



**SEÇİCİ KATALİTİK İNDİRGEME SİSTEMİNDE
FARKLI PARAMETRELERİN NO_x EMİSYONLARINA
ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Emrah ERÇEK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

Bu tez çalışması 20.FEN.BİL.27 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**SEÇİCİ KATALİTİK İNDİRGEME SİSTEMİNDE FARKLI
PARAMETRELERİN NO_x EMİSYONLARINA ETKİSİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Emrah ERÇEK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Emrah ERÇEK tarafından hazırlanan “Seçici Katalitik İndirgeme Sisteminde Farklı Parametrelerin NO_x Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 06 / 07 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR

Başkan : Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Fatih AKSOY
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Hamit SOLMAZ
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06 / 07 / 2023

Emrah ERÇEK

ÖZET

Doktora Tezi

SEÇİCİ KATALİTİK İNDİRGEME SİSTEMİNDE FARKLI PARAMETRELERİN NO_x EMİSYONLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Emrah ERÇEK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR

Bu çalışmada tek silindirli bir dizel motora SCR sistemi kurularak farklı parametrelerde NO_x dönüşüm verimliliğini incelemek amaçlanmıştır. SCR sistemleri genel olarak motor elektronik kontrol ünitesi ile iletişim halindedir. Motorun o anki çalışma şartlarına bağlı olarak üreticinin belirlediği şartlarda DEF püskürtülüp sistem verimliliği kontrol edilmektedir. Bundan dolayı kurulan deney sisteminde motordan bağımsız SCR elektronik kontrol ünitesi ve yazılımı oluşturulmuştur. Sisteme istenen şekilde müdahale edilebilmesi bu çalışmanın önemini ortaya çıkarmaktadır. Bu amaçla belirlenen deney motoruna uygun egzoz sistemi tasarlanmış ve DEF enjektör karakteristiği çıkartılmıştır. Hazırlanan deney sisteminde DEF enjeksiyon miktarının, egzoz gazı sıcaklığının, DEF sıcaklığının, farklı DEF oranlarının ve SCR karıştırıcısının NO_x emisyonları üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Enjeksiyon miktarının 400 mg/s debide ve egzoz sıcaklığının 300 °C üzerindeki sıcaklıklarda iken en iyi NO_x dönüşümü gerçekleşmiştir. Farklı DEF sıcaklıklarında yapılan deneylerde DEF sıcaklığı 40-45 °C iken maksimum NO_x dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Farklı DEF oranlarında ise en iyi dönüşüm verimliliğinin DEF32 oranında olduğu görülmüştür. Aynı zamanda sisteme karıştırıcı eklendiğinde NO_x dönüşüm verimliliğinde %16'ya kadar artış olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yapılan deneyler ile SCR sistemlerinde optimum şartların belirlenmesi ile en iyi NO_x dönüşümünün sağlandığı, minimum DEF tüketiminin elde edilebildiği ve sistemde üre birikmesi gibi olumsuz durumları azaltarak sistem verimliliğini artıran veriler elde edilmiştir.

2023, xiii + 105 sayfa

Anahtar Kelimeler: SCR, Emisyon, NO_x, Dizel egzoz sıvısı, Dizel motor, Enjeksiyon



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT PARAMETERS ON NO_x EMISSIONS IN A SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION SYSTEM

Emrah ERÇEK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Şükrü Ayhan BAYDIR

In this study, it is aimed to examine the NO_x conversion efficiency in different parameters by installing an SCR system on a single-cylinder diesel engine. SCR systems are generally in communication with the engine electronic control unit. Depending on the current operating conditions of the engine, DEF is sprayed under the conditions determined by the manufacturer and the efficiency of the system is checked. For this reason, the SCR electronic control unit and software independent of the engine were created in the experimental system. Being able to intervene in the system as desired reveals the importance of this study. For this purpose, the exhaust system suitable for the specified test engine was designed and the DEF injector characteristic was extracted. In the experimental system, the effects of DEF injection amount, exhaust gas temperature, DEF temperature, different DEF ratios and SCR mixer on NO_x emissions were investigated experimentally. The best NO_x conversion was achieved when the injection amount was at a flow rate of 400 mg/s and at temperatures 300 °C above the exhaust temperature. In experiments performed at different DEF temperatures, maximum NO_x conversion efficiency was obtained when the DEF temperature was 40-45 °C. At different DEF ratios, it was seen that the best conversion efficiency was DEF32. At the same time, it was observed that the NO_x conversion efficiency increased up to 16% when a mixer was added to the system. As a result, with the experiments carried out, data were obtained that determine the optimum conditions in SCR systems, provide the best NO_x conversion,

obtain the minimum DEF consumption, and increase the system efficiency by reducing the negative conditions such as urea accumulation in the system.

2023, xiii + 105 pages

Keywords: SCR, Emission, NO_x, Diesel exhaust fluid, Diesel engine, Injection



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen, emisyon cihazı konusunda desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünden Sayın Prof. Dr. Hüseyin Serdar YÜCESU ve Prof. Dr. Hamit SOLMAZ'a, elektronik altyapının hazırlanmasında destek veren Manisa Celâl Bayar Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden Sayın Doç. Dr. İsmail YABANOVA'ya, motor düzeneğinin hazırlanmasında destek veren Afyon Kocatepe Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünden Sayın Doç. Dr. Yaşar Önder ÖZGÖREN'e, Katalizör malzeme tedariki ve bilgi konusunda desteğini esirgemeyen Mersin Üniversitesi Otomotiv Teknolojisi Bölümü Sayın Doç. Dr. İbrahim Aslan REŞİTOĞLU'na Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Sayın Prof. Dr. Mustafa ACAROĞLU'na, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma, fikirleri ve tecrübeleri ile desteklerini esirgemeyen EMTEST firmasından Volkan BAYRAKTAR'a, egzoz sistemi imalat ve yapım aşamasında destek veren Turgut ve Ahmet ERÇEK'e, Mekatronik Teknikeri Arif Melih ERÇEK'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamı 20.FEN.BİL.27 numaralı proje ile maddi olarak desteklediği ve çalışmalarımın yürütülmesinde kolaylık sağladığı için Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)'ne teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve eşim Sevil ERÇEK'e teşekkür ederim.

Emrah ERÇEK
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	4
2.1 Emisyonlara Genel Bakış	4
2.2 Egzoz Gazı Emisyonları	5
2.3 Dizel Motorlarda Yanma ve Emisyon Oluşumu	6
2.4 Dizel Motor Emisyonları	9
2.4.1 Karbon monoksit (CO).....	9
2.4.2 Hidrokarbonlar (HC)	10
2.4.3 Azot oksitler (NO _x)	11
2.4.4 Partikül madde (PM)	14
2.4.5 Kükürt dioksit (SO ₂).....	15
2.5 Dizel Motorlarda Yanma Sonrası Emisyon Kontrol Sistemleri	16
2.5.1 Dizel Oksidasyon Katalizörü (DOC)	18
2.5.2 Dizel Partikül Filtresi (DPF)	19
2.5.3 Seçici Katalitik İndirgeme (SCR)	20
2.5.3.1 SCR Katalizör Tipleri ve Uygulamaları	26
2.5.4 Amonyak (NH ₃) Slip	29
2.5.5 SCR Egzoz Sisteminde Üre Bazlı Tortu Oluşumu.....	29
2.5.6 SCR Sistemi ve Yakıt Tüketimi İlişkisi	31
2.5.7 SCR Teknolojisi, Avantaj ve Dezavantajları	31
2.6 Dizel Egzoz Sıvısı (DEF)	32
2.6.1 Dizel Egzoz Sıvısı Özellikleri	33
2.6.2 Dizel Egzoz Sıvısı Tüketimi	35

3. MATERYAL ve METOT.....	36
3.1 Deney Düzeneği.....	36
3.1.1 Test Motoru	36
3.1.2 Motor Dinamometresi	38
3.1.3 Yük Okuyucu (Load Cell) ve Devir Okuyucu (Encoder)	38
3.1.4 Dinamo ve Motor Kontrol Paneli.....	40
3.1.5 Sıcaklık Sensörü.....	41
3.1.6 NO _x Sensörü.....	41
3.1.7 MAF Sensörü	43
3.1.8 Dizel Egzoz Sıvısı Pompası	46
3.1.9 Dizel Egzoz Sıvısı Enjektörü	48
3.1.10 Hassas Terazî	49
3.1.11 Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı.....	50
3.1.12 Egzoz Emisyon Cihazı.....	51
3.2 SCR Elektronik Kontrol Ünitesi (SCR ECU).....	52
3.3 SCR, DOC Katalizörleri ve Egzoz Sisteminin Tasarımı	57
3.4 Dizel Egzoz Sıvısı Enjektörü Püskürtme Karakteristiğinin Çıkarılması.....	61
3.5 Sıcaklık Sensörü Verilerinin İşlenmesi	68
3.6 Farklı Oranlarda Dizel Egzoz Sıvısı Üretimi.....	70
3.7 SCR Sisteminde Püskürtülecek Dizel Egzoz Sıvısı Miktarının Hesaplanması ..	71
4. BULGULAR.....	75
4.1 Enjeksiyon Miktarının NO _x Emisyonlarına Etkisi	75
4.2 Egzoz Gazı Sıcaklıklarının NO _x Emisyonlarına Etkisi	80
4.3 Dizel Egzoz Sıvısı Sıcaklığının NO _x Emisyonlarına Etkisi	82
4.4 Dizel Egzoz Sıvısı Oranlarının NO _x Emisyonlarına Etkisi	83
4.5 SCR Karıştırıcısının NO _x Emisyonlarına Etkisi	85
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	88
6. KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ.....	99
EKLER	101

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	Alüminyum oksit
C	Karbon
Ce	Seryum
CO	Karbon monoksit
Co	Kobalt
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	Üre
CO_2	Karbondioksit
cpsi	Cell per square inch (bir inç karedeki gözenek sayısı)
Cr	Krom
Cu	Bakır
Fe	Demir
Fe_2O_3	Hematit
g	Gram
h	Saat
H	Hidrojen
H_2O	Su
HC	Hidrokarbon
HNCO	İzosiyanik asid
HP	Horse power (beygir gücü)
JHC	Yanmamış hidrokarbonlar
K	Kelvin
km	Kilometre
kW	Kilowatt
$\dot{m}_{DEF}$	Dizel egzoz sıvısı debisi
$\dot{m}_{NO_x}$	NO_x gazı debisi
$\dot{m}_a$	Hava debisi
$\dot{m}_e$	Egzoz debisi
$\dot{m}_f$	Yakıt debisi
mg	Miligram
Mn	Manganez
MnO_x	Manganez oksit
ms	Milisaniye
Mt	Milyon ton
n	Motor devri
N_2	Azot
N_2O	di-azot monoksit
NH_3	Amonyak
Ni	Nikel
NO	Azot oksit
NO_2	Azot dioksit
NO_x	Azot oksitler
NO_{xs}	Sensör tarafından ölçülen NO_x miktarı
O_2	Oksijen
Pd	Paladyum

Simgeler (Devam)

ppm	Parts per million (milyonda bir birim)
Pt	Platin
rpm	Revolutions per minute (dakikadaki devir sayısı)
s	Saniye
S	Kükürt
Sb	Antimon
SiO ₂	Silisyum dioksit
SO ₂	Sülfür dioksit
SO _x	Kükürt oksitler
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum dioksit
V ₂ O ₅	Vanadyum pentoksi
V _c	Katalizör hacmi
V _s	Silindir hacmi
WO ₃	Tungsten trioksit
λ	Hava fazlalık katsayısı
μA	Mikroamper
μg	Mikrogram
°	Derece
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar

ADC	Analog digital converter (analog sayısal dönüştürücü)
AUS	Aqueous urea solution (Sulu Üre Çözeltisi)
CAN	Controller area network bus (kontrol alan ağı veri yolu)
CUC	Clean up catalyst
DEF	Diesel exhaust fluid (dizel egzoz sıvısı)
DOC	Dizel oksidasyon katalizörü (diesel oxidation catalyst)
DPF	Dizel partikül filtresi
ECU	Electronic control unit (elektronik kontrol ünitesi)
EGR	Egzoz gazı devridaim
H/Y	Hava-yakıt oranı
MAF	Mass air flow sensor (hava kütle ölçer- debimetre)
NI	National instruments
PAH	Poli aromatik hidrokarbonlar
PM	Partikül madde
SCR	Selective catalytic reduction (seçici katalitik indirgeme)
SNCR	Selective non-catalytic reduction (seçici olmayan katalitik indirgeme)
VAC	Alternatif akım voltajı
VDC	Doğru akım voltajı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 İçten yanmalı motorlarda egzoz emisyon oranları.....	6
Şekil 2.2 Püskürtülen yakıt jetinin alev bölgeleri detayı.....	7
Şekil 2.3 Dizel motorun kısmi yük aralığında ham egzoz gazı ve kirleticiler bileşenleri....	8
Şekil 2.4 Çin’de 2019 yılı azot oksit emisyonlarının dağılımı.....	13
Şekil 2.5 Avrupa'daki hava kalitesi izleme istasyonları tarafından EU6d aracının ve NO ₂ emisyon simülasyonunun 2030’daki tahmini NO _x emisyonları.....	13
Şekil 2.6 Euro 6 ve sonrası egzoz arıtma işlemi şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.7 Dizel partikül filtresi kesit görünümü.	19
Şekil 2.8 SCR sistemi ve elemanları.	21
Şekil 2.9 SCR sistemi gerçekleşen kimyasal olaylar	22
Şekil 2.10 Üre çözeltilerinin donma noktaları.....	33
Şekil 3.1 Deney düzeneğinin şematik görünümü.	36
Şekil 3.2 NO _x sensör kontrol ünitesi pin bağlantıları.....	43
Şekil 3.3 MAF sensörü debi-voltaj polinom eğrileri.....	45
Şekil 3.4 SCR elektronik kontrol ünitesi blok devre şeması.....	52
Şekil 3.5 Farklı atımla (pulse) için kullanılan enjektör kontrol sinyalleri.....	63
Şekil 3.6 LabVIEW blok diyagram ara yüzünden püskürtme sürelerinin tanımlanması.	64
Şekil 3.7 Farklı püskürtme tipleri (pulse) ve süreleri (ms/s) için enjektör debisinin (mg/s) doğrusal regresyonla tespiti.	66
Şekil 3.8 Farklı püskürtme tipleri (pulse) ve sürelerindeki (ms/s) enjektör debisinin (mg/s) değişim grafikleri.	68
Şekil 3.9 Ham sıcaklık sensörü verileri ve 100 aralıklı hareketli ortalama değerleri. ...	69
Şekil 3.10 MATLAB’da aykırı veriler ile kararlı sıcaklık verilerinin tespiti.....	69
Şekil 3.11 Sıcaklık verisi işlenmiş LabVIEW blok diyagramları ve ön panel görünümü.	70
Şekil 4.1 Enjeksiyon öncesi ve sonrasındaki NO _x emisyonları.	76
Şekil 4.2 Enjektör debisine göre NO _x düşüşlerinin değişimi.	77
Şekil 4.3 40 mg/s’lik debide DEF enjeksiyon süreci ve NO _x değişimi.....	78
Şekil 4.4 40 mg/s’lik DEF enjeksiyon süresince sıcaklık değişimi.	79
Şekil 4.5 40 mg/s’lik DEF enjeksiyon süresince diğer emisyon değerlerinin değişimi.	80
Şekil 4.6 Egzoz sıcaklığının NO _x emisyonlarına etkisi.....	81
Şekil 4.7 DEF sıcaklığının NO _x emisyonlarına etkisi.	83

Şekil 4.8 DEF oranlarının NO _x emisyonlarına etkisi.	84
Şekil 4.9 SCR karıştırıcısının NO _x emisyonlarına etkisi.....	86



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Dizel egzoz sıvısı (DEF32) fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	34
Çizelge 3.1 Deney motoru teknik özellikleri.....	37
Çizelge 3.2 Loadcell cihazının teknik özellikleri.....	39
Çizelge 3.3 Continental UniNO _x sensör teknik özellikleri.	42
Çizelge 3.4 MAF sensörü teknik özellikleri.....	44
Çizelge 3.5 MAF sensörü çıkış voltajı hava debisi fabrika verileri.	45
Çizelge 3.6 Dizel egzoz sıvısı pompası teknik özellikleri.	47
Çizelge 3.7 Dizel egzoz sıvısı enjektörü teknik özellikleri.	49
Çizelge 3.8 Egzoz emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri	51
Çizelge 3.9 USB-4716-AE veri toplama ve iletişim modülü teknik özellikleri.....	55
Çizelge 3.10 SCR katalizörü teknik özellikleri.....	58
Çizelge 3.11 Farklı hareketli ortalamalarda sıcaklık veri aralıkları değişimi.	69
Çizelge 3.12 Püskürtülecek DEF miktarı mol/moleküler ağırlık hesabı.....	73
Çizelge 3.13 Üre ayrışması mol/moleküler ağırlık hesabı.	74

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Deney motoru.	37
Resim 3.2 Dinamometre.....	38
Resim 3.3 Yük hücresi (loadcell) ve loadcell cihazı.....	39
Resim 3.4 Encoder.	40
Resim 3.5 Dinamo ve motor kontrol paneli.	41
Resim 3.6 K tipi termokupl ve ayarlı rekoru.....	41
Resim 3.7 NO _x sensörü.	42
Resim 3.8 MAF sensörü.....	43
Resim 3.9 MAF sensörünün motor bağlantısı.	44
Resim 3.10 Dizel egzoz sıvısı pompası.....	46
Resim 3.11 Sıvı basınç saati ve çek valf düzeneği.....	48
Resim 3.12 Dizel egzoz sıvısı enjektörü.	49
Resim 3.13 Hassas terazi.....	50
Resim 3.14 Isıtıcılı manyetik karıştırıcı.	50
Resim 3.15 Egzoz emisyon ölçüm cihazı	51
Resim 3.16 SCR elektronik kontrol ünitesi ve komponentleri.	53
Resim 3.17 Güç kaynakları.	53
Resim 3.18 Sinyal çevirici.	54
Resim 3.19 DEF pompa ve enjektör kontrolü devre kartı.	54
Resim 3.20 USB-4716-AE veri toplama ve iletişim modülü.....	55
Resim 3.21 NI USB-8473s CAN cihazı.....	56
Resim 3.22 LabVIEW yazılıma ait ara yüz.	56
Resim 3.23 DOC ve SCR katalizörleri.	58
Resim 3.24 Amyant ve katalizöre giydirilmesi.....	59
Resim 3.25 Konik redüktör.	59
Resim 3.26 DOC ve SCR katalizörleri.	59
Resim 3.27 Egzoz sistemi ve parçaları.	60
Resim 3.28 Egzoz parçaları conta ve kelepçe ile birleşimi.....	60
Resim 3.29 SCR karıştırıcısı ve montajı.	61
Resim 3.30 Püskürtülen DEF sıvısının hassas ölçümü.	62
Resim 3.31 LabVIEW enjektör kontrolü ara yüz ekran görüntüsü.....	67
Resim 3.32 DEF hazırlama süreci.....	71

1. GİRİŞ

Son zamanlarda bilim ve teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte çevre sorunları ve enerji krizi gibi ciddi küresel problemlerle karşılaşmaktadır. Bunlara bağlı olarak sanayileşmenin hızlanması hava kirliliğini önemli bir çevre sorunu haline getirmiştir. Hava kirliliğinin ana tetikleyicileri insan faktörleri, endüstriyel üretim, ulaşım, yakıtların yanması ve tarımsal faaliyetler vb. olmaktadır. Hava kirleticiler arasında azot oksitler (NO_x); fotokimyasal duman, asit yağmuru ve ozon tabakası tahribatı gibi bir dizi çevresel soruna neden olan birincil hava kirleticilerindendir. Küresel kaynaklar, azot oksitlerin ana nedeninin petrokimya endüstrisi olduğunu göstermektedir. Bundan dolayı doğrudan veya dolaylı olarak bu sorunlara neden olan motor emisyonları üzerine araştırmalar odak noktası haline gelmiştir (Zhang Z vd. 2022).

Her yıl motorlu araç sayısı dünyada yaklaşık 50 milyon artmaktadır. Bu artış hızına bağlı olarak yaklaşık 150 000 km yol kat eden bir araç ortalama 100 ton yakıt ve 150 litre yağ harcamaktadır. Tüketilen bu yakıt ve yağ düşünülürse atmosfere salınan egzoz gazları ve partikül maddelerin ağırlığı 35 tonu bulmaktadır (Uyumaz vd. 2017).

Emisyon standartlarında alınan sıkı önlemler, araştırmacıları düşük emisyonlu ve yüksek yakıt ekonomisine sahip verimli motorlar geliştirmeye yönlendirmektedir. Diğer yandan içten yanmalı motorların dezavantajlarından dolayı dünya elektrikli araçlara doğru yönelmektedir. Ancak ekonomik olarak ticarileşme açısından elektrikli araç teknolojileri şuan çok geridedir. Muhtemelen tam olarak ekonomik hale gelmesi için binek araç segmentinde yaklaşık on yıl gerekirken ağır hizmet araçları için hedef hala çok uzak görünmektedir. Dizel motorların düşük yakıt tüketimi, yüksek tork, yüksek termal verimlilik ve alternatif yakıtlarla çalışma avantajı bulunmaktadır. Bu bakımından geleceğin otomotivinin özellikle ticari araçlarda hala dizel motorlarında olduğu görülmektedir (Vignesh ve Ashok 2020).

NO_x emisyonlarının Euro 4 standartlarının yürürlüğe girmesinden sonra sadece motor teknolojisinde yapılan değişikliklerle sağlanabilmesi oldukça zorlaşmıştır. 2009 ve 2014 yıllarında Euro 5 ve Euro 6 standartlarının yürürlüğe girmesiyle NO_x emisyonları %60

partikül emisyonları ise %80 oranında azalması gerekmektedir. Bu noktada NO_x emisyonlarının yanma sonrasında egzoz hattında iyileştirilmesi gerekliliği doğmuştur. Yanma sonrası uygulanan en etkin yöntem SNCR (Seçici Olmayan Katalitik İndirgeme), SCR (Seçici Katalitik İndirgeme) veya bunların hibrit sistemleridir (Jung vd. 2019). SCR sistemi ile NO_x emisyonlarını azaltmak için uzunca bir süredir çalışılmaktadır (Mazzoleni vd. 2004). SCR sistemleri, maliyeti, uygulama zorluğu ve kontrol işlemleri nedeni ile şu ana kadar büyük taşıtlara uygulansa da emisyon standartları gereği 2020 yılı itibarı ile küçük binek dizel motorlu taşıtlara da uygulama zorunluluğu gelmiştir.

SCR sisteminin binek araçlardaki kurulumu ve satış sonrasında belli zamanlarda DEF (Dizel Egzoz Sıvısı) alması gerektiğinden müşteriler tarafından kabul edilemeyecek düzeyde maliyetler oluşturmaktadır. Bu nedenle binek taşıtlarda SCR sistemi yerine NO_x depolayıcı konvertörlerin kullanılması gibi alternatif seçimler kullanılmaktadır. Ancak SCR sisteminin binek taşıtlara uygulanabilmesi için boyut ve maliyetleri düşürme çalışmaları hala devam etmektedir (Kannepalli 2017, Kurzydym vd. 2022).

Otomotiv dizel motor endüstrisi, giderek daha sıkı emisyon düzenlemeleriyle karşı karşıya kalmaktadır. Özellikle azot oksit (NO_x) emisyon limitleri üreticileri zorlamaktadır. Örneğin Avrupa'da hafif ticari araçlar için NO_x emisyon standartları gereği Euro 5 emisyon limitleri 180 mg/km iken Euro 6 emisyon limitleri 80 mg/km'ye düşürülmüştür. Yani NO_x emisyonlarında %50'den daha fazla bir düşüş olması istenmektedir. Ek olarak Euro 6d standartları ile sürüş anında taşınabilir emisyon ölçüm sistemi testleri ile gerçek sürüş emisyonları için bir standart getirilecektir. Bu gereksinimlerin karşılanmasında, yanma süreci iyileştirilmesi artık tek başına yeterli olmadığından, egzoz gazı iyileştirme tekniklerinin uygulanması gerekecektir. Dolayısıyla sürekli olarak NO_x düşüşü sağlayabilen üre temelli SCR sistemi en umut verici yöntem olarak bilinmektedir (Rogóz vd. 2020).

Dizel motorların kullanım alanı olan gemi motorlarında düşük kaliteli yakıt kullanılması nedeniyle yakıtın yanması sonucu kirletici emisyonlar meydana gelmektedir. Yüksek miktarlarda ortaya çıkan azot oksitler (NO_x), kükürt oksitler (SO_x), karbondioksit (CO_2), partikül madde (PM), uçucu organik bileşikler ve diğer birçok kirleticiler deniz ortamında

ve liman atmosferinde ciddi kirliliğe neden olmaktadır. Bunlar arasında azot oksitler, kükürt oksitler ve karbondioksit asit yağmuru ve fotokimyasal sis gibi kirlilik problemlerine kolayca neden olabilen ve sera etkisini şiddetlendiren aşındırıcı gazlardır. Ayrıca bu beş kirlletici insan vücudunun merkezi sinir sistemini ve solunum sistemini uyararak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır (Zhu vd. 2022).

