



**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA NO_x
EMİSYONUNUN AZALTILMASINA YÖNELİK
HİDROJEN TAKVİYELİ YAKLAŞIM
GELİŞTİRİLMESİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Idriss İBRAHİMA

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Samet USLU**

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA NO_x EMİSYONUNUN
AZALTILMASINA YÖNELİK HİDROJEN TAKVİYELİ YAKLAŞIM
GELİŞTİRİLMESİ**

Idriss İBRAHİMA

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Samet USLU**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Nisan 2024**

Idriss IBRAHIMA tarafından hazırlanan “İÇTEN YANMALI MOTORLARDA NO_x EMİSYONUNUN AZALTILMASINA YÖNELİK HİDROJEN TAKVİYELİ YAKLAŞIM GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Samet USLU

.....

Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/04/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Ramazan ÖZMEN (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Samet USLU (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ŞİMŞEK (İAÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Idriss IBRAHIMA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA NO_x EMİSYONUNUN AZALTILMASINA YÖNELİK HİDROJEN TAKVİYELİ YAKLAŞIM GELİŞTİRİLMESİ

Idriss İBRAHİMA

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Samet USLU

Nisan 2024, 51 sayfa

Bu tezde, hidrojen kullanarak dizel motorlardan kaynaklanan azot oksit (NO_x) emisyonlarını azaltmak için bir teknik geliştirilmiştir. İçten yanmalı motorlar, özellikle de dizel motorlar, NO_x dahil olmak üzere birçok emisyon üretmektedir. Dizel motorlardan kaynaklanan yüksek azot oksit (NO_x) emisyonları nedeniyle, emisyon azaltma tekniklerinin geliştirilmesi ve uygulanması çevre kirliliğinin azaltılması için çok önemlidir.

Testler 500W ile 3000W arasında değişen yüklerde tek silindirli bir dizel motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. Egzoz borusu çıkışına yerleştirilen bir emisyon sensörü, Multigas Analyser yazılımı aracılığıyla elde edilen emisyon verilerini motor yükünün bir fonksiyonu olarak kaydetmek için kullanılmıştır.

Kullanılan hidrojen gazı bir litre su kullanılarak üretilmiştir. Su elektrolizi temelinde bir hidrojen jeneratörü tasarlanmıştır. Temel olarak sudan yalıtılmış korozyona dayanıklı dört metal plaka, jeneratörün elektrolitik metal plakalara dokunmadan kullanılmasını sağlayan iki sert plastik plaka, plakaları birbirine sabitlemek için cıvatalar ve sızdırmazlık sorunlarını çözmek için contalardan oluşmaktadır. Hidrojen jeneratörü bir güç jeneratörü tarafından çalıştırılmıştır.

İlk testler motor hidrojen enjeksiyonu olmadan çalışırken gerçekleştirilmiştir. İkinci testler dizel emisyonlarına $48,52 \text{ cm}^3$ hidrojen enjekte edilerek gerçekleştirilmiştir. Hidrojen enjeksiyonundan önce ve sonra dizel emisyonları arasında yapılan karşılaştırma, 500 ile 3000W arasında hidrojen enjeksiyonundan sonra CO_2 emisyonlarının %3,17 oranında düştüğünü göstermiştir. 500 ile 3000W arasında hidrojen enjeksiyonundan sonra CO emisyonları %0,024 oranında düşmüştür. 500 ile 3000W arasında hidrojen enjeksiyonundan sonra HC emisyonları 13ppm düşmüştür. 500 ile 1500W arasında hidrojen enjeksiyonundan sonra NO_x emisyonları 201,67ppm artmış ve 1500 ile 3000W arasında NO_x 166,33ppm düşmüştür.

Bu testler sırasında dizel emisyonlarındaki iyileşme, hidrojenin bu emisyonlar üzerinde etkili olduğu anlamına gelmektedir. Hidrojen yüksek motor yüklerinde NO_x 'i önemli ölçüde azaltmıştır, ancak hidrojen aynı zamanda CO, CO_2 ve HC emisyonlarını da önemli ölçüde azaltmıştır. Sonuç olarak, hidrojenin dizel emisyonları, özellikle de NO_x üzerinde bir etkisi vardır.

Anahtar Sözcükler : İçten Yanmalı Motor, Azot Oksit (NO_x), Hidrojen Jeneratörü
Dizel Emisyonları Dizel Motor, Hidrojen, Emisyon azaltımı.

Bilim Kodu : 91413

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DEVELOPMENT OF A HYDROGEN-SUPPLEMENTED APPROACH TO REDUCING NO_x EMISSIONS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Idriss IBRAHIMA

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechatronics Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Samet USLU

April 2024, 51 pages

In this thesis, a technique for reducing nitrogen oxide (NO_x) emissions from diesel engines using hydrogen was developed. Internal combustion engines, in particular diesel engines, produce a lot of emissions, including NO_x. Due to the high emissions of nitrogen oxides (NO_x) from diesel engines, the development and application of emission reduction techniques is crucial to reducing environmental pollution.

Tests were carried out on a single-cylinder diesel engine with loads ranging from 500W to 3000W. An emissions sensor placed at the exhaust pipe outlet was used to record the emissions data obtained through the Multigas Analyser software as a function of engine load.

Hydrogen gas is produced using 1l of water. A hydrogen generator has been designed based on water electrolysis. It essentially consists of four rigid plasticization metal

plates insulated from water, two rigid plastic plates that allow the generator to be used without touching the electrolytic metal plates, bolts to secure the plates together, and gaskets to solve sealing problems. The hydrogen generator was powered by a power generator.

Initial tests were carried out running the engine without hydrogen injection. The second test was carried out by injecting 48.52cm³ of hydrogen into diesel emissions. A comparison between diesel emissions before and after hydrogen injection showed that CO₂ emissions after hydrogen injection between 500 and 3000W fell by 3.17%. CO emissions after hydrogen injection between 500 and 3000W fell by 0.024%. HC emissions after hydrogen injection between 500 and 3000W fell by 13ppm. NO_x emissions after hydrogen injection between 500 and 1500W rose by 201.67ppm and between 1500 and 3000W NO_x fell by 166.33 ppm.

the improvement in diesel emissions during these tests means that hydrogen has indeed influenced these emissions. Hydrogen significantly reduced NO_x at high engine loads, but hydrogen also significantly reduced CO, CO₂, and HC emissions. In conclusion, hydrogen influences diesel emissions, particularly NO_x.

Key Word : Internal Combustion Engine, Nitrogen Oxides (NO_x), Hydrogen Generator Diesel Emissions Diesel Engine, Hydrogen, Emission Reduction.

Science Code : 91413

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanması, araştırılması, yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında ilgi ve desteğini esirgemeyen, tez çalışmamın başarılı bir şekilde tamamlanmasına katkıda bulunan herkese içten teşekkürlerimi sunarım. Bu yolculuk boyunca, beni destekleyen, rehberlik eden ve motive eden birçok değerli insan ve kurum oldu. Sizlerin desteği, bu başarıya ulaşmamı sağladı.

İlk olarak, sayın hocam Doç. Dr. Samet USLU'ya özel bir teşekkür sunmak istiyorum. Sizin bilgeliliğiniz, sabrınız ve samimiyetiniz, tez çalışmamın her aşamasında yol gösterici oldu. Sizinle çalışmak büyük bir onurdu ve sizin rehberliğiniz sayesinde kişisel ve akademik olarak büyüdüm. Tez danışmanım olan ve bu çalışmaya birlikte başladığım merhum Dr. Öğretim Üyesi Cihan MIZRAK'ı saygıyla anıyor ve kendisine teşekkür ediyorum.

Ayrıca, aileme, babam Idriss Hisseine ve annem Sadia Ibrahim'e özel bir minnettarlık ifade etmek istiyorum. Sizlerin sevgi dolu destekleri, benim için her zaman en büyük motivasyon kaynağı oldu. Sizlerin manevi desteği olmadan bu zorlu süreci başarıyla tamamlamak mümkün olmazdı.

Son olarak, Karabük Üniversitesi'ne olan teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Bu üniversite, beni sadece akademik olarak değil, aynı zamanda kişisel olarak da geliştirmeme olanak sağladı. Bu kurumun öğretim üyeleri, arkadaşlarım ve öğrenci topluluğuyla geçirdiğim zamanlar, hayatımın en değerli deneyimlerindendi.

Tüm bu kişilere ve kurumlara olan minnettarlığımı ifade etmek için yeterli kelimeler bulmak zor olsa da sizin desteğiniz ve rehberliğiniz olmadan bu başarıya ulaşamazdım. Her birinize teşekkür ederim ve gelecekteki projelerimde de sizlerle çalışmayı dört gözle bekliyorum. Tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
DİZEL MOTORLAR.....	5
2.1. DİZEL MOTORLARDA GELİŞMELER	5
2.2. DİZEL MOTORLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	7
2.3. DİZEL MOTOR YAKITI	9
2.4. DİZEL MOTORLARIN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	11
BÖLÜM 3	13
DİZEL MOTOR EMİSYONLARI	13
3.1 DİZEL MOTOR EMİSYONLARININ OLUŞUMU.....	14
3.1.1. Karbon Monoksit (CO) ve Karbon Dioksit (CO ₂).....	14
3.1.2. Hidrokarbon (HC).....	15
3.1.3. Azot Oksit (NO _x)	16
3.1.4. Partikül Madde (PM)	17
3.2. DİZEL MOTORLAR İÇİN EMİSYON STANDARTLARI.....	17
BÖLÜM 4	22

DİZEL MOTORLARDA EMİSYON KONTROL SİSTEMLERİ.....	22
4.1. AZOT OKSİTLER (NO _x) DİZEL MOTORLAR İÇİN YİNELENEN SORUN	22
4.2 DİZEL ARAÇLARDAN KAYNAKLANAN EGZOZ EMİSYONLARINI AZALTMA YÖNTEMLERİ	24
4.2.1. Egzoz Gazı Devridaimi (EGR).....	24
4.2.2. Seçici Katalitik İndirgeme (SCR).....	26
4.2.3. Dizel Partikül Filtresi.....	28
4.2.4. Seçici Katalitik Olmayan İndirgeme (SNCR)	28
4.2.5. 3 Yollu Katalitik Konvertör.....	30
BÖLÜM 5	31
ELEKTROLİZ YÖNTEMİ.....	31
5.1. HİDROJEN ÜRETİMİ.....	31
5.1.1. Su Elektroliz Prosesi.....	32
5.1.2 Kimyasal İşlem	32
5.2. HHO-JENERATÖR	33
5.2.1. Tanım.....	33
5.2.2. Hidrojen Jeneratörünün Kompozisyonu	34
5.2.3. İşlem	35
5.2.3. Hidrojen tanımlama yöntemi	36
5.3. HİDROJEN İLE DİZEL EMİSYONLARI ARASINDAKİ KİMYASAL REAKSİYON.....	36
BÖLÜM 6	38
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
6.1. HİDROJEN ÜRETİM PROSESİ	38
6.2. MOTOR TESTLERİ	40
6.2.2. Hidrojen Enjeksiyonu	40
6.2.3. Egzoz Emisyonları.....	41
BÖLÜM 7	44
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	44

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Trafikteki araç sayısının yıllara göre dağılımı ve toplam kazalar.....	2
Şekil 2.1. Rudolf Diesel patenti	6
Şekil 2.2. Carnot çevrimi	7
Şekil 2.3. Dizel motor modeli	8
Şekil 2.4. Dört zamanlı dizel motorun gösterimi	8
Şekil 2.5. Sıvı formdaki dizel yakıt görüntüsü.....	9
Şekil 3.1. Dizel motor egzoz gazları	13
Şekil 3.2. Dizel motorlarda egzoz emisyonları	14
Şekil 3.3. Benzen moleküler yapısı.....	16
Şekil 3.4. NO _x emisyonları ve standartlarındaki değişiklikler.....	19
Şekil 4.1 Kontrollü emisyonu sahip Bosch dizel otomobil modeli.....	23
Şekil 4.2. Bir dizel motorda EGR devridaim modeli.....	25
Şekil 4.3. SCR katalizörü kullanım modeli.....	27
Şekil 4.4. NO _x dolu partikül filtresi.....	28
Şekil 4.5. 3 Yollu Katalitik Konvertör.....	30
Şekil 5.1. Su elektrolizi için kullanılan Hoffmann voltmetresinin diyagramı.....	32
Şekil 5.2. Su molekülü H ₂ O'nun ayrıştırılması	32
Şekil 5.3. Hidrojen jeneratörü bileşenleri.	34
Şekil 5.4. Monte edilmiş hidrojen jeneratörü.....	35
Şekil 5.5. Hidrojen jeneratörünün kablolu montajı.....	35
Şekil 5.6. Alınan gazlar a) katotta: H ₂ , b) anotta: O ₂	36
Şekil 6.1. Hidrojen üretim sisteminin gösterimi.	39
Şekil 6.2. Elektronik karta kaydedilen veriler.....	39
Şekil 6.3. Kullanılan dizel motor.	40
Şekil 6.4. Hidrojen gazı çıkışı ve girişi.	41
Şekil 6.5. Motor yükünün bir fonksiyonu olarak CO seviyeleri.....	41
Şekil 6.6. Motor yükünün bir fonksiyonu olarak CO ₂ seviyeleri.....	42
Şekil 6.7. Motor yükünün bir fonksiyonu olarak HC miktarı.....	42
Şekil 6.8. Motor yükünün bir fonksiyonu olarak NO _x seviyeleri.	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Dizel motorlu araçlar için Avrupa Birliği emisyon standartları	19
Çizelge 3.2. Çin'in dizel motorlu araçlar için emisyon standartları	20
Çizelge 3.3. Çin 6 emisyon standartlar	21
Çizelge 5.1. Kullanılan güç jeneratörünün özellikleri.	38
Çizelge 5.2. Kullanılan dizel motorun özellikleri	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

NO _x	: azot oksit
PM	: partikül madde
CO ₂	: karbon dioksit
H ₂ O	: su molekülü
N ₂ O	: azot oksit
O ₂	: dioksijen
CO	: karbon monoksit
HC	: hidrokarbonlar
HNO ₃	: nitrik asit
NO ₂	: azot dioksit
C ₁₂ H ₂₀	: sikloheksilidensikloheksan
C ₁₅ H ₂₈	: kadinane
C ₈ H ₁₈	: izooktan
°C	: Selsiyus derece
l	: litre
Kg	: kilogram
s	: saniye
J	: Joule
K	: Kelvin
rpm	: round per minute (dakika başına tur)
mm ²	: milimetre kare
C ₁₇ H ₃₄	: heptadesen
N ₂ O ₄	: dinitröz tetroksit
N ₂ O ₃	: diazot trioksit
M	: Kütle
ppm	: milyon başına parça

exh : yayınlandı
atm : atmosferik
kW : kilovat
rpm : dakika başına tur
NH₃ : amonyak
MW : megavat
CH₄ : metan
Na⁺ : sodyum iyonu
e⁻ : elektron
H⁺ : hidrojen iyonu
NaOH : sodyum hidroksit
OH⁻ : hidroksit
H₂OH : Aminoxyl
CH₃OH: metanol

KISALTMALAR

EPA : Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
MAN : Maschinenfabrik
RON : research octane number (oktan sayısını araştırın)
MON : motor octane number (motor oktan sayısı)
AB : Avrupa Birliği
NEDC : New European Driving Cycle (Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü)
WLTC: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (Dünya Çapında Uyumlu Hafif Araç Test Döngüsü)
RDE : Real Driving Emissions (Gerçek Sürüş Emisyonları)
DPF : Dizel Partikül Filtresi
BSFC : Brake-specific fuel consumption (Frene özel yakıt tüketimi)
EGR : Exhaust Gas Recirculation (Egzoz Gazı Resirkülasyonu)
SCR : Selective Catalytic Reduction (Seçici Katalitik İndirgeme)
SCNR : Selective non-catalytic reduction (Seçici katalitik olmayan indirgeme)
DC : Direct current (Doğru akım)
HHO : Hydrogen generator (Hidrojen jeneratörü)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

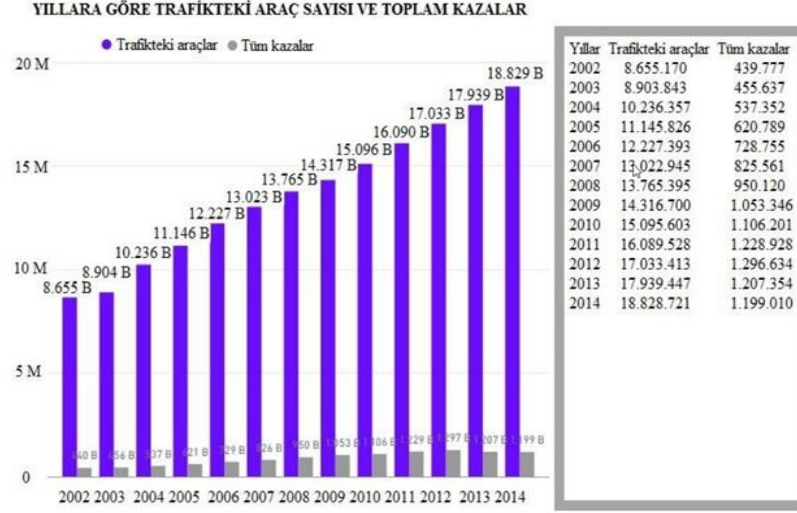
Alman mühendis Rudolf Diesel'in 1893-1897 yılları arasında yürüttüğü çalışmalar sonucunda ortaya çıkan dizel motorlar [1], farklı kullanım alanları nedeniyle dünyada vazgeçilmez olduklarını kanıtlamışlardır. Verimliliklerini artırmak ve çevre üzerindeki etkilerini azaltmak için çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir [2].

