties, applications, modification and selectivity. *Zeolites: advances in research and applications*, 1., (2020). <https://www.researchgate.net/publication/337928117>.
- [53] O. Abdelwahab, W.M. Thabet, Natural zeolites and zeolite composites for heavy metal removal from contaminated water and their applications in aquaculture Systems: A review, *Egypt. J. Aquat. Res.* 49 (2023) 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2023.11.004>.
- [54] L. Velarde, M.S. Nabavi, E. Escalera, M.L. Antti, F. Akhtar, Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review, *Chemosphere* 328 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>.
- [55] M.G. Valdés, A.I. Pérez-Cordoves, M.E. Díaz-García, Zeolites and zeolite-based materials in analytical chemistry, *TrAC - Trends Anal. Chem.* 25 (2006) 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2005.04.016>.
- [56] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/zeolit>, Erişim: 23.02.2023, (n.d.).
- [57] M. Król, Natural vs. Synthetic zeolites, *Crystals* 10 (2020) 1–8. <https://doi.org/10.3390/cryst10070622>.
- [58] M. Karaca, Use of Natural Zeolite (Clinoptilolite) in Agriculture Epigenetic project View project Acquired or induced DNA methylation and transgenerational impact on cotton technological fiber traits View project, n.d. <https://www.researchgate.net/publication/269709768>.
- [59] E. Demir, H. Yalçın, Adsorbentler: Sınıflandırma, Özellikler, Kullanım ve Öngörüler, n.d. www.nobel.gen.tr.
- [60] M. Soylu, Ö. Gökkuş, Türkiye’deki Doğal Zeolitler Ve İyon Değişimi Uygulamaları, 2017.
- [61] M.Ç. Karakaya, N. Karakaya, F. Yavuz, Geology and conditions of formation of the zeolite-bearing deposits southeast of Ankara (central Turkey), *Clays Clay Miner.* 63 (2015) 85–109. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2015.0630202>.
- [62] I. Petrov, T. Michalev, Synthesis of Zeolite A: A Review, n.d.

- [63] <https://damlakimya.com/>, Erişim: 25.02.2023, (n.d.).
- [64] B. Wang, Y. Zhu, Q. Qin, H. Liu, J. Zhu, Development on hydrophobic modification of aluminosilicate and titanosilicate zeolite molecular sieves, *Appl. Catal. A Gen.* 611 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117952>.
- [65] L. Eprikashvili, T. Kordzakhia, M.I.~ Dj, Zeolites-The Unique Desiccating Agents of Organic Liquids Nitrogenous zeolite nanomaterial and the possibility of its application in agriculture View project Zeolites-The Unique Desiccating Agents of Organic Liquids, 2015. <https://www.researchgate.net/publication/305999669>.
- [66] A. Ates, C. Hardacre, The effect of various treatment conditions on natural zeolites: Ion exchange, acidic, thermal and steam treatments, *J. Colloid Interface Sci.* 372 (2012) 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.01.017>.
- [67] A. Alshameri, A. Ibrahim, A.M. Assabri, X. Lei, H. Wang, C. Yan, The investigation into the ammonium removal performance of Yemeni natural zeolite: Modification, ion exchange mechanism, and thermodynamics, *Powder Technol.* 258 (2014) 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.063>.
- [68] S. Dursun, A. Pala, Lead pollution removal from water using a natural zeolite #, 2007.
- [69] E. Pérez-Botella, S. Valencia, F. Rey, Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects, *Chem. Rev.* 122 (2022) 17647–17695. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00140>.
- [70] M. Thommes, K. Kaneko, A. V. Neimark, J.P. Olivier, F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol, K.S.W. Sing, Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report), *Pure Appl. Chem.* 87 (2015) 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
- [71] N. Jiang, R. Shang, S.G.J. Heijman, L.C. Rietveld, High-silica zeolites for adsorption of organic micro-pollutants in water treatment: A review, *Water Res.* 144 (2018) 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.017>.
- [72] E.J. Shokroo, D.J. Farsani, H.K. Meymandi, N. Yadollahi, Comparative study of zeolite 5A and zeolite 13X in air separation by pressure swing adsorption, *Korean J. Chem. Eng.* 33 (2016) 1391–1401. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0232-6>.
- [73] M. Akgül, A. Karabakan, Promoted dye adsorption performance over desilicated natural zeolite, *Microporous Mesoporous Mater.* 145 (2011) 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.05.012>.
- [74] Ö. Öğütçü, Doğal Adsorban Maddeler_Niyonik Ve Moleküler adsorbsiyon özellikleri, 2007.
- [75] M. Çanlı, Review of Processes Concerning Zeolite Activation And Modification, n.d.
- [76] Bilgin Öykü, Koç Ercüment, Doğal Zeolitlerin Çevre Kirliliği Kontrolünde Kullanımı, n.d. www.nobel.gen.tr.
- [77] A. Ertan, F. İme, C., Akicio, ~ Glu- Ozkan, CO₂ and N₂ Adsorption on the Acid (HCl, HNO₃, H₂SO₄ and H₃PO₄) Treated Zeolites, n.d.
- [78] F. Cakicioglu-Ozkan, S. Ulku, The effect of HCl treatment on water vapor adsorption characteristics of clinoptilolite rich natural zeolite, *Microporous Mesoporous Mater.* 77 (2005) 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.08.013>.
- [79] Bilgin Öykü, Gördes Zeolitlerinin Hammaddesel özelliklerinin İncelenmesi Ve değişik sektörlerde