Bu tez çalışmasında ilk olarak SCR (Seçici Katalitik İndirgeme) sistemi üzerine yapılan akademik çalışmalar incelenerek literatür taraması yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda Motor-SCR düzeneği genellikle otomotiv üreticilerinin kurduğu hazır laboratuvar şartlarında veya araç üzerinde gerçekleştirilmektedir. Otomotiv SCR sistemlerinde SCR ve motor ECU'su (Elektronik Kontrol Ünitesi) irtibat halinde çalıştığı için SCR ECU'suna bağımsız müdahale edilememektedir. Bu yüzden bu çalışmada tek silindirli bir dizel motora SCR sistemi düzeneği uyarlanarak motordan bağımsız SCR elektronik kontrol ünitesi ve yazılımı yapılmıştır. Materyal ve metot bölümünde sistemin mekanik bölümü olan egzoz sistemi, hidrolik bölümü olan Dizel Egzoz Sıvısı (DEF) pompası ve enjektör sistemi, elektronik bölümü olan SCR-ECU'su ve sistemin yönetildiği yazılım bölümü hakkında bilgiler verilmiştir. Bulgular başlığı altında sistemde deneysel çalışmalar yapılarak NO_x emisyonları ve sistemin verimliliği analiz edilmiştir. Tartışma ve sonuçlar kısmında ise elde edilen önemli sonuçlar değerlendirilerek geçmiş çalışmalarla kıyaslama yapılmış ve gelecek çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Emisyonlara Genel Bakış

Çevre, günümüzün en önemli tartışma konularından birisidir. Son yıllarda, dünyanın ölçülen ortalama sıcaklıklarının artması ile küresel ısınma (iklim değişikliği) olayı ekosistem üzerinde birçok olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Bu iklim değişikliğinin temel nedenlerinden biri, artan sera gazı emisyonlarıdır. Başlıca sera gazları; karbondioksit (%82), metan (%9), azot oksitler (%6) ve diğer gazlardır (%3). Bu gazlar, ısının atmosferden ayrılmasını engelleyerek sıcaklık artışına neden olan sera etkisi yaratırlar (Elfeky 2018).

Atmosferdeki sera gazları (su buharı, karbondioksit, metan, ozon, azot oksit, aerosoller ve partikül isi) ortalama sıcaklıkları +5 °C'ye kadar yükseltmektedirler. Özellikle su buharı, önemli miktarda ısı tutmaktadır. Karbondioksit, 100 yıldan daha fazla bir süredir, endüstriyel çağın ilk zamanlarından beri yükselmiştir. Bunların ana kaynağı kömür ve petrol ürünlerinin yakılmasındaki artıştır. Emisyonları düşürmek ve sera etkisi ile mücadele etmek için enerji kullanımının azaltılması çağrısında büyük bir oybirliği vardır (Bosch 2006).

Covid-19 döneminde karbon emisyonları ile ilgili yapılan çalışmalarda, Çin başta olmak üzere sanayileşme oranı yüksek olan ülkelerde üretimin bir süre durdurulmasının enerji ve fosil kaynaklı yakıt tüketimini azalttığını, buna bağlı olarak karbon emisyonlarının düştüğü ve hava kalitesinin arttığına dair bulgulara rastlandığını ifade etmişlerdir (Mert ve Aykan 2022).

Araştırmalar, hava kirliliğinin daha yüksek olduğu yerlerde yaşayanların daha fazla Covid-19 vakasına sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin Çin'de hava kirliliğinin yüksek olduğu dönemlerde virüs yayılım oranının arttığı, İngiltere de ise NO₂ ve PM_{2,5} seviyeleri arttıkça Covid-19 kaynaklı ölüm oranlarının arttığı gözlemlenmiştir (Fayyazbakhsh vd. 2022).

Türkiye emisyon envanteri (2022) sonuçlarına göre, 2020 yılı toplam sera gazı emisyonu (CO₂ eşdeğeri) bir önceki yıla göre %3,1 artarak 523,9 milyon ton (Mt) olarak hesaplanmıştır. Kişi başı toplam sera gazı emisyonları (CO₂ eşdeğeri) 1990 yılında 4 ton, 2019 yılında 6,2 ton ve 2020 yılında 6,3 ton olarak hesaplanmıştır (TÜİK 2022).

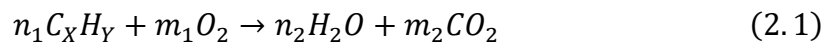
Sera gazlarının yaklaşık %26'sından ulaşım sorumludur. Bu nedenle otomotiv üreticileri özellikle çevre sorunlarına odaklanarak sera gazı emisyonlarını sınırlamak için bir çözüm bulmaya çalışmaktadırlar (Elfeky 2018).

Ulaşım sektörünün özellikle sera gazı salınımına bağlı olarak çevre üzerinde yarattığı olumsuz etkilerin çözülmesi veya en azından iyileştirilmesi sürdürülebilir ulaşım için gerekmektedir (Demirtürk 2021).

2.2 Egzoz Gazı Emisyonları

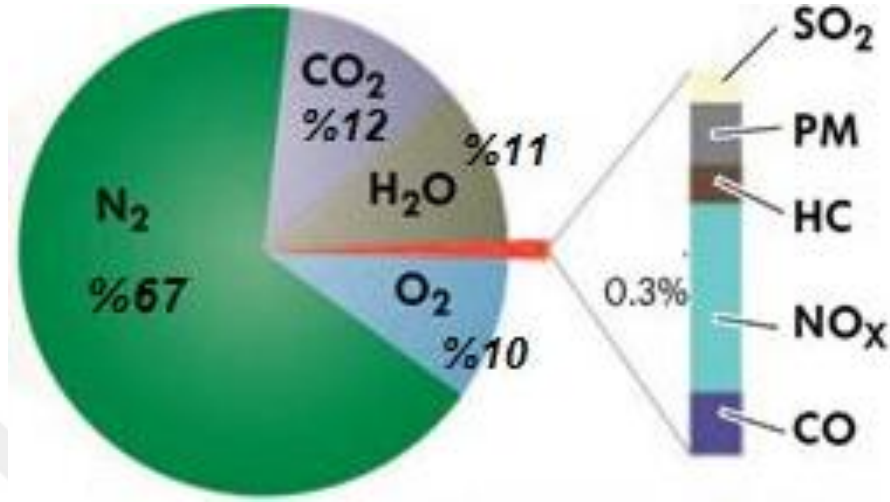
Motorlu taşıtlardan salınan kirletici maddelerin temel olarak üç ana kaynağı vardır. Bunlar; karter havalandırması, yakıt deposu havalandırması ve egzoz gazları içindeki kirleticilerdir (Sassykova vd. 2019). Günümüzde karter ve yakıt deposu havalandırmasından kaynaklanan kirleticiler teknolojinin gelişmesi ile birlikte azaltılmıştır.

İçten yanmalı motorlarda yakıt hava karışımlarının yanması sonucu zararlı egzoz gazları meydana gelmektedir. Bunun nedeni uygulamada silindirlerde tam yanmanın gerçekleşmemesidir. Bu durum karışımda fazladan hava bile olsa geçerlidir. İdeal şartlarda saf yakıtın tam yanması denklem (2.1)'de verilmiştir (Bosch 2006).



Yanma için ideal koşulların olmaması, birincil yanma ürünleri olan su (H₂O) ve karbon dioksitin (CO₂) yanı sıra çevreye zarar verebilecek potansiyelde eksik yanma ürünleri meydana getirir. Eksik yanma ürünlerinin en önemlileri Şekil 2.1'de görüldüğü gibi

karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), partikül madde (PM), sülfür dioksit (SO₂) ve azot oksitlerdir (NO_x) (Bosch 2006).



Şekil 2.1 İçten yanmalı motorlarda egzoz emisyon oranları (Bosch 2006).

Motor modifikasyonları ve egzoz gazı arıtımı, üretilen kirletici maddelerin miktarını azaltabilir. Dizel motorlar daima aşırı hava ile çalıştıkları için doğal olarak benzinli motorlara kıyasla çok daha az miktarda CO ve HC üretir. Bu yüzden, temel olarak üzerinde durulan NO_x ve partikül emisyonlarıdır.

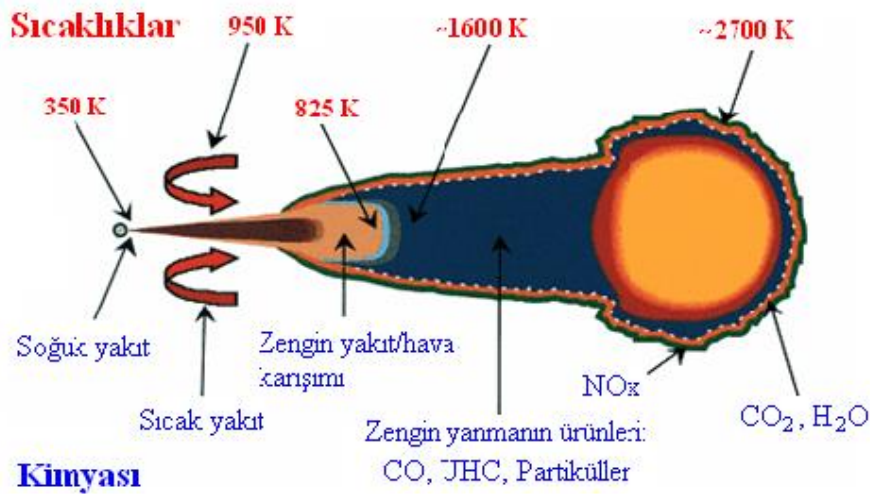
İçten yanmalı motorlara sahip taşıtların meydana getirdiği emisyonlar nedeniyle, birçok ülke bu tür taşıtların aşamalı olarak kullanımdan kaldırma ve elektrikli araçlara teşvik etme planlarını açıklamaktadır. Benzinli motorların verimliliği ortalama %25-35 iken dizel motorların verimliliği %40-50 arasında değişmektedir. Elektrikli araçlarda maliyetleri düşürme ve verimin artırılması biraz zaman alacağını göstermektedir. Bu yüzden önümüzdeki on yıl içerisinde bu motorların kullanılmaya devam etmesi beklenmektedir. Bu durum egzoz gazı emisyonları üzerinde çalışılması gerektiğini göstermektedir.

2.3 Dizel Motorlarda Yanma ve Emisyon Oluşumu

Dizel motorlarda, benzinli motorlardaki yanma olayından farklı olarak difüzyon kontrollü yanma gerçekleşir. Benzinli motorlarda yanma öncesi hava ve yakıtın karışımı tamamlanır. Dizel motorlarda ise hava ve yakıtın karışımı yanma ile eşzamanlı olarak

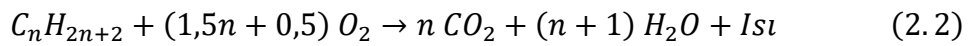
gerçekleşir. Bu durum, farklı verimlilik, farklı emisyonlar ve farklı yakıt ihtiyacı gibi pek çok sonucu beraberinde getirir.

Dizel motorun tipik özelliği olan difüzyon kontrollü yanma ile açığa çıkan ısı, yakıt ve oksijenin karışma hızı tarafından kontrol edilir. Bu durum önceden karıştırılmış yanmaya kıyasla oldukça düşük bir alev hızı ile sonuçlanır. Yakıt, alev eksenini boyunca akar ve radyal olarak dışa doğru yayılır, oksitleyici (hava) ise ters yönde yayılır. Her ikisi de reaksiyon bölgesinde tüketilir. Bu bölgede, stokiyometrik koşulların ve dolayısıyla adyabatik alev sıcaklığına yaklaşan en yüksek sıcaklığın bulunabileceği bölgedir. Sonuç olarak burası aynı zamanda en yüksek ürün konsantrasyonunun olduğu yerdir. Şekil 2.2’de püskürtülen yakıt jetinin alev bölgeleri detayı gösterilmektedir (Lakshminarayanan ve Aghav 2010, Erçek 2011).



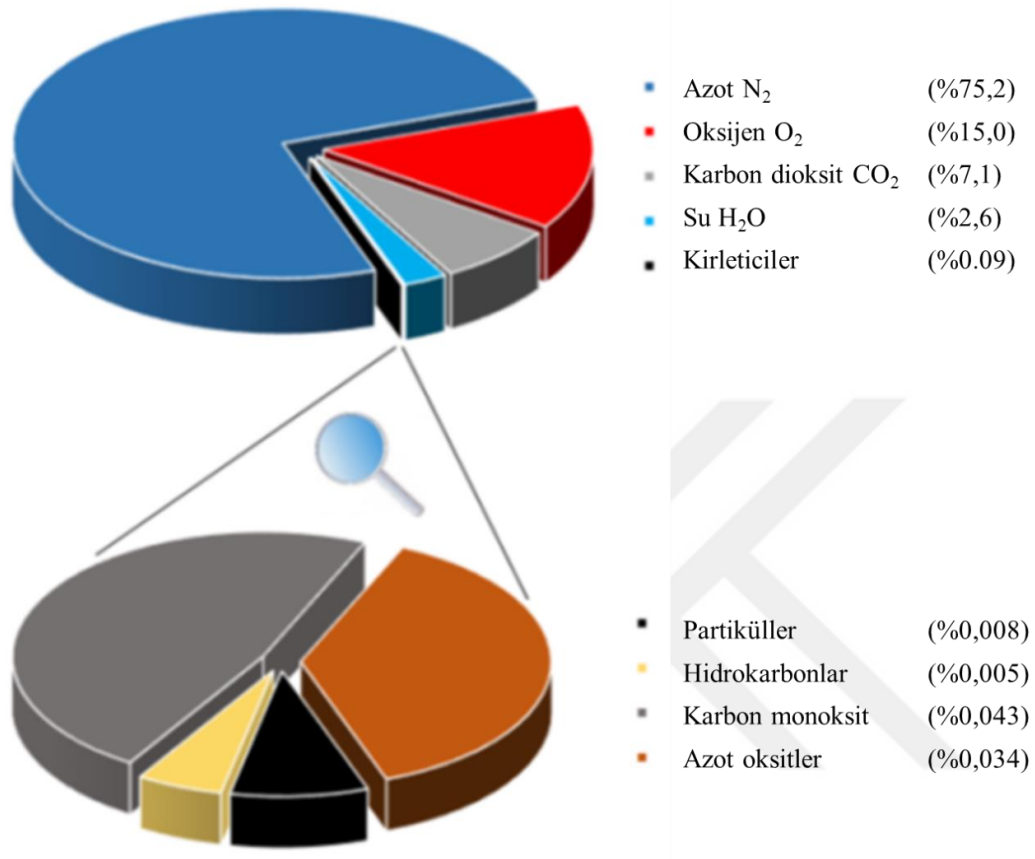
Şekil 2.2 Püskürtülen yakıt jetinin alev bölgeleri detayı (Lakshminarayanan ve Aghav 2010, Erçek 2011).

Dizel motorlarda ideal, stokiyometrik yanma şartlarında yakıtın yanma süreci denklem (2.2)’de tanımlanmıştır.



Denklem (2.2)’de görüldüğü gibi dizel yakıtın stokiyometrik yanması sonucu karbondioksit, su ve ısı açığa çıkar. Gerçek yanmada doğaya ve canlılara karşı toksik özelliklerinden dolayı kirletici olarak kabul edilen diğer yan ürünlerde meydana

gelmektedir. Şekil 2.3’de dizel motorun kısmi yük aralığında ham egzoz gazı ve kirletici bileşenleri gösterilmektedir (sayılar kütle yüzdesi olarak verilmiştir).



Şekil 2.3 Dizel motorun kısmi yük aralığında ham egzoz gazı ve kirletici bileşenleri (Braun 2019).

Şekil 2.3’de görüldüğü üzere dizel motorun egzoz gazlarının ağırlıkça %99,9’u zararsız ve zehirli olmayan bileşenlerden oluşur. Yasal olarak sınırlandırılmış kirleticiler ağırlıkça yaklaşık %0,1 oranındadır. Bu oran dizel egzoz gazının çok küçük bir kısmını oluştursa da, bu maddeler doğa ve insan sağlığı açısından çeşitli zararlı etkilere neden olurlar. Kirleticiler temel olarak dört farklı sınıftan oluşur: yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbonlar, karbon monoksit, partiküller ve nitrojen oksitlerdir (Braun 2019).

Motordan çıkan maksimum kirletici miktarını düzenlemek için yıllar içinde bazı emisyon mevzuatları gerekli hale gelmiştir. Birçok sıkıntıyı ve karşılanması gereken yatırım gereksinimlerini beraberinde getirmelerine rağmen, günümüzde üretilen araçların motor verim ve performanslarının geliştirilmesinde de önemli katkılar sağlamıştır (Antoniotti 2017).

2.4 Dizel Motor Emisyonları

Bugünkü dizel motorlar aynı güç çıkışına sahip benzinli motorlara kıyasla daha verimlidir ve bu nedenle yakıt tüketimi ve yayılan CO₂ seviyeleri daha düşüktür. Aynı zamanda dizel yakıtı, benzeri yenilenebilir enerji kaynakları ile karıştırılması sonucu CO₂ emisyonlarını azaltma ve verimlilik açısından gelecekteki hedeflere ulaşma konusunda önemli bir kilit teknoloji olarak görülmektedir (2020 hedefine göre 2025'te %15 ve 2030'da %30) (Avolio vd. 2018).

2005-2016 yılları arasında, dizel motorlu araçların satışlarındaki sürekli artış, onları kentsel hava kirliliğinin ana kaynağı haline getirmiştir. Dizel motorun yaydığı başlıca kirleticiler karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (UHC), azot oksit (NO) ve azot dioksitten (NO₂) oluşan azot oksitlerdir (NO_x). Benzinli motorlarla kıyaslandığında, partikül madde (PM) veya duman olarak da bilinen çok sayıda partikül emisyonu yayarlar (Gall 2015).

2.4.1 Karbon monoksit (CO)

Karbon monoksit, zengin hava/yakıt karışımlarında havanın yetersizliği sebebiyle meydana gelen eksik yanmadan kaynaklanmaktadır. Karışımın heterojen olmasından dolayı bölgesel oksijen eksikliğinde ($\lambda < 1$), eksik yanmanın bir ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra silindir çeperlerindeki soğuk yüzeyler nedeniyle sıcaklıktaki ani düşüş CO bileşiğinin CO₂'ye dönüşümünü engeller (Braun vd. 2019). Zengin karışımın belirli bölgelerinde buharlaşmayan yakıt damlacıkları, tam olarak yanamazlar. Karbon monoksit hava/yakıt karışımı içerisinde kısa süreli zengin çalışma aralığı veya kararsızlıklardan da kaynaklanmaktadır (Bosch 2006).

Motorların düşük hızlarda ve rölantide çalışması, motor yakıtlarının bileşimindeki ağır fraksiyon oranının artması karbon monoksit emisyonlarında artış göstermektedir (Sassykova vd. 2019).

Genel olarak, motor yükündeki veya hızındaki artış, CO emisyonlarını düşürür. Ancak

motor devrindeki aşırı artış, yanma alevi sıcaklığını düşüreceğinden çok yüksek motor hızlarında CO emisyon değerleri de daha yüksek olma eğilimindedir (Verma vd. 2018)

Hidrokarbonlarda olduğu gibi dizel motor temel olarak fazla oksijenle çalıştırıldığından, ham egzoz gazında bulunan karbon monoksit miktarları, stokiometrik olarak çalıştırılan benzinli motorlara göre önemli ölçüde daha düşüktür (Braun vd. 2019).

Karbon monoksit, insanlar için tehlikeli olan başlıca kirleticiler arasında sonlardadır. Koksuz, renksiz ve çok zehirlidir. İnsanlarda, kanın oksijeni tutma kabiliyetini engelleyerek boğulmaya, bilinç kaybına ve ölüme neden olabilmektedirler (Antoniotti 2017).

2.4.2 Hidrokarbonlar (HC)

Hidrokarbonlar (HC), karbon (C) ile hidrojen (H)'in reaksiyonu sonucu oluşan kimyasal birleşenlerin genel tanımıdır. Egzoz gazındaki hidrokarbonların (HC) ana nedeni, yakıtın kısmi eksik yanmasından kaynaklanmaktadır. Kısmi eksik yanmanın nedeni ise yanma odasında yeterince hava olmasına rağmen sıcaklık değişimi ve yakıtın kalış süresindeki yetersizliklerden dolayı hidrokarbon gibi eksik yanma ürünleri görülür (Braun vd. 2019). Ayrıca literatürde yakıt spreyinin yanma odasına düzgün bir şekilde yayılmadığı durumlarda, silindir iç duvarlarında ve çatlak bölgelerinde gaz halindeki hidrokarbonların yanmadan bırakılarak eksik yanmaya neden olmaktadır (Verma vd. 2018).

Dizel motorlarda benzin motorlarına göre daha az sorun teşkil eden HC emisyonları, farklı şekillerde oluşabilen yanmamış hidrokarbonlardan kaynaklanmaktadır. Yanmamış hidrokarbon konsantrasyonu motor yükünün artması ile azalır (Verma vd. 2018). Genel oluşumları aşağıdaki nedenlerden kaynaklanmaktadır (Antoniotti 2017).

- Aşırı fakir veya zengin bölgeler
- Silindir gömleğindeki soğumalar
- Ara ara büyük yakıt damlacıkları
- Piston ve silindir gömleği arasındaki oluşan yakıt damlacığı

- Silindir gömleği üzerindeki yağ filmi desorpsiyonu
- Tekleme

Alifatik hidrokarbonlar (alkanlar, alkenler, alkinler ve bunların çevrimsel türevleri) neredeyse kokusuzdur. Çevrimsel aromatik hidrokarbonlar (benzol, toluol ve çok döngüsel hidrokarbonlar gibi) görülebilir bir koku yayarlar. Kısmen oksitlenmiş hidrokarbonlar (aldehitler, ketonlar, vb.) hoş olmayan bir koku yayarlar. Bu maddeler güneş ışığında maruz kaldığında ortaya kimyasal ürünler çıkarmaktadırlar (Bosch 2006). Hidrokarbonlar ve özellikle PAH'lar (poli-aromatik hidrokarbonlar) kanserojendir ve fotokimyasal duman ve ozona neden olurlar (Antoniotti 2017).

2.4.3 Azot oksitler (NO_x)

Azot oksitler, nitrojen ve oksijenden oluşan kimyasal bileşiklerin kapsadığı genelleyici bir terimdir. Bunlar, azot içeren havanın yakıldığı tüm yanma süreçlerinde ortaya çıkan ikincil reaksiyonlardan kaynaklanır. NO_x emisyonlarının %90'ı kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yanmasından kaynaklanmaktadır (Zhang Z vd. 2022).

İçten yanmalı motorların egzoz gazlarında ortaya çıkan ilk halleri, azot oksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) olup, ayrıca anlık konsantrasyonlarda di-azot monoksit (N_2O) olarak da bulunmaktadır (Bosch 2006). Ancak egzoz gazında azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) önemli miktarlarda bulunur. Bu nedenle NO_x , NO ve NO_2 emisyonlarının toplamını tanımlamak için kullanılır. Motordan meydana gelen azot oksitlerin büyük kısmı %85-95 oranı NO iken %5-15 oranı NO_2 emisyonudur (Braun vd. 2019). Emisyonlar atmosferik havada yavaş yavaş azot dioksite (NO_2) dönüşür. Sonuç olarak azot oksitlerin (NO_x) çoğu NO_2 bileşiğine dönüştürülür (Sorrels vd. 2019).

Azot oksitlerin oluşumu prensipte dört mekanizma ile gerçekleşebilir; yakıt- NO_x , hızlı (ani)- NO_x , termal- NO_x ve N_2O -mekanizması tarafından oluşturulan azot oksitlerdir. Yakıt kaynaklı NO_x , yakıt içeriğindeki azotun oksidasyonu sonucu oluşur. Hızlı- NO_x , yanma alevinin yakınında hidrokarbon köklerinin oksidasyonundan meydana gelen önemsiz miktardaki NO_x oluşumudur. Termal NO_x , 2000 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda

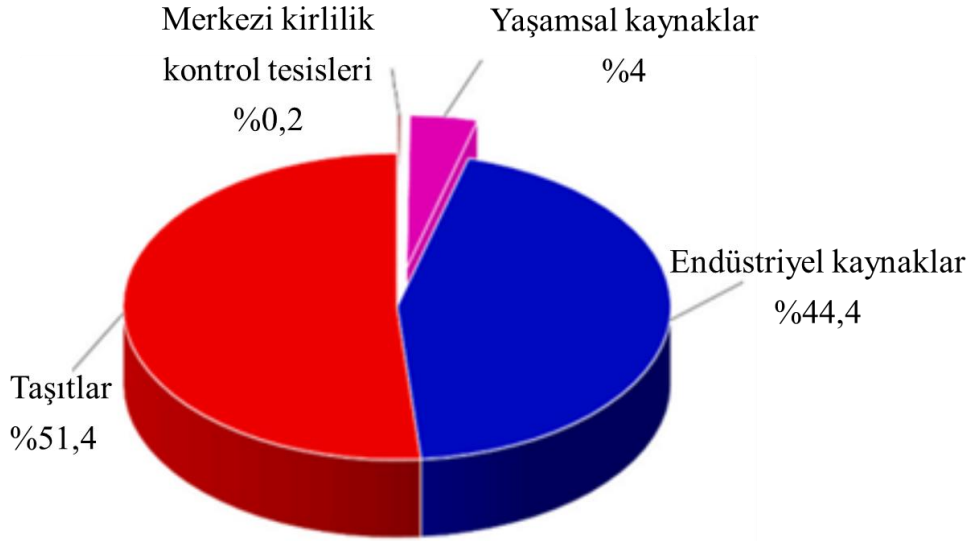
moleküler nitrojen ve oksijenin bağlanmasıyla meydana gelir (Sorrels vd. 2019). Sıcaklık artışına bağlı olarak NO_x emisyonunda artar. 1700 °C'nin üzerindeki sıcaklıktaki her %1'lik artış, NO_x emisyonunda %20'lik artışa neden olur (Reşitoğlu 2018).