Daha iyi yakıt ekonomisi, daha yüksek güç ve daha az pahalı bakım ile dizel motorların popülaritesi önemli ölçüde artmıştır. Bu motorlar, insanları taşımak, dökme yükleri taşımak, sabit/mobil ekipmana güç sağlamak ve bu boyut aralığındaki diğer tüm cihazlardan daha ekonomik bir şekilde elektrik üretmek için kullanılır [2].

Çoğu küresel otomotiv pazarında son yıllarda rekor dizel araç satışları gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, en büyük termik santraller büyük miktarlarda elektrik üretmek için dizel motorları kullanırlar, tüm dünyada kırsal alanlarda elektrik üretimini merkezi olmayan hale getirmek için çok popüler santrallerdir. Dizel motorlar da birçok endüstriyel sektörde kullanılmıştır [3]. Böylece yakıt ekonomisi, bakım kolaylığı ve sağlamlığı nedeniyle tarımsal ekipman tedarikini mümkün kılarlar. Dizel motorlar daha az emisyon ürettikleri için benzinli motorlara bir alternatif olarak görülmüştür. Bununla birlikte, en yüksek emisyonları : Azot oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM), önemli sorunlar olarak kabul edilmiştir [4].

Otomobil endüstrisinin yıllar içinde dünya çapında gösterdiği gelişim kayda değer bir başarı öyküsü olmakla birlikte, dezavantajları da olmuştur. Aşağıdaki Şekil 1.1, yıllar içinde yollardaki araç sayısındaki artışı ve kaza sayılarını göstermektedir. Bununla birlikte, dünyadaki araç sayısının artmaya devam etmesi, emisyonların da artması

anlamına gelmektedir. Yollarda daha fazla araç olması daha fazla emisyon anlamına gelmektedir [5].



Şekil 1.1. Trafikteki araç sayısının yıllara göre dağılımı ve toplam kazalar [5].

Dizel egzoz gazları karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O), nitrojen (N_2), oksijen (O_2), karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC), nitrojen oksitler (NO_x) ve partikül maddeden (PM) oluşur, ancak çevreye zararlı olan daha küçük miktarlar da mevcuttur. CO_2 , H_2O , N_2 ve O_2 egzoz gazlarının %99'unu oluşturur. Kirleticiler olarak sınıflandırılan hem CO , HC , NO_x hem de PM , egzozun %1'ini temsil eder [1].

Hava kirletici emisyonları yerel hava kalitesini ve küresel iklimi etkilemektedir. Hava kirliliğinin sağlık üzerinde doğrudan etkisi vardır. Küresel iklim değişikliği sıcaklıkları ve hava modellerini etkilemiştir [7].

Dizel motorun yaydığı kirleticiler arasında nitrojen oksit (NO_x), içten yanmalı dizel motorun egzoz borusundan çıkan en zararlı kirleticilerden biridir. Azot oksit (NO_x) emisyonu da çevremizin bozulmasına önemli ölçüde katkıda bulunur. NO_x hava ile reaksiyona girerek nitrik asit (HNO_3) oluşturur ve bu da metropol alanlarda toprak kireçlenmesine ve su asitlenmesine katkıda bulunmuştur [4].

NO_x , nitrik oksit (NO) ve nitrojen dioksit (NO_2) içerir ve her ikisinin de çevreye olduğu kadar insanlara da zararlı olduğu kabul edilir. NO ve NO_2 , özellikle solunum

sistemi için tahriş edici bileşiklerdir [8]. Ayrıca, NO_x'e maruz kalma, insanlarda gözlenen kardiyovasküler etkilere de katkıda bulunabilir. Epidemiyolojik çalışmalar, NO₂'nin kirlilik epizodları sırasında gözlenen mortalite artışında bir risk faktörü temsil edebileceğini ileri sürmüştür. NO₂, NO'dan daha toksik olarak kabul edilir, insan sağlığını doğrudan etkiler ve esas olarak duman oluşumundan sorumlu olan ozon oluşumundan öncedir. Dizel motor egzozunda NO₂ ve NO oranı oldukça küçüktür, ancak yanma sonrası yanma odasında oluşan NO yüksek sıcaklık bölgesinde yanma işlemi çevrede hızla oksitlenerek NO₂ oluşturur [9].

Artan çevresel kaygılar ve daha katı emisyon standartları, nitrojen oksit (NO_x) emisyonlarını azaltmak için gelişmiş motor teknolojilerinin geliştirilmesine yol açmıştır [8]. Azaltılmış emisyonlar için sürekli artan talepler, motor tasarımcıları için devam eden bir zorluktur. İşler Son motor incelemeleri, güç silindirlerine, hava dağıtımına, yakıt yönetimine ve elektronik sistemlere yönelik iyileştirmelere veya yeni teknolojilerin dahil edilmesine odaklanmaktadır [4].

Azot oksit emisyonları farklı kıtalarda ve farklı ülkelerde farklı şekilde düzenlenmektedir, ancak ulusal hava kalitesi standardına uymak için, bu sınırlar emisyon sektörüne bağlı olarak yerel makamlar tarafından belirlenir, örneğin elektrik santralleri, gaz türbinleri vb. [9].

Araştırmacılar ve motor üreticileri, giderek daha kısıtlayıcı hale gelen egzoz emisyon standartlarının bir sonucu olarak NO_x emisyonlarını azaltmaya yönelik sistemler geliştirme eğilimindedir. Ayrıca, dünyadaki araç sayısının hızla artmasıyla birlikte, araçlardan kaynaklanan NO_x emisyonları çok ciddi sorunlar oluşturmuştur [4].

Motorlu taşıtlardan yayılan kirleticiler hava kirliliğinin ana nedenlerinden biridir. Bu nedenle motorlu taşıtlardan kaynaklanan azot oksit (NO_x) emisyonları uzun zamandır araştırma konusu olmuştur. Özellikle son yıllarda, fosil yakıtların giderek tükenmesi ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri, yanmalı motorlardan atmosfere NO_x emisyonlarını azaltmaya yönelik teknikler üzerine çok sayıda çalışma yapılmasına yol açmıştır.

Çalışmanın amacı, içten yanmalı motorlardan, özellikle de dizel motorlardan kaynaklanan NO_x emisyonlarını azaltmak için hidrojenle güçlendirilmiş bir yöntem geliştirmektir. Hidrojen, geleneksel olarak bir dizi alanda kullanılan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bunlar arasında amonyak endüstrisi, petrol arıtma ve füze rampaları yer almaktadır. Günümüzde hidrojen, otomobiller için yakıt ve indirgeme reaktifi olarak da kullanılabilir. Hidrojen doğada gaz halinde bulunmaz, ancak hidrokarbonlar, karbon ve su dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan elde edilebilir.

Bu yüksek lisans çalışması 7 bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1, tez ve tezin bölümleri hakkında genel bilgi vermektedir. Bölüm 2'de dizel motor tanıtılmaktadır. Bölüm 3'te dizel motor emisyonları, standartları ve emisyon limitleri hakkında bilgi verilmektedir. Bölüm 4'te motor emisyonlarını azaltmak için halihazırda kullanılan yöntemler anlatılmaktadır. Bölüm 5'te hidrojen tanımlanmakta, üretim süreci anlatılmakta ve hidrojen jeneratörünün tasarımı sunulmaktadır. Bölüm 6'da deneysel çalışma ve sonuçların kaydı sunulmaktadır. Bölüm 7'de tezin sonuçları değerlendirilmektedir.

BÖLÜM 2

DİZEL MOTORLAR

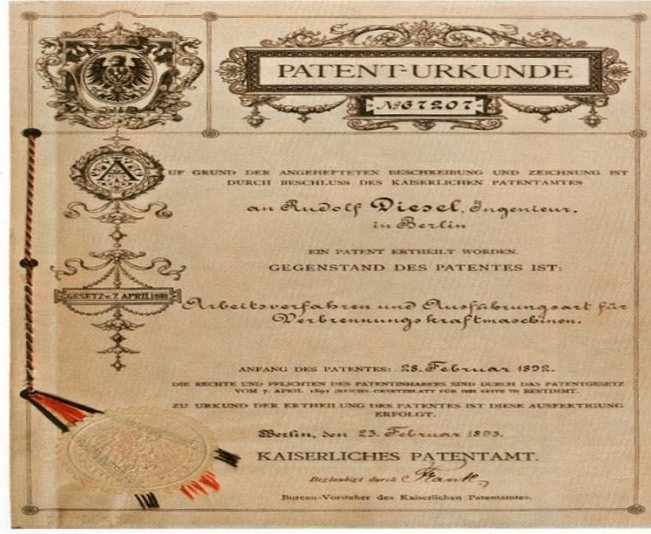
Dizel motor içten yanmalı bir motordur. Aşırı basınç altındaki bir gazdan mekanik iş sağlayan bir motordur. Yakıt yanma sistemi bu aşırı basıncı sağlar. İlk buhar motorlarından daha güçlü ve daha hafiftir [7]. Bu tip motorlar çok çeşitli cihazlarda bulunur: arabalar, motosikletler, uçaklar, çim biçme makineleri vb. Dizel motor genellikle aracın kaputunun altında bulunur ve bir krank mili ile bir biyel koluna bağlıdır [10].

2.1. DİZEL MOTORLARDA GELİŞMELER

Sıkıştırma ateşlemeli motor olarak da bilinen dizel motor, yanma odasına yakıt enjekte edildiğinde yanmanın kendiliğinden ateşleme ile tetiklendiği bir yanmalı motordur. Bunu başarmak için hava silindirlerde 14 :1 ila 25 :1 sıkıştırma oranında sıkıştırılır ve 700 ila 900°C'lik sıcaklıklara neden olur [4]. Kızdırma bujileri genellikle küçük motorları soğuk çalıştırmak için kullanılır. Hava-yakıt karışımının ateşlenmesini tetiklemeye yardımcı olan sıcak bir nokta oluştururlar [11].

Daha iyi yakıt ekonomisi, daha fazla güç ve daha düşük bakım maliyetleri sayesinde dizel motorların popülaritesi önemli ölçüde artmıştır [4].

Dizel motor adını, 23 Şubat 1893 tarihinde motor için patent alan Alman mühendis Rudolf Diesel' in 1893-1897 yılları arasındaki çalışmalarından almaktadır. [1].



Şekil 2.1. Rudolf Diesel patenti [12].

MAN'ın bir çalışanı olarak mühendis Rudolf Diesel, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıtlar kullanarak yüksek termal verimliliğe sahip motorlar üzerinde çalıştı. Diesel' in amacı verimsiz, çok ağır ve pahalı olan eski buhar motorlarının yerini almaktı. 1892'de dizel motorun ilk teorik çevrimini önerdi, ilk gerçek model ise 1897'de inşa edildi. Rudolf Diesel tarafından 1892 yılında önerilen orijinal çevrim sabit sıcaklıklı bir çevrimdi. Diesel 'in fikri, havayı o kadar sert sıkıştırmaktı ki hava sıcaklığı yanma sıcaklığını aştı [1],

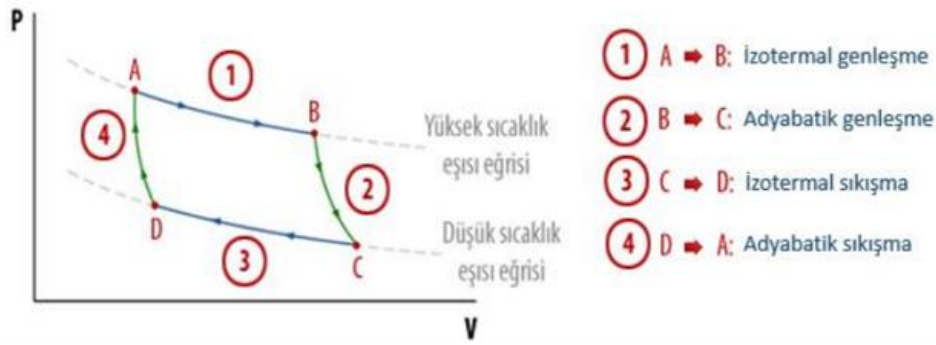
Yıllar sonra Diesel, orijinal çevriminin çalışmayacağını fark etti ve sabit basınç çevrimini benimsedi. Diesel, ilgili patent açıklamasında artık sıkıştırma sıcaklıklarının yanma sıcaklığını aşması gerektiğinden bahsetmemektedir. Artık bahsedilen tek şey, sıkıştırmanın ateşleme için yeterince yüksek olması gerektiğidir. [12].

Dizel yıllarca petrolden elde edilen benzin dışındaki yakıtları kullanabilmek için çalıştı. Kullanılan yakıt hafif akaryakıttı. 1897 yılında MAN, Rudolf Diesel 'in çalışmalarını temel alan ilk motoru üretti. İlk dizel motorlar gemiler ve nakliye araçları için üretildi. [6], 1930'larda Mercedes-Benz ilk dizel motorlu binek otomobili piyasaya sürdü [1].

Alman mucit ve makine mühendisi Rudolf Diesel ilk prototip dizel motoru yaratmayı başardı. Rudolf Diesel motoru, enerji üretimi uygulamalarında en yaygın kullanılan

motorlardan biri olmaya devam etti. Yıllar içinde çok sayıda iyileştirme ve geliştirme geçiren dizel motor, günümüzde endüstride en yaygın kullanılan motorlardan biridir. [1].

Rudolf Diesel tarafından tasarlanan makinenin verimliliği, hava sıkıştırmaya dayalı bir çalışma modu ile Carnot çevrimine dayanmıştır. Üretilen termal enerji ile genişleme şeklinde hareket enerjisi elde edilir. Makine döngüsü iki sabit sıcaklık (adyabatik) ve iki sabit sıcaklık (izotermal) ile karakterize edilir [12].