kullanılabilirliğinin araştırılması, 2009.

- [80] C. Wang, S. Leng, H. Guo, J. Yu, W. Li, L. Cao, J. Huang, Quantitative arrangement of Si/Al ratio of natural zeolite using acid treatment, *Appl. Surf. Sci.* 498 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143874>.
- [81] M. Sakizci, E. Yörükoğullari, Gördes Yöress Klnopttloittn (Doğal Ve Moddffye) Su Buharı Adsorpsyonu, 2007.
- [82] İ. Özkirim, Y. Lisans, T. Fen, B.E. Fizik, A. Dalı, Dogal Zeolitlerde Azot Adsorpsiyonu, 2002.
- [83] M. Sakızci, Investigation Of Thermal And Structural Properties Of Natural And Ion-Exchanged Analcime, *Anadolu Univ. J. Sci. Technol. A - Appl. Sci. Eng.* 17 (2016) 724–724. <https://doi.org/10.18038/Aubtda.266863>.
- [84] Günal Aytaç, Klinoptilolit Ve Şabazitin Doğal Ve Modifiye Formlarının Yapısal Ve Termal Özelliklerinin Ve Amonyak Adsorpsiyonunun İncelenmesi, 2018.
- [85] E.C.G. Dignos, K.E.A. Gabejan, E.M. Olegario-Sanchez, H.D. Mendoza, The comparison of the alkali-treated and acid-treated naturally mined Philippine zeolite for adsorption of heavy metals in highly polluted waters, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 478 (2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/478/1/012030>.
- [86] M. Ogura, S.Y. Shinomiya, J. Tateno, Y. Nara, M. Nomura, E. Kikuchi, M. Matsukata, Alkali-treatment technique - New method for modification of structural and acid-catalytic properties of ZSM-5 zeolites, *Appl. Catal. A Gen.* 219 (2001) 33–43. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(01\)00645-7](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00645-7).
- [87] A. Ates, Effect of alkali-treatment on the characteristics of natural zeolites with different compositions, *J. Colloid Interface Sci.* 523 (2018) 266–281. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.03.115>.
- [88] C. Wang, J. Yu, K. Feng, H. Guo, L. Wang, Alkali treatment to transform natural clinoptilolite into zeolite Na-P: Influence of NaOH concentration, *J. Phys. Chem. Solids* 168 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110827>.
- [89] K. Rajkumar, P. Govindarajan, A. Professor, Experimental Investigation of Oxygen Enriched air intake on Combustion Parameters of a Single Cylinder Diesel Engine, 2010. <https://www.researchgate.net/publication/50315841>.
- [90] J. Jeevahan, A. Poovannan, V. Sriram, R.B. Durai Raj, G. Maghwaran, G. Britto Joseph, Effect of intake air oxygen enrichment for improving engine performance and emissions control in diesel engine, *Int. J. Ambient Energy* 40 (2019) 96–100. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1372811>.
- [91] W. Zhang, Z. Chen, W. Li, G. Shu, B. Xu, Y. Shen, Influence of EGR and oxygen-enriched air on diesel engine NO-Smoke emission and combustion characteristic, *Appl. Energy* 107 (2013) 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.024>.
- [92] K. Cagua, A. Amell, F. Cadavid, Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine, *Biomass and Bioenergy* 45 (2012) 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.003>.
- [93] M.M. Abdelaal, B.A. Rabee, A.H. Hegab, Effect of adding oxygen to the intake air on a dual-fuel engine performance, emissions, and knock tendency, *Energy* 61 (2013) 612–620. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.09.022>.