İçten yanmalı motorların silindirinde meydana gelen NO_x oluşumu esas olarak Zeldovich mekanizması olarak adlandırılan termal NO emisyonudur. Mekanizma radikal reaksiyonlara dayanmaktadır ve aşağıdaki denklemler (2.3, 2.4, 2.5 ve 2.6) ile açıklanabilir (Braun 2019):



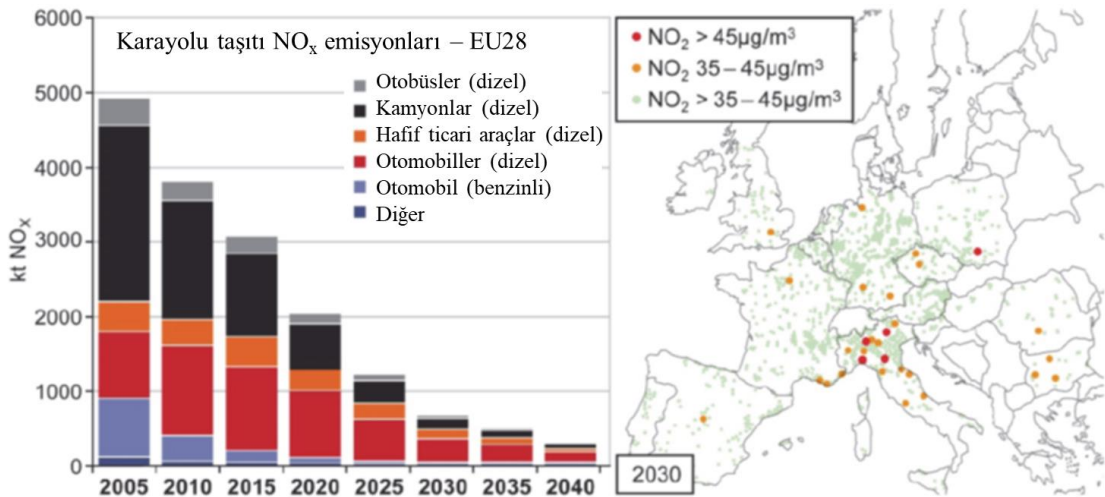
Zeldovich mekanizmasını etkileyen iki temel parametre sıcaklık ve oksijen içeriğidir. Dizel motorlar hava fazlalığı ile çalıştırıldığı için yanma sürecinde ortamda gereğinden fazla oksijen bulunmaktadır. Aynı zamanda yüksek sıkıştırma oranlarından dolayı yanma sonu sıcaklıkları yükselmektedir. Zeldovich mekanizması reaksiyonları (Denklem 2.3 ve 2.6 arası) incelendiğinde dizel motorlarda yüksek oranlarda NO_x emisyonu oluşması kaçınılmaz olmaktadır (Semakula ve Inambao 2018).

Dünyanın en kalabalık bölgelerden biri olan Çin örneğine bakıldığında; 2019 Çin Ekolojik ve Çevre İstatistikleri Yıllık Raporuna göre, Çin'in 2019'daki toplam NO_x emisyonları 12,339 milyon tondur. Bunlar arasında, endüstriyel kaynaklardan kaynaklanan NO_x emisyonları 5,481 milyon ton olup, ülkedeki toplam NO_x emisyonlarının %44,4'üne tekabül etmektedir. Motorlu taşıtlardan kaynaklanan NO_x emisyonları 6,336 milyon ton olup, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi ülkedeki toplam NO_x emisyonlarının %51,4'üne tekabül etmektedir. Ayrıca, NO_x emisyonlarının %70'i dizel motorlardan kaynaklanmaktadır (Zhang Z vd. 2022).



Şekil 2.4 Çin'de 2019 yılı azot oksit emisyonlarının dağılımı (Zhang Z vd. 2022).

2030'da Avrupa'daki hava kalitesi izleme istasyonları tarafından EU6d normundaki aracın ve NO₂ emisyon simülasyonunun kullanımıyla 2030'daki tahmini NO_x emisyonları Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Şekil 2.5'in solunda belirtilen diyagram, ortalama NO_x emisyon seviyesi 120 mg/km olan EU6d aracının piyasaya sürülmesi dikkate alındığında, karayolu taşıtlarının NO_x emisyonunun 2040'a kadar olan gelişimini göstermektedir. Sağdaki diyagram ise farklı Avrupa şehirleri için 2030'da tahmin edilen NO₂ emisyon seviyesini göstermektedir (Avolio vd. 2018).



Şekil 2.5 Avrupa'daki hava kalitesi izleme istasyonları tarafından EU6d aracının ve NO₂ emisyon simülasyonunun 2030'daki tahmini NO_x emisyonları (Avolio vd. 2018).

Azot oksit (NO) renksiz ve kokusuzdur. NO₂, hem bitki örtüsüne hem de insan solunum yollarına ciddi zararlar verebilen ve en tehlikeli motor emisyonlarından biri olan kırmızımsı-kahverengimsi keskin bir kokuya sahip zehirli bir gazdır. Azot oksitlerin insan sağlığı ve çevre üzerinde çeşitli olumsuz etkileri vardır. NO, solunum sisteminin çeşitli bölümlerine yayılabilir. NO_x, akciğerin alveolar hücreleri ve bitişik kılcal damarlarından yayılır ve böylece alveolar yapıları ve işlevlerini bozar (Braun vd. 2019). Örneğin, Hadidi ve ark. (2016), yaklaşık 30-60 dakika nitrojen dioksit (NO₂) maruz kalmanın astımlılarda kronik akciğer şişmesine ve ağırlaştırılmış solunum semptomlarına yol açabileceğini bulmuşlardır. Benzer şekilde, Marco ve ark. (2016), PM10 ve NO₂ emisyonlarının her yıl kardiyovasküler ve solunum yolu hastalıkları nedeniyle yaklaşık 58 000 erken ölüme yol açtığını bildirmiştir (Zhang Z vd. 2022). NO₂, aşırı kirli havada bulunan konsantrasyonlarda mukoza membranlarında tahrişe neden olabilir. Atmosferdeki NO_x, güneş ışığı ile reaksiyona girdiğinde, sağlığa zararlı kirleticilerden biri olan ozonu (O₃) oluşturur. Azot oksitler, orman hasarına (asit yağmuru) sebep olurlar ve ayrıca fotokimyasal duman üretmek için hidrokarbonlarla birlikte reaksiyona girerler. (Bosch 2006). NO₂ emisyonlarına uzun süre maruz kalmak, hipertansiyon, diyabet ve kardiyovasküler hastalıklar gibi çok çeşitli ciddi hastalıklarla ilişkilidir ve hatta ölüme neden olurlar (Ali ve Islam 2020).

2.4.4 Partikül madde (PM)

Partiküller genel olarak yanma odasında havanın eksikliğinden kaynaklanan eksik yanma ürünüdür. Yani zengin karışım bölgelerinde ve düşük sıcaklıklarda meydana gelirler. Parçacıklar boyutlarına göre sınıflandırılabilir. PM10 maksimum 10 µm çapındaki partikülleri, PM2,5 ise 2,5 µm'den küçük partikülleri ifade eder (Braun vd. 2019).

Egzoz gazı bileşimleri, yanma sürecinin ve motorun çalışma şartlarının bir işlevi olarak değişirken, bu partiküller temelde, çok yüksek bir özel yüzey oranı olan hidrokarbon zincirlerinden (kurum) oluşur. PM, yağ ve yakıt, sülfürik asit, nitrojen asit, metaller, kül ve sudan kaynaklanan yanmamış hidrokarbonlar gibi birçok farklı ürünü emen gözenekli karbon çekirdeklerden oluşur. Yanmamış ve kısmen yanmış hidrokarbonlar, keskin

kokusu ile aldehitlerle birleştiklerinde kurum birikintileri oluştururlar. Aerosol bileşenleri (çok dağılan katılar veya gazlardaki sıvılar) ve sülfatlar kurumla bağlanır. Sülfatlar yakıttaki kükürt içeriğinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, bu kirleticiler kükürttten arındırılmış yakıt kullanılırsa oluşmazlar (Bosch 2006).

PM oluşum noktaları, genellikle NO_x emisyonları ile ters orantılıdır. Çünkü yüksek sıcaklıklara ve dolayısıyla yüksek NO_x seviyelerinde kurum kolayca oksitlenir. Diğer yandan, daha düşük sıcaklıklar ve düşük NO_x oluşumu ile kurum üretimi artmaktadır. Bununla birlikte, genellikle sıcaklıkları ve NO_x seviyelerini oldukça yüksek tutmak ve sonra bunları düşürmeye çalışmak yaygındır. Çünkü bu bölgeler motor verimliliğinin en yüksek olduğu ve dolayısıyla yakıt tüketiminin en düşük olduğu yerdir. En iyi NO_x indirgeme sistemleri arayışının bu kadar önemli olmasının nedeni de budur (Antoniotti 2017).

Partikül emisyonlarının problemi öncelikli olarak dizel motorlarla ilişkilidir. Çok nokta enjeksiyon sistemleri ile benzinli motorların partikül emisyon seviyeleri göz ardı edilebilir. Direk enjeksiyonlu modern dizel motorların partikülleri genellikle nispeten küçüktür ve bu nedenle egzoz gazında görünmezler (Braun vd. 2019).

Özellikle çok küçük partiküller, dolaşım ve solunumla ilgili kalp ve ciğerlerde ciddi sorunlara neden olabilirler (Braun vd. 2019). En son verilere göre, ince partikül madde veya $\text{PM}_{2,5}$, kalp hastalığı, solunum yolu enfeksiyonları, kronik akciğer hastalığı, kanserler, erken doğumlar ve diğer hastalıklar gibi kardiyopulmoner hastalıklardan dünya çapında yaklaşık 4 milyon ölümden sorumlu olduğu bilinmektedir (Thangavel vd. 2022).

2.4.5 Kükürt dioksit (SO_2)

Egzoz gazlarındaki kükürtlü bileşikler, başta kükürt dioksit olmak üzere yakıtların içeriğinde bulunan sülfatlar tarafından üretilir. Bu kirletici emisyonların nispeten küçük bir kısmı motorlu taşıtlardan kaynaklanmaktadır. Bu emisyonlar resmi emisyon limitleri ile sınırlandırılmamaktadır.

Kükürt dioksiti dönüştürmek için bir katalitik konverter kullanmak mümkün değildir. Kükürt, katalitik konvertörler içerisinde birikintiler oluşturur, aktif kimyasal tabaka ile reaksiyona girer ve katalitik konverterin egzoz gazlarından diğer kirleticileri çıkarabilme işlevini engeller. Direkt enjeksiyonlu benzinli motorlarla emisyon kontrolü için kullanılan NO_x depolama katalitik konvertörlerinde kükürt etkileşimi tersine çevrilebilirse de, bu işlem önemli miktarda enerji gerektirir ve dolayısıyla doğrudan enjeksiyonla elde edilen yakıt ekonomisi avantajını ortadan kaldırır.

1999 yılı sonuna kadar geçerli olmak üzere yakıt içindeki kükürt konsantrasyonları 500 ppm sınırlarında iken şu anda AB mevzuatı ile denetimi sıkılaştırılmıştır. Yeni sınırlar, 2000'den itibaren geçerli olmak üzere, benzin için 150 ppm, dizel yakıtlar için 350 ppm'dir. 2005 yılı için her iki yakıt türü için de 50 ppm'den daha düşük bir azalma istenmiştir. Uygulamada kükürtsüz yakıt daha erken sunulmuş olup 10 ppm'in altında kükürt içeriğine sahip benzin ve dizel yakıtı 2003 yılında Almanya'da (2005 yılına kadar AB genelinde) satışa sunulmuştur (Bosch 2006).

SO₂ solunum sistemi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir ve yüksek seviyelerde kısa süreliğine maruz kalındığında ölüme neden olabilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (2021) hava kalitesi kurallarına göre, insan sağlığı açısından 24 saatte maruz kalınan SO₂ konsantrasyonu ortalama 40 µg/m'den fazla olmamalıdır. Ayrıca, yüksek SO₂ seviyeleri bitkilerde aşırı su kaybına neden olduğu için bitki verimliliğinin kalitesini ve miktarını düşürmektedir (Kuttippurath vd. 2022).

2.5 Dizel Motorlarda Yanma Sonrası Emisyon Kontrol Sistemleri

İçten yanmalı motorlarda kirletici emisyonları azaltmak için önlemler alınmaktadır. Bu önlemler genel olarak yanma öncesi, yanma sırası (motor içi) ve yanma sonrası önlemler olarak uygulanabilmektedir. Yanma öncesi alınan önlemler genelde yakıt içeriği ve katkıları ile gerçekleşmektedir. Yanma sırası önlemlere örnek olarak NO_x oluşumunu azaltmak için kullanılan, EGR (Egzoz Gazı Devridaim) yöntemidir. EGR, yanma sırasında yüksek sıcaklığı azaltarak Zeldovich mekanizmasının kapsamında NO_x miktarını düşürür. Burada yanmış veya kısmen yanmış egzoz gazları oksijen konsantrasyonu düşürerek alev

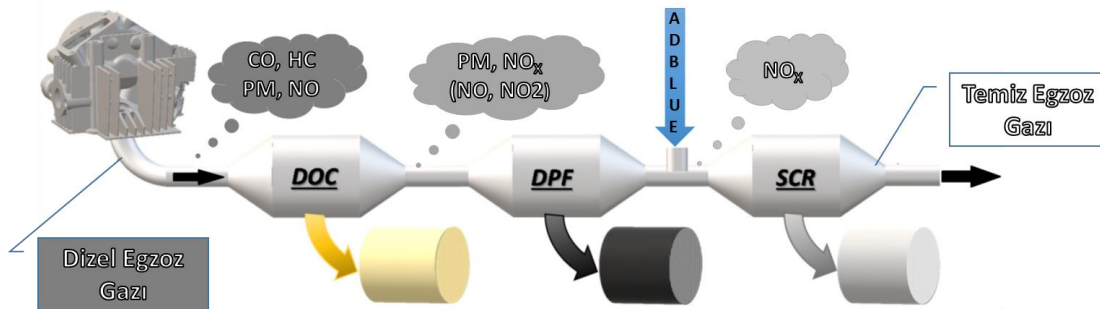
sıcaklığı düşürür. Ancak EGR ortamdaki mevcut oksijen miktarını azalttığı için partikül oluşumunu artırdığından dolayı olumsuz bir etkisi de vardır.

Euro 6 ve sonraki emisyon standartlarına uymak için, yanma sırası (motor içi) önlemlere ek olarak yanma sonrası (egzoz arıtma) işlemler gereklidir. Bu yöntemler doğrudan motorun çalışmasına bağlı olmayıp egzoz sistemine entegre edilmiştir. Düşük hava fazlalığı ile çalışan benzinli motorlarda, üç yollu katalizör HC, CO ve NO_x miktarını "tek adımda" azaltabilirler, ancak yüksek hava fazlalığı ile çalışan günümüz dizel motorlar için kurulum farklı katalitik konvertörlerle gerçekleşir (Braun 2019).

Euro 4, Euro 5 ve Euro 6 standartları NO_x salınımlarını benzinli motorlar için sırasıyla 0,08, 0,06 ve 0,06 g/km ile sınırlandırırken dizel motorlar için sınırlama sırasıyla 0,25, 0,18 ve 0,08 g/km'dir (Fayyazbakhsh vd. 2022).

Otomotiv üreticileri, dizel motor emisyon standartlarını sağlamak için yanma sonrası egzoz sistemi üzerinde çeşitli katalizörler kullanmaktadırlar. HC ve CO emisyonlarını azaltmak için DOC (Dizel Oksidasyon Katalizörü) kullanılmaktadır. DOC sonrasında, egzoz gazındaki partikül miktarını azaltmak için DPF (Dizel Partikül Filtresi) kullanılır. Euro 4 ve Euro 5 standartlarında, PM için partikül filtreleri verimli bir teknoloji olarak kullanılmaktadır. Ancak Euro 6 ve sonrasında NO_x emisyon standartlarını sağlamak için SCR sistemi kullanılır (Gall 2015).

Dizel motorlarda Euro 6 ve sonrası standarda uygun egzoz arıtma işlemi şematik gösterimi Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Lisi vd. 2020).



Şekil 2.6 Euro 6 ve sonrası egzoz arıtma işlemi şematik gösterimi (Lisi vd. 2020).

2.5.1 Dizel Oksidasyon Katalizörü (DOC)

Dizel oksidasyon katalizörü (DOC), dizel motorlardaki temel egzoz arıtma bileşenlerinden biri olan önemli bir standart ekipman haline gelmiştir. Temel işlevi hidrokarbonların (HC), karbon monoksitin (CO) ve azot oksit'in (NO) aşağıdaki reaksiyonlar (Denklem 2.7-2.9) yoluyla oksidasyonlarını sağlamaktır.

CO oksidasyonu:



HC oksidasyonu:



NO oksidasyonu:



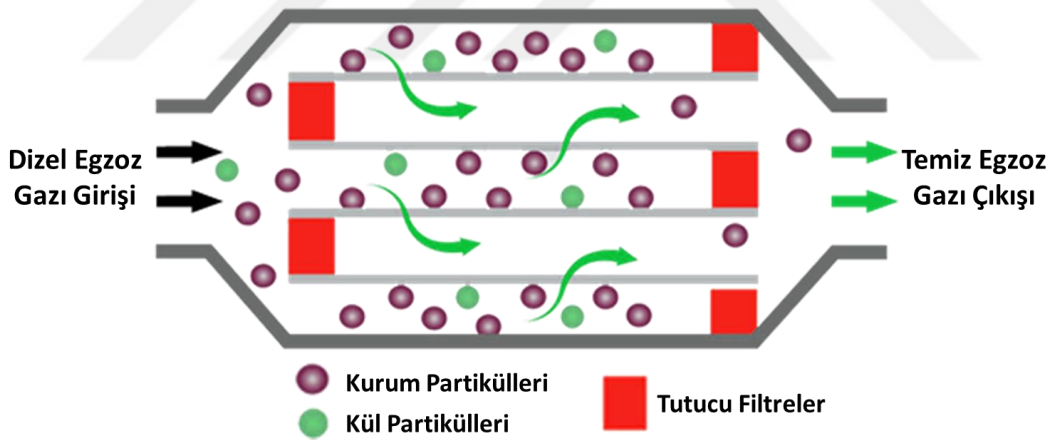
Dizel oksidasyon katalizörü CO emisyonunu denklem (2.7)'deki oksidasyon reaksiyonu ile CO₂'ye, denklem (2.8) ile HC emisyonunu H₂O'ya dönüştürür. Ayrıca denklem (2.9)'daki reaksiyon ile NO'yu NO₂'ye çevirir. Daha sonra NO₂, DPF'de kurumu (is) okside eder (Fayyazbakhsh vd. 2022).

Partikül filtrelerinin SCR ile kullanımı, dizel oksidasyon katalizörünün rolünü daha çeşitli ve vazgeçilmez hale getirmiştir. Bu katalizör dizel motorun çalıştığı hava fazlalığı nedeniyle NO_x emisyonunu gerektiği gibi azaltamaz. Dizel oksidasyon katalizörünün azot oksit (NO) emisyonunu azot dioksite (NO₂) oksitleme özelliğinden dolayı SCR sisteminde azot oksitlerin (NO_x) azot (N₂) gazına verimli bir şekilde dönüşmesi önemli hale gelmiştir. Aslında NO₂ istenmeyen bir kirlenici, NO oksidasyonu istenmeyen bir yan reaksiyondur. Bununla birlikte, SCR katalizörlerinde NO/NO₂ oranının bir olduğunda daha verimli çalıştıkları bulunmuştur. Dolayısıyla, DOC'un doğru miktarda NO₂ üretilmesinde

çok önemli bir rol oynadığı açıkça ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda yüksek NO₂ içeriği, partikül tutucudan sürekli kurum çıkarılması için de faydalıdır. Ayrıca DOC enjeksiyon sonrası yakıtı ve kurumu oksitleyerek sıcaklığın artması ile bileşenlerin ön ısıtmasına yardımcı olarak DPF'yi aktif olarak rejenerasyon yapmasını da sağlar (Antoniotti 2017, Kannepalli 2017).

2.5.2 Dizel Partikül Filtresi (DPF)

Dizel partikül filtresi, dizel motorlardaki partikül maddelerini kontrol etmek için kullanılan en popüler ekipmandır. Gözenekli çeperlere sahip partikül filtreleri, katalitik konvertörlere benzer uzun kanallardan oluşan bir petekten oluşur. Ancak partikül filtrelerinde, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, sisteme giren akışın tamamının gözenekli bir duvardan geçmesi için peteğin sadece alternatif kanalları açıktır (İnt. Kyn. 1). Duvardaki gözenekler, araya giren kurumu yakalar. Çalışma sırasında kurumlar gözenekli çeperlerde birikir ve çeperi tıkararak akış direncini ve basınç düşürür.



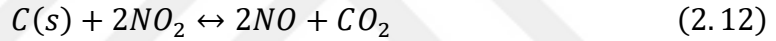
Şekil 2.7 Dizel partikül filtresi kesit görünümü (İnt. Kyn. 1).

Filtrede toplanan partikül madde gözenekleri tıkar ve motorların verimliliği ile sonuçlanan önemli basınç düşüşüne neden olabilir. Bu durumdan kaçınmak için filtrenin gözeneklerinde sıkışan kurum, aktif rejenerasyon ve pasif rejenerasyon olmak üzere iki yolla temizlenebilmektedir. İlk olarak aktif rejenerasyon sırasında, tutulan kurum aşağıdaki reaksiyonlara göre oksijen ile oksitlenebilir (Denklem (2.10) ve Denklem (2.11)).



Kurumun oksijen ile oksidasyonu 600 °C'nin üzerinde sıcaklıklar gerektirir. Bu sıcaklıklara tüm şartlarda düzenli olarak ulaşılmaz. Bu nedenle çoğu araçta bir basınç düşüşü sensörü aracılığıyla kurum yükünü zaman içinde izleyen ve rejenerasyon olayını tetikleyen gelişmiş bir motor kontrol stratejisiyle donatılmıştır. Rejenerasyon olayı yaklaşık 10-15 dakika sürer ve tipik bir binek otomobil uygulamasında yaklaşık her bin km'de bir gerçekleştirilir.

Filtrelerde sıkışan kurumu yakmanın diğer bir yolu da, denklem 2.12'de gösterilen reaksiyona göre kurumu oksitlemek için yükseltgen madde NO₂ kullanarak yapılan pasif rejenerasyondur.