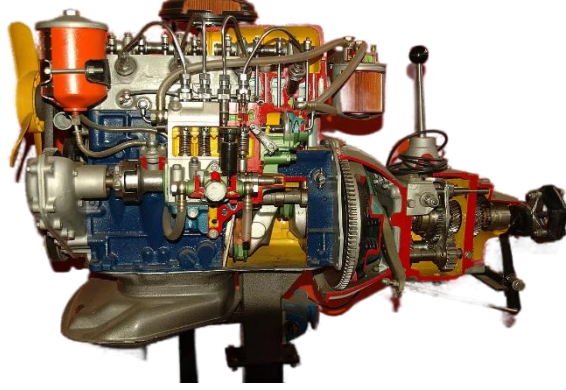
Şekil 2.2. Carnot çevrimi [12].

Günümüze kadar dizel motorlarda birçok değişiklik yapılmasına rağmen Rudolf Diesel 'in temelleri üzerinden ilerletildiği için bu motorlara hala dizel adı verilmektedir .

2.2. DİZEL MOTORLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİ

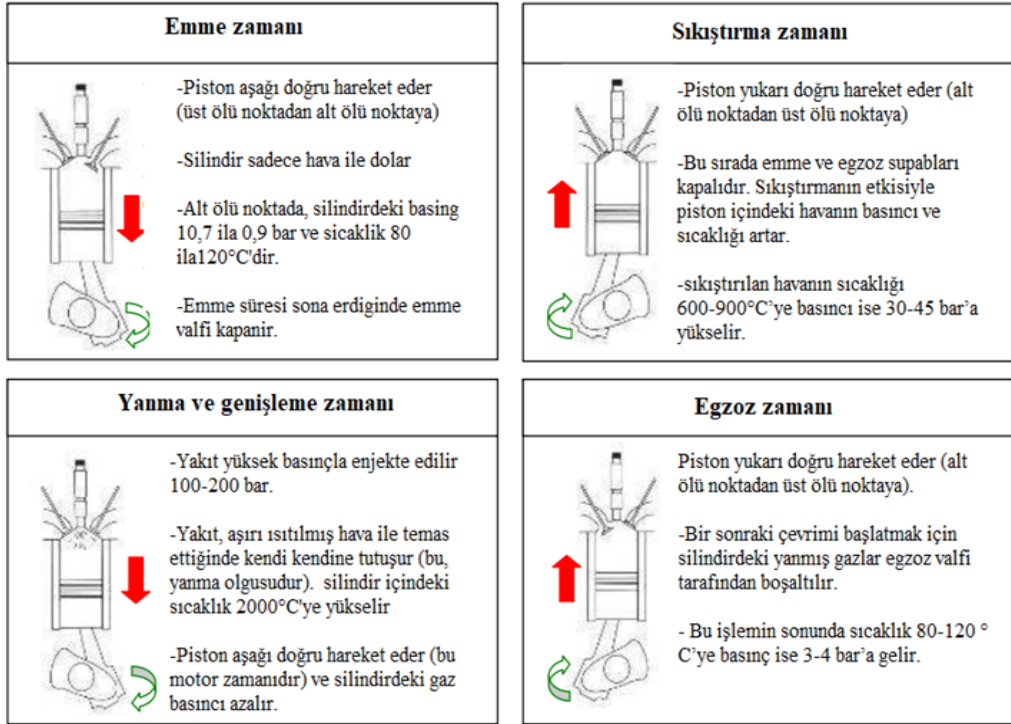
Dizel motor, silindirleri emme ve egzoz manifoldlarına bağlayan bir silindir kapağı tarafından kapatılan ve bir eksantrik mili tarafından kontrol edilen valflerle donatılmış silindirler içinde kayan pistonlardan oluşur [13]. Çalışması, dizel, ağır fuel oil veya ham bitkisel yağın silindir hacminin 1 :20'si kadar sıkıştırılmış (yaklaşık 35 bar) ve sıcaklığı 600°C'den yaklaşık 1.500°C'ye yükseltilmiş hava içinde kendiliğinden tutuşmasına dayanır. Yakıt enjekte edilir edilmez (atomize edilir edilmez), buji ateşlemesine gerek kalmadan neredeyse anında tutuşur. Karışım yandıkça silindirdeki sıcaklık ve basıncı (60 ila 100 bar) keskin bir şekilde artırarak pistonu geri iter, bu da

bir biyel kolu üzerinde çalışma kuvveti sağlar ve bu da krank milinin (veya biyel kolu-krank sistemi gibi motor aksı olarak hareket eden krank milinin) dönüşünü sağlar [13].



Şekil 2.3. Dizel motor modeli [14].

Bir dizel motor dört zamanlı (emme, sıkıştırma, yanma ve genişleme, egzoz) olarak çalışmaktadır. [12]



Şekil 2.4. Dört zamanlı dizel motorun gösterimi [12].

2.3. DİZEL MOTOR YAKITI

Dizel motorda yanma, yakıt (dizel) ve oksidan (hava) arasındaki bir reaksiyondur. [15].

Dizel motorlarda kullanılan yakıt dizeldir. Dizel, sıkıştırma ateşlemeli motorlar (dizel motorlar) için kullanılan bir yakıttır. Fiziksel olarak hafif bir akaryakıttır ve yasal olarak petrolün rafine edilmesiyle üretilen bir yakıttır.

Dizel, yaklaşık %75 doymuş hidrokarbonlardan (çoğunlukla alkanlar/parafinler) ve %25 aromatik hidrokarbonlardan (naftalinler ve alkil benzenler dahil) oluşan bir petrol türevidir. Ortalama kimyasal formülü $C_{12}H_{23}$ 'tür (yaklaşık $C_{10}H_{20}$ ila $C_{15}H_{28}$ arasında değişir) [17].



Şekil 2.5. Sıvı formdaki dizel yakıt görüntüsü [17].

Dizel yakıtın sahip olması gereken tüm özellikler dizel motorun kendine has özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Yalnızca havadan oluşan bir karışımı emer ve keskin bir şekilde sıkıştırarak ısınmasına neden olur. Sıkıştırma aşamasının sonunda, enjeksiyon pompası tarafından ölçülen dizel, çok yüksek basınç altında (100 MP üzerinde) yanma odasına püskürtülür ve burada buharlaştırılarak sıkıştırılmış hava ile karıştırılır [2]. Yanma, sıcaklık ve basınç koşullarının ve süreci tetiklemek için gereken konsantrasyonların mevcut olduğu odanın bir veya daha fazla bölgesinde kendiliğinden tutuşma yoluyla gerçekleşir [18].

Dizelin fiziksel özellikleri, iklim koşullarına bağlı olarak kullanıldığı yere göre biraz farklılık gösterir. Türkiye gibi ılıman iklime sahip ülkeler ile aslında tüm İskandinav bölgelerini içeren "arktik" iklime sahip ülkeler arasında bir ayrım yapılır. Dizel yakıtın özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Yoğunluk

Dizelin yoğunluğu ılıman ülkelerde 15°C'de 0.820 ile 0.845 kg/l arasında, kutup ülkelerinde ise 0.800 ile 0.845 kg/l arasında olmalıdır [19]. Minimum yoğunluk değerinin belirlenmesi, akış hızı hacme göre ayarlanan bir enjeksiyon pompası vasıtasıyla motor için yeterli güç elde etme kaygısıyla gerekçelendirilmiştir; dizelin yoğunluğu ne kadar yüksek olursa, tam güçte sağlanan enerji miktarı da o kadar fazla olur. Buna ek olarak, belirli kirleticilerin emisyonlarını azaltmak ve tam güçte siyah duman oluşumunu önlemek için yoğunluğa maksimum bir sınır getirilmiştir [2].

- Uçuculuğu

Uçuculuk, yakıtların buharlaşma kabiliyetini ifade eder. Geleneksel dizel yakıtlar 149°C ile 371°C arasındaki sıcaklıklarda buharlaşır. Gaz yağı benzine göre çok daha az uçucudur ve bu nedenle buharlaşma yoluyla neredeyse hiç kayba uğramaz, bu da önemli bir çevresel avantajdır [12].

- Viskozitesi

Viskozite, akışkanların akma eğilimine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Dizel motor enjeksiyon pompalarının aşırı mekanik hassasiyeti, dizel yakıtın çok özel viskozite özelliklerine sahip olduğu anlamına gelir. Viskozite, ılıman iklimlerde 40 °C'de 2 ila 4,5 mm²/s arasında olmalıdır; İskandinav bölgelerinde daha düşük değerlere (1,2 ila 4 mm²/s arasında) izin verilir [18].

- Parlama noktası

Parlama noktası, bir sıvının yüzeyinde yanıcı bir karışım oluşturabileceği en düşük sıcaklıktır. Yani bir maddenin parlama noktası ne kadar düşükse, tutuşması da o kadar kolay olur. Dizel yakıt "yanıcıdır" ve parlama noktası 56°C'dir. Dizelin tutuşması için sıcak olması gerekir. [18].

- Setan sayısı

Setan sayısı, enjeksiyon ile yanmanın başlaması arasındaki süreyi gösterir. Yüksek setan sayısı, yağın daha verimli yanmasını ve dolayısıyla daha iyi performansı gösterir. Günümüzde dizel için gerekli minimum setan sayısı 51'dir [19].

- Sülfür içeriği

Günümüzde üretilen dizel yakıttaki sülfür seviyeleri önemli ölçüde azaltılmıştır. Dizel yakıtın sülfür içeriği şu anda düzenlenmektedir. Birçok ülke dizel yakıtın sülfür içeriğini 15 mg/kg'ın altına düşürmektedir [12].

- Isıl değeri

Yakıtın birim kütle başına sahip olduğu enerjiyi gösterir. Dizel yakıt için 2100 j/g-k olarak tahmin edilmektedir [19].

2.4. DİZEL MOTORLARIN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Dizel motorların birçok avantajı vardır [20]:

- Daha iyi bir sıkıştırma oranı;
- Daha yüksek verimlilik: benzinli bir motor için %36'ya kıyasla yaklaşık %42;
- Daha düşük hacimsel tüketim;
- Daha eksiksiz yanma (böylece daha az CO₂ emisyonu)
- Daha düşük yakıt tüketimi;

- Daha hassas valf hareketi;
- Yanma odasında yakıt atomizasyonunun daha iyi kontrolü;
- Daha güçlü parçalar sayesinde daha uzun hizmet ömrü;
- Daha ucuz yakıt.

Ancak dizel motorların bir dizi dezavantajı vardır [20]:

- Dizel araçlar genellikle standart araçlardan daha pahalıdır;
- Bir dizel motorun onarımı daha pahalıdır;
- Soğuk çalıştırmaya yatkınlık daha düşük;
- Dizel motorlar ağırdır.

Bu tezin ikinci bölümü içten yanmalı motorları, özellikle de dizel motorları açıklamaktadır. İcadından bu yana dizel motorlar sürekli gelişim göstermiştir. Dizel motorlar, özellikle dayanıklılıkları ve dizel yakıtın daha düşük maliyetli olması nedeniyle çok kullanışlı olduklarını kanıtlamışlardır. Dizel motorlar ayrıca benzinli motorlara göre daha az emisyon yayarlar ve bu nedenle çevre üzerinde daha az olumsuz etkiye sahiptirler.

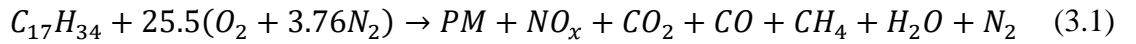
Bu belgenin geri kalanında dizel motor emisyonları ve bu emisyonların, özellikle de azot oksitlerin (NO_x) nasıl azaltılacağı ele alınmaktadır. Bir sonraki bölüm dizel motor emisyonlarının analizine ayrılmıştır.

BÖLÜM 3

DİZEL MOTOR EMİSYONLARI

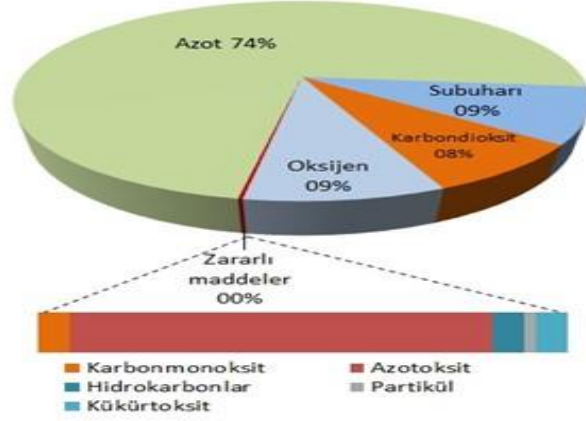
Dizel motorlar birçok endüstriyel sektörde ve ulaşım araçlarımızda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorlardan kaynaklanan emisyonların azaltılmasında önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, neden oldukları kirlilik hem hava kalitesi üzerindeki etkileri nedeniyle çevre hem de özellikle işyerlerinde maruz kalanların sağlığı üzerindeki etkileri nedeniyle sağlık açısından bir endişe kaynağı haline gelmiştir [21]. Dizel motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonları, bileşimi yakıtın kalitesi, motorun tipi, yaşı, ayarları ve bakımı gibi birçok faktöre bağlı olan karmaşık ve değişken bir gaz ve partikül karışımıdır [22]. Ancak özellikle yakıt ve oksidan arasındaki yanma reaksiyonuna bağlıdır.

Yanma, yakıtın havadaki oksijenle birleşerek enerji açığa çıkardığı kimyasal bir reaksiyondur. Dizel motorlarda kullanılan dizel yakıt $C_{17}H_{34}$ formülüne sahiptir. İdeal yanma sırasında oluşan yanma ürünleri CO_2 , H_2O ve N_2 'dir. Yanmanın tam olmaması durumunda ana yanma ürünlerine ek olarak eksik yanma ürünleri de oluşur. Bir dizel motorda yanma aşağıdaki denklemle ifade edilir [12].



Şekil 3.1. Dizel motor egzoz gazları [23].

Dizel motorlardan kaynaklanan partikül madde ve NO_x emisyonları benzinli motorlardan kaynaklanana göre oldukça yüksektir. Dizel motorlar fakir hava ile çalıştığından ve yanma sıcaklıkları yüksek olduğundan, NO_x ve PM oluşumu artarken, HC ve CO oluşumu benzinli motorlara göre daha düşüktür [24].



Şekil 3.2. Dizel motorlarda egzoz emisyonları [25].

3.1 DİZEL MOTOR EMİSYONLARININ OLUŞUMU

Dizel motorlar tarafından oluşturulan ana emisyonlar CO₂, CO, HC, PM ve NO_x'tir.

3.1.1. Karbon Monoksit (CO) ve Karbon Dioksit (CO₂)

Karbon monoksit (CO) kokusuz, renksiz ve yanıcı bir gaz olup insan ve hayvan sağlığı için tehlikelidir ve çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Karbon monoksit, karbon atomlarının yanma sırasında oksijenle karşılaşmaması sonucu oluşur. O₂ ile karşılaşmama, silindirin belirli noktalarında O₂'nin bulunmamasından veya yetersizliğinden kaynaklanabilir [26].

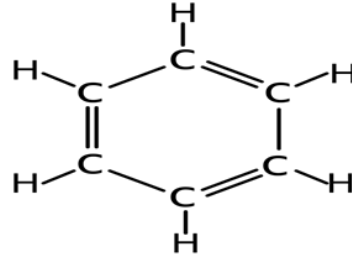
Dizel motorlar benzinli motorlara göre daha fakir hava ile çalıştığından, dizel motorlarda yanma sonucu oluşan CO miktarı benzinli motorlara göre daha düşüktür. Oluşan CO miktarı yanma verimliliğinin bir göstergesidir. Yüksek yanma verimliliğine sahip motorlarda (tam veya eksik yanma), CO miktarı daha düşüktür.[2].