- [94] E. Porpatham, A. Ramesh, B. Nagalingam, Experimental studies on the effects of enhancing the concentration of oxygen in the inducted charge of a biogas fuelled spark ignition engine, *Energy* 142 (2018) 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.025>.
- [95] A. Çiçek, Oksijen İle Zenginleştirilmiş Emme Havaasının LPG Yakıtlı Buji Ateşlemeli Bir Motorun Performans Ve Egzoz Emisyonları Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, n.d.
- [96] P. Baskar, M.A. Joseph, N. Narayanan, R.B. Loya, Experimental investigation of oxygen enrichment on performance of twin cylinder diesel engine with variation of injection pressure, in: 2013 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2013, 2013: pp. 682–687. <https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533467>.
- [97] P. Dinesha, V. Nayak, K.S. Shankar, P. Mohanan, Studies on the environmental emission and performance of a single cylinder CI engine with enhanced intake air oxygen combustion, *Biofuels* 5 (2014) 713–721. <https://doi.org/10.1080/17597269.2015.1016374>.
- [98] H. Hazar, R. Tekdogan, H. Sevinc, Investigating the effects of oxygen enrichment with modified zeolites on the performance and emissions of a diesel engine through experimental and ANN approach, *Fuel* 303 (2021) 121318. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121318>.
- [99] K. Sezer, B. Özdalyan, M. Bahattin ÇELİK, M. Eğitim Merkezi, Z. Karalemas Üniversitesi, K. Teknik Eğitim Fakültesi, Teknoloji Karbüratörlü Motora Karışım İçerisine Saf Oksijen İlave Edilmesinin Motor Karakteristiklerine Etkisi, 2005.
- [100] M. Subramaniam, J.M. Solomon, J. Arockia Dhanraj, C.P. Ramaian, N. Vinayagam, N. Selvaraju, A. Ramana Johannes Bachmann, Performance Enhancement of Jatropa Methyl Ester by Utilizing Oxygen Enrichment in Diesel Engine, in: *Lect. Notes Mech. Eng.*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022: pp. 261–271. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7909-4_23.
- [101] S. Bayram, İdrarın Gübre Olarak Değerlendirilmesinde klinoptilolit İle İyon Değişiminin Yeri, n.d.
- [102] İzci Ertuğrul, Dogal Ve İyon Değiş'i' İrmış Formlarının Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi, n.d.
- [103] <https://www.rotamining.com/?lang=tr>, Erişim: 09.05.2023, (n.d.).
- [104] F. Çakıcıoğlu-Özkan, M.J. Becer, Effect Of The Acid Type On The Natural Zeolite Structure, 2019.
- [105] C. Chin, Z. Kamin, M.H.V. Bahrin, A. Bono, The Production of Industrial-Grade Oxygen from Air by Pressure Swing Adsorption, *Int. J. Chem. Eng.* 2023 (2023). <https://doi.org/10.1155/2023/2308227>.
- [106] P. qiang Tan, Z. yuan Hu, D. ming Lou, Z. jun Li, Exhaust emissions from a light-duty diesel engine with Jatropa biodiesel fuel, *Energy* 39 (2012) 356–362. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.002>.
- [107] Y.H. Tan, M.O. Abdullah, C. Nolasco-Hipolito, N.S.A. Zauzi, G.W. Abdullah, Engine performance and emissions characteristics of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol emulsions, *Energy Convers. Manag.* 132 (2017) 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.013>.
- [108] J.C. Ge, J.Y. Kim, B.O. Yoo, J.H. Song, Effects of Engine Load and Ternary Mixture on Combustion and Emissions from a Diesel Engine Using Later Injection Timing, *Sustainability* 15 (2023) 1391. <https://doi.org/10.3390/su15021391>.
- [109] C. Patel, N. Tiwari, A.K. Agarwal, Experimental investigations of Soyabean and Rapeseed SVO and biodiesels on engine noise, vibrations, and engine characteristics, *Fuel* 238 (2019) 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.068>.