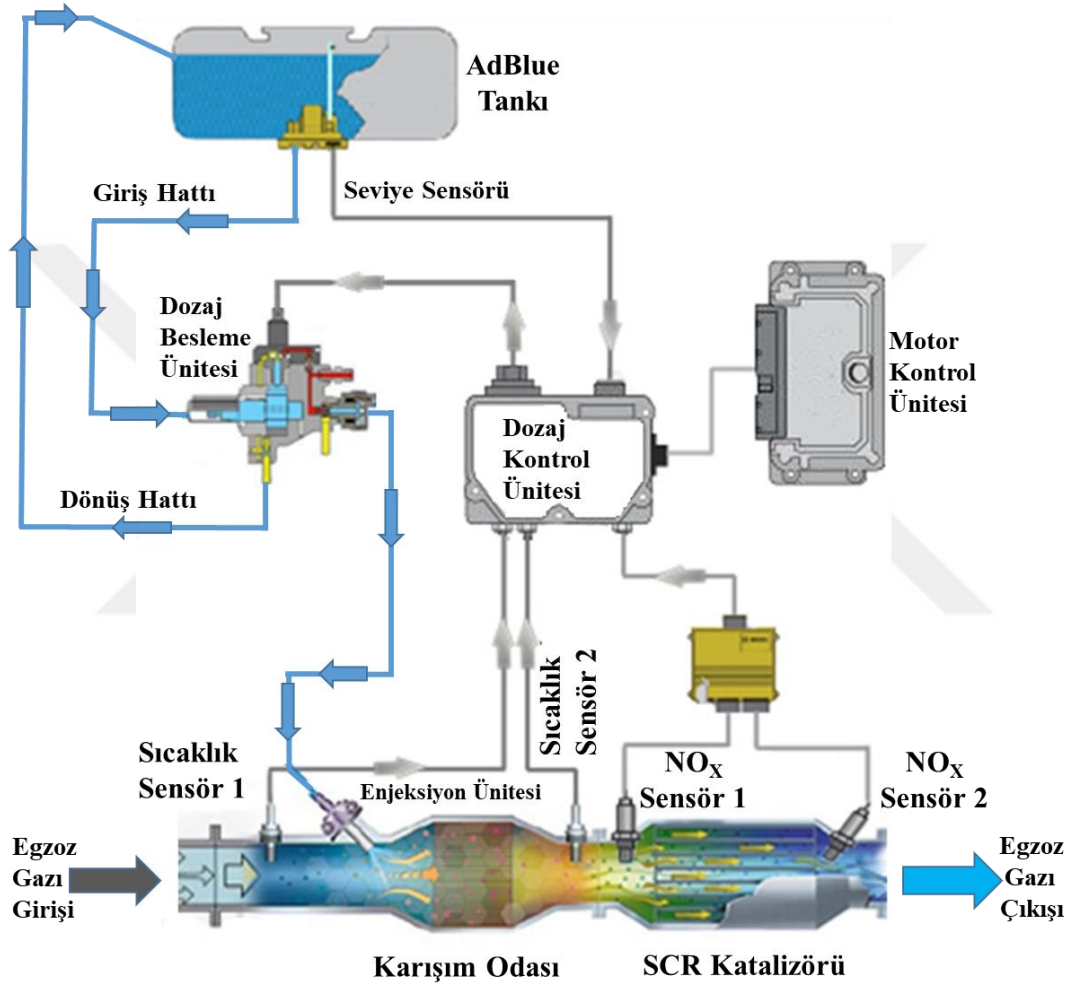


Kurumun NO₂ tarafından oksidasyonu sürekli olarak gerçekleşir ve ayrı bir rejenerasyon olayı gerektirmez. Bu nedenle bu rejenerasyon şekline sürekli veya pasif rejenerasyon denir. Bu reaksiyonlar 250-300 °C gibi düşük sıcaklıklarda aktiftir. Ancak çoğu araçta egzoz sıcaklığı ve/veya NO konsantrasyonu, tüm sürüş koşullarında pasif rejenerasyonu gerçekleştirmek için yeterli değildir. Bu nedenle, çoğu araçta pasif rejenerasyonun ara sıra aktif rejenerasyon ile desteklenmesi gerekmektedir (Kannepalli 2017).

2.5.3 Seçici Katalitik İndirgeme (SCR)

Seçici katalitik indirgeme, günümüz dizel motorlarında NO_x emisyonlarını azaltmak için kullanılan yanma sonrası egzoz emisyon kontrol sistemlerinden en etkili ve yaygın teknolojilerdendir (Braun vd. 2019). SCR sisteminin amacı, azot oksitleri kimyasal reaksiyonlarla zararsız veya daha az zararlı hale dönüştürmektir (Elfeky 2018).

Yanma sonrası düşük sıcaklıklarda azot oksitleri azaltmak için kullanılan SCR teknolojileri ilk olarak 1980'lerde endüstriyel enerji santrallerinde kullanılmaya başlanmıştır. SCR teknolojisi ilk kez otomotiv endüstrisinde, Mercedes G-Serisi Bluetech aracında tanıtılmıştır (Stelzer 2014). Otomotiv uygulamalarında kullanılan SCR sistemi ve elemanları Şekil 2.8'de gösterilmiştir (Vignesh ve Ashok 2020).



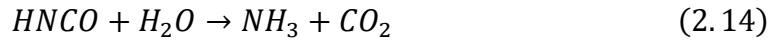
Şekil 2.8 SCR sistemi ve elemanları (Vignesh ve Ashok 2020).

SCR işleminde otomotiv uygulamalarında kullanılan ticari adı DEF (Dizel Egzoz Sıvısı) olarak adlandırılan sulu üre çözeltisi enjektör ile SCR katalizörünün önüne egzoz gazı üzerine püskürtülür. Yüksek sıcaklığın etkisiyle su buharlaşır ve üre parçacıkları 133°C'de erir ve iki aşamalı bir reaksiyon ile ayrışmaya başlar. Birinci aşama da termoliz, ikinci aşamada hidroliz reaksiyonları gerçekleşir. Ürenin ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) amonyağa (NH_3)

ve izosiyanik aside (HNCO) dönüşümünün gerçekleştiği termoliz reaksiyonu denklem (2.13)'te verilmiştir (Holmström 2014).

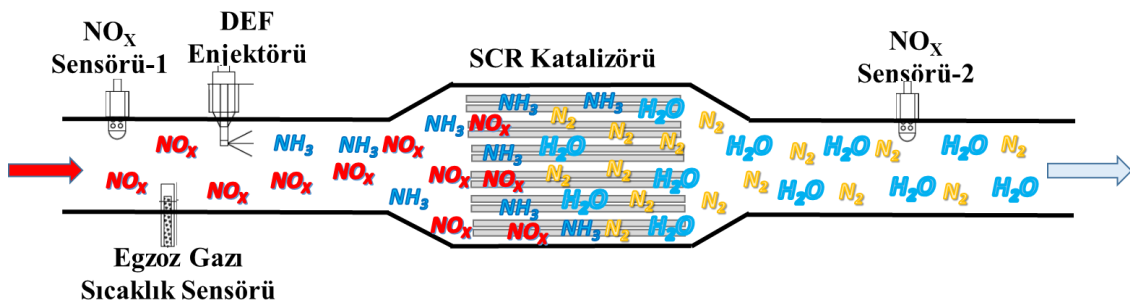


Termoliz reaksiyonundan sonra meydana gelen izosiyanik asit (HNCO), denklem (2.14) reaksiyonu ile amonyak (NH₃) ve karbon dioksit (CO₂) olarak hidrolize uğrar.



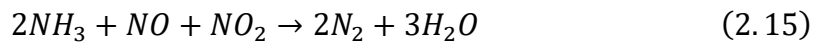
Termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucunda ayrıışan bir mol üreden iki mol amonyak üretildiği görülmektedir. Termoliz endotermik ve hidroliz ekzotermik bir reaksiyondur. Ancak bir üre molekülünden iki amonyak molekülüne toplam reaksiyon endotermiktir (Holmström 2014).

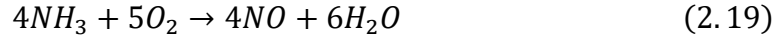
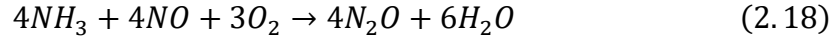
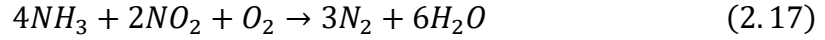
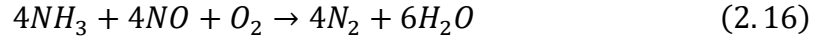
Termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonrası elde edilen amonyak (NH₃) bileşikleri katalizör içerisinde azot oksit (NO_x) emisyonları ile reaksiyona girerler. NO_x emisyonları zararsız olan azot (N₂), su (H₂O) ve daha az zararlı olan N₂O'ya indirgenirler. Şekil 2.9' da SCR sisteminde gerçekleşen kimyasal olaylar şematik olarak gösterilmektedir (Erçek ve Baydır 2023).



Şekil 2.9 SCR sistemi gerçekleşen kimyasal olaylar (Erçek ve Baydır 2023).

NO_x emisyonlarının indirgenmesinde gerçekleşen SCR reaksiyonları aşağıdaki denklem (2.15-2.18) aralığında gösterilmiştir (Antoniotti 2017).





Reaksiyonlarda NO_2 'nin NO_x 'e oranı büyük önem taşır ve reaksiyon hızını oldukça etkiler. Düşük sıcaklık aralıklarında gerçekleşen en hızlı reaksiyon denklem (2.15)'dir. Bu reaksiyonda NO_2/NO_x oranı %50 olmaktadır. Bu durum düşük sıcaklıklarda en iyi performans için NO_2 ve NO mol miktarlarının eşit miktarda olduğu anlamına gelmektedir. NO/NO_2 oranı 1/1 olduğunda SCR sistemi maksimum performans göstermektedir (Reşitoğlu ve Keskin 2017). Bu şartlarda reaksiyon hızının yüksek olmasından dolayı daha iyi bir NO_x emisyonu dönüşümü sağlanmaktadır. Denklem (2.16) temel olarak dizel egzozunda yüksek NO içeriğinin olmasından dolayı gerçekleşen standart (normal) SCR reaksiyonudur. Bu reaksiyonda NO_2/NO_x oranı %0 'dır. Bu reaksiyon, denklem (2.15)'den daha yavaştır ve bu yüzden otomotiv uygulamalarında bu kimyasal reaksiyonlarda daha az amonyak tüketilir. Eğer NO_2/NO_x oranında yüksek miktarda NO_2 içeriyorsa denklem (2.17) gerçekleşebilir ve bu yavaş SCR reaksiyonu olarak kabul edilir. Bu durumda NO_2/NO_x oranı %100 olur ve gerekli amonyak miktarı diğer reaksiyonlara göre %30 daha fazla olduğu için dizel egzoz sıvısı tüketiminin artmasına neden olur. Sıcaklık yükselse, denklem (2.18) ve denklem (2.19) gibi istenmeyen reaksiyonlar meydana gelebilir. Denklem (2.18), küresel ısınma üzerinde ciddi etkisi olan azot dioksit (N_2O) üretir. Denklem (2.19) ise amonyağın (NH_3) azot oksite (NO) oksitlenebileceğini ve bu nedenle NO konsantrasyonunu artıracığından dolayı istenmeyen reaksiyonlardandır (Holmström 2014, Braun vd. 2019).

Başlık 2.5 Dizel Motorlarda Yanma Sonrası Emisyon Kontrol Sistemleri anlatılırken Şekil 2.6 Euro 6 ve sonrası egzoz arıtma işlemi şematik gösterimi (Lisi vd. 2020). görüleceği gibi, SCR genellikle DOC ve DPF'den sonra konumlandırılır. Bu stratejik bir seçimdir, çünkü DOC'da NO 'nun NO_2 'ye oksidasyonu, SCR girişinde mevcut olan

NO_2/NO_x oranını ayarlamak için kullanılabilir. Ayrıca birçok PM'nin dizel egzoz sıvısı buharlaşma alanına ve SCR'ye girmesini engellenerek olası sorunlar önlenabilir (Antoniotti 2017).

SCR performansı değerlendirilmesinde iki önemli tasarım değişkeni dikkate alınır. Bunlar NO_x 'u düşürmek ve katalizörde “ NH_3 slip” olarak adlandırılan amonyak birikimini engellemektir. Ürenin eksik ayrışması tortu türü yan ürünleri meydana getirebilir (Braun vd. 2019). Bu tortular, SCR katalizörünün uzun vadeli katalitik performansına zarar verebilir. Aynı zamanda NH_3 birikimi, büyük miktarlarda amonyağın atmosfere yayılımına sebep olur. Yönetmelik gereği NH_3 slip (kayması) maksimum 10 ppm'i geçmemelidir. Amonyak zehirli olduğu kadar tehlikelidir. Ayrıca son derece uçucudur ve amonyum sülfat ve amonyum nitrat tuzları gibi zararlı maddeler oluştururlar (Stelzer 2014).

Azot oksitleri (NO_x) düşürmek, amonyağın egzoz gazı ile ne kadar etkili karıştığına bağlıdır. SCR tasarımında yüksek miktarlarda NO_x düşüşü veya dönüşümü hedeflenir. Katalizör girişinde amonyağın egzoz gazı ile homojen karışımı katalizör ömrünü uzattığı gibi NO_x dönüşümü için gerekli olan katalizör boyutlarını azaltır (Stelzer 2014).

SCR sistemlerinde egzoz gazının hava akış yönünü değiştirerek farklı yönlerde türbülanslı akışı sağlamak için egzoz borusunda statik bir karıştırıcı yerleştirilmiştir. Bu yöntem, ürenin radyal yönde hızla hareket etmesini ve karışmasını sağlamaktadır. Böylece egzozun enine kesitinde homojen bir dağılım elde edilmektedir. Mikser egzoz gazı ile amonyak gazını tam olarak karıştırabilmesine rağmen belli bir basınç kaybına da neden olacaktır (Zhu vd. 2022).

SCR sistemlerindeki karıştırıcıların performansları egzoz borusu çapına, enjektör tipine ve montaj açısına, kütleli akış hızına ve yönüne, sıcaklığına ve karıştırma uzunluğuna bağlıdır (Kurzydym vd. 2022).

Kurzydym ve arkadaşları SCR karıştırıcısı önünde enjektör borusunun iki çeşidini (S tipi ve düz boru tasarımı) kullanarak deneysel çalışma yaptılar. Bu çalışmada S-tipi boru

tasarımında ürenin egzoz gazlarının akışı yönünde eş merkezli olarak enjekte edilmesini sağladılar. Sonuç olarak S tipi borunun, düz boru tasarımına kıyasla ürenin daha iyi ayrıştığını, üre birikimi tortularının azaldığını ve ayrıca optimum NO_x azalma verimliliğini elde etmişlerdir (Kurzydym vd. 2022).

Emisyon dönüşümünde SCR performansını etkileyen parametreler (Sorrels vd. 2019);

- Reaksiyon sıcaklık aralığı
- Emisyonların optimum sıcaklık aralığında kalma süresi
- Enjekte edilen reaktif ile yanma gazları arasındaki karışım derecesi
- Enjekte edilen reaktifin kontrolsüz NO_x 'e molar oranı
- Kontrolsüz NO_x konsantrasyon seviyesi
- Amonyak birikimi
- Katalizörün etkinliği veya devre dışı kalması
- Katalizör seçiciliği
- Katalizör boyunca basınç düşüşü
- Katalizör alanı
- Katalizör yönetimidir.

Prabhu ve ark. (2021), karıştırma bölgesi uzunluğunun ve üre enjeksiyon noktası konumunun önemine dikkat çekmişlerdir. Bu parametreler uygun şekilde tanımlanırsa, katalizör girişinde daha fazla NH_3 elde edilebileceği belirtilmiştir. Sayısal analiz yoluyla, püskürtme açısını artırmanın, sulu çözeltideki artan buharlaşma hızı ve artan amonyak konsantrasyonundan dolayı avantaj sağladığı bulunmuştur. Cho vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen sayısal ve deneysel analiz, Üre-SCR sisteminde amonyak dağılımının homojenliği ve NO_x dönüşüm verimliliğini araştırmak için çoklu karıştırıcıların ve ayrıştırıcıların uygulanmasının amonyak dağılımını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve oluşan türbülanslı girdabın sulu üre çözeltisinin daha iyi ayrışmasını desteklediğini göstermiştir (Zhu vd. 2022).

SCR tasarımlarında karıştırma oranının iyileştirilmesi için yapılabilecek işlemler şunlardır (Sorrels vd. 2019);

- Egzoz gazı ve amonyağın yeterince karışımını sağlamak için amonyak enjeksiyonu ve katalizör arasında yeterli kanal uzunluğu,
- Enjekte edilen sıvının akış yönüne statik karıştırıcı montajı,
- Enjekte edilen sıvının basıncını artırma,
- Enjektörlerin ve/veya enjeksiyon bölgelerinin sayısını artırma ve reaktif dağılımını, püskürtme açısını ve yönünü iyileştirmek için enjeksiyon meme tasarımını değiştirmektir.

2.5.3.1 SCR Katalizör Tipleri ve Uygulamaları

SCR katalizörleri aktif bileşenlere göre, üç kategoriye ayrılabilir: asil metal katalizörler (platin (Pt), paladyum (Pd), Argentum (Ag), vb.), geçiş metal oksit katalizörler (Manganez (Mn) , Ferrum (Fe), Nikel (Ni), Vanadyum (V), Bakır (Cu), Krom (Cr), Kobalt (Co), Seryum (Ce), vb.) ve geçiş metali iyon değişimi zeolit katalizörlerdir. Asil metal katalizörler, düşük sıcaklıklarda mükemmel katalitik aktiviteye sahip olmalarına rağmen, yüksek fiyatları, kaynak kıtlığı, dar çalışma aralıkları ve kükürt zehirlenmesine karşı zayıf dirençleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmazlar. Geçiş metal oksit katalizör aktivitesi, asil metallerinkinden daha kötüdür, ancak düşük maliyet ve yüksek termal kararlılık avantajlarına sahiptirler (Zhang Z vd. 2022).

SCR katalizörlerinde çalışma sıcaklığına bağlı olarak üç tip malzeme kullanılır. Bunlar platin, vanadyum ve zeolittir. Platin katalizörler çok düşük sıcaklıklarda (175-250 °C), vanadyum katalizörler orta sıcaklıklarda (300-450 °C) ve zeolit katalizörler ise yüksek sıcaklıklarda (350-650 °C) çalışmak üzere tasarlanmışlardır. Platin bazlı katalizörlerin çalışma sıcaklık aralığı çok dar olduğundan dolayı, uygulama alanları sınırlıdır. Bu yüzden genellikle vanadyum ve zeolit bazlı katalizörler kullanılır (Gall 2015).

Vanadyum bazlı V_2O_5 gibi katalizörler 260 °C ile 450 °C arasında en verimli çalışan malzemedir. Fakat V_2O_5 katalizörü için çalışma sıcaklık aralığı geniş iken, NO_x dönüşümü sınırlıdır. Modifiye edilmiş bir V_2O_5/TiO_2 katalizörü, N_2 'ye karşı geliştirilmiş seçicilik ve daha iyi dayanıklılık göstermiştir. Diğer katalitik malzemelerle karşılaştırıldığında, V_2O_5 bazlı katalizörlere sahip SCR sistemlerinde N_2O oluşumu daha

düşüktür. Bununla birlikte, $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ katalizörünün bazı dezavantajları vardır. Bunlar; 550 °C'nin üzerinde etkinliği ve seçiciliğinin hızlı azalması, vanadyum türlerinin çevreye karşı yüksek zehir etkisi, SO_2 'nin SO_3 'e oksidasyonunun yüksek olması, 300-400 °C' lik dar çalışma sıcaklığının olması ve bu yüzden düşük sıcaklık uygulamaları için uygun olmamasıdır. Bu tip katalizörler, enerji santralleri ve dizel motorlar için piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır (Gall 2015, Braun vd. 2019).

Vanadyum bazlı SCR katalizörünün çalışma kararlılığını daha da geliştirmek için düşük ve yüksek sıcaklıklı zeolit katalizör tipleri geliştirilmiştir. Düşük sıcaklıklı zeolit katalizörler 150-450 °C, yüksek sıcaklıklı zeolit katalizörler 350-600 °C arasındaki sıcaklıklarda optimum şartlarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Zeolit bazlı katalitik malzemelerin, özellikle düşük sıcaklık aralığında NH_3 -SCR için en iyi olduğu ispatlanmıştır (Gall 2015, Braun vd. 2019).

Mordenit zeolitinin ana bileşenleri, azot oksitlerin amonyak oksidasyonu olmadan 600 °C'ye kadar çalışabilen yüksek sıcaklık zeolit katalizörleri için kullanılan 10:1 oranında SiO_2 ve Al_2O_3 'tür. Bu yapı mordenit zeolite, platin ve vanadyum SCR'ye göre pahalı ve değerli metaller içermediğinden dolayı önemli bir avantaj sağlar. Aynı zamanda 600 °C sıcaklıkta de-alüminasyon adı verilen işlemle kalıcı olarak durdurulabilir (Gall 2015).

Özellikle demir (Fe) ve bakır (Cu) zeolitlerin verimli olduğu görülmektedir. Cu zeolit, Fe zeolit ile karşılaştırıldığında, SCR reaksiyonundaki NO_2/NO_x oranının hassasiyeti bakımından Cu zeolit önemli bir avantaj sağlamaktadır. Cu zeolit, Fe zeolite kıyasla düşük sıcaklık aralığında daha yüksek aktivite gösterir. Ancak NO_2/NO_x 'in 0,5'lik ideal oranında, Fe zeolitinin düşük sıcaklık verimliliği Cu zeolitten daha iyi performans gösterir. Fe zeolitlerinin aksine, Cu zeolitleri ayrıca NH_3 -inhibisyon etkisi göstermezler (Braun 2019). Bununla birlikte, kükürte (S) maruz kaldıktan sonra Cu bazlı zeolit SCR, düşük sıcaklıklarda deaktivasyon göstermiştir (Gall 2015).

Son zamanlarda NO_x emisyonlarını düşürmek için düşük sıcaklıklı NH_3 -SCR katalizörleri olarak manganez (Mn) bazlı katalizörler geniş uygulama alanları bulmaktadır. Şu anda, manganez oksit (MnO_x) katalizörleri, düşük sıcaklıklarda

mükemmel SCR performansları nedeniyle de büyük ilgi görmektedirler. MnO_x , katalitik çevrimi tamamlamak için gerekli olan çeşitli kararsız oksijen ve manganez oksidasyon durumlarını içerdiğinden, düşük sıcaklıklı bir SCR katalizörü olarak özellikle dikkat çekmektedir (Zhang Z vd. 2022).

Yüksek sıcaklık aralığında çalışan SCR teknolojilerinde yüksek sıcaklıklar ve yüksek doz nedeniyle SCR katalizörlerinin aşınmasına ve tıkanmasına neden olmaktadır. Düşük sıcaklık aralığında çalışan SCR katalizörlerinin, düşük sıcaklıklarda yüksek dönüşüm verimliliği sağlanmasıyla yüksek sıcaklıklı SCR teknolojilerindeki meydana gelen aşınma ve tıkanma durumunu azaltabilmektedir. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda SCR katalizörlerinin daha yüksek aktivitesi, emisyon düzenlemelerini karşılamak ve yakıt ekonomisini iyileştirmek için çok önemlidir (Zhang Z vd. 2022).

Hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), iyi kükürt direnci nedeniyle azot oksitlerin NH_3 seçici katalitik indirgemesi ($\text{NH}_3\text{-SCR}$) için beklentisi yüksek bir katalizörler olarak görülmektedir. Ancak saf $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 'ün aktivitesi çok düşüktür. Y. Zhang ve arkadaşları (2022), hematit'i ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), yüzey sülfatlama yöntemi ile mükemmel bir N_2 seçiciliği ve orta-yüksek sıcaklık aralıklarında optimum aktivasyon elde etmişlerdir. $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'de sülfatlanmış Fe_2O_3 numunesi, $275\text{-}350\text{ }^\circ\text{C}$ aralığında yaklaşık %100'lük bir NO dönüşüm oranı gösterdi ve $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'de mükemmel H_2O ve SO_2 direnci yeteneği sergilediği bulgular elde etmişlerdir (Zhang Y vd. 2022).

SCR katalizöründe yapılan çalışmada, WO_3 (Tungsten Trioksit) yapısına Sb (Antimon) eklenerek $\text{V/WSb}_x\text{Ti}$ katalizörlerinin fizikokimyasal özelliklerini ve SCR reaksiyon performansı incelenmiştir. $\text{V/WSb}_x\text{Ti}$ katalizörleri, WO_3 'ün yanı sıra V/WTi katalizörünün bir destek olarak ağırlıkça %1-5 Sb eklenerek hazırlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda en üstün SCR performansının, ağırlıkça %2 Sb ilavesinde elde etmişlerdir. (Shin vd. 2022)

2.5.4 Amonyak (NH₃) Slip

SCR ve SNCR sistemlerinde tepkimeye girmemiş amonyağın havaya bırakılan emisyonuna amonyak slip (NH₃ slip) denir. NH₃ slip olarak tanımlanan amonyak kaçağı amonyağın SCR katalizörünün içinden tepkimeye girmeden çıkmasıdır. Bunun nedenleri genellikle üreyi fazla enjekte etmek, reaksiyon sıcaklığına ulaşamaması ve katalizörün pasif hale gelmesinden kaynaklanmaktadır (Anar ve Bayram 2018).

Amonyak emisyonları, bitkiler ve hayvanlar için zararlı olan zehirli bir gazdır. Ortam havasına yayılan amonyak, sülfürik asit ve nitrik asit ile birleşerek amonyum sülfat ve amonyum nitrat tuzları oluşturabilir. SCR sistemi normalde maksimum 5-10 ppm seviyelerinde amonyak yayılımı olacak şekilde tasarlanmıştır. NH₃-slip'i en düşük seviyeye getirmek için, egzoz gazında NH₃/NO_x homojen oranını elde etmek önemlidir. NH₃ slip'i önlemek için, SCR katalizöründen sonra CUC (Clean Up Catalyst) olarak adlandırılan oksidasyon katalizörü yerleştirilmektedir. Katalizör tipik olarak platin ve alüminyum oksitten oluşur (Latha vd. 2019).