Karbondioksit (CO₂) ise dizel motorlardaki emisyon oranı yakıtın kalitesine, yanmasına ve motorun verimliliğine göre değişir. Yanma sırasında oksijen ile reaksiyona giren karbon ve hidrojen CO₂'ye dönüşür. Yakıtın yanma içeriği de CO₂ emisyonlarının oranı üzerinde etkilidir. Sülfür içeriği CO₂ emisyonlarını artırır. Motor verimliliği yakılan yakıt miktarını azaltarak daha az yakıt kullanılmasını sağlar ve bu da daha düşük emisyonlara neden olur. CO₂ ve CO emisyonları sera etkisine neden olur ve iklim değişikliğinin ana nedenlerinden biridir [2].

3.1.2. Hidrokarbon (HC)

HC, yanma sırasında yanmayan elementleri, diğer bir deyişle yanmamış hidrokarbonları ifade eder. Hidrojen atomları H ve karbon atomları C'den oluşurlar. Araba motorları HC'nin başlıca üreticileridir: emisyonların %58'i. Ancak dizel motorlar benzinli motorlara göre daha az HC yayar (herhangi bir düzenleme yoktur). Yanmamış hidrokarbonlar, ortam havasına atıldıklarında ozon oluşumuna katkıda bulunurlar[2]. İnsan sağlığı açısından, yanmamış hidrokarbonlar çok zararlıdır ve (HC'nin sinir sistemi üzerindeki depresan etkisi nedeniyle) nevrasteni, depresyon ve anksiyeteye yol açabilen çok sayıda hastalığa (örn. benzen) neden olur. Kronik, uzun süreli maruziyet sonuçta beyin dejenerasyonuna ve kansere yol açabilir [20].

Hidrokarbonlar, egzoz emisyonunda birçok hidrokarbon çeşidinin bir arada bulunmasıyla oluşur. Genel olarak kimyasal formülasyonu C_nH_m olarak ifade edilir. Hidrokarbonlar yanma sırasındaki hava fazlalığı durumunda olduğu gibi yakıt fazlalığı durumunda da (zengin karışım) oluşur. Yanma sırasında çok fazla hava olduğunda yanma odasındaki sıcaklık düşer ve tam yanma olmaz bu durumda HC miktarı artar. Karışımın zengin olması durumunda da yetersiz oksijen olacağı için yine tam yanma olmaz ve HC miktarı artar. Bir hidrokarbon olan benzen molekülünün kimyasal yapısı Şekil 3.3'te gösterilmiştir [20].



Şekil 3.3. Benzen moleküler yapısı [26].

3.1.3. Azot Oksit (NO_x)

Genellikle NO_x formülü altında gruplandırılan azot oksitleri şunlardan oluşur: azot monoksit (NO), azot dioksit (NO₂), azot oksit (N₂O), dinitrojen tetroksit (N₂O₄) ve azot trioksit (N₂O₃). Ağlar tarafından analiz edilen bileşikler NO ve NO₂ olup, bunların toplamı kokulu ve oldukça zehirli bir gaz olan azot oksitler (NO_x) olarak adlandırılır [27].

Dizel motorlarda yanma sonunda oluşan azot oksitlerin miktarı 50 ila 1000 ppm arasında olup, bunların %85'i NO, %15'i NO₂ ve %1'den azı N₂O'dur. NO renksiz, kokusuz bir gazdır. Yüksek basınç ve sıcaklıkta N₂, O₂ ile birleşerek NO oluşturabilir. Aynı zamanda, azot oksidasyon reaksiyonu bir redoks reaksiyonudur; düşük sıcaklık ve düşük basınçta reaksiyon tersine döner [28]. Yüksek sıcaklık bölgesinde alev sonrası yanma işleminde yanma odasının içinde NO oluşur. Yanma odası içinde NO oluşumu ve ayrışması, genişletilmiş Zeldovich mekanizması ile açıklanabilir. Moleküler nitrojenden NO oluşumunu yöneten neredeyse stokiometrik bir yakıt-hava karışımındaki ana reaksiyonlar şunlardır: [4]



NO_x emisyonlarının ana nedeni silindir içindeki sıcaklığın maksimum seviyenin 1800K üzerinde olmasıdır. Eğer çok fazla hava varsa, NO_x emisyonları artar [4]. Dizel motorlar benzinli motorlara göre daha fazla hava ile çalıştığından, dizel motorlardan kaynaklanan NO_x emisyonları daha yüksektir.

Bu nedenle günümüzde dizel motorların geliştirilmesi daha çok çevredeki zehirli gazların azaltılmasına odaklanmıştır.

3.1.4. Partikül Madde (PM)

Partikül oluşumu dizel yakıtın temel özelliklerinden biridir. Dizel araçlarda gözlenen siyah dumanın ana nedenidir. Partiküller temel olarak çekirdekteki karbondan ve etrafındaki yine karbon içeren organik ve inorganik bileşiklerden oluşur. Bu bileşikler aynı zamanda karbon, hidrokarbon ve sülfat içeren maddelerdir [29].

Dizel motorlarda partikül oluşumu yakıt türüne ve hava-yakıt oranına bağlıdır. Yanma sırasında, karbon atomları yeterli oksijen bulamazsa, kurum şeklinde egzoz gazlarına salınırlar [30].

Dizel motor emisyonları CO₂, CO, HC, NO_x ve PM olarak belirtilmiştir. Araçlardan çıkan siyah gazların içinde bulunan bu elementlerin hepsi sağlığa zararlıdır ve çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Günümüzde dizel motorların geliştirilmesi daha çok yaydıkları zararlı gazları kontrol etmeye ve azaltmaya odaklanmaktadır. Emisyonları sınırlandırmak için yönetmelikler oluşturulmuş ve standartlar tanımlanmıştır.

3.2. DİZEL MOTORLAR İÇİN EMİSYON STANDARTLARI

Son yıllarda, çevresel bozulma kötüleştiğçe enerji verimliliği ve kirliliğin önlenmesi küresel öncelikler haline gelmiştir. Otomobil emisyonlarını en aza indirmek için etkili stratejiler bulmak giderek daha önemli hale gelmektedir. Elektrikli araçların gelişimi oldukça umut vericidir, ancak yüksek maliyet, sınırlı sayıda şarj istasyonu ve kısa menzil gibi bir dizi faktörün hala gözden geçirilmesi gerekmektedir.

Buna ek olarak, mükemmel verimlilikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle dizel motorlar hâlâ yaygın olarak kullanılmakta ve günümüzde enerji tüketimi ve çevre kirliliğinin önemli bir kaynağı haline gelmiştir. Ancak dizel motorlar, zayıf yanan yakıtlar

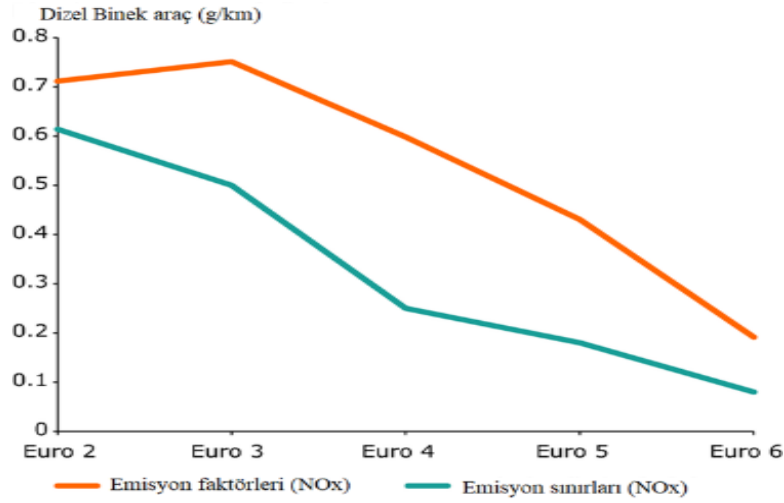
kullanmaları ve yanma süreçlerindeki yüksek sıcaklık ve basınçlar nedeniyle yüksek düzeyde emisyon üretirler. Dizel motorlardan yayılan başlıca kirleticiler azot oksitler (NO_x) ve ince partiküller (PM) olup, bunları yanmamış hidrokarbonlar (HC) ve karbon monoksit (CO) takip etmektedir. Bu atmosferik kirletici emisyonları Avrupa Birliği'nde (AB) erken ölümlerin başlıca çevresel nedenidir; solunum yolu hastalıklarına neden olmakta ve önemli sağlık harcamalarına yol açmaktadır. En son verilere göre, sadece üç atmosferik kirletici (ince partiküller (PM_{2.5}), nitrojen dioksit (NO_2) ve ozon (O_3)) AB'de yılda 400.000 erken ölümden sorumludur ve bunların yaklaşık 70.000'i doğrudan nitrojen dioksit ile bağlantılıdır. Kentsel ulaşım aynı zamanda birçok kentsel alanın hava kirliliği sınırlarını aşmasının ve dolayısıyla küresel ısınma olgusunun şiddetlenmesinin nedenlerinden biridir. Emisyon sorunları araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Özellikle azot oksitler (NO_x) olmak üzere bu emisyonların azaltılması büyük bir zorluk olmaya devam etmektedir [30].

Son birkaç on yılda, Avrupa Birliği ve diğer uluslararası kuruluşlar gibi komisyonlar, yakıt kalitesini iyileştirmek ve yeni araçlar için giderek daha sıkı emisyon sınırları belirlemek suretiyle dizel motorlu karayolu taşıtlarından kaynaklanan atmosferik kirletici emisyonlarını kademeli olarak azaltma çabalarına öncülük etmiştir. Bu, üreticilerin ürünlerini yola çıkarmadan önce standartlara uymak zorunda oldukları anlamına gelmektedir [29]. Dizel motor emisyonlarına ilişkin yasa ve yönetmelikler dünya çapında giderek daha sıkı hale gelmekte ve bu emisyon standartlarını uygulamak için birçok bölgede büyük yatırımlar yapılmaktadır.

Dizel motorlar için Avrupa emisyon standartları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Binek otomobiller için Euro 3 emisyon standartları ile karşılaştırıldığında, Euro 6 emisyon standartları dizel motorlardan kaynaklanan HC ve NO_x emisyonları için daha katı standartlar önermektedir. Özellikle NO_x emisyon limiti %64 oranında azaltılarak 0,50 g/km'den 0,08 g/km'ye düşürülmüştür. Partikül madde emisyon limitleri ise %90 oranında azaltılarak 0.50 g/km'den 0.05 g/km'ye düşürülmüştür. Avrupa ayrıca Yeni Avrupa Sürüş Döngüsünü (NEDC) Dünya Hafif Araç Test Döngüsü (WLTC) ile değiştirmiştir. Gerçek yaşam koşullarında yapılan ölçümlere dayalı emisyonları sınırlandırmak için 2017 yılında Gerçek Sürüş Emisyonu (RDE) testinin gerekliliklerini aşamalı olarak uygulamaya başlamıştır [30].

Çizelge 3.1. Dizel motorlu araçlar için Avrupa Birliği emisyon standartları [30].

Aşama	Tarih	CO	HC + NO _x	NO _x	PM
		g/km			
Euro 1	1992.07	2.72(3.16)	0.97(1.13)	-	0.14 (0.18)
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	0.7	-	0.08
Euro 2, ID	1996.01	1.0	0.9	-	0.10
Euro 3	2000.01	0.64	0.56	0.50	0.05
Euro 4	2005.01	0.50	0.30	0.25	0.025
Euro 5a	2009.09	0.50	0.23	0.18	0.005
Euro 5b	2011.09	0.50	0.23	0.18	0.005
Euro 6	2014.09	0.50	0.17	0.18	0.005



Şekil 3.4. NO_x emisyonları ve standartlarındaki değişiklikler [31].

Çizelge 3.1'deki rakamlar her bir tehlikeli unsur için aşılmaması gereken emisyon sınırlarını temsil etmektedir. Ancak, Şekil 3.4'ün NO_x örneğinde gösterdiği gibi, bu standartlara uymak her zaman zordur.

Şekil 3.4 ayrıca farklı Euro standartlarını karşılayan dizel otomobiller için gerçek koşullar altında ve kentsel ortamlarda NO_x emisyon faktörlerinin gelişimini ve tip onay standartlarının gelişimini göstermektedir. Bu evrim, otomotiv sektörünün sürekli büyümesi ile açıklanabilir.

Avrupa Birliği gibi Çin de emisyon gerekliliklerini belirlemiştir. Dünyanın en büyük otomobil üreticilerinden biri olan Çin, yollardaki araç sayısında hızlı bir büyüme yaşamaktadır. Buna ek olarak, Çin'in binek otomobiller ve yeni hafif ticari araçlar için emisyon gereklilikleri Çin 6 standartlarıyla eşleşecek şekilde yenilenmiştir [30].

Çizelge 2 ve 3, Çin 3, Çin 5 ve Çin 6 için emisyon kısıtlamalarını göstermektedir. Bunlardan Çin 6 emisyon standartları 2016 yılında önerilmiş ve 2021 yılında uygulamaya konulmuş olup, Euro 6 standardına kıyasla HC'yi %50, NO_x'i %40 ve PM'yi %33 oranında azaltmayı hedeflemektedir. 2007'de uygulanan Çin 3 standardı ile karşılaştırıldığında, Çin 6b Sınıf I, Sınıf II ve Sınıf III standartlarının NO_x emisyon sınırları sırasıyla 0,50 g/km, 0,65 g/km ve 0,78 g/km'den 0,035 g/km, 0,045 g/km ve 0,050 g/km'ye düşmüştür. Çin 6b standardı Temmuz 2023'ten itibaren uygulanmaya başlanacaktır [30].

RDE uyumluluk kuralları, güncellenmiş NO_x ve PM limitleri ile sıkıştırma ateşlemeli motorlar için geçerlidir. Buna ek olarak hem yolculuğun şehir içi kısmı hem de tüm yolculuk için bir emisyon kısıtlaması uyum faktörü uygulanır. RDE verileri Temmuz 2023'ten önce gözlemlenmeli ve kaydedilmelidir [30].

Çizelge 3.2. Çin'in dizel motorlu araçlar için emisyon standartları [30].

Aşama	Kategori	Sınıf	CO	HC + NO _x	NO _x	PM
			g/km			
China 3	Tip 1		0.64	0.56	0.50	0.050
		Tip 2	I	0.64	0.56	0.50
		II	0.80	0.72	0.065	0.070
		III	0.95	0.86	0.78	0.100
China 4	Tip 1		0.50	0.30	0.25	0.025
		Tip 2	I	0.50	0.30	0.25
		II	0.63	0.39	0.33	0.040
		III	0.74	0.46	0.39	0.060
China 5	Tip 1		0.50	0.230	0.180	0.0045
		Tip 2	I	0.50	0.230	0.180
		II	0.63	0.295	0.235	0.0045
		III	0.74	0.350	0.280	0.0045

Çizelge 3.3. Çin 6 emisyon standartlar [30].

Aşama	Kategori	Sınıf	CO	HC	NO _x	N ₂ O	PM
			g/km				
China 6a	Tip 1		0.700	0.100	0.060	0.020	0.0045
	Tip 2	I	0.700	0.100	0.060	0.020	0.0045
		II	0.880	0.130	0.075	0.025	0.0045
		III	1.000	0.160	0.082	0.030	0.0045
China 6b	Tip 1		0.500	0.050	0.035	0.020	0.0030
	Tip 2	I	0.500	0.050	0.035	0.020	0.0030
		II	0.630	0.065	0.045	0.025	0.0030
		III	0.740	0.080	0.050	0.030	0.0030

Sadece dünya çapında dizel motorlar için geçerli olan ve giderek sıkılaştan düzenlemelere uymak için değil, aynı zamanda çevreyi korumak için de kirletici emisyonların azaltılması giderek daha acil hale gelmektedir. Bu nedenle dizel motorlardan kaynaklanan emisyonları en aza indirmek için etkili stratejiler uygulamak önemlidir.