- [110] A.O. Hasan, A.I. Osman, A.H. Al-Muhtaseb, H. Al-Rawashdeh, A. Abu-jrai, R. Ahmad, M.R. Gomaa, T.J. Deka, D.W. Rooney, An experimental study of engine characteristics and tailpipe emissions from modern DI diesel engine fuelled with methanol/diesel blends, *Fuel Process. Technol.* 220 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106901>.
- [111] X.J. Man, C.S. Cheung, Z. Ning, L. Wei, Z.H. Huang, Influence of engine load and speed on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with diesel fuel blended with waste cooking oil biodiesel, *Fuel* 180 (2016) 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.007>.
- [112] S.B. Singh, A. Dhar, A.K. Agarwal, Technical feasibility study of butanol-gasoline blends for powering medium-duty transportation spark ignition engine, *Renew. Energy* 76 (2015) 706–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.095>.
- [113] G. Guan, K. Kusakabe, S. Morooka, Separation of nitrogen from oxygen using a titanasilicate membrane prepared on a porous α -alumina support tube, *Sep. Sci. Technol.* 37 (2002) 1031–1039. <https://doi.org/10.1081/SS-120002239>.
- [114] S. Jaichandar, M. Thamaraikannan, D. Yogaraj, D. Samuelraj, A comprehensive study on the effects of internal air jet piston on the performance of a JOME fueled DI diesel engine, *Energy* 185 (2019) 1174–1182. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.114>.
- [115] L. Siwale, L. Kristóf, T. Adam, A. Bereczky, M. Mbarawa, A. Penninger, A. Kolesnikov, Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine, *Fuel* 107 (2013) 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.11.083>.
- [116] J. Huang, Y. Wang, S. Li, A.P. Roskilly, H. Yu, H. Li, Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol-diesel blends, *Appl. Therm. Eng.* 29 (2009) 2484–2490. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.016>.
- [117] C. Sayin, A.N. Ozsezen, M. Canakci, The influence of operating parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine using methanol-blended-diesel fuel, *Fuel* 89 (2010) 1407–1414. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.035>.
- [118] A. Uyumaz, F. Boz, Ş.A. Baydır, Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Atık Zeytinyağı Biyodizelinin Yanma, Performans ve Emisyon Karakteristikleri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* (2017). <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.317409>.
- [119] M. Aydın, M. Afşar, M.B. Çelik, Tek Silindirli Bir Dizel Motorda Atık Biyodizel Kullanımının Motor Performansı ve Emisyonlarına Etkisi, *SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg.* (2017) 1–1. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.295296>.
- [120] C. Deheri, S.K. Acharya, D.N. Thatoi, A.P. Mohanty, A review on performance of biogas and hydrogen on diesel engine in dual fuel mode, *Fuel* 260 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116337>.
- [121] S. Jaikumar, S.K. Bhatti, V. Srinivas, M. Rajasekhar, Vibration and noise characteristics of CI engine fueled with Niger seed oil methyl ester blends and hydrogen, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17 (2020) 1529–1536. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02443-y>.
- [122] Z.C. Ong, M.B. Mohd Mishani, W.T. Chong, R.S. Soon, H.C. Ong, Z. Ismail, Identification of optimum Calophyllum inophyllum bio-fuel blend in diesel engine using advanced vibration analysis technique, *Renew. Energy* 109 (2017) 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.039>.
- [123] D.P. Satsangi, N. Tiwari, Experimental investigation on combustion, noise, vibrations, performance and emissions characteristics of diesel/n-butanol blends driven genset engine, *Fuel* 221 (2018) 44–

60. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.060>.
- [124] S. Sarıdemir, Ü. Ağbulut, Combustion, performance, vibration and noise characteristics of cottonseed methyl ester–diesel blends fuelled engine, *Biofuels* 13 (2022) 201–210. <https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1667658>.
- [125] M.S. Shehata, Emissions, performance and cylinder pressure of diesel engine fuelled by biodiesel fuel, *Fuel* 112 (2013) 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.056>.



ÖZGEÇMİŞ

Selahattin Özgür FIRAT

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Bildiriler:

1. Hazar, H., Firat S.O., Sevinc, H., Determination of exhaust emissions of an oxygen enriched diesel engine with acid modified zeolite, 8th International New York Conference On Evolving Trends In Interdisciplinary Research&Practices, Manhattan, New York City, USA
2. Hazar, H., Firat S.O., Sevinc, H., The effects of oxygen enriched air using 4A zeolite on the performance values of a diesel engine, 8th International New York Conference On Evolving Trends In Interdisciplinary Research&Practices, Manhattan, New York City, USA