2.5.5 SCR Egzoz Sisteminde Üre Bazlı Tortu Oluşumu

SCR sistemlerinde üre ayrışması sırasında oluşan üre kristallerinden meydana gelen tortular önemli bir problemdir. Oluşan kristaller NO_x dönüşüm verimliliğini azaltır ve NH₃ emisyonunu artırır. Aynı zamanda egzoz akışının tıkanmasına ve basınç düşüşünün artmasına da yol açmaktadır (Kurzydym vd. 2022).

SCR sistemlerinde enjektörden püskürtülen DEF sıvısı içeriğindeki ürenin egzoz cidarına tutunması istenmeyen bir durumdur. Enjekte edilen ürenin yüzeyde oluşturduğu duvar filmi, katı yan ürünlerin oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Egzoz borusu cidarlarında üre filmi oluşumu, duvar sıcaklığı Leidenfrost sıcaklığının altında olduğunda püskürtme - duvar etkileşiminin bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Tortu oluşumları dozajlama ünitesinde çalışmasına engel olabilmektedir. Sonuç olarak, SCR sistemi mümkün olan maksimum NO_x dönüşümüne gerçekleştiremez ve oluşan üre türevi yan ürünlerin ayrışması bir amonyak kaymasına neden olabilmektedir (Brack vd. 2016).

Malbec ve ark. (2019) katı ürenin ısıtılmış bir yüzeye bırakıldıktan sonraki davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sıcaklık artırılarak yüzeydeki tortunun gelişimi, ürenin dinamiği ve termal davranışları gözlemlenmiştir. Üre termoliz hızı duvar sıcaklığı 600 K ile 650 K arasında iken maksimum kritik değere ulaşmıştır. Ardından çok küçük bir termoliz oranına sahip bir tortunun oluşumunu gözlemlemişlerdir. Duvar sıcaklığı 650 K üzerinde iken duvarda tortu oluşmamış ve erimiş üre damlacığı, Leidenfrost rejimindeki bir hidrokarbon damlacığına çok benzer şekilde duvarda yükselmiş ve geri dönmüştür. Bu nedenle üre için Leidenfrost benzeri bir sıcaklık olarak duvar sıcaklığı 650 K (377 °C) olarak kabul edilmiştir. Bu sıcaklık, püskürtme duvarı etkileşim modeli haritasında üre için Leidenfrost rejimini tanımlamak için kullanılmıştır (Malbec vd. 2019).

SCR sisteminde soğuk ve sıcak çalışma koşullarda su buharlaşma ve üre termoliz ve hidroliz işlemlerinin zamanlaması farklı olmaktadır. Duvar sıcaklığının DEF Leidenfrost sıcaklığından daha düşük olduğu soğuk koşullarda, birikintiler esas olarak karıştırıcı üzerinde ve boru dirseklerinin yakınında oluşmaktadır. Bu durumda önce su buharlaşır ve enjekte edilen ürenin %99'dan fazlası duvara yapışarak saf üreden oluşan sıvı bir film oluşturur. Bu gibi durumlarda, karıştırıcının ana rolü, soğuk koşullar için termal hidroliz işlemlerini artırabilen sıvı film tarafından kaplanan duvar yüzey alanını önemli ölçüde artırmaktır. Duvar sıcaklığının DEF Leidenfrost sıcaklığından daha yüksek olduğu sıcak koşullarda, DEF enjektörü ile SCR katalizörü arasındaki kısa mesafe nedeniyle katalizör giriş kısmında tortular oluşmaktadır. Ayrıca, DEF püskürtme damlacıkları esas olarak karıştırıcı sıcak duvarlarına sıçradığından ve hızla katalizöre doğru yönlendiğinden dolayı karıştırıcı bu tür sıcak koşullarda görevini yerine getiremez. Sonuç olarak tortu oluşumu DEF enjeksiyonunun sıcak veya soğuk koşullarına göre farklılık göstermektedir. Üre polimerizasyonu nedeniyle duvarda katı yan ürünlerin (Siyanürik asit veya ammelid vb.) oluşumuna neden açabileceğinden egzoz sistemde problemlere neden olabilmektedir (Habchi vd. 2015).

2.5.6 SCR Sistemi ve Yakıt Tüketimi İlişkisi

SCR sisteminin yakıt ekonomisine doğrudan bir etkisi olmamakla birlikte dolaylı yünden yakıt ekonomisi sağlamaktadır. SCR sistemini kullanan taşıtlarda, SCR sistemini kullanmayan taşıtlara göre % 6'ya kadar yakıt tasarrufu mümkün olmaktadır. SCR sistemi yanma sonrası NO_x emisyonlarını azalttığı için silindir içi yanma sıcaklıklarının artmasına imkân verir. Yanma veriminin artması yakıtın tam yanmaması sonucu meydana gelen eksik yanma ürünleri olan CO emisyonlarının azalmasını ve bu durumda yakıtın tam yanmasını sağladığı için yakıt ekonomisinde verimlilik sağlamaktadır.

2.5.7 SCR Teknolojisi, Avantaj ve Dezavantajları

SCR teknolojisi NO_x emisyonlarını azaltma konusundan en etkili tekniklerden biridir. Ancak kendi içerisinde avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. SCR teknolojisi avantajları;

- NO_x emisyonlarını düşürmek (%95 kadar düşüş) için en etkin teknolojidir.
- Sistem nadir bakım gerektirir, araç ömrü boyunca kullanılabilir.
- Monte edildiği aracın bakım ve yağ değiştirme aralıklarını etkilemez.
- Ekstra yakıcı veya oksidasyon katalizörü gerektirmez.
- Dizel motorlarda dolaylı olarak yakıt ekonomisini iyileştirir.
- %100 Biyodizel kullanıldığında bile uyumludur (Stelzer 2014).
- Yüksek devirli motorlarda kullanılabilir.
- Sistemde kullanılan sıvı ve ekipmanlar yanıcı ve yakıcı özelliği yoktur (İnt. Kyn. 2).
- Egzoz sisteminde fazla basınç düşüşü oluşturmaz (Stelzer 2014).

SCR teknolojisi, dezavantajları;

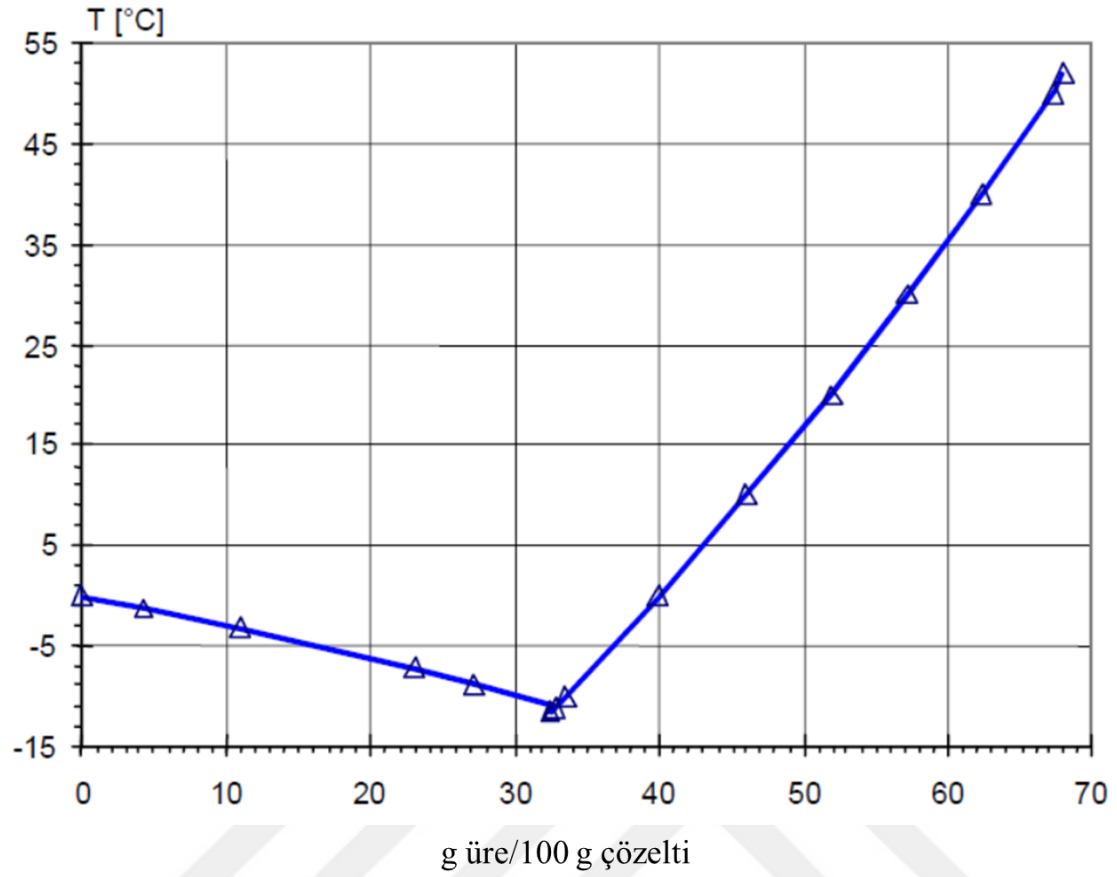
- SCR sistemi komponentleri (özellikle adblue deposu ve katalizör gibi) araç üzerinde alan gerektirmektedir.

- Sistemin kurulumu için AdBlue deposu, enjektör, ilave borular, SCR katalizörü gibi ekstra komponentlerin aracın ağırlığının ve maliyetinin artmasına neden olmaktadır (Anar ve Bayram 2018).
- DEF sıvısının - 11°C’de donması sebebiyle özellikle soğuk havalarda sistemin tam performanslı çalışabilmesi için sıvının önceden ısıtılması için ekstra sistem gerektirmektedir (Anar ve Bayram 2018).
- Sistemde NH₃ slip olarak adlandırılan amonyak emisyonu oluşmaktadır. Amonyak sülfürik asit ve nitrik asit ile birleşerek amonyum sülfat ve amonyum nitrat tuzları ’da meydana getirebilmektedir (Stelzer 2014).

2.6 Dizel Egzoz Sıvısı (DEF)

Dizel egzoz sıvısı, dizel motorlarda meydana gelen zararlı azot oksit (NO_x) emisyonlarını azaltmak için SCR (Seçici Katalitik İndirgeme) sisteminde kullanılan %32,5 üre ve %67,5 saflaştırılmış sudan oluşan su bazlı üre çözeltisidir (Indrajit 2011).

Sulu üre çözeltisi AUS32 için kullanılan ticari markadır. Ticari adı AdBlue® olarak adlandırılan çözelti Alman derneği Verband der Automobilindustrie (VDA) aittir (Antoniotti 2017). Piyasada AdBlue®, Üre Çözeltisi, DEF (Diesel Exhaust Fluid/Dizel Egzoz Sıvısı), AUS 32 (Aqueous Urea Solution 32%/ Sulu Üre Çözeltisi %32) isimleriyle anılmaktadır. Dizel egzoz sıvısı konsantrasyonunun %32,5 üre ve %67,5 su seçilmesinin nedeni kristalleşme noktasının minimum eksi on bir derece (-11 °C)’ de olmasıdır (Indrajit 2011). Dizel egzoz sıvısının farklı üre oranlarında donma noktaları Şekil 2.10’da görülmektedir (İnt. Kyn. 6).



Şekil 2.10 Üre çözeltilerinin donma noktaları (İnt. Kyn. 6).

Binek, hafif ticari ve ağır ticari dizel araçlarda Euro IV ve sonrası emisyon standartlarını karşılayabilmek ve katalizörlere zarar vermemesi açısından ISO 22241-1 ve DIN 70070 standartlarına uygun olarak üretilir (Indrajit 2011).

DEF temel olarak sentez ve çözünme yöntemleri ile üretilmektedir. Sentez yönteminde, en saf olan dizel egzoz sıvısı, doğrudan amonyak/üre üretim prosesinden elde edilir ve kirlilik riski yoktur. Çözünme yönteminde üre genellikle katılaşır, depolamak ve korumak için bazı maddeler eklenir ve tehlikeli kirlilikler bulaşabilir.

2.6.1 Dizel Egzoz Sıvısı Özellikleri

- Sentetik olarak üretilir ve zehirsizdir.
- Taşınabilir sıvıların minimum risk kategorisindedir. Uygun kullanılırsa canlılara ve çevreye karşı herhangi bir risk oluşturmaz.

- Yanıcı değildir. Ancak ısıya maruz kaldığında amonyak gazı açığa çıkarabilir.
- DEF32 -11,5 °C'de donmaya başlar. DEF donduktan sonra tekrar eritilip sorunsuzca kullanılabilir.
- 70-80 °C sıcaklıktan sonra DEF dağılır ve amonyak oluşur, bu da kötü kokuya sebep olur.

DEF32 fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Dizel egzoz sıvısı (DEF32) fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Parametre	Değer	Kaynak
Üre içeriği	%32,5	(İnt. Kyn. 3)
Yoğunluk	1090 kg/m ³ (1,09 g/cm ³) [20 °C’de]	(İnt. Kyn. 4)
Viskozite	1.4 mPa.s [20 °C’de]	(İnt. Kyn. 5)
pH	Min. 9,8 – Mak. 10	(İnt. Kyn. 4)
Suda Çözünürlük	100 g/l	(İnt. Kyn. 5)
Kaynama Noktası	100 °C	(İnt. Kyn. 4)
Donma Noktası	-11°C	(İnt. Kyn. 5)
Görünüş	Sıvı	(İnt. Kyn. 4)
Renk	Renksiz	(İnt. Kyn. 4)
Koku	Amonyağa benzer (hafif)	(İnt. Kyn. 4)
Bozunma Sıcaklığı	100°C	(İnt. Kyn. 4)
Buhar Basıncı	6,4 kPa (48 mm Hg) [40 °C’de]	(İnt. Kyn. 4)
Kırılma İndeksi	Min. 1,3814 - Mak. 1,3843 [20 °C’de]	(İnt. Kyn. 2)
Erime Noktası	Veri yok	(İnt. Kyn. 4)
Parlama Noktası	Veri yok	(İnt. Kyn. 4)

Dizel egzoz sıvısı (DEF) kullanımında alınması gereken önlemler ve dikkat edilecek hususlar;

- Deri ve gözlerle temas etmesinden kaçınılmalıdır. Cilde temas ettiğinde bol suyla yıkanmalıdır.
- Zemine dökülürse kayma tehlikesi oluşturur (İnt. Kyn. 2).
- 30 °C (hidroliz oluşumundan dolayı) altında -10 °C üzerinde saklanmalıdır. Genellikle donmanın dizel egzoz sıvısı kalitesi üzerinde hiçbir etkisi yoktur, 30

°C'den yüksek sıcaklıklarda depolanması ise ömrünü oldukça keskin bir şekilde azaltır.

- Paslanmaz veya poli propilen kaplarda ağzı kapalı bir şekilde muhafaza edilmelidir. Aktarma yapılacak kaplar hijyenik ve ilk kez kullanılıyor olmalıdır.
- Dizel egzoz sıvısı, metal iyonlarından (örn. Na, K, Mg, Ca, Al ve özellikle ağır metaller) uzak tutulmalıdır, çünkü bunların tuzları katalizörün gözeneklerini tıkayabilir veya katalizörü deaktive ederek etkisiz hale getirebilir (Indrajit 2011).
- DEF zamanla bozulur, bu sebeple üretim tarihinden itibaren bir yıl içinde tüketilmelidir (Antoniotti 2017).
- Hava ile teması önlenmelidir. Açık havada güneşte bırakılmamalıdır (İnt. Kyn. 2).
- Standartları karşılayan DEF kullanılmalıdır.
- DEF ekipmanlarını temizlemek gerektiğinde sadece demineralize su kullanılmalıdır.

2.6.2 Dizel Egzoz Sıvısı Tüketimi

Dizel egzoz sıvısı tüketimi yakıt tüketiminin %2 ile %8 arasında değişebilmektedir. Yani 100 litre dizel yakıtı tüketimi ile 2-8 litre arasında DEF tüketimi gerçekleşmektedir. DEF tüketimi, hafif, orta ve ağır hizmet araçlarına göre farklılık gösterir. Ancak SCR sistemi üreticileri DEF tüketimini genel olarak dizel yakıtının %2-4 arasında bir oran olmasını önermektedir. Bu değerler dizel motor üreticilerine göre değişkenlik gösterir. Ayrıca aracın boyutuna, motora bindirilen yüke ve rölanti süresine bağlı olarak değişecektir. Ağır yük altında çalışan iş makineleri ve ağır arazi ekipmanları ile çalışan traktör gibi motorlu taşıtlarda yüzde 10'a kadar DEF tüketimi gerçekleştiği görülmüştür.

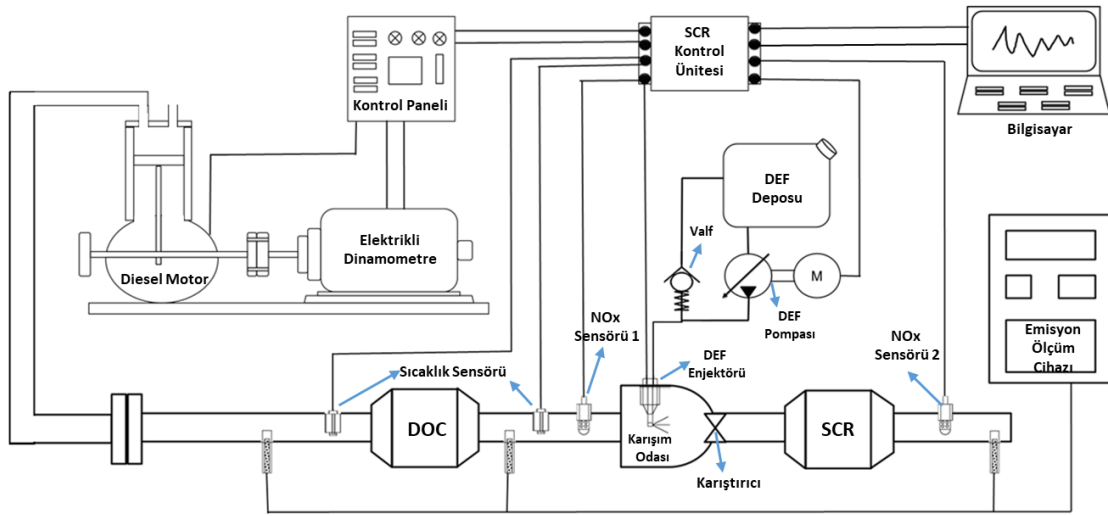
DEF uzun süre yüksek ısıya maruz kalırsa kullanım yüzdesi artar. Ayrıca SCR sistemli araçlarda biyodizel kullanıldığında, egzoz gazında NO_x emisyonları artış göstereceğinden dolayı dizel egzoz sıvısı kullanımını hafif artış göstermektedir.

3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği deney düzeneği, bu düzenekte kullanılan materyal ve cihazlara ait teknik özellikler detayları ile açıklanmıştır. Deney düzeneğindeki dizel motor ve bu motora uyarlanan SCR sisteminin mekanik, hidrolik ve elektronik sistem kurulumu da yine bu bölümde anlatılmıştır. Aynı zamanda SCR sisteminin yönetiminde kullanılan elektronik kontrol ünitesi ve yazılımı, dozaj kontrolü ve üre enjeksiyon sistemi karakteristik ve matematiksel hesaplamalara ait bilgilere yer verilmiştir.

3.1 Deney Düzeneği

Deney düzeneği Afyon Kocatepe Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Uygulama Atölyesindeki İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında kurulmuştur. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3.1’de verilmiştir (Erçek ve Baydır 2023).



Şekil 3.1 Deney düzeneğinin şematik görünümü.

3.1.1 Deney Motoru

SCR sistemi deneylerinde kullanılan deney motoru Resim 3.1’de gösterilen Antor 3LD 510 marka ve modelli doğal emişli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu, tek silindirli bir dizel motordur. Deney motoruna ait teknik özellikler Çizelge 2.1’de yer verilmektedir.



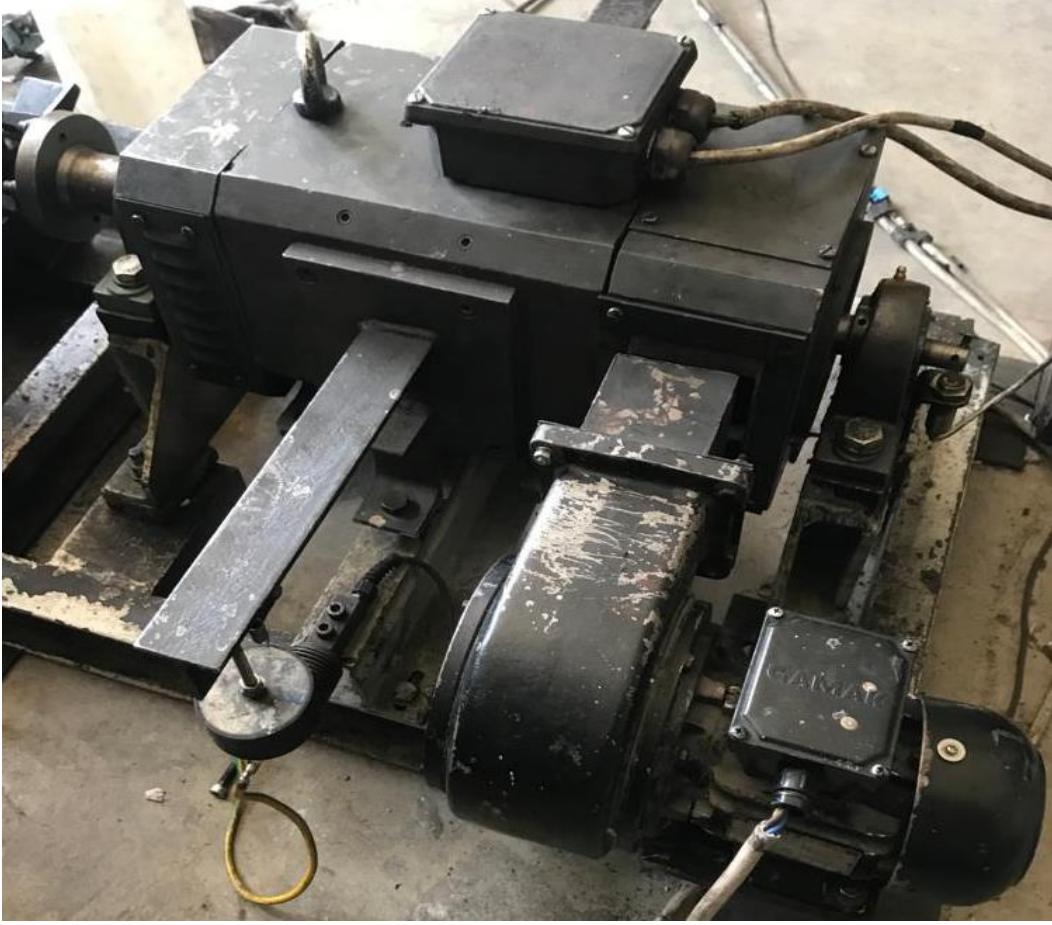
Resim 3.1 Deney motoru.

Çizelge 3.1 Deney motoru teknik özellikleri.

Parametre	Değer
Model	Antor 3LD 510
Motor tipi	4 zamanlı, direkt enjeksiyonlu, dizel motor
Silindir sayısı	1
Silindir hacmi (cm ³)	510
Sıkıştırma oranı	17,5:1
Çap (mm) x strok (mm)	85 x 90
Maksimum devir (rpm)	3000
Maksimum güç (kW)	6,6 @3000 rpm
Maksimum tork (Nm)	32,8 @1800 rpm
Soğutma tipi	Hava soğutmalı

3.1.2 Motor Dinamometresi

Deneyleerde motor frenlemeleri Resim 3.2’de görülen Kemsan marka, 3000 dev/dk. ’da 15 kW güç üreten doğru akım ile çalışan hava soğutmalı bir elektrikli dinamometresi ile gerçekleştirilmiştir. Dinamometrenin rotoru deney motoru miline, statoru ise rulmanlı yataklar vasıtası ile bir dengeleme düzeneğine bağlanmıştır.



Resim 3.2 Dinamometre.

3.1.3 Yük Okuyucu (Load Cell) ve Devir Okuyucu (Encoder)

Dinamometrede y k  l  mleri Resim 3.3’de görülen Esit marka, BB 50 kg C3 modeli y k hücresi (load-cell) ve load cell cihazı göstergesi ile gerçekleştirilmektedir. Yük hücresinin bir tarafı sabit diğer tarafı dinamometre kuvvet koluna bağlanmış ve 0’dan 50 kg’a kadar ölçüm yapabilmektedir. Load cell cihazı teknik özellikleri ise  izelge 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.3 Yük hücresi (loadcell) ve loadcell cihazı.