Bu çalışmanın bir sonraki bölümü, dizel motor emisyonlarının kontrol edilmesi ve azaltılması için günümüzde halihazırda kullanılan strateji ve yöntemleri ele almaktadır.

Bu tezin 4. bölümü, bu çalışmanın bir parçası olarak emisyonların azaltılması için geliştirilecek strateji hakkında değerli bilgiler sunmaktadır.

BÖLÜM 4

DİZEL MOTORLARDA EMİSYON KONTROL SİSTEMLERİ

Dizel motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonları çevreye ve insan sağlığına önemli ölçüde zarar vermektedir. Dünya çapında belirlenen emisyon sınırlarına rağmen, emisyonlar hala artmaktadır ve ciddi bir sorundur. Atmosfere yayılan egzoz emisyonlarının kontrol altına alınmaması dünyayı yaşanmaz hale getirecektir. Bu nedenle dizel motor kirliliğinin kontrolü mutlak bir önceliktir. Araştırmacılar ve motor üreticileri, giderek daha katı hale gelen sınırlamalar nedeniyle emisyonları azaltacak sistemlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadır. Bu bölümde çalışma, CO, CO₂, PM vb. gibi diğer emisyonların davranışını analiz ederken NO_x 'in azaltılmasına yönelik yöntemlere odaklanmaktadır.

4.1. AZOT OKSİTLER (NO_x) DİZEL MOTORLAR İÇİN YİNELENEN SORUN

Elektrikli otomobillerin ortaya çıkmasıyla birlikte, çok kullanışlı olabilen ancak yine de tehlikeli olan dizel motorlu araçların geleceği sorusu ortaya çıkmaktadır. Ancak Bosch gibi bazı üreticiler, düşük emisyonlu dizel motorlu araçlar tasarlamamın mümkün olduğuna ikna olmuş görünüyor.

Küresel ısınma gibi faktörlerle ilgili endişeler karşısında dizel motorlar giderek daha fazla tartışılıyor [32]. 2018'de Fransız basınında otomotiv teknolojisi üzerine çıkan bir incelemede (<https://www.autoplus.fr/>), üretici Bosch'un sorunu neredeyse çözdüğü duyuruldu. Gaz devridaimi ve NO_x dönüşümü sorunlarını çözmek için Bosch, dinamik bir sürüş durumunda sürücünün isteklerini takip edebilen daha duyarlı turbolar benimsemiştir.

Bosch, NO_x dönüşümünün en etkili olduğu sıcaklık olan en az 200°C'de tutmak amacıyla egzoz gazlarının sıcaklığını kontrol etmek için bir sistem geliştirmiştir [33].



Şekil 4.1 Kontrollü emisyonla sahip Bosch dizel otomobil modeli [33].

Şekil 4.1, Bosch tarafından önerilen deneysel dizel araç modelini göstermektedir. Aracın çalışırken siyah duman yaymaması dikkat çekmiştir. Egzoz borusu doğrudan emisyonların izlendiği bir muhafazaya bağlanmıştır [33].

- Bosch ölçümleri, tipik yolculuklarda NO_x emisyonlarının 2020 standartlarından neredeyse 10 kat daha düşük olduğunu göstermiştir;
- Bosch, bu teknolojinin halihazırda var olan bileşenlere dayandığını garanti ediyor. Bosch'a göre CO₂ emisyonları da artmamalıdır;
- 2017 yılında ortalama NO_x seviyesi 168 mg/km idi. Bosch'un bu seviyeyi 120 mg/km'ye düşürebileceğini iddia ettiği bildirilmiş.

Bu umut verici sonuçlara rağmen, Bosch tarafından önerilen teknoloji araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Daha ağır araçlarla ve daha zorlu sürüş koşullarıyla uyumluluğu konusunda sorular var. Teknolojinin uzun ömürlülüğü, bakımı ve araç performansı üzerindeki etkisi de analiz edilmeyi beklemektedir. Teknolojinin finansal maliyeti ve dünya çapında dağıtımını da geliştirilmeyi beklemektedir.

4.2 DİZEL ARAÇLARDAN KAYNAKLANAN EGZOZ EMİSYONLARINI AZALTMA YÖNTEMLERİ

Bu bölüm azot oksit (NO_x) emisyonlarının azaltılmasına yönelik yöntemlere odaklanmaktadır. NO_x emisyonlarını kontrol etme teknikleri şunları içerir:

- Egzoz gazı devridaimi (EGR)
- Seçici Katalitik İndirgeme (SCR)
- Seçici katalitik olmayan indirgeme (SNCR)

4.2.1. Egzoz Gazı Devridaimi (EGR)

Egzoz gazı devridaimi veya EGR, en son emisyon standartlarını karşılamak için emisyon miktarını çok fazla artırmadan azot oksit (NO_x) emisyonlarını azaltmak amacıyla egzoz gazlarının bir kısmını emme manifolduna yönlendiren bir sistemdir [34]. Devridaim egzoz gazları temel olarak karbondioksit, azot oksitler, sülfür oksitlerden vb. oluşur. Bu karışım atmosferik havadan daha yüksek bir özgül ısıya sahiptir. Devridaim egzoz gazları, yanma odasına giren temiz havayı motor egzoz gazlarında bulunan karbondioksit ve su buharı ile değiştirir [35].

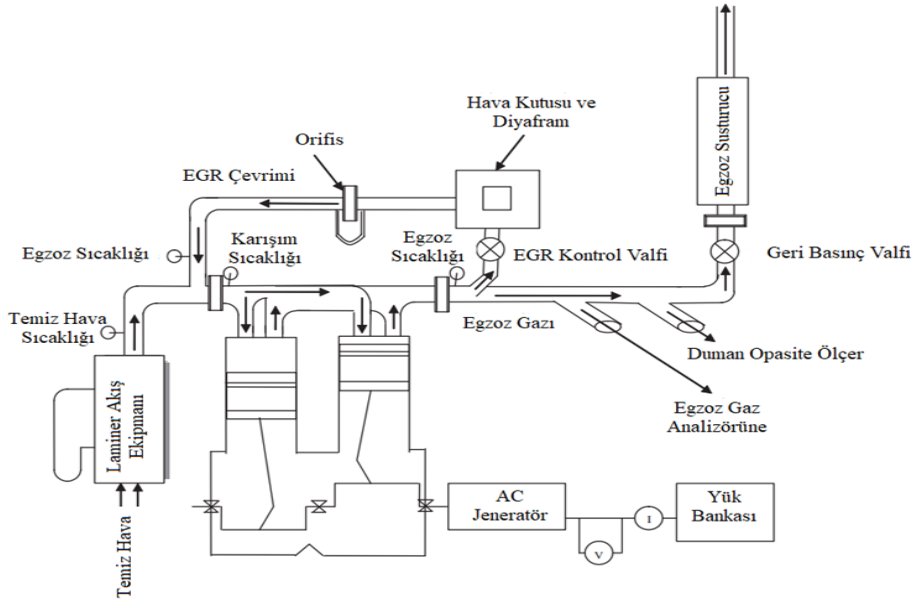
Bu hava değişiminin bir sonucu olarak, giriş karışımındaki oksijen miktarı azalır. Yanma için mevcut olan azaltılmış oksijen, etkin hava yakıt oranını azaltır. Hava-yakıt oranındaki bu etkili azalma, egzoz emisyonlarını önemli ölçüde etkiler. [34] Ek olarak, egzoz gazlarının giriş havası ile karıştırılması, giriş karışımının özgül ısısını artırır, bu da alev sıcaklığında bir azalmaya yol açar. Bu nedenle, giriş havasındaki daha düşük miktarda oksijen ve eşit derecede daha düşük alev sıcaklığı kombinasyonu, NO_x oluşum reaksiyonlarının hızında bir azalmaya neden olur [34].

EGR (%), toplam emme karışımında (M_i) devridaim edilen egzoz gazının (M_{EGR}) kütle yüzdesi olarak tanımlanır [4].

$$EGR(\%) = \frac{M_{EGR}}{M_i} \times 100 \quad (4.1)$$

Desantes ve ark. EGR oranı tespiti için emme ($[CO_2]_{int}$) ve egzoz manifoldunda ($[CO_2]_{exh}$) NDIR bazlı CO_2 konsantrasyonu ölçümü kullandı.

$$EGR = \frac{[CO_2]_{int} - [CO_2]_{atm}}{[CO_2]_{exh} - [CO_2]_{atm}} \quad (4.2)$$



Şekil 4.2. Bir dizel motorda EGR devridaim modeli [4].

D. Agarwal ve Al., EGR'nin performans ve emisyonlar, karbon birikintileri ve çeşitli dizel motor parçalarının aşınması üzerindeki etkisini araştırmak için araştırma ve deneysel çalışmalar yürütmüştür [4]. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, EGR egzoz gazlarını yanma odasına geri göndererek emme havasındaki oksijenin yerini alır. Egzoz gazları yanma odasındaki oksijen konsantrasyonunu azaltır ve emme havası karışımının özgül ısısını artırarak alev sıcaklığında düşüşe neden olur. Azalan oksijen ve düşük alev sıcaklıkları dizel motor performansını ve emisyonları çeşitli şekillerde etkiler.

D. Agarwal ve Al., tarafından gerçekleştirilen deneyler, bir dizel motorun daha düşük yüklerine uygulanan daha yüksek bir EGR oranının, motor performansından ödün vermeden ve CO_2 , CO vb. gibi diğer emisyonları artırmadan NO_x 'i önemli ölçüde azalttığını göstermiştir [4].

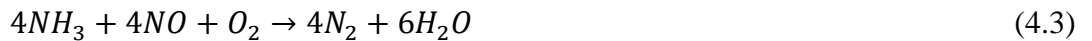
Bununla birlikte, yüksek dizel motor yüklerinde uygulanan yetersiz EGR oranı NO_x'i önemli ölçüde azaltır, ancak motor performansını düşürür ve CO₂ gibi emisyonlarda artışa neden olur. EGR uygulaması pistonlarda daha fazla kurum birikmesine ve bazı motor parçalarının daha hızlı aşınmasına neden olur [34].

4.2.2. Seçici Katalitik İndirgeme (SCR)

Baca gazı arıtma yöntemleri arasında Seçici Katalitik İndirgeme (SCR), verimliliği, seçiciliği ve ekonomisi nedeniyle dizel motorlarda yakıt yanmasında NO_x emisyonlarını kontrol etmek için dünya çapında en gelişmiş ve kullanılan yöntemdir. Reaksiyon, üre CO(NH₂)₂ veya saf amonyak NH₃ olabilen azot içeren bir indirgeyici madde enjekte edilerek azot oksitlerin (NO_x) indirgenmesinden oluşur [36,37]. Amonyak daha çok enerji santralleri gibi büyük endüstriyel tesisler için kullanılırken, üre daha çok küçük tesisler veya araçlar için kullanılır [38].

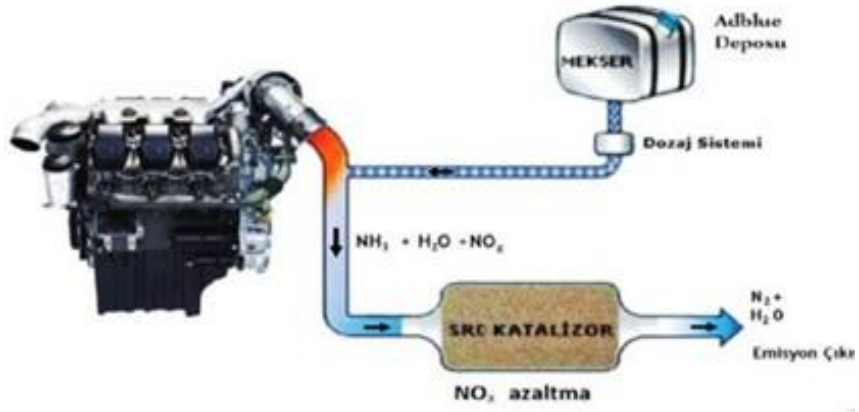
SCR sistemleri ilk olarak 1970'lerin sonunda Japonya'da sanayi ve kamu hizmetlerinden kaynaklanan kirletici emisyonları arıtmak için kurulmuştur. Şu anda 170'ten fazla ticari SCR tesisi, yaklaşık 100.000 MW'lık tahmini toplam kapasite ile Japon kamu hizmetlerinde hizmet vermektedir. Avrupa'da SCR teknolojisi 1985 yılında tanıtılmış ve yaygın olarak kullanılmıştır [36]. Teknoloji, Euro 5 standardının kirlilik seviyelerini karşılamak için sabit tesislerden kamyonlara aktarılmıştır. Daha spesifik olarak, NO_x azaltımı gaz sabit katalitik yataktan geçerken gerçekleşir. Reaktöre girmeden önce, indirgeyici madde, amonyak veya üre, enjekte edilir ve gazla karıştırılır [39].

SCR süreci aşağıdaki reaksiyonlara dayanmaktadır [39]:



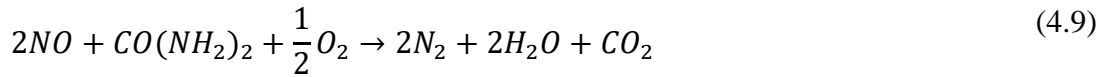
Reaksiyon (4.3), aşırı oksijende 250 ila 450 °C arasındaki sıcaklıklarda katalizör üzerinde çok hızlı bir şekilde gerçekleşir ve NO_x genellikle > %90'dan oluştuğu için

sürecin genel stokiyometrisini ($\text{NH}_3/\text{NO} = 1/1$) açıklar. "Seçici" terimi, amonyağın N_2 , N_2O ve NO oluşturmak üzere oksijen tarafından oksitlenmek yerine NO_x ile seçici olarak reaksiyona girme yeteneğini ifade eder; bu yetenek, karbon monoksit ve hidrokarbonlar gibi diğer basit reaktanlar durumunda gözlenmemiştir ve bu nedenle amonyağa özgüdür [40]. Tesisler için tehlikeli olan korozif amonyum sülfat (NH_4) $_2\text{SO}_4$ oluşumuna neden olabilecek bazı ikincil reaksiyonları sınırlamak için amonyak miktarı tam olarak hesaplanmalıdır [37].



Şekil 4.3. SCR katalizörü kullanım modeli [41].

Reaktif olarak üre kullanılırsa, reaksiyon dengesi farklı olur ve CO_2 oluşur. 41].



Otomotiv sektöründe SCR pahalı bir teknoloji olmaya devam etmektedir. SCR katalizörleri ağır hizmet araçlarında kullanılmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, birçok üretici tarafından NO_x tutucu (genellikle Partikül filtresi olarak adlandırılır) adı verilen başka bir filtreleme sistemi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Ancak, NO_x tuzağının etkinliği çok sınırlıydı ve bununla donatılmış araçlardan kaynaklanan emisyonların emisyon standartlarından daha yüksek olduğu görülmüş.

4.2.3. Dizel Partikül Filtresi

Dizel partikül filtresi (DPF) veya bazen "emisyon kontrol cihazı" olarak adlandırılır, dizel motorun egzozundan dizel partiküllerini veya kurumu azaltan bir cihazdır. Fabrikadan yeni veya yenilenmiş araçlardaki araçlara takılabilirler. Dizel partikül filtreleri NO_x dahil bu çok küçük maddeleri birbirine paralel çalışan sıkıştırılmış kanallardan geçirir. Bu kordiyerit yapıdan geçmeye çalışan partikül madde filtrede tutulur. Özetle egzoz gazlarını filtrelerler ve partikül madde filtrede tutulur. İki ana filtre türü vardır [9,42]:

- Partikül emisyonlarını %85 ile %99 arasında azaltacak “dolu” bir partikül filtresi. Ayrıca sağlık için en büyük endişe olan çok küçük parçacıkların emisyonlarını azaltmada çok etkilidirler. Genellikle sadece fabrikadan yeni çıkan araçlar için veya ağır hizmet araçlarının sonradan donatılması için mevcuttur.
- Emisyonları yaklaşık %30 ile %50 arasında azaltan “kısmi” bir filtre. En küçük parçacıkların emisyonlarını daha büyük olanlar kadar etkili bir şekilde azaltma eğiliminde değiller, ancak hafif hizmet araç güçlendirmeleri için kullanılabilirler.



Şekil 4.4. NO_x dolu partikül filtresi [42].

4.2.4. Seçici Katalitik Olmayan İndirgeme (SNCR)

Seçici katalitik olmayan indirgeme, baca gazlarındaki azot oksit emisyonlarını azaltma yöntemidir. NO_x 'i dinitrojene indirgemek için bir nitrojen indirgeyici ajanın enjekte edilmesinden oluşur. Bu baca gazı arıtma yöntemi, seçici katalitik indirgeme gibi, atık

kirletici emisyonlarının azaltılması ve büyük yakma tesisleri için Avrupa Topluluğu tarafından onaylanmış mevcut en iyi teknolojilerden biridir. Amaç, nitrojen oksitleri oluşturan iki molekülü: NO ve NO₂'yi dinitrojene dönüştürmektir. Bunun için, kendisi bir veya daha fazla nitrojen atomu içeren bir indirgeyici ajan kullanılır. Pratikte üç molekül kullanılır [9,43]:

- Amonyak: NH₃;
- Üre: CO(NH₃)₂;
- İz siyanürik asit: (HOCN)₃

Küresel reaksiyonlar yazılabilir [9]:



Seçici katalitik indirgemenin aksine katalizör kullanılmaz, ancak SCNR 750 ila 1100°C arasında yüksek bir sıcaklık gerektirir. SCR'ye eşdeğer bir reaksiyon hızı elde etmek için denitrifikasyon reaksiyonlarını çok daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirmek gereklidir. SNCR verimliliği, optimum koşullar altında %80 kadar yüksek olabilir, ancak daha yaygın olarak %50 civarındadır.

Amonyak zehirli bir gaz olduğundan, katı halde kullanılabilirdiği için üre kullanımı ilginçtir. Yüksek sıcaklıklarda, reaksiyon gözlenir [43]:



SNCR uygulamasındaki temel zorluk, kullanılacak sıcaklık penceresinin dar olması ve kullanılan indirgeyici maddeye bağlı olmasıdır. Sıcaklık çok düşükse, indirgeme reaksiyonları gerçekleşmeyecektir; sıcaklık çok yüksekse, indirgeyici madde NO_x'e oksitlenebilir. Amonyak kullanıldığında, sıcaklık 900 ila 1000°C arasında olmalıdır. İkinci zorluk, indirgeyici madde indirgeme reaksiyonu için tam olarak kullanılmazsa, gaz akışının sadece NO_x değil, aynı zamanda tesis için potansiyel olarak sorunlu olan diğer azotlu ürünleri de içermesidir. Örneğin, NO_x'i azaltmak için kullanılmayan amonyak, aşındırıcı olan amonyum sülfat, (NH₄)₂SO₄ oluşturmak için sülfür ürünleriyle reaksiyona girebilir [43].

4.2.5. 3 Yollu Katalitik Konvertör

"Üç yollu düzenlenmiş katalitik konvertör" egzoz gazlarının ikincil arıtılmasında kullanılan klasik bir yöntemdir. Üç kimyasal indirgeme ve oksidasyon reaksiyonu paralel olarak gerçekleşir. En yeni modellerde motora enjekte edilen yakıt miktarını kontrol eden bir elektronik bilgisayara bağlı bir çift oksijen sensörü ("lambda" sensörleri olarak bilinir) bulunur. Regülasyon sensörü olarak da bilinen prob, katalitik konvertörün yukarısında yer alır. Motor yönetim sistemi tarafından verimli yanma sağlamak üzere yakıt ilavesini kontrol etmek için bir giriş değişkeni olarak kullanılır. Katalitik konvertörde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [44,45]:



Şekil 4.5. 3 Yollu Katalitik Konvertör [45].

Bölüm 4, emisyonların kontrolü ve azaltılmasına yönelik teknik ve stratejileri analiz etmektedir. Dizel motor emisyonlarının en zararlı bileşenlerinden biri olan azot oksitlere (NO_x) odaklanılmaktadır. NO_x 'i kontrol etmek ve azaltmak için kullanılan çeşitli teknikler incelenmektedir: EGR, SCR, SCNR ve hatta NO_x partikül filtresi. Bu tekniklere dayanarak, bu çalışma dizel motorlardan kaynaklanan NO_x emisyonlarını azaltmak için hidrojenle güçlendirilmiş yeni bir yöntem geliştirmeyi amaçlamaktadır. Hidrojen elde etmek için bir elektroliz cihazının tasarımı da çalışmanın amaçlarından biridir. Bölüm 5'te hidrojen jeneratörünün tasarımı açıklanmaktadır.

BÖLÜM 5

ELEKTROLİZ YÖNTEMİ

5.1. HİDROJEN ÜRETİMİ

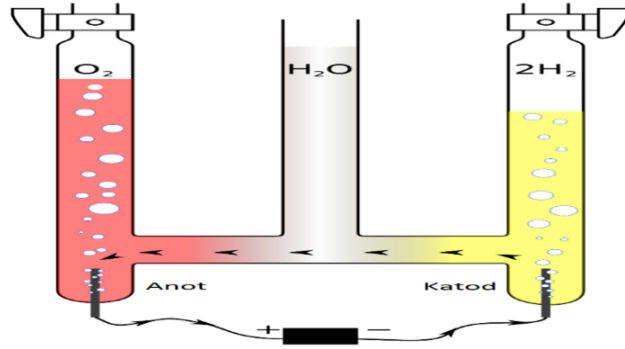
Hidrojen, kimyasal özellikleri onu önemli bir enerji kaynağı haline getiren bir gazdır. Hidrojen bir "enerji taşıyıcısı" olarak kabul edilir, çünkü bir kez üretildikten sonra depolanabilir, taşınabilir ve kullanılabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak neredeyse yalnızca endüstride (rafinaj, kimyasallar, vb.) kullanıldığı için kullanımını halk tarafından nispeten bilinmemektedir [46].

Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, 2021 yılında hidrojen üretiminin 94 Mt (milyon ton) olacağı ve bunun büyük bir kısmının rafinasyon (kükürt giderme) ve amonyak üretiminde kullanılacağı tahmin edilmektedir. Bunun %62'si doğal gazdan, %18'i petrolden, %19'u kömürden, %0,7'si CO₂ yakalama ve geri kazanımı ile fosil yakıtlardan ve %0,04'ü su elektrolizinden elde edilecektir. Enerji açısından önemi ve çevre üzerindeki olumlu etkisi göz önüne alındığında, dünya çapında üretilen hidrojen miktarı önemli ölçüde artacaktır [47].

Hidrojen (H), kimyasal formülü H₂ olan çok hafif bir gazdır. Sıfır emisyonlu bir yakıttır ve oksijenle yakıldığında sera etkisi yaratmaz. Oldukça yanıcıdır, kokusuzdur, renksizdir, toksik değildir ve aşındırıcı değildir. Doğal halinde, özellikle suda (H₂O), petrolde (HC hidrokarbonları) ve hatta doğal gazda (CH₄ bileşiği) olmak üzere genellikle diğer atomlarla birleşir. Hidrojeni ilişkili olduğu elementlerden ayırmak için termokimyasal veya fotokimyasal ayrıştırma ve hatta su elektrolizi gibi kimyasal işlemler kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan hidrojen üretim prosesi su elektrolizidir [48].

5.1.1. Su Elektroliz Prosesi

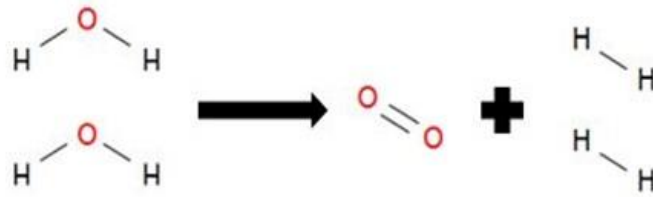
Su elektrolizi, bir elektrik akımı kullanarak suyu (H_2O) oksijen ve hidrojen gazına parçalayan elektrolitik bir işlemdir. Elektrolitik hücre, bir elektrolitin (bu durumda suyun kendisi) içine daldırılmış ve doğru akım kaynağının zıt kutuplarına bağlanmış, genellikle platin grubundan, söz konusu potansiyel ve pH aralığında inert bir metalden yapılmış iki elektrottan oluşur [49].



Şekil 5.1. Su elektrolizi için kullanılan Hoffmann voltametresinin diyagramı [49].

5.1.2 Kimyasal İşlem

Su (H_2O) gibi bir bileşik, yani iki veya daha fazla elementin bir araya gelmesiyle oluşan bir molekül, kimyasal dönüşümlerle bölünebilir. Sudan geçen bir elektrik akımı iki gaz üretir: hidrojen ve oksijen. Aşağıdaki denklem suyun ayrışmasını temsil etmektedir [50]:



Şekil 5.2. Su molekülü H_2O 'nun ayrıştırılması.

Farklı Aşamalar

Elektrik akımı su molekülü H₂O'yu hidroksit iyonları HO⁻ ve hidrojen iyonları H⁺'ya ayırır: elektrolitik hücrede, hidrojen iyonları redoks reaksiyonunda katotta elektronları kabul ederek indirgeme reaksiyonuna göre gaz halinde dihidrojen H₂ oluşturur [51]:



Hidroksit iyonlarının oksidasyonu- dolayısıyla elektron kaybetmesi- elektrik devresini "kapatmak" için anotta gerçekleşirken (kimyasal reaksiyonun yük dengesi):



Bu da aşağıdaki elektrolitik ayrışma denklemini verir:



Üretilen gaz halindeki dihidrojen miktarının dioksijen miktarının iki katı olduğu varsayılmaktadır. Avogadro yasasına göre, üretilen dihidrojen hacmi de oksijenin iki katıdır.

5.2. HHO-JENERATÖR

5.2.1. Tanım

Su elektrolizi işlemiyle hidrojen gazı üretmek için tasarlanmış bir prototiptir. Tutarlı saflıkta hidrojen sağlayarak çalışma sonuçlarını etkileyebilecek gaz kalitesindeki değişiklik riskini ortadan kaldırır.

5.2.2. Hidrojen Jeneratörünün Kompozisyonu

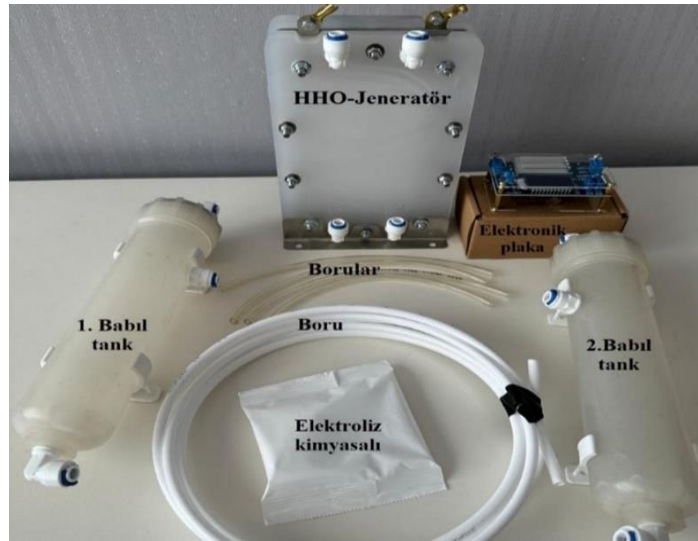
HHO hidrojen jeneratörü aşağıdakilere dayanmaktadır:

- 316 paslanmaz çelikten 4 plakalı 13cm x 22cm saf sistem hücresi
- 2 adet sert plastik tabaka 15cm X 25cm
- 2 bağlantı elektrodu (Anot ve Katot)
- 2 su giriş v 2 gaz çıkışı

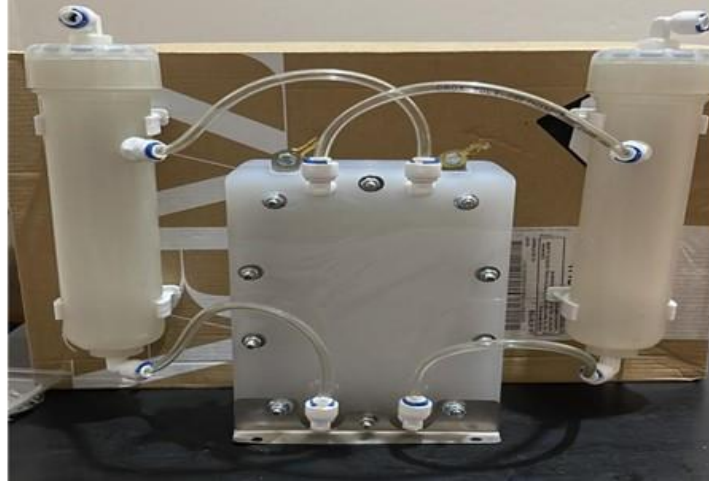
Tüm bu bileşenler cıvatalı vidalarla monte edildi ve sıkıldı. Sızdırmazlık sorunlarını çözmek için contalar da takılmıştır.

Sistemin yardımcı bileşenleri şunlardır:

- 2 adet şişe tank hidrojen ve oksijen için
- Bağlantı boruları
- Elektroliz kimyasalı (Suyun iletkenlik kapasitesini artırmak için potasyum hidroksit kullanılmıştır)
- Elektronik referans plakası ZK-12KX V3 (cihazın giriş voltajını düzenler)



Şekil 5.3. Hidrojen jeneratörü bileşenleri.

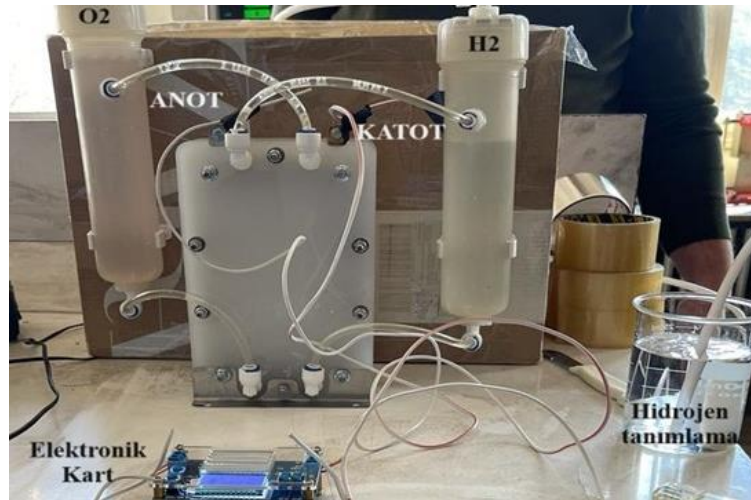


Şekil 5.4. Monte edilmiş hidrojen jeneratörü.

5.2.3. İşlem

Hidrojen jeneratörünü çalıştırmak için bir doğru akım jeneratörüne bağlanacaktır. Anot, jeneratörün pozitif terminaline bağlı elektrottur. Katot, jeneratörün negatif terminaline bağlı elektrottur.