Çizelge 3.2 Loadcell cihazının teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Besleyebileceği yük hücresi sayısı	8 adet (350 ohm)
Analog giriş aralığı	10V DC
Hassasiyet	%0,003
A/D dönüştürücü	24 bit Sigma-Delta
Okuma frekansı	50 Hz
Giriş hassasiyeti	0,5 μ V/dijit
Çalışma sıcaklığı aralığı (OIM onaylı)	-10 °C / +40 °C
Besleme gerilimi ve güç	12-24 VDC, 5W
Dijital giriş / çıkış	2 çıkış (250V/2A röle)
Stabilite	3,6 ppm / °C
Uyarım voltajı	10V DC
Nominal çıkış	2 $\pm$ 0,1 % mV/V
Ağırlık	1 kg
Depolama sıcaklığı aralığı	-20 °C / +70 °C
Yük göstergesi	4,5 mm, 40 pix. yeşil renk, LCD, 2x16 digit

Devir ölçümü ise dinamometre rotoru üzerinde yer alan Resim 3.4’de görülen Lika marka encoder ile yapılmaktadır. Motor devrini dev/dk. cinsinden ölçerek kontrol paneline göndermektedir.



Resim 3.4 Encoder.

3.1.4 Dinamo ve Motor Kontrol Paneli

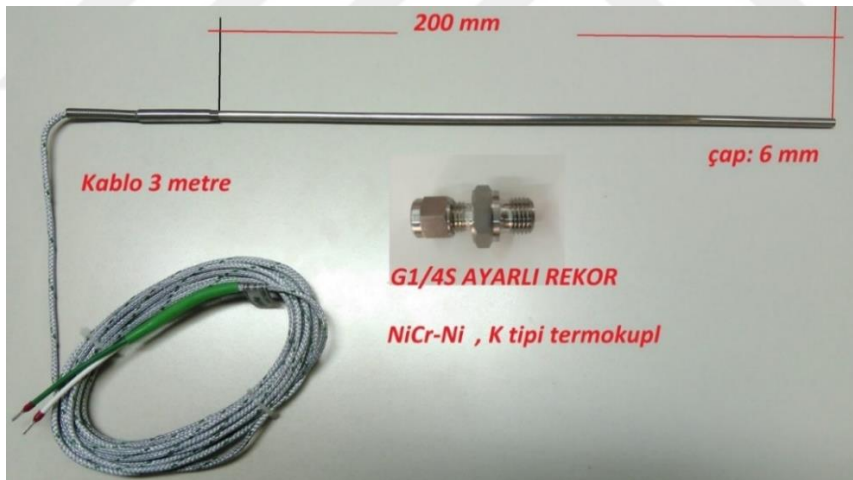
Dinamo ve motor kontrol paneli sistemin yönetilmesi ve veri takibi için düğme, kontak anahtarı, reostalı düğme ve dijital göstergelerden oluşmaktadır. Pano ekranı Resim 3.5’te gösterilmektedir. Resimde görülen 3 numaralı kontak anahtarı; motor yönüne çevrildiğinde, dinamo motora ilk hareketini verdirmek için motor ile aynı yönde dönerken, dinamo yönüne çevrildiğinde ise motoru yüke bindirmek için motor ile zıt yönde döndürmek için kullanılır. 2 numaralı start-stop düğmeleri, motor ve dinamo çalıştırma ve durdurma pozisyonları arası geçiş durumlarında kullanılır. 1 numaralı reostalı düğme motor çalışma ve yüke bindirme anlarında dinamo devrini ayarlamak için kullanılmaktadır. 4 numaralı devir göstergesinde encoderden gelen devir verileri dijital olarak okunmaktadır. 5 ve 6 numaralı dijital ekranlarda ise sırasıyla sistem gerilim ve akım verileri gösterilmektedir.



Resim 3.5 Dinamo ve motor kontrol paneli.

3.1.5 Sıcaklık Sensörü

Egzoz gazı sıcaklıkları 1200 °C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilen elimko marka NiCr-Ni, K tipi termokupl ile yapılmıştır. Resim 3.6’da K tipi termokupl ve G1/4S ayarlı rekoru görülmektedir. Sıcaklık probun uç kısmından algılamaktadır. Egzoz sıcaklık ölçümleri egzoz manifold çıkışı, DOC öncesi ve sonrası, SCR katalizörü sonrası prob kanallarından egzoz borusuna paralel veya ayarlı rekor ile egzoz borusuna 90° açı ile bağlantısı yapılabilmektedir.



Resim 3.6 K tipi termokupl ve ayarlı rekoru.

3.1.6 NO_x Sensörü

SCR sisteminde NO_x emisyonları dönüşümü için püskürtülecek dizel egzoz sıvısı miktarının hesaplanmasında egzoz gazındaki NO_x emisyonlarının kütesel akış miktarı en önemli parametrelerden birisidir. Egzoz gazındaki NO_x miktarı motorun o anki çalışma koşullarına bağlı olarak değişmektedir. SCR sisteminde katalizör öncesi ve sonrası olmak

iki adet NO_x sensörü kullanılmaktadır. Katalizör öncesi NO_x sensörü egzoz gazındaki NO_x miktarını tespit ederek, püskürtülecek dizel egzoz sıvısı miktarının belirlenmesini sağlar. Katalizör sonrası NO_x sensörü ise NO_x emisyonlarının dönüşümünü, püskürtülen dizel egzoz sıvısı miktarının tekrar düzenlenmesini ve sistemin çalışma verimini kontrol eder.

NO_x sensör sinyal verileri mikroamper (μ A) seviyesindedir. Sinyal verileri uzun kablo hatlarıyla ECU'ye gönderilmek istendiğinde sinyal değerleri bozulacağından dolayı sensör yakınında bulunan NO_x sensörü kontrol ünitesine aktarılır. Sinyaller kontrol ünitesinde değerlendirildikten sonra SCR ve motor ECU'sune iletilirler. SCR deney sisteminde Resim 3.7'de görülen Continental marka UniNO_x Sensörü kullanılmıştır. Çizelge 3.3'de sensöre ait teknik özellikleri verilmiştir.

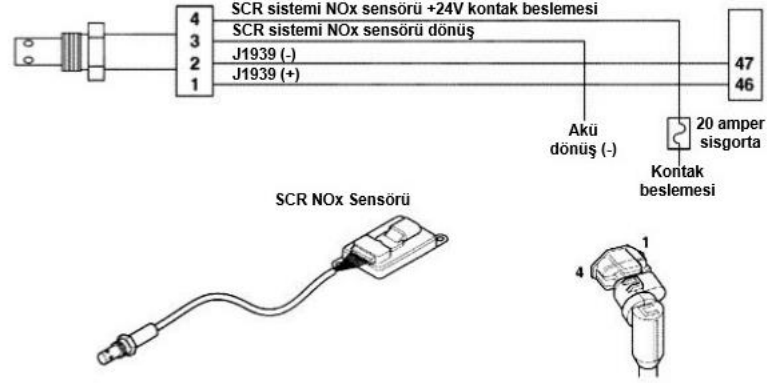


Resim 3.7 NO_x sensörü.

Çizelge 3.3 Continental UniNO_x sensör teknik özellikleri.

Parametre	Değer
Çalışma gazı sıcaklığı	100 - 800 °C
Besleme gerilimi	12 V/ 24 V
Ölçüm aralığı	0-2000 ppm (NO _x)
NO _x hassasiyeti	@ 100-1500 ppm $\pm$ %10; @ 0 ppm $\pm$ 10 ppm
Veri bağlantısı	CAN 2.0 veya SAE-J-1939

NO_x sensörü kontrol ünitesi ile NI USB-8473s CAN cihazı arasındaki kablo pin bağlantıları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



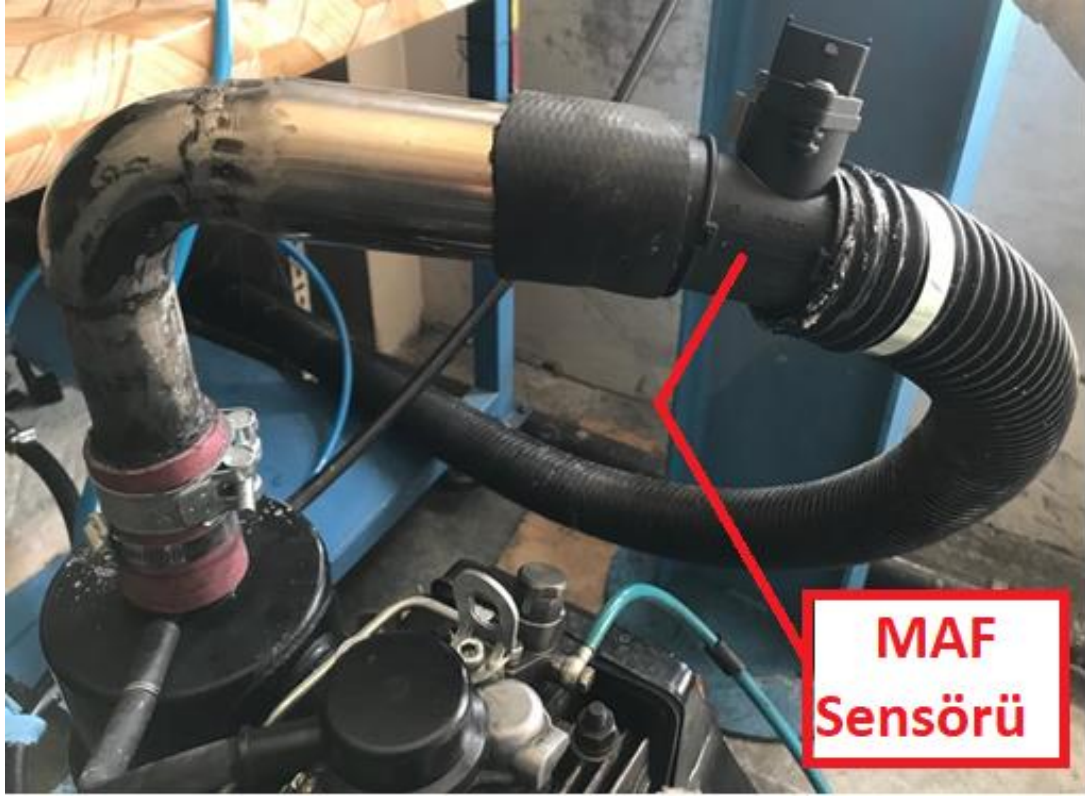
Şekil 3.2 NO_x sensör kontrol ünitesi pin bağlantıları.

3.1.7 MAF Sensörü

MAF (Mass Air Flow) sensörü motora emilen hava miktarını kütsel olarak ölçen sensördür. Hava akış metresi olarak da bilinir. Motora alınan hava miktarı (*g/h*), sıcaklığa bağlı olarak düzeltme yapabilen debimetre (MAF sensörü) ile ölçülecektir. Deney sisteminde kullanılan Bosch marka HFM 5 tip sıcak film hava kütseli ölçer sensörü Resim 3.8 'de gösterilmekte olup motor emme sistemi üzerindeki bağlantısı ise Resim 3.9'da gösterilmiştir.



Resim 3.8 MAF sensörü.



Resim 3.9 MAF sensörünün motor bağlantısı.

MAF sensörü teknik özellikleri de Çizelge 3.4 'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 MAF sensörü teknik özellikleri.

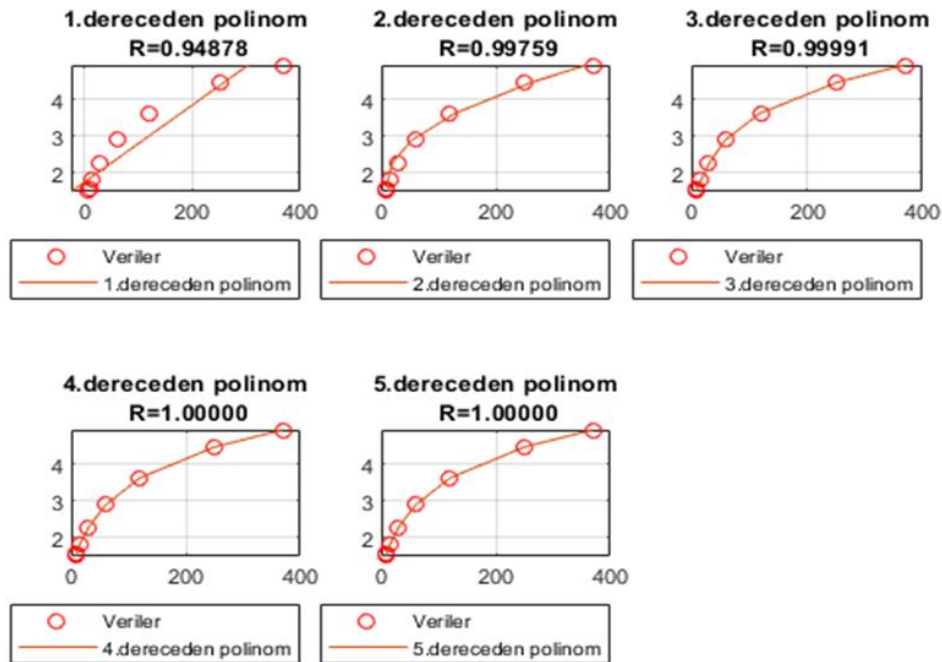
Parametre	Değer
Nominal besleme gerilimi	14 V
Besleme gerilimi aralığı	8...17 V
Çıkış gerilimi	0...5 V
Giriş akımı	< 0,1 A
İzin verilen titreşim ivmesi	$\leq 150 \text{ ms}^{-2}$
Sıcaklık aralığı	-40+120 °C

Egzoz debisini hesaplamak için kullanılan Bosch marka sensörün çıkış voltajı-hava debisi fabrika verileri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 MAF sensörü çıkış voltajı hava debisi fabrika verileri.

Hava Debisi (Q_{hava}) [kg/h]	Çıkış Voltajı ($V_{\text{çıkış}}$) [V]
8	1,4837
10	1,5819
15	1,7898
30	2,2739
60	2,8868
120	3,6255
250	4,4727
370	4,9406
480	-
640	-
850	-

Çizelge 3.5 'te sensör kataloğundaki veriler noktasal değerlerdir. Veriler arasında kalan diğer sayısal değerleri belirlemek için MATLAB programında eğri uydurma (curve fitting) yöntemi uygulanmıştır. MAF sensörü debi-voltaj polinom eğrileri Şekil 3.3 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3 MAF sensörü debi-voltaj polinom eğrileri.

Sensör kataloğunda 8 adet veri olduğu için 7. dereceden bir polinoma uydurulmuştur. Şekil 3.3’de x eksen çıkış voltajı verilerini, y eksen ise debi verilerini göstermektedir. MATLAB sonuç ekranından motora alınan emme havası debisine ($\dot{m}_a$) ait bağıntı denklem (3.1)’de verilmiştir.

$$\dot{m}_a = a_7x^7 + a_6x^6 + a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x^1 + a_0 \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)’deki ifadelerin değerleri aşağıda verilmiştir.

x : Voltaj değeri (Sensörden gelen gerilim)

a : Polinom katsayılarıdır.

$$a_0 = 442,04583831676$$

$$a_4 = 351,0526662681$$

$$a_1 = -1271,01079203706$$

$$a_5 = -75,05903714$$

$$a_2 = 1505,41328015788$$

$$a_6 = 8,640140866$$

$$a_3 = -952,000466476538$$

$$a_7 = -0,411975863$$

3.1.8 Dizel Egzoz Sıvısı Pompası

SCR deney sisteminde basıncı yaklaşık 30 bara kadar çıkabilen 220 Volt gerilimle çalışan kimyasal sıvıların basınçlandırılmasında kullanılan yüksek güçlü elektrikli tip DEF pompası Resim 3.10’da gösterilmiştir.



Resim 3.10 Dizel egzoz sıvısı pompası.

Pompa emme basma tip olup pompa seviyesinden yukarısına konumlandırılan dizel egzoz

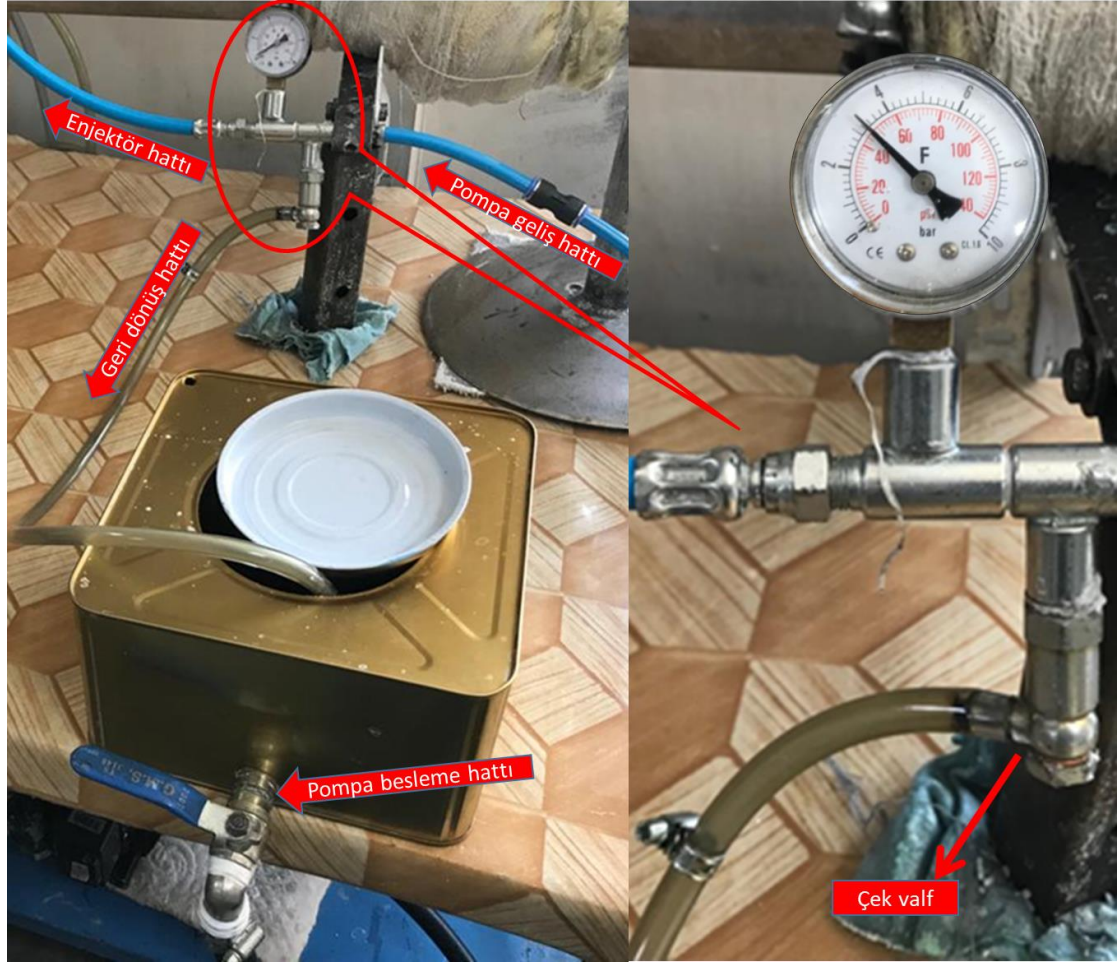
sıvısı deposundan gelen sıvıyı basınçlandırıp enjektöre göndermektedir. Çizelge 3.6’da pompa teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.6 Dizel egzoz sıvısı pompası teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Motor	Elektrikli
Gerilim	220 Volt
Çalışma devri	1400 rpm
Güç	1,5 kW (2 BG)
Motor tipi	İndüksiyon motoru
Pompa tipi	Üç pistonlu
Basınç	30 bar
Su debisi	6 litre/dakika

Dizel egzoz sıvısı pompasının kontrolü hem LabVIEW tabanlı yazılım aracılığıyla hem de manuel olarak yapılabilmektedir. Sisteme DEF püskürtmek istendiğinde, enjektör komutundan 4-5 saniye önce pompaya SCR elektronik kontrol ünitesi tarafından sinyal gönderilerek pompa çalışmaktadır. Manuel komutlarda ise ekranda pompayı çalıştırınız uyarısı gelmektedir.

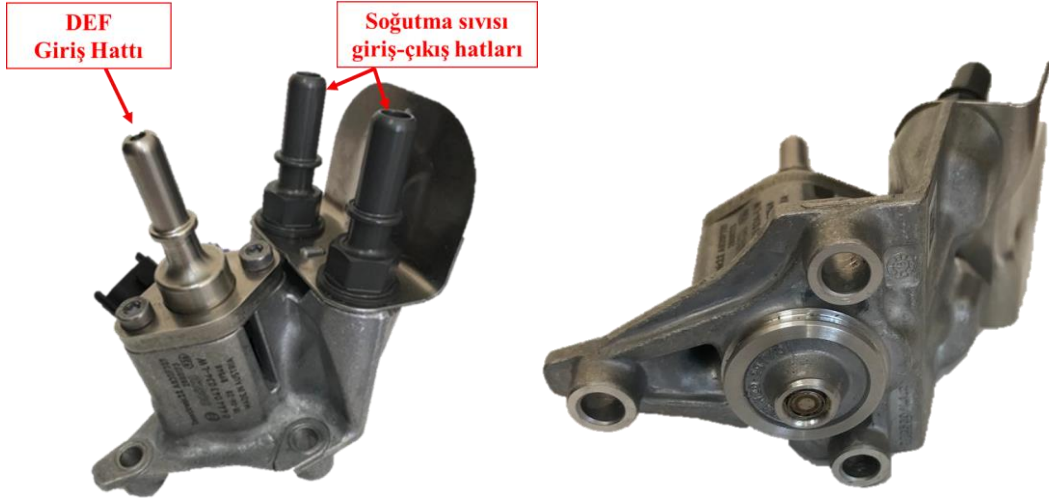
Pompa çalıştır komutundan sonra sabit basınçta devamlı dizel egzoz sıvısı basma işlemini gerçekleştirmektedir. Sıvı basıncı kontrolü için sisteme sıvı basınç saati bağlanmıştır. DEF basıncını sınırlayan-düzenleyen bir çek valf konulmuştur. Çek valf üzerindeki ayarlı vidadan püskürtülecek DEF basıncı ayarlanabilmektedir. Çek valf sıvı basıncını sabit tutmakta ve fazla gelen dizel egzoz sıvısını geri dönüş borusu ile depoya göndermektedir. Sisteme bağlanan sıvı basınç saati ve çek valf Resim 3.11’de gösterilmektedir.



Resim 3.11 Sıvı basınç saati ve çek valf düzeneği.

3.1.9 Dizel Egzoz Sıvısı Enjektörü

SCR sisteminde dizel egzoz sıvısının egzoz gazı içerisine püskürtülmesinde kullanılan Bosch marka 2. Nesil (deNO_x 2.2) dizel egzoz sıvısı enjektörü Resim 3.12’de gösterilmiştir. Enjektör elektronik olarak anlık kumanda edilebilen, çok hızlı açılıp kapanabilme özelliği olan kademeli olarak püskürtme yapılabilen selenoid (elektro valf) tiptir.



Resim 3.12 Dizel egzoz sıvısı enjektörü.

Dizel egzoz sıvısı enjektörü LabVIEW programı ile kontrol edilmektedir. Pompa tarafından basınçlandırılan dizel egzoz sıvısı enjektörün kumanda odasında hazır halde bulunmakta ve sinyal gönderildiği an püskürtme gerçekleşmektedir. 12 volt gerilimle çalışan 9 bar'a kadar basınçla üç delikten püskürtme yapabilen enjektöre ait teknik özellikler Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Dizel egzoz sıvısı enjektörü teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Hizmet ömrü	35 000 saate kadar
Maksimum ortam sıcaklığı	180 °C
Çalışma basıncı	9 bar
Dizel egzoz sıvısı giriş sıcaklığı (mak.)	90 °C

3.1.10 Hassas Terazı

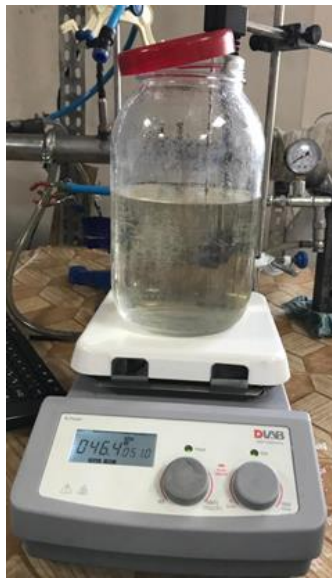
Deneyisel çalışmalarda DEF enjektörü püskürtme karakteristiklerinin çıkartılması, DEF üretiminde üre ve saf su miktarlarının ayarlanması, DEF tüketimi ve yakıt ölçüm hesaplamalarında Resim 3.13'te gösterilen 500 gr tartım kapasiteli 0,01 gr hassasiyetli SF-400C LCD dijital hassas terazi kullanılmıştır. Terazide daha hassas ölçümler için plastik fanusu ve harici otomatik kalibrasyon özelliği bulunmaktadır. Aynı zamanda numune vererek sayım yapabilme özelliği ve ekranda gördüğünüz değeri sabitleyebilme özelliği de bulunmaktadır.



Resim 3.13 Hassas terazi.