Saf su elektriği iyi iletmez. İletkenliğini artırmak için potasyum hidroksit çözeltisi kullanılır. 1 litre suya 15 g potasyum oksit çözeltisi eklenir ve karıştırıldıktan sonra tanklara dökülür. Borular kullanılarak çeşitli bağlantılar yapılır. Elde edilen sistem aşağıdaki gibidir :

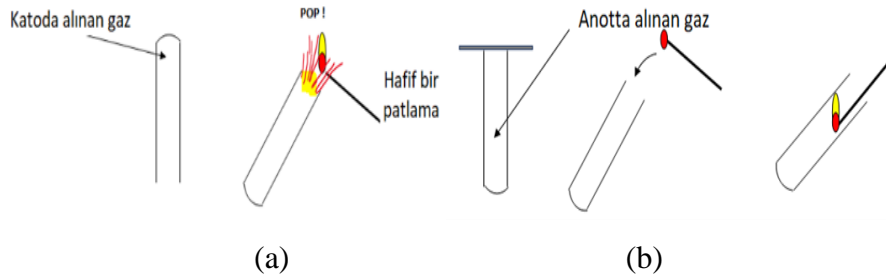


Şekil 5.5. Hidrojen jeneratörünün kablolu montajı.

5.2.3. Hidrojen tanımlama yöntemi

Üretilen gazlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır :

- Katotta toplanan gaz aleve yaklaştığında küçük bir patlama meydana getiriyorsa: bu hidrojen
- Anotta toplanan gaz parlayan bir kütüğü yeniden ateşliyorsa, bu oksijendir.



Şekil 5.6. Alınan gazlar a) katotta: H₂, b) anotta: O₂.

5.3. HİDROJEN İLE DİZEL EMİSYONLARI ARASINDAKİ KİMYASAL REAKSİYON

Hidroliz işleminden elde edilen hidrojen gazı doğrudan bir dizel motorun egzoz borusuna enjekte edilir. Hidrojen molekülleri, çıkan siyah dumanda bulunan çeşitli emisyonlarla reaksiyona girecektir. Reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir [52]:



Hidrojen bazlı enerji sistemleri, kirletici emisyonlar ve iklim değişikliği ile ilgili kamu kaygılarına ilişkin sundukları faydalar nedeniyle caziptir. Hidrojen, kendisini çeşitli şekillerde kullanılabilir kılan belirli özelliklere sahiptir. Basit bir kimyasal elementtir, hafif bir gazdır ve atomik formda bol miktarda bulunur.

Ancak asıl sorun şudur: Hidrojenin kullanımı, emisyon nötr olması gereken üretim yöntemine bağlıdır. Bu nedenle bir hidrojen jeneratörü, hidrojeni doğrudan kullanılabilir şekilde üretmek üzere tasarlanmıştır.

Bölüm 6'da üretilen hidrojen kullanılarak testler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, bir hidrojen jeneratörü kullanılarak hidrojen üretilmiştir. Elde edilen hidrojen gazı doğrudan bir dizel motorun egzoz borusuna enjekte edilmiştir. CO, CO₂, NO_x ve HC partiküllerinin değerlerini ölçmek için dizel emisyon + hidrojen enjeksiyon düzeneğinin çıkışına bir emisyon sensörü yerleştirilmiştir. Bu partiküllerin değerleri, hidrojen enjeksiyonundan önce ve sonra Multigas Analyser yazılımı kullanılarak kaydedilmiş ve bir bilgisayar ekranında görüntülenmiştir.

6.1. HİDROJEN ÜRETİM PROSESİ

Potasyum hidroksit ile karıştırılmış bir litre su şişe tankına dökülür ve prototipin ana kısmına akar. Kablo bağlantısı :+ anotta ve - katotta.

Elektrik akımı, aşağıdaki özelliklere sahip bir güç jeneratörü tarafından sağlanır:

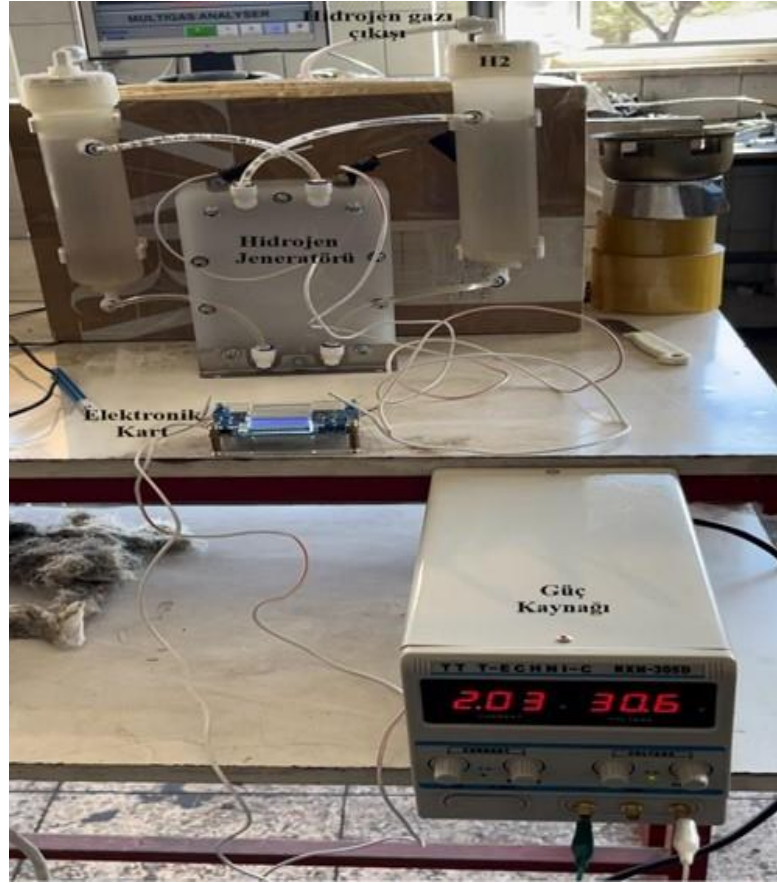
Çizelge 5.1. Kullanılan güç jeneratörünün özellikleri.

TT T-ECHNI-C RXN-305D	
GİRİŞ VOLTAJİ: AC 220V ± 10% 50Hz	ÇIKIŞ DC 0-30V 0-5A
SİGORTA 5×20mm 2A	WATT 150W

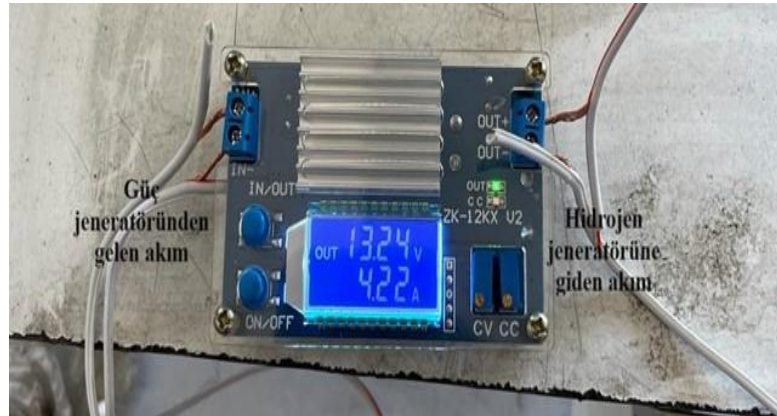
- Test sırasında güç jeneratörü $V_j=30,6V$ gerilim ve $I_j=2,03A$ akım vermiştir.
- Hidrojen jeneratörü prototipine girişinden önce güç jeneratöründen gelen voltajı düzenlemek için bir elektronik kart (ZK-12KX V3) kullanılmış.
- Elektronik kart hidrojen jeneratörü girişi $V_k=13,24 V$ ve $I_k=4,22A$ verilmiş.
- Üretilen hidrojen gazı, aleve yaklaşıldığında meydana gelen bir patlamayla tespit edilmiştir.

- Hidrojen üretimi başladığında hidrojen jeneratörü tarafından tüketilen akımın arttığına dikkat edilmelidir. Böylece $V_k=13,24$ V ve $I_k=4,22$ A için yaklaşık 5.39 cm³/dakika 'ya eşit bir hidrojen üretimi gerçekleşmiştir.

Şekil 6.1 hidrojen üretim ünitesinin tüm kablolamasını göstermektedir.



Şekil 6.1. Hidrojen üretim sisteminin gösterimi.



Şekil 6.2. Elektronik karta kaydedilen veriler.

6.2. MOTOR TESTLERİ

Çizelge 5.2. Kullanılan dizel motorun özellikleri.

Model	Lutian 3GF-ME
Motor Gücü	7 HP
Motor Hızı Maksimum (d/d)	3000
Silindir sayısı	1
Silindir Hacmi	296 cm ³
Yakıt tipi	Dizel
Sürekli Çıkış Gücü (kW)	2.9
Maksimum Çıkış Gücü (kW)	3.2
Soğutma Sistemi	Hava Soğutmalı
Ağırlık (kg)	69



Şekil 6.3. Kullanılan dizel motor.

6.2.2. Hidrojen Enjeksiyonu

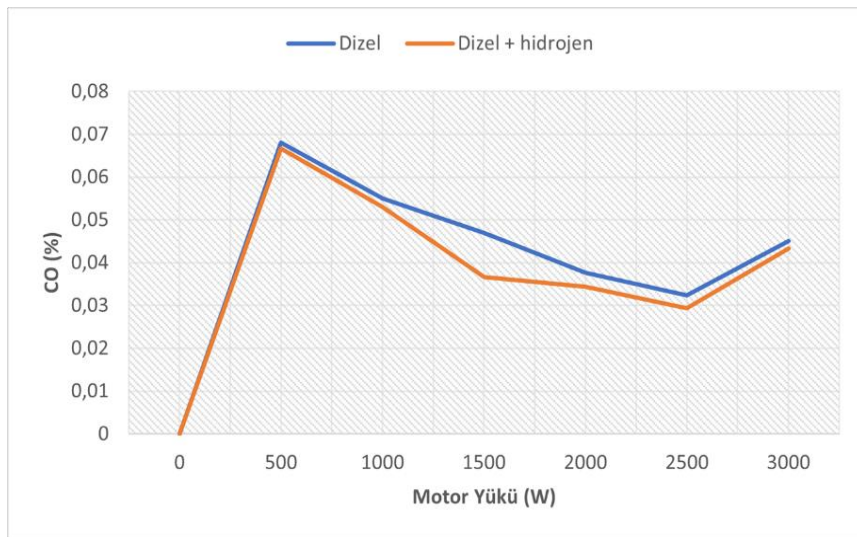
Üretilen hidrojen, 8 mm çaplı bir PVC boru aracılığıyla doğrudan motor egzozuna gönderildi. Hidrojen gazının geçebilmesi için egzoz borusunda özel olarak bir delik açılmıştır.



Şekil 6.4. Hidrojen gazı çıkışı ve girişi.

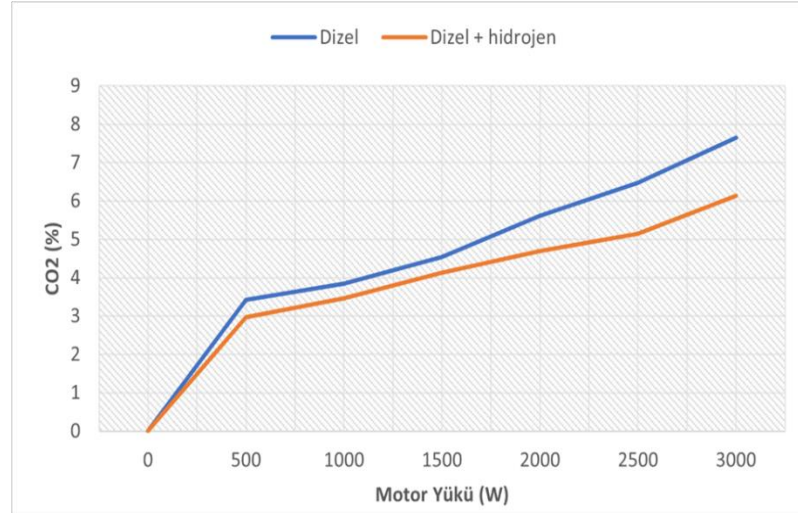
6.2.3. Egzoz Emisyonları .

- Hidrojen gazı enjeksiyonundan sonra, motor yükünün bir fonksiyonu olarak mevcut partikül emisyonlarının oranını almak için emisyon dizel + hidrojen tertibatının tüp çıkışında bir partikül sensörü kullanılmıştır. Sonuçlar Multigaz Analyser yazılımı kullanılarak bir bilgisayar ekranında okunmuştur ve testler 9 dakika içinde gerçekleştirilmiştir.
- Akış hızı $5,39 \text{ cm}^3/\text{dakika}$ olduğunda, 9 dakikada enjekte edilen hidrojen miktarı $48,52 \text{ cm}^3$ 'tür.



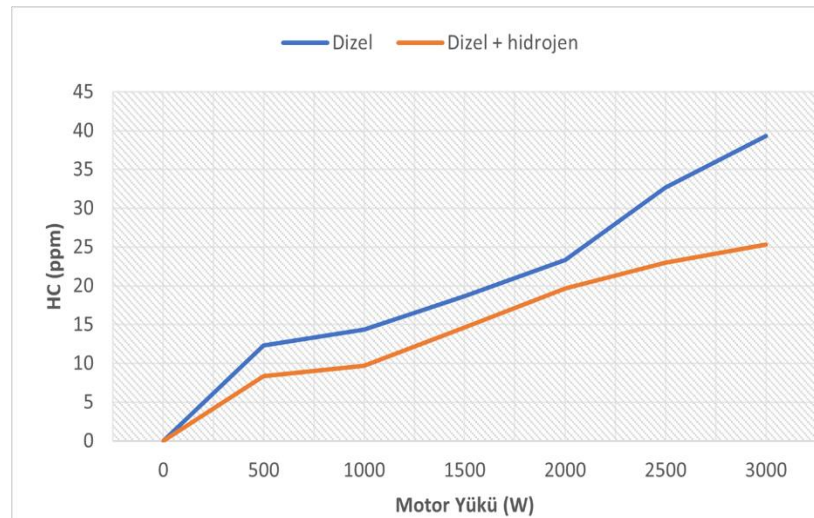
Şekil 6.5. Motor yükünün bir fonksiyonu olarak CO seviyeleri.

Hidrojen enjeksiyonundan sonraki CO miktarı, hidrojen enjeksiyonundan önceki CO miktarından daha azdır. 500 ile 3000W arasında yaklaşık %0,024'lük bir azalma gözlenmiştir.



Şekil 6.6. Motor yükünün bir fonksiyonu olarak CO₂ seviyeleri.

Hidrojen enjeksiyonundan sonraki CO₂ miktarı, hidrojen enjeksiyonundan önceki CO₂ miktarından daha düşüktür. 500 ile 3000W arasında yaklaşık %3,17'lik bir azalma gözlenmiştir.



Şekil 6.7. Motor yükünün bir fonksiyonu olarak HC miktarı.

Hidrojen enjeksiyonundan sonraki HC miktarı, hidrojen enjeksiyonundan önceki HC miktarından daha düşüktür. 500 ile 3000W arasında yaklaşık 13 ppm'lik bir düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8. Motor yükünün bir fonksiyonu olarak NO_x seviyeleri.

500 ila 1500W arasında değişen bir motor yükü için hidrojen enjeksiyonundan sonraki NO_x miktarı, hidrojen enjeksiyonundan önceki NO_x miktarından daha yüksektir. 1500W ile 3000W arasında hidrojen enjeksiyonundan sonraki NO_x miktarı, hidrojen enjeksiyonundan önceki NO_x miktarından daha düşüktür. 500 ile 1500W arasında NO_x emisyonları hidrojen enjeksiyonundan sonra 201,67 ppm artmış ve 1500 ile 3000W arasında NO_x emisyonları 166,33 ppm azalmıştır.

Emisyon boşluklarında gözlemlenen farklılıklar, bölüm 5, kısım 5.3'teki kimyasal denklemlerde gösterildiği gibi, hidrojen gazının (H₂) CO, CO₂ ve NO_x molekülleri ile kimyasal etkileşime girerek diğer ürünleri vermesi ile açıklanabilir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, içten yanmalı motorlardan, özellikle de dizel motorlardan kaynaklanan azot oksit (NO_x) emisyonlarını azaltmak için hidrojenle güçlendirilmiş bir teknik geliştirilmiştir. En büyük zorluk hidrojen gazı üretimidir. Bu nedenle bir hidrojen jeneratörü tasarlanmıştır. İçinden bir elektrik akımı geçirerek emisyonsuz hidrojen gazı üretilmiştir.

Üretilen hidrojen gazı doğrudan dizel motorun egzoz borusuna beslenmiş. Enjekte edilen hidrojen gazı ile dizel motordan kaynaklanan emisyonlar "dizel + hidrojen emisyonları" olarak bilinir. Hidrojen gazı, emisyonlarda bulunan moleküllerle kimyasal olarak etkileşime girer.

Analiz gerçekleştirilir ve emisyonların 'miktarları veya oranları' hidrojen enjeksiyonundan önce ve sonra kaydedilir. Analizin sonunda CO, CO_2 , HC ve NO_x emisyonlarının grafikleri olumlu sonuçlarla gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler aşağıdaki sonuçlara yol açmaktadır:

- Hidrojen gazı, herhangi yük için dizel emisyonlarından kaynaklanan CO ve CO_2 seviyelerini (%) ve HC miktarını (ppm) önemli ölçüde azaltır.
- Hidrojen gazı, yüksek yüklerde dizel emisyonlarından kaynaklanan NO_x 'i (ppm) önemli ölçüde azaltır.

Tüm kimyasal elementler arasında hidrojen en hafif olanıdır çünkü en basit atomik yapıya sahiptir: çekirdeği tek bir protondan oluşur ve atomunda yalnızca bir elektron vardır. Hidrojenin özellikleri, diğer molekülleri üretmek için CO, CO_2 ve NO_x molekülleriyle verimli bir şekilde reaksiyona girmesini sağlar.

Çalışma boyunca dizel motorlardan kaynaklanan emisyonların azaltılması ihtiyacı ortaya konmuştur. Dünyanın enerji tüketiminin artması, yollardaki araç sayısı ve diğer birçok faktörle birlikte emisyonlar da artmaktadır. Bununla birlikte, bu emisyonlar çevre, refah ve insan sağlığı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bu nedenle bu çalışma, küresel enerji dönüşümünün başlıca zorluklarının bir parçasıdır. Hidrojenin büyük potansiyelini ortaya koymaktadır. Hidrojenin ana dezavantajı kullanımının pahalı olmasıdır.

Hidrojen enjeksiyonundan önce ve sonra emisyonlar karşılaştırılırken gözlemlenen farklılıklar, hidrojenin dizel CO, CO₂, HC ve NO_x emisyonları üzerindeki azaltıcı etkisini şüphesiz göstermektedir. Bununla birlikte, çalışma sodyum hidroksit NaOH kullanılarak emisyon azaltıcı etkide olası bir iyileşmeyi içerecek şekilde genişletilebilir.

KAYNAKLAR

1. Simon LE GUEN, “Etude Expérimentale Et Modélisation Phénoménologique Des Transferts Thermiques Aux Parois Des Chambres De Combustion Des Moteurs A Allumage Commandé”, Ph. D. Thesis, *L'école Centrale De Nantes*, Nante,2-7 (2020).
2. Şule SARAL, “ Dizel/B₂O₃ Nanoparçacık Karışımlarının Dizel Motor Karakteristiklerine Etkilerinin Yanıt Yüzey Metodolojisi İle İncelenmesi Ve Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında*, Karabük, 6-14 (2024).
3. Reşitoğlu İ A,,” NO_x Pollutants from Diesel Vehicles and Trends in the Control Technologies”, *Viskup, R. (ed.), Intech Open*, Austria, 200 (2018).
4. Deepak Agarwal, Shrawan Kumar Singh and Avinash Kumar Agarwal,,”Effect Of Exhaust Gas Recirculation (EGR) On Performance, Emissions, Deposits And Durability Of A Constant Speed Compression Ignition Engine”, *Applied Energy 88*”: 2900-2907 (2011).
5. İnternet; Tuik Kurumsal, “Motorlu Kara Taşıtları”, <http://data.tuik.gov.tr/bulten/index?p=motorlu-kara-tasitlari-aralik-2014-18762> (2014).
6. Jordan L. Schnell, Michael J. Prather, Beatrice Josse, Vaishali Naik, Larry W. Horowitz, Guang Zeng, Drew T. Shindell And Greg Faluvegi, “Effect Of Climate Change On Surface Ozone Over Northamerica, Europe, And East Asia”, *Geophysical Research Letters* : 3509 -3518 (2016).
7. Dr. Mohamed BENCHERIF, “Moteurs A Combustion Interne, Combustion Et Eléments De Carburation”, Ph. D. Thesis, *Université Des Sciences Et De La Technologie d'Oran*, Oran,1-18 (2018).
8. Bilal AYDOĞAN, “ Biyodizel Kullanılan Dizel Motorlarda NO_x Emisyonlarının ve NO_x Emisyonları Azaltma Yöntemlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında*, Pamukkale, 37-46 (2008).

9. Jung Y, Pyo Y D, Jang J, Kim G C, Cho C P, Yang C, ‘‘NO, NO₂ and N₂O Emissions Over a SCR Using DOC and DPF Systems with Pt Reduction’’, *Chemical Engineering Journal Elsevier*, **369**, 1059–1067 (2019).
10. Pulkrabek W. W. ‘‘Engineering Fundamentals of The Internal Combustion Engine’’. *Prentice Hall*, New Jersey, 411 (1997).
11. Safgönül, B.,Ergeneman, M., Arslan, E. ve Soruşbay C., "İçten Yanmalı Motorlar", *Birsen Yayın Evi*, İstanbul, 58-133 (1995).
12. Ferit Orçun Parlak, ‘‘ Dizel Motor Emisyon Düzenlemeleri İçin Lnt'nin Matematiksel Olarak Modellenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü*, İstanbul, 3-5 (2017).
13. Rabih Omran, ‘‘Modelisation Du Moteur Diesel, En Vue De Sa Commande Dynamique Par Reseaux De Neurones Pour Minimiser Les Emissions’’, Ph. D. Thesis, *L'ecole Centrale De Lyon*, Lyon,14- 20 (2007).
14. İnternet : FUTURA , ‘‘ Moteur Diesel : Qu'est-Ce Que C'est ?’’. <http://www.futura-sciences.com/tech/definitions/technologie-moteur-diesel-11133/> (2021).
15. Hebbbar, G. S.,’’ Investigations on Performance and Emissions of a Stationary DI Diesel Engine with Different Exhaust Gas Recirculation Temperatures’’, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, **2(1)**, 1-9 (2013).
16. Çelik, M., ‘‘Dizel Motorlarda Performans ve Egzoz Emisyonlarının n-hexadecane Katkı Maddesi ile İyileştirilmesi’’, *Politeknik Dergisi*, **21(3)**: 701-706, (2018).
17. İnternet : Dr Krok ‘‘ Diesel’’. <http://dict.drkrok.com/diesel/>(2017).
18. Azime KILIÇ, ‘‘ Dizel/Nano Parçacık Karışımlarının (MgO) Dizel Motor Parametrelerine Etkilerinin İncelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında*, Karabük, 28-37 (2024).
19. İnternet : Demotor, ‘‘ Caractéristiques Et Propriétés Du Diesel’’, <http://fr.demotor.net/moteursthermiques/carburant/gasoil#:~:text=pour%20des%20raisons%20de%20sécurité,soit%2010200%20kcal%20fkg> (2018).
20. Öğr.Gör. Seyfi Polat, ‘‘ Dizel Motorlar’’, *Ders Notu*, Hitit Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Çorum, 1-10 (2011).

21. Christine, B.K., “Shaping The Terms Of Competition: Environmental Regulation And Corporate Strategies To Reduce Diesel Vehicle Emissions”. *Massachusetts Institute Of Technology*, Massachusetts, 244-256 (2006).
22. Papa Ciss, “Etude De L'utilisation Du Diesel Oil Dans Les Moteurs Diesel Turbo Compresseur Auxics Plate-Forme Darou”, M. Sc. Thesis, *Ecole Supérieure Polytechnique*, Thiès,13- 20 (2003).
23. İnternet : Planète Santé “ Quand L’effet Des Gaz D’échappement Est Testé Sur Des Humains”. <http://www.planetesante.ch/magazine/ethique-politique-et-droit/ethique/quand-l-effet-des-gaz-d-echappement-est-teste-sur-des-humains> (2018).
24. İçingür, Y., “Dizel Motorlarında Emisyon (Azot Oksit) (NO_x) Kontrol Yöntemleri”, *Araştırma Yazısı*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1-9 (2017).
25. İnternet : Hayatın Virajlı Yollarında“ Dizellerin Diğer Yüzü : Volkswagen Dıselgate”. <http://hayatinvirajliyollarında.com/2015/10/04/dizellerin-diger-yuzu-volkswagen-dieselgate/> (2015).
26. Evelyne Chelain, Nadège Lubin-Germain, Jacques Uziel, ‘Chimie Organique’, Durnod,68-83,(2021).
27. Emrah ERÇEK, “ Seçici Katalitik İndirgeme Sisteminde Farklı Parametrelerin NO_x Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi ”, Doktora Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalında*, Kocaeli, 16-26 (2023).
28. Agarwal, D., Sinha, S., And Agarwal, A.K., “Experimental Investigation Of Control Of Nox Emissions In Biodiesel-Fueled Compression Ignition Engine”, *Renewable Energy*, 2356-2369 (2006).
29. Holman,C.,Kessell,”M., Emission Control Technology For Heavy-Duty Vehicles”, *Final Report*, United Kingtom, 1 (2002).
30. Xuewen Zhang, Xiang Huang, Peiyong Ni And Xiang Li, “Strategies To Reduce Emissions From Diesel Engines Under Cold Start Conditions”, *Energies* 16”: 5192 (2023).
31. İnternet : European Environment Agency “ Trends In Diesel NO_x Emission Factors And Type Approval Emission Standards”. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/trends-in-diesel-nox-emission> (2012).

32. Abd-Alla, G. H.,” Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines”, **A Review Energy Conversion and Management** **43(8)**, 1027-1042 (2002).
33. İnternet : Auto Plus“ Diesel : Bosch Aurait Résolu Le Problème Des Nox”. <http://www.autoplus.fr/environnement-2/diesel-bosch-aurait-resolu-le-probleme-des-nox-343472.html> (2018).
34. Hountalas, D.T., Mavrapoulos, G.C. And Binder, K.B.,”Effect Of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Temperature For Various EGR Rates On Heavy Duty DI Diesel Engine Performance And Emission”, **Energy** **33**, 272-283, (2006).
35. Halil İbrahim AKOLAŞ, “ Elektromekanik EGR Soğutma Sistem Tasarımının NO_x Emisyonlarına ve Yakıt Tüketimine Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında**, Erzurum, 12-25 (2020).
36. Pio Forzatti,”Present Status And Perspectives In De-Nox SCR Catalysis”, **Applied Catalysis**, 221-236 (2001).
37. Marie-Laure Tarot, Mathias Barreau, Daniel Duprez, Vincent Lauga, Eduard Emil Iojoiu , Xavier Courtois , ID And Fabien Can,”Influence Of The Sodium Impregnation Solvent On The Deactivation Of Cu/Fe-Exchanged Zeolites Dedicated To The SCR Of Nox With NH₃”, **Catalysts**, 1-20 (2017).
38. Hang Y, Yang S, Zhu X, Xu X, Huang F, Yang Z, vd.,” Effects of Sulfation on Hematite for Selective Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides with Ammoniac”, **Journal of Colloid and Interface Science, Elsevier Inc.**, 606, 1445–1456 (2022).
39. Reşitoğlu İ A, Keskin A,” Hydrogen Applications in Selective Catalytic Reduction of NO_x Emissions from Diesel Engines”, **International Journal of Hydrogen Energy Elsevier Ltd**, **42**, 23389–23394 (2017).
40. Der Wiesche, S.A. Der Wiesche,”Numerical Heat Transfer And Thermal Engineering Of Adblue (SCR) Tanks For Combustion Engine Emission Reduction”, **Applied Thermal Engineering** **27**, 1790–1798.(2007)
41. İnternet : Oq Value “ Adblue Tanken, Welke Kwaliteit Is Belangrijk ? ”. <http://www.oqvalue.nl/producten/adblue-tanken/> (2019).
42. İnternet : Techworm“ Dizel Partikül Filtresi (DPF) Nedir? Ne İşe Yarar ? ”. <http://www.tech-worm.com/dizel-partikul-filtresi-dpf-nedir-ne-ise-yarar/> (2016).

43. Jacobowicz, “Dénitrification Des Gaz De Combustion”, *Techniques De L'ingénieur - J3922 V1* (1998).
44. Ahmet UYUMAZ, Fahrettin BOZ1, Emre YILMAZ, Hamit SOLMAZ And Seyfi POLAT, “Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler”, *The Journal Of Graduate School Of Natural And Applied Sciences*, 15-24 (2017).
45. İnternet : RHEINMETALL “ 3 Yollu Katalitik Konvertör Ve Lambda Sensörü ”. <http://www.ms-motorservice.com/tr/technipedia/post/3-yollu-katalitik-konvertoer-ve-lambda-sensoerue/> (2010).
46. Li, S.; Kang, Q.; Baeyens, J.; Zhang, H. L.,” Deng, Y. M. Hydrogen Production: State of Technology”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 544 (2020).
47. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologique, “Les Modes de Production de l'Hydrogène”, *Les Notes Scientifiques de l'Office Note n° 25*, Paris, 1-10 (2021).
48. MEHDAOUI Younes, KABOUCH Mohamed, “REALISATION D'UN GÉNÉRATEUR D'HYDROGÈNE”, M. Sc. Thesis, *Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Département De Génie Electrique Et Electronique*, Tlemcen, 12-40 (2017).
49. Karl Hecht, ”Recommendation for use Hofmann voltameter for educational purposes”, *Stettener StraBe*, 22-24 (2017).
50. Xiang, C.; Papadantonakis, K. M.; Lewis, N. S.,” Principles and Implementations of Electrolysis Systems for Water Splitting”, *Mater* 3. Horiz., 169–173 (2016).
51. Koleola Ebenezer Ojaomo, Tunji John Erinle, Dayo Hephzibah Oladebeye And Oluwasayo Dorcas Olakolegan, , “Hydrogen Generation Through Electrolysis Of Brine For Clean Energy Development In A Depressed Economy”, *International Advanced Research Journal In Science, Engineering And Technology* Vol 7: 95-101 (2020).
52. İnternet : Chemicalaid “Equations Chimiques Balancées”. <https://www.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php> (2024)..

ÖZGEÇMİŞ

Idriss IBRAHIMA, 2017 yılında INSTITUT SUPERIEUR DE TECHNOLOGIE INDUSTRIELLE'de (SENEGAL) Elektromekanik-Elektroteknik, Soğutma ve İklimlendirme bölümünde eğitimine başlamış ve 2021 yılında Lisans diplomasını almıştır.2021 yılından beri Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimde devam etmektedir.