3.1.11 Isıticılı Manyetik Karıştırıcı

Farklı sıcaklıklarda DEF sıvısı ile deneyler yapılırken ve farklı oranlarda DEF (DEF20, DEF50 gibi) hazırlanırken numunelerin homojen biçimde karıştırılması ve ısıtılması için Resim 3.14’de gösterilen DLAB MS7-H550-Pro marka Isıticılı Manyetik Karıştırıcı kullanılmıştır. Cihaz da iki adet ayar düğmesi olup devir ve ısı ayar kontrolleri ile hem ısıtma hem karıştırma görevini birlikte veya tek tek yapılabilmektedir. Sıcaklık kontrol hassasiyeti ± 1 °C ve hız kontrolü 0-1500 rpm aralığındadır. Manyetik tablası üzerine beher veya metal kap konularak harici sıcaklık sensörü ile sıvı sıcaklık kontrolü yapılabilmektedir.



Resim 3.14 Isıticılı manyetik karıştırıcı.

3.1.12 Egzoz Emisyon Cihazı

Deneysel çalışmalarda egzoz gazı emisyon ölçümleri Resim 3.15'te gösterilen Bosch BEA060 marka egzoz emisyon ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Egzoz emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri Çizelge 3.8'de gösterilmektedir.



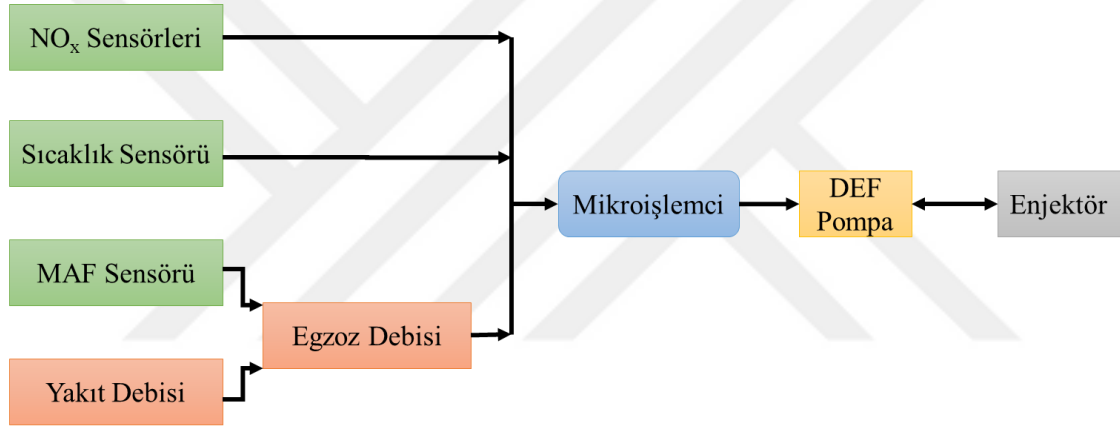
Resim 3.15 Egzoz emisyon ölçüm cihazı

Çizelge 3.8 Egzoz emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri

Bileşenler	Ölçüm aralığı	Çözünürlük
NO (ppm)	0 - 5000	1
CO (% hacimsel)	0 - 10	0,001
CO ₂ (% hacimsel)	0 - 18	0,01
HC (ppm)	0 - 9999	1
O ₂ (% hacimsel)	0 - 22	0,01
Lamda	0,5 – 9,999	0,001

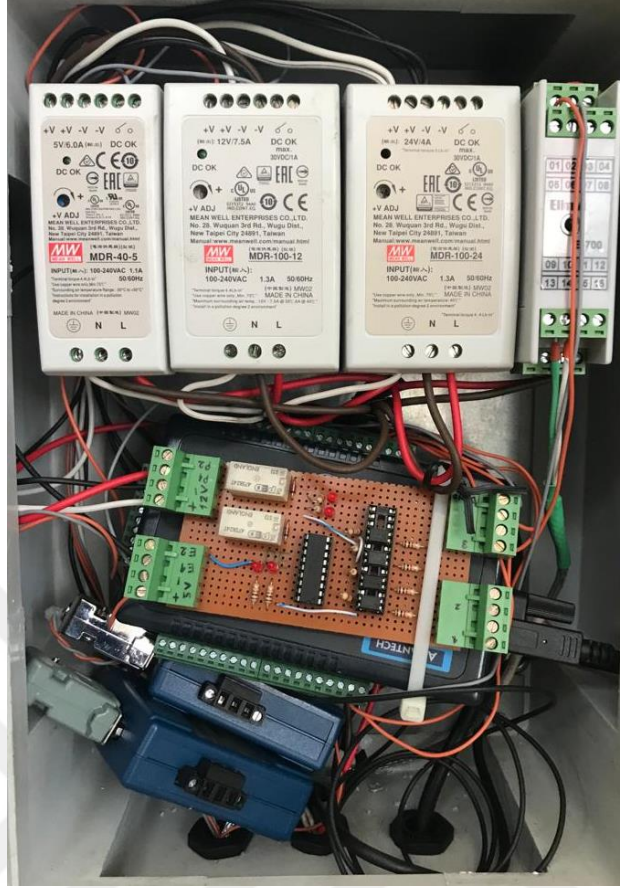
3.2 SCR Elektronik Kontrol Ünitesi (SCR ECU)

SCR sisteminde yapılacak deney şartlarına göre sensörlerden gelen verilerin değerlendirilmesi, püskürtülecek dizel egzoz sıvı miktarının belirlenerek DEF pompa ve enjektör kontrolleri için SCR elektronik kontrol ünitesi tasarlanmıştır. Sıcaklık sensörü, MAF sensörü ve NO_x sensörlerinden gelen sinyaller mikroişlemciler aracılığıyla LabVIEW program ara yüzüne aktarılması ve bu verilerin manuel olarak girilen diğer parametreler ile ilişkilendirilip pompa ve enjektör yönetimi SCR ECU'su tarafından gerçekleştirilmektedir. SCR elektronik kontrol ünitesine ait blok devre şeması Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 SCR elektronik kontrol ünitesi blok devre şeması.

Deneylerin yapılma amacına göre gerekirse sisteme dahil edilebilen MAF sensörü verileri ve manuel olarak girilen yakıt debisi verileri dikkate alınarak püskürtülecek dizel egzoz sıvısı miktarı ve enjektörün açık kalma süreleri kontrol edilebilmektedir. LabVIEW ekranında işlenmiş veriler sistem ara yüzünde dijital olarak ve grafikler ile takip edilebilirken aynı zamanda Excel formatında kayda alınmaktadır. Sistemdeki hesaplama verileri, dizel egzoz sıvısı pompası ve enjektör kontrolleri LabVIEW ara yüzünden hem manuel hem de otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Resim 3.16'da SCR elektronik kontrol ünitesi ve komponentleri görülmektedir.



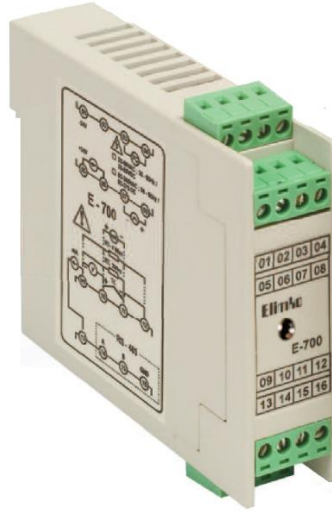
Resim 3.16 SCR elektronik kontrol ünitesi ve komponentleri.

SCR elektronik kontrol ünitesinde komponentlere enerji sağlamak için 5, 12 ve 24 volt olmak üzere 3 adet güç kaynağına yer verilmiştir. DEF enjektörü için 5 volt, sıcaklık sensörü için 12 volt ve NO_x sensörleri için 24 voltluk güç kaynakları kullanılmıştır. Resim 3.17’de güç kaynaklarına ait görsele yer verilmiştir.



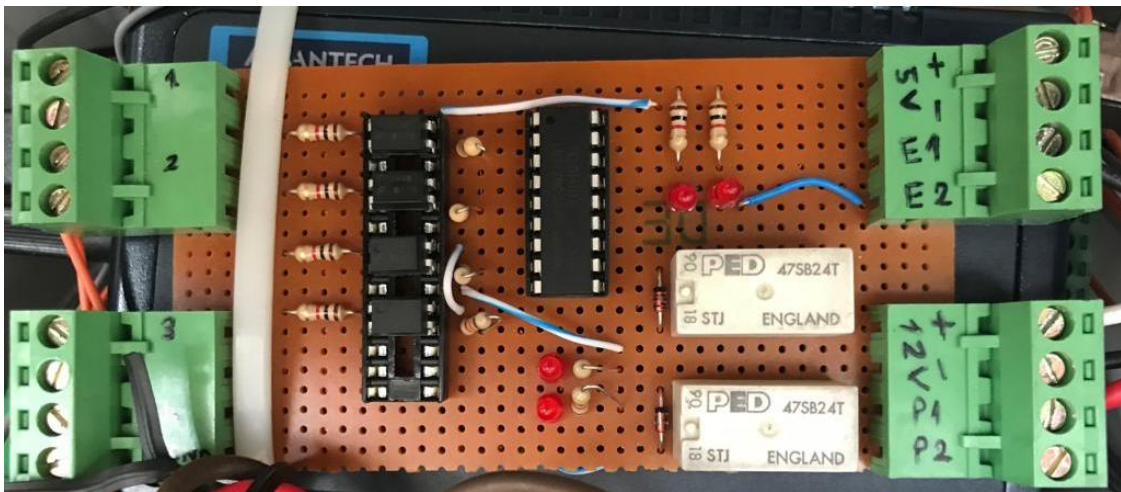
Resim 3.17 Güç kaynakları.

Sıcaklık sensöründen alınan verilerin standart/özel akım ve gerilim düzeylerine çevrilip program ara yüzüne iletilmesinde Elimko marka E-700 serisi sinyal çevirici (inverted) kullanılmıştır. Çevirici tipi E-700-3-2-0-0 olup sıcaklık skalası 0-1100 °C aralığında, 0-10 VDC çıkışlı ve 220 VAC beslemeli 4 adet yük hücresine (loadcell) kadar bağlantı yapılabilme özelliğine sahiptir. Çeviriciye ait görüntü Resim 3.18’de verilmiştir. Sıcaklık verileri bu çevirici üzerinden veri toplama kartı aracılığı ile program ara yüzüne sayısal olarak aktarılmaktadır.



Resim 3.18 Sinyal çevirici.

SCR programı ara yüzünden DEF pompa ve enjektör kontrolünün yapılabilmesi için Resim 3.19’da görülen elektronik kart hazırlanmıştır.



Resim 3.19 DEF pompa ve enjektör kontrolü devre kartı.

Sistemi izleme ve kontrol için gerekli ölçüm verilerini toplayıp program ara yüz ekranına aktarılması amacıyla Advantech USB-4716-AE veri toplama ve iletişim modülü kullanılmıştır. Veri toplama ve iletişim modülüne ait görüntü Resim 3.20’de teknik özellikleri ise Çizelge 3.9’da verilmiştir.



Resim 3.20 USB-4716-AE veri toplama ve iletişim modülü.

Çizelge 3.9 USB-4716-AE veri toplama ve iletişim modülü teknik özellikleri.

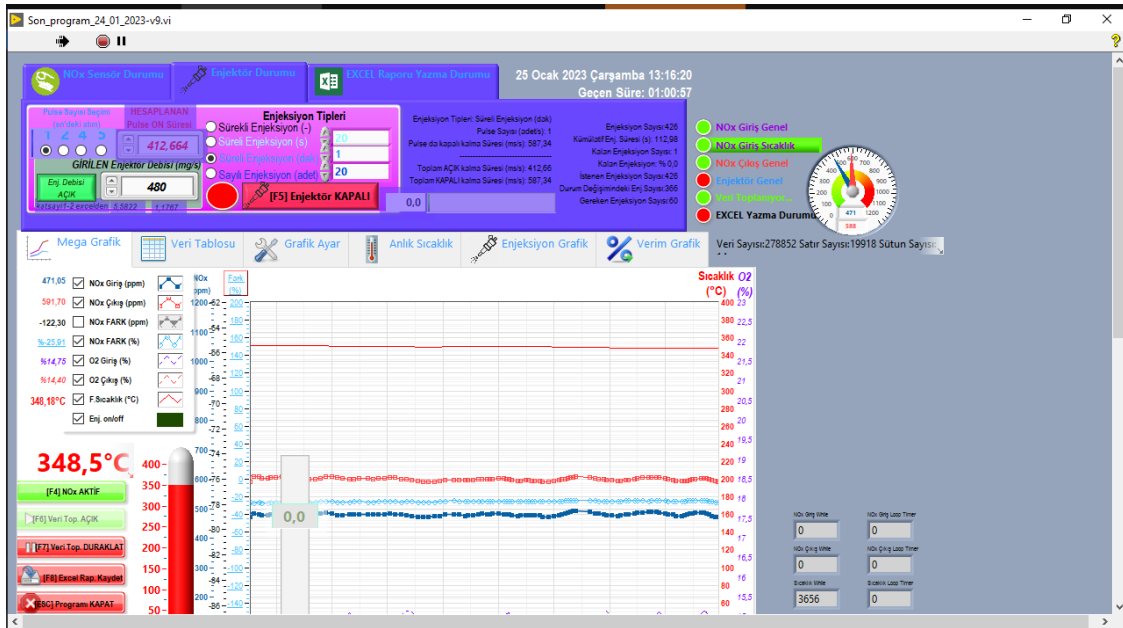
Özellik	Değer
Üretici firma	Advantec
Alım aralığı	4 ~ 20 mA
Örnekleme oranı	200 kS/s
Çözünürlük	16 bit
Veri yolu	USB 2.0
Giriş kanalı	16 kanallı analog giriş
Çalışma sıcaklığı	0 ~ 60 °C
Güç tüketimi	Normal: 5 V @ 360 mA Maksimum: 5 V @ 450 mA
Programlama dili	C #, C + +, LabVIEW, VB. Net, BCB, MFC, VB6, Delphi, Java, MATLAB, Qt

NO_x sensörlerinin ölçmüş olduğu değerlerin dijital olarak bilgisayar ekranında görülebilmesi için Resim 3.21’de gösterilen NI USB-8473s CAN cihazları ile LabVIEW programı ara yüzüne aktarılmaktadır. Ara yüz ekranında NO_x değerleri ppm olarak verilirken aynı zamanda O₂ seviyesi de % hacimsel olarak görülebilmektedir.



Resim 3.21 NI USB-8473s CAN cihazı.

SCR sisteminde elde edilen NO_x değerlerinin sayısal ve grafiksel olarak izlenebildiği, sıcaklık ve MAF sensörlerinden gelen değerlerin okunabildiği ve bu değerlere göre yapılan hesaplamaların sonuçlarının kontrol edileceği LabVIEW yazılımına ait ara yüz Resim 3.22’de gösterilmektedir. Bu yazılım ile değerler kayıt altına alınarak veriler işlenmektedir. Pompa ve enjektör kontrolü de bu ara yüz üzerinden gerçekleştirilebilmektedir.



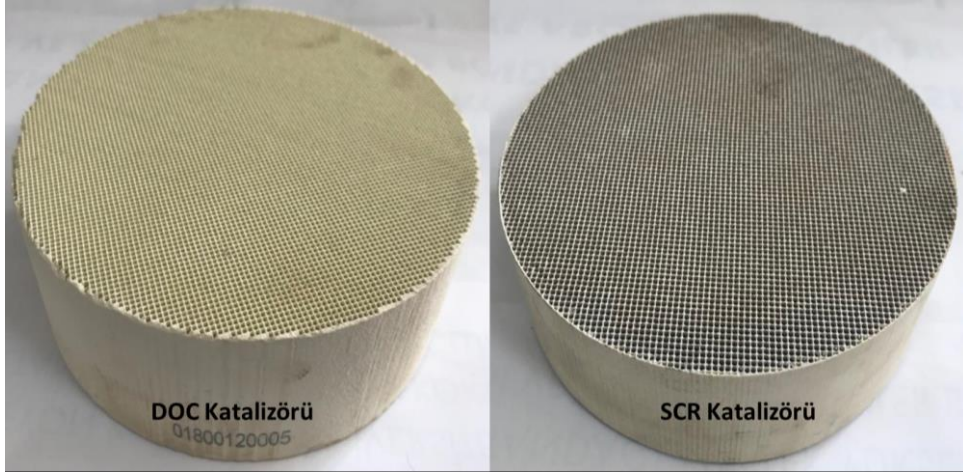
Resim 3.22 LabVIEW yazılımına ait ara yüz.

Bu ara yüz ekranından “Mega Grafik” sekmesinden verilerin tamamının tek bir ekranda toplanarak takip edilebilir duruma getirilmiştir. Ekranda “Veri tablosu” sekmesinde tablo biçiminde sayısal olarak veriler işlenmektedir.

3.3 SCR, DOC Katalizörleri ve Egzoz Sisteminin Tasarımı

Proje kapsamında deney motoru özelliklerine göre SCR, DOC katalizörleri ve egzoz sistemi imalat ve montajı gerçekleştirilmiştir. Taşıtlarda katalizör boyut hesapları yapılırken motor hacmi özellikleri dikkate alınmaktadır. DOC ve SCR katalizör hacmi (V_C), egzoz gazının hacimsel olarak akışının bir fonksiyonu olarak tanımlanır ve motorun silindir hacmine (V_S) bağlı olarak değişim gösterir. Tipik bir DOC ve SCR ‘de V_C/V_S oranı 0,6-0,8 aralığında olmaktadır (Reşitoğlu 2016). Yani katalizör hacmi motor silindir hacminin 0,6-0,8 katı aralığındadır. Deney motoru hacmi 510 cm^3 olduğundan hesaplanan katalizör hacimleri $306\text{-}408 \text{ cm}^3$ aralığında olması gerekmektedir. Aynı zamanda ilerleyen çalışmalarda deney motoru olarak 640 cm^3 hacimli motorun kullanılacağı öngörülerek katalizörlerin bu ölçülere de uyum sağlanması istenmiştir. 640 cm^3 ’lik motora göre hesaplanan katalizör hacmi $384\text{-}512 \text{ cm}^3$ aralığındadır. Bu yüzden her iki aralığı da göz önüne alarak tasarlamayı düşündüğümüz katalizör hacmi 400 cm^3 olarak belirlenmiştir.

Proje kapsamında alınan DOC ve SCR katalizörleri Resim 3.23’de görülmektedir. SCR katalizörü fabrikasyon ölçüleri $132 \times 100 \text{ mm}$, DOC katalizörü fabrikasyon ölçüleri $118 \times 140 \text{ mm}$ boyutlarındadır. Katalizörlerin dış yüzeylerinin yapısını bozmamak için kesilerek uzunluğu kısaltılmış ve hacimleri 400 cm^3 olarak ayarlanmıştır.



Resim 3.23 DOC ve SCR katalizörleri.

Sistemde kullanılan DOC katalizörü evrensel seramik malzemedен yapılmış standart katalizördür. SCR katalizörünün teknik özellikleri ise Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.10 SCR katalizörü teknik özellikleri (Reşitoğlu 2016).

Özellik	Değer
Tipi	Geleneksel $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ katalizörü
Yoğunluğu	400 cpsi
BET yüzey alanı	$26,2497 \pm 0,4740 \text{ m}^2/\text{g}$
Katalizör kütle içeriği (%)	TiO_2
	40,71
	SiO_2
	30,13
	Al_2O_3
	16,86
	MgO
	5,54
	WO_3
	2,31
	Fe_2O_3
	1,38
	V_2O_5
	1,23
	SO_3
	0,80
	Na_2O
	0,34
	A.Z.($ZnO-Ag_2O/Ag$)
	0,23
	CaO
	0,22
	K_2O
	0,086
	ZrO_2
	0,075
	P_2O_5
	0,072
	Cl
	0,018
	NiO
	0
	CuO
	0
	ZnO
	0
	Rb_2O
	0
	SrO
	0
	BaO
	0
	La_2O_3
	0
	CeO_2
	0
	PtO_2
	0

Katalizörün, egzoz sistemindeki titreşimlerden, basınçtan, termal yükleme sonucu genleşmelerden ve herhangi bir darbeden zarar görmesinin engellenmesi için katalizörler amyant malzemesi ile sarılmıştır. Resim 3.24'te katalizörlerin amyant ile montaj resimlerine yer verilmektedir.



Resim 3.24 Amyant ve katalizöre giydirilmesi.

Katalizörlerin dış montajları yapıldıktan sonra 51 mm'lik egzoz borusu çapına indirgenmesi için Resim 3.25'te gösterilen konik redüktörler kullanılmıştır.



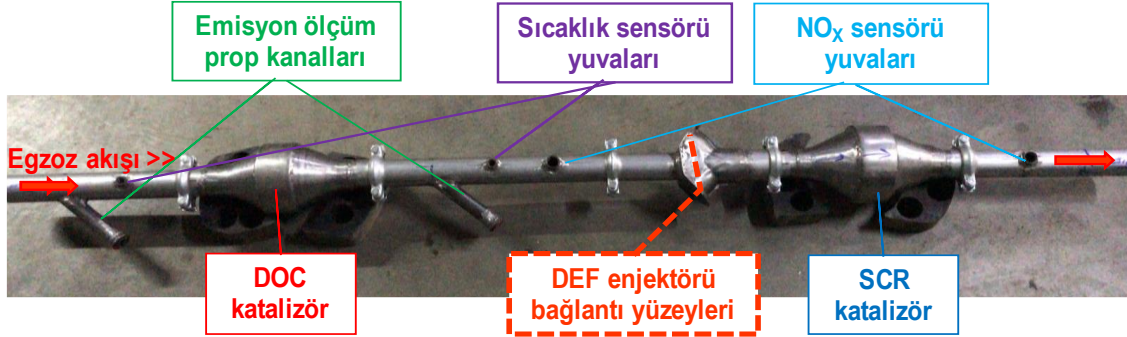
Resim 3.25 Konik redüktör.

Konik redüktör ile katalizörler kaynak ile birleştirilmiştir. Resim 3.26 'da DOC ve SCR katalizörleri gösterilmiştir.



Resim 3.26 DOC ve SCR katalizörleri.

Proje kapsamında imalatı ve montajı gerçekleştirilen egzoz sistemi ve parçaları Resim 3.27’de gösterilmektedir.



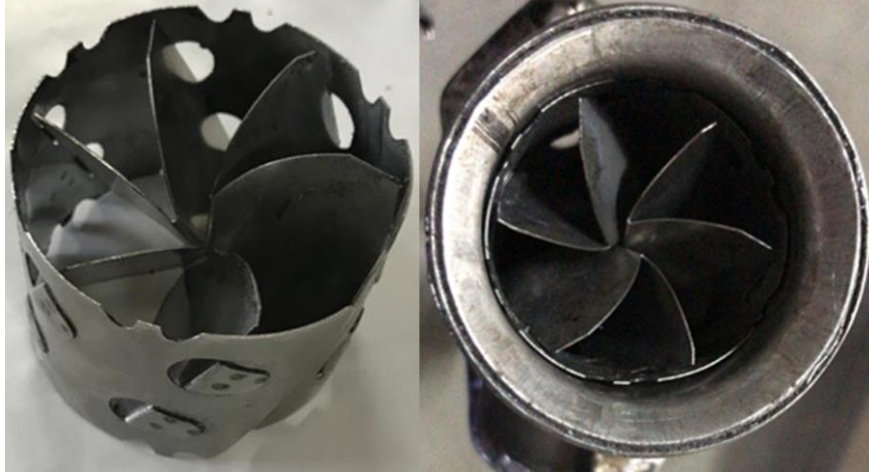
Resim 3.27 Egzoz sistemi ve parçaları.

Tasarlanan egzoz sisteminde her bir sensör, enjektör ve emisyon ölçümü için montaj kanalları ve emisyon cihazı probu ile ölçüm yapılabilmesi için prop kanalları konumlandırılmıştır. Resim 3.27’deki sisteme sol taraftan itibaren bakılırsa; Egzoz çıkışında emisyon değerlerine bakabilmek için 45° açı ile konumlandırılmış emisyon prob kanalı bulunmaktadır. Prob kanalından sonra DOC öncesi egzoz sıcaklığını ölçen sıcaklık sensörü yuvası konumlandırılmıştır. Yine DOC - SCR katalizörü arasında egzoz probu kanalı, sıcaklık sensörü, NO_x sensörü ve DEF enjektörü yuvaları yerleştirilmiştir. Sistem 6 parçadan oluşturulmuş olup her bir parça egzoz sızıntılarını önlemek amacıyla her bir bağlantı noktasında Resim 3.28’deki gibi konik bağlantılardan egzoz contası ve kelepçe ile bağlanmıştır.



Resim 3.28 Egzoz parçaları conta ve kelepçe ile birleşimi.

SCR tasarımlarında NO_x dönüşümüne büyük etkisi olan egzoz gazı ile dizel egzoz sıvısı karışımının daha iyi olması için enjektör önüne konumlandırılan portatif (gerektiğinde çıkartılabilen) karıştırıcı ve montajı Resim 3.29’da görülmektedir.



Resim 3.29 SCR karıştırıcısı ve montajı.

Sistemin gaz akışı ve kaçak kontrolünün yapılabilmesi için deney tek silindirli motorda düşük ve yüksek devirlerde test edilmiş ve mekanik olarak herhangi bir sorunun olmadığı tespit edilmiştir.

3.4 Dizel Egzoz Sıvısı Enjektörü Püskürtme Karakteristiğinin Çıkartılması

SCR sistemlerinde NO_x dönüşümü için püskürtülecek dizel egzoz sıvısı miktarının belirlenmesi en önemli özelliklerinden birisidir. DEF sıvısının az püskürtülmesi yeterince NO_x dönüşümü sağlayamadığı gibi fazla püskürtülmesi ise amonyak birikimi ve tortu oluşumuna neden olmaktadır. Püskürtülmesi gereken DEF miktarı ise enjektörün açık ve kapalı kalma sürelerine göre belirlenmektedir. SCR deney sisteminde kullanılan DEF enjektörünün farklı püskürtme tipleri (pulse) ve sürelerinde (ms/s) enjektör debisinin (mg/s) tespiti için püskürtme karakteristiği çıkarılmıştır.

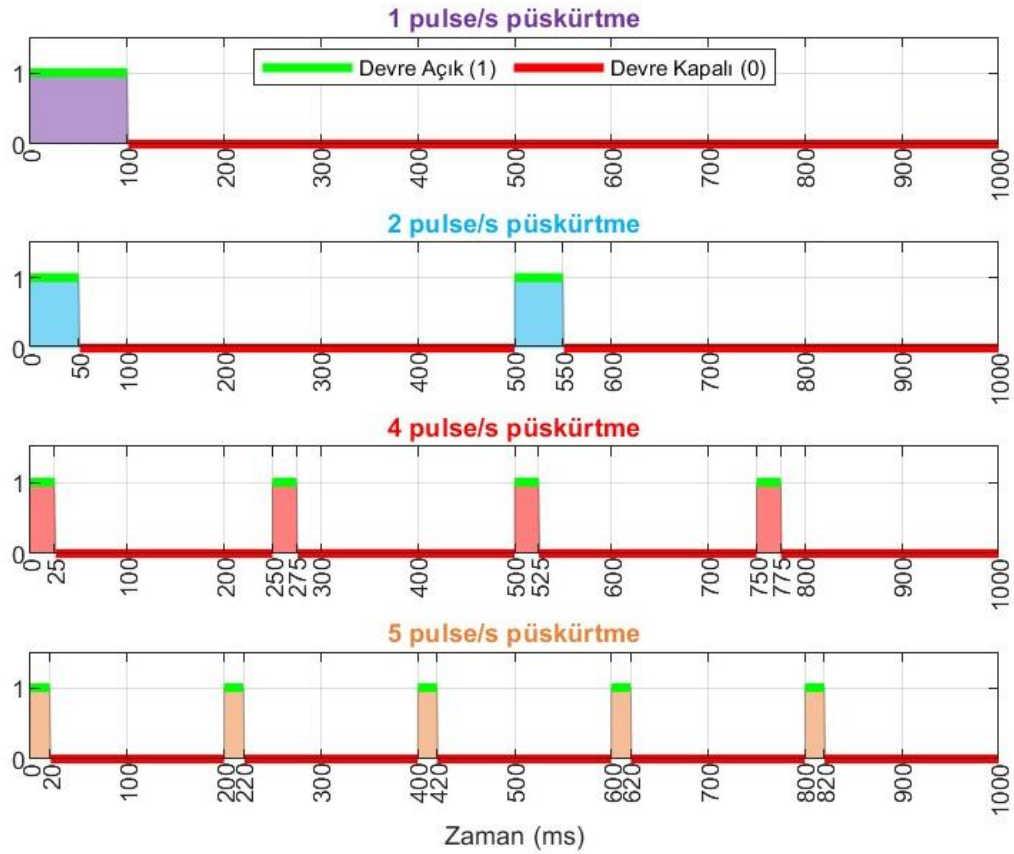
Püskürtme karakteristiği deneyleri enjektörün farklı toplam açık kalma sürelerinde, saniyede 7-200 milisaniye aralığında ve 1, 2, 4 ve 5 atımlı (pulse) farklı püskürtme tiplerinde, bir dakikalık enjektör çalışması boyunca en az 3 tekrarlı ölçümle gerçekleştirilmiştir. Püskürtülen DEF beher kabının darası alınarak Resim 3.30'daki gibi hassas terazi ile ölçülmüştür. Her adımdaki 3 ölçümün minimum ve maksimum değerleri arasındaki fark 0,08 gramın üzerinde olduğu durumlarda ölçümler tekrarlanmıştır. Minimum ve maksimum değerler arasındaki fark şartı sağlandığında sonraki ölçüme geçilmiştir.



Resim 3.30 Püskürtülen DEF sıvısının hassas ölçümü.

Yaklaşık 4 barlık hat basıncında enjektör 7 ms sürenin altında püskürtme yapmamaktadır. 6 ms ve altında sıvı püskürtmesi olmadığı için bu değerlerde ölçümler yapılamamıştır. 1, 2, 4 ve 5 atımlı (pulse) farklı püskürtme tiplerinde sırasıyla saniyede 7, 14, 28 ve 35 ms'lerde enjektörün toplam açık kalma sürelerinin altında püskürtme olmadığı için herhangi bir ölçüm yapılamamaktadır.

Şekil 3.5'te bir saniye (1000ms) boyunca enjektörün toplam açık kaldığı 100 ms süreyi sabit tutarak 1, 2, 4 ve 5 atımlı (pulse) farklı püskürtme tipleri için kullanılan enjektör kontrol sinyalleri gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Farklı atımla (pulse) için kullanılan enjektör kontrol sinyalleri.

Şekil 3.6 a)-d)’de bir saniye boyunca enjektörün toplam açık kaldığı 100 ms süreyi sabit tutarak 1, 2, 4 ve 5 atımlı (pulse) farklı püskürtme tipleri için LabVIEW blok diyagramında bir dakikalık püskürtme süreleri tanımlanmıştır.

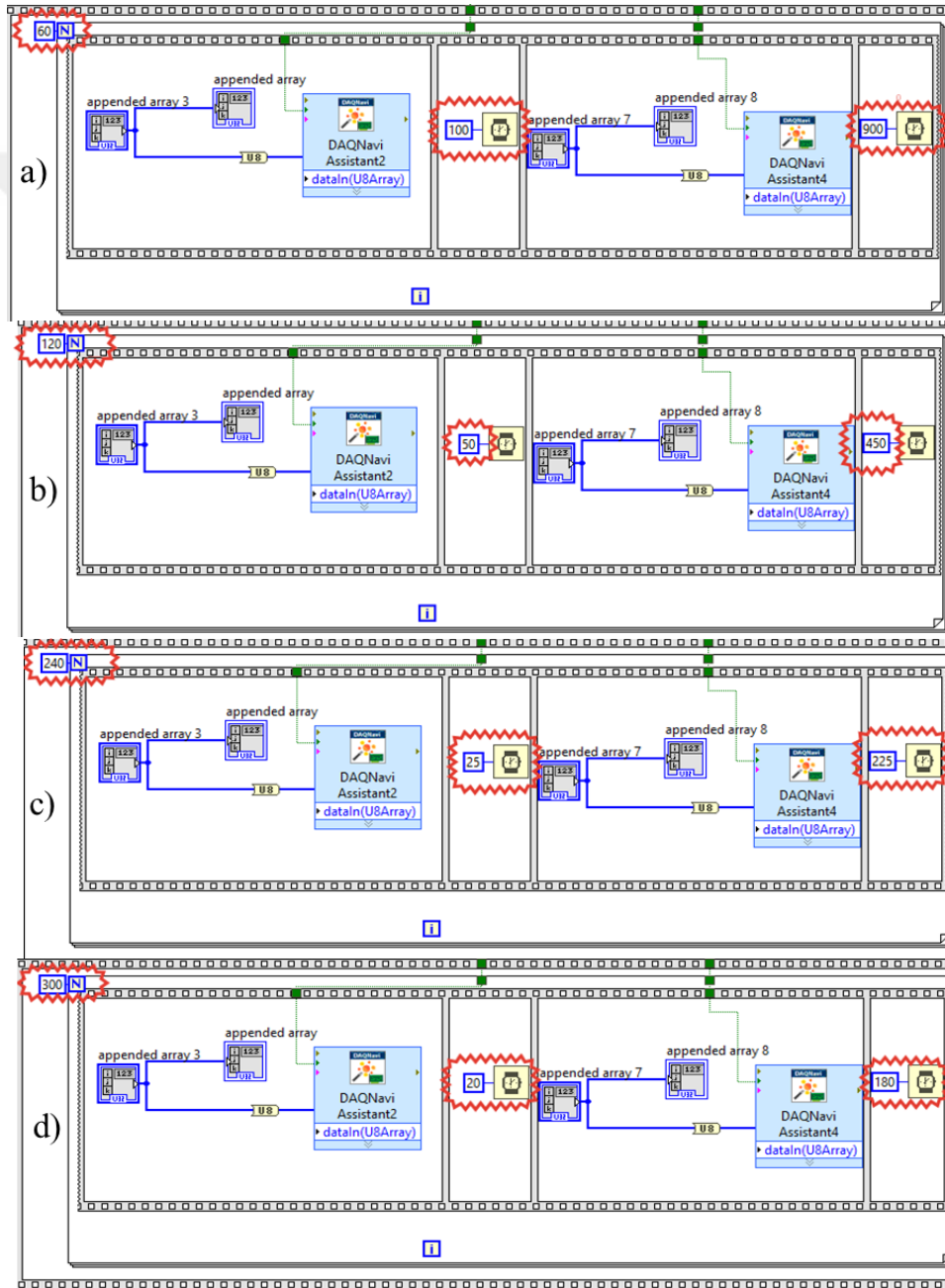
Şekil 3.6 a)’da enjektörün bir saniyede 100 ms açık 900 ms kapalı kaldığı (saniyede 1 atım) ve işlemin 60 defa tekrarlandığı bir dakikalık püskürtmenin tanımlanması gösterilmektedir.

Şekil 3.6 b)’de enjektörün 500 ms ’de 50 ms açık 450 ms kapalı kaldığı (saniyede 2 atım) ve işlemin 120 defa tekrarlandığı bir dakikalık püskürtme tanımlanmaktadır. Burada saniyede toplam enjektör açık kalma süresi yine 100 ms (2 atım x 50 ms), toplam çalışma süresi 60 saniye (120 tekrar x 0,5 s) yani 1 dakika olmaktadır.

Şekil 3.6 c)’de enjektörün 250 ms ’de 25 ms açık 225 ms kapalı kaldığı (saniyede 4 atım) ve işlemin 240 defa tekrarlandığı bir dakikalık püskürtme tanımlanmaktadır. Burada

saniyede toplam enjektör açık kalma süresi yine 100 ms (4 atım x 25 ms), toplam çalışma süresi 60 saniye (240 tekrar x 0,25 s) yani bir dakika olmaktadır.

Şekil 3.6 d)'de enjektörün 200 ms 'de 20 ms açık 180 ms kapalı kaldığı (saniyede 5 atım) ve işlemin 300 defa tekrarlandığı bir dakikalık püskürtme tanımlanmaktadır. Burada saniyede toplam enjektör açık kalma süresi yine 100 ms (5 atım x 20 ms), toplam çalışma süresi 60 saniye (300 tekrar x 0,2 s) yani bir dakika olmaktadır.



Şekil 3.6 LabVIEW blok diyagram ara yüzünden püskürtme sürelerinin tanımlanması.

LabVIEW kontrol yazılımında milisaniye (ms) olarak sadece tam sayılı değerlerde enjektör kontrolü yapılabilmektedir. Milisaniye olarak ondalıklı değerler ile kontrol mümkün olmamaktadır. 2, 4 ve 5 atımlı (pulse) farklı püskürtme tiplerinde enjektörün toplam açık kalma süreleri belirlenirken atım sayısının katları olacak şekilde süreler tespit edilmiştir. Enjektörün minimum açık kalabildiği 7 ms'lik sürede bir saniyedeki 1 atımla 60 saniyelik (60 atım) ölçüm sonucu ortalaması 0,066667 gramdır. Yani saniyede 1,11 mg 'lık sıvı püskürtüldüğü tespit edilmiştir.

Her bir ölçüm adımında uygun sapma şartını sağlayan 3 ölçümün ortalaması alınarak doğrusal regresyonda kullanılmıştır. Şekil 3.7'de ölçüm değerleri ve regresyon sonucu gösterilmiştir.

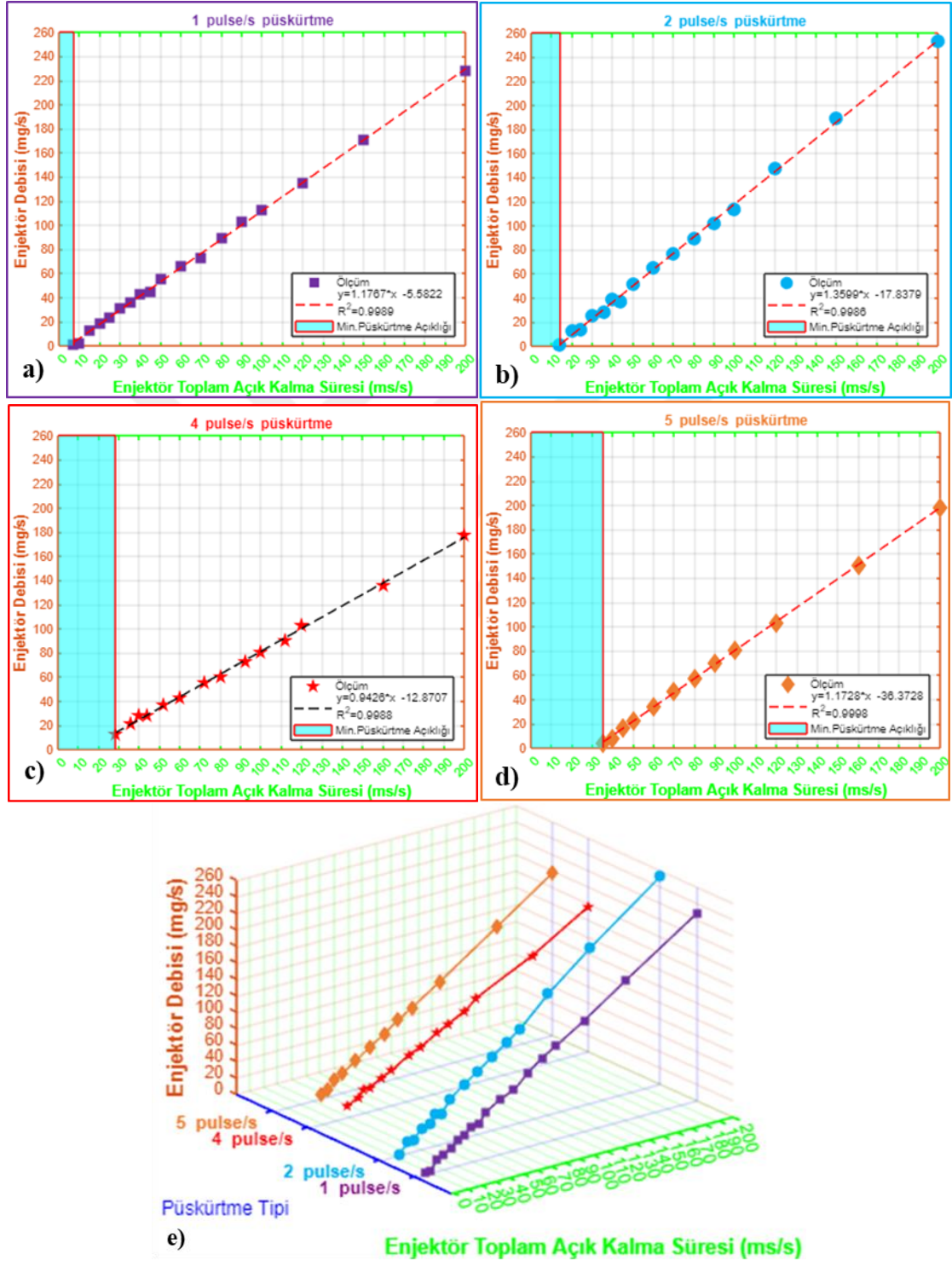
Şekil 3.7 a)'da enjektörün saniyede 1 atımlı püskürmesi ve 7-200 ms/s arasında değişen 18 farklı noktada toplam açık kalma süresi ile bir dakikalık ölçümlerin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan enjektör debisinin toplam açık kalma süresine bağlı değişimi ve doğrusal regresyon sonucundaki değerleri grafikte gösterilmektedir. Doğrusal regresyon değeri 0,9989 olarak bulunmuştur.

Şekil 3.7'b) de enjektörün saniyede 2 atımlı püskürme ve 14-200 ms/s arasında değişen 16 farklı noktada toplam açık kalma süresi ile bir dakikalık ölçümlerin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan enjektör debisinin toplam açık kalma süresine bağlı değişimi ve doğrusal regresyon sonucundaki değerleri grafikte gösterilmektedir. Doğrusal regresyon değeri 0,9986 olarak bulunmuştur.

Şekil 3.7'c) de enjektörün saniyede 4 atımlı püskürme ve 28-200 ms/s arasında değişen 14 farklı noktada toplam açık kalma süresi ile bir dakikalık ölçümlerin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan enjektör debisinin toplam açık kalma süresine bağlı değişimi ve doğrusal regresyon sonucundaki değerleri gösterilmektedir. Doğrusal regresyon değeri 0,9988 olarak bulunmuştur.

Şekil 3.7'd) de enjektörün saniyede 5 atımla püskürme ve 35-200 ms/s arasında değişen 12 farklı noktada toplam açık kalma süresi ile bir dakikalık ölçümlerin ortalama değerleri

hesaplanmıştır. Hesaplanan enjektör debisinin toplam açık kalma süresine bağlı değişimi ve doğrusal regresyon sonucundaki değerleri gösterilmektedir. Doğrusal regresyon değeri 0,9998 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.7 Farklı püskürtme tipleri (pulse) ve süreleri (ms/s) için enjektör debisinin (mg/s) doğrusal regresyonla tespiti.

Ölçüm verileri arasında yapılan doğrusal regresyonla yüksek R^2 (en küçüğü 0,9986) değerleri ile elde edilen eğilim çizgilerinin denklemleri, LabVIEW kontrol yazılımı içinde tanımlanmıştır. LabVIEW enjektör kontrolü ara yüz ekran görüntüsü Resim 3.31’de görülmektedir. Burada Pulse sayısı seçimi (saniyedeki atım) 1, 2, 4, 5 pulse atımlı 4 seçenek ayarlanmıştır. Aynı zamanda pulse on süresi milisaniye cinsinden ayarlanabilmektedir. Ekranda sürekli enjeksiyon, süreli enjeksiyon (saniye ve dakika) ve sayılı enjeksiyon (adet) olarak 4 seçenekli enjeksiyon işlemi gerçekleştirilebilecek alternatifler hazırlanmıştır.



Resim 3.31 LabVIEW enjektör kontrolü ara yüz ekran görüntüsü.

Şekil 3.8 a)’da farklı püskürtme tipleri (pulse) ve sürelerinde (ms/s) gerçekleştirilen ölçümlerin ortalamasıyla hesaplanan enjektör debisinin (mg/s) değişimi gösterilmektedir. LabVIEW kontrol yazılımı ile milisaniye (ms) olarak sadece tam sayılı değerlerde enjektör kontrolü yapılabilir. Farklı püskürtme tiplerinde (2, 4 ve 5 pulse) enjektörün toplam açık kalma süreleri belirlenirken atım sayısının katları olacak şekilde süreler tespit edilmiştir. Bundan dolayı her toplam enjektör açık kalma süresinde 2, 4 ve 5 atımlı (pulse) farklı püskürtme tiplerinde değerler bulunmamaktadır. 60 ms/s’lik toplam enjektör açık kalma süresine kadar saniyedeki atım sayısı arttıkça aynı toplam açık kalma süresine rağmen enjektör debisinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 3.8 b)’de farklı püskürtme tiplerinin (1, 2, 4 ve 5 pulse) ortak katları olan 40, 60, 80, 100, 120 ve 200 (ms/s) ’lik toplam enjektör açık kalma sürelerine göre hesaplanan enjektör debisinin (mg/s) değişimi daha detaylı gösterilmektedir.



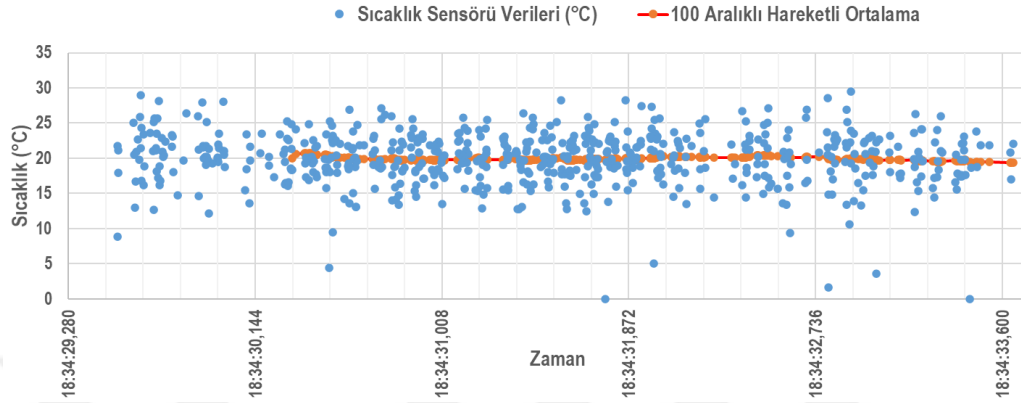
Şekil 3.8 Farklı püskürtme tipleri (pulse) ve sürelerindeki (ms/s) enjektör debisinin (mg/s) değişim grafikleri.

3.5 Sıcaklık Sensörü Verilerinin İşlenmesi

Sıcaklık sensörü özellikleri ve ekipmanları tezin materyal ve metot bölümünde tanıtılmıştır. Sıcaklık sensörü ile ortam sıcaklığında yapılan basit ölçümlerde sıcaklık sensörünün saniyede ortalama 151 değer gönderdiği ancak sıcaklık değerlerinin 0-29,4891 °C geniş sıcaklık aralığında sürekli değiştiği gözlemlenmiştir. Konu ile sıcaklık sensörünün temin edildiği firmanın teknik elemanlarıyla yapılan görüşmede değerlerdeki aşırı sapmaların veri toplama kartıyla sıcaklık sensörü arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanabileceği bildirilmiştir.

İlk olarak Excel yazılımında farklı aralıklarla hareketli ortalamalar alınarak sinyal düzeltilmeye çalışılmıştır, 100 aralıklı hareketli ortalama sonucunda sıcaklık değerlerinin 19,2 - 20,8 °C arasında nispeten daha dar sıcaklık aralığına ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Şekil 3.9’da aşırı dalgalanan ham sıcaklık sensör verileri ve 100 aralıklı hareketli ortalama değerleri gösterilmektedir. Çizelge 3.11’de farklı sayıdaki hareketli ortalamalarla elde edilen sıcaklık aralıkları gösterilmektedir.

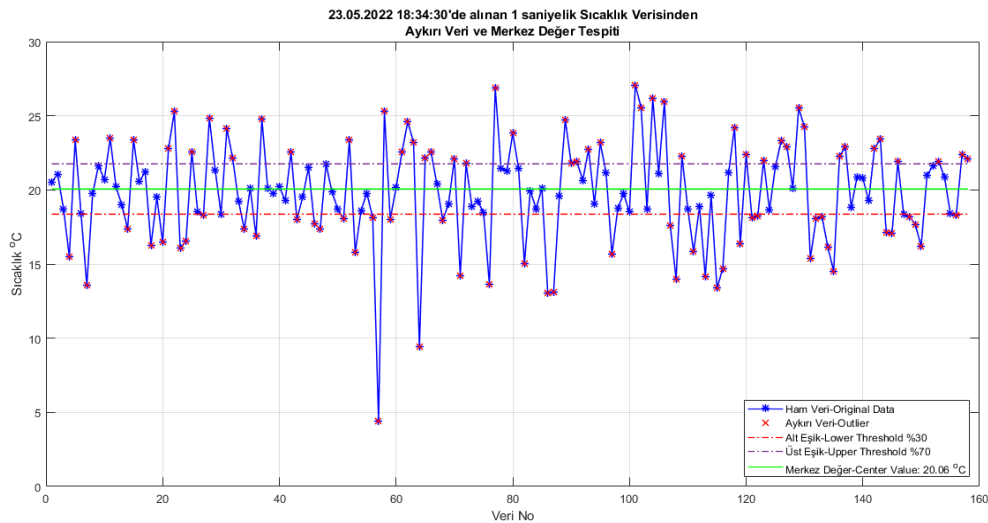


Şekil 3.9 Ham sıcaklık sensörü verileri ve 100 aralıklı hareketli ortalama değerleri.

Çizelge 3.11 Farklı hareketli ortalamalarda sıcaklık veri aralıkları değişimi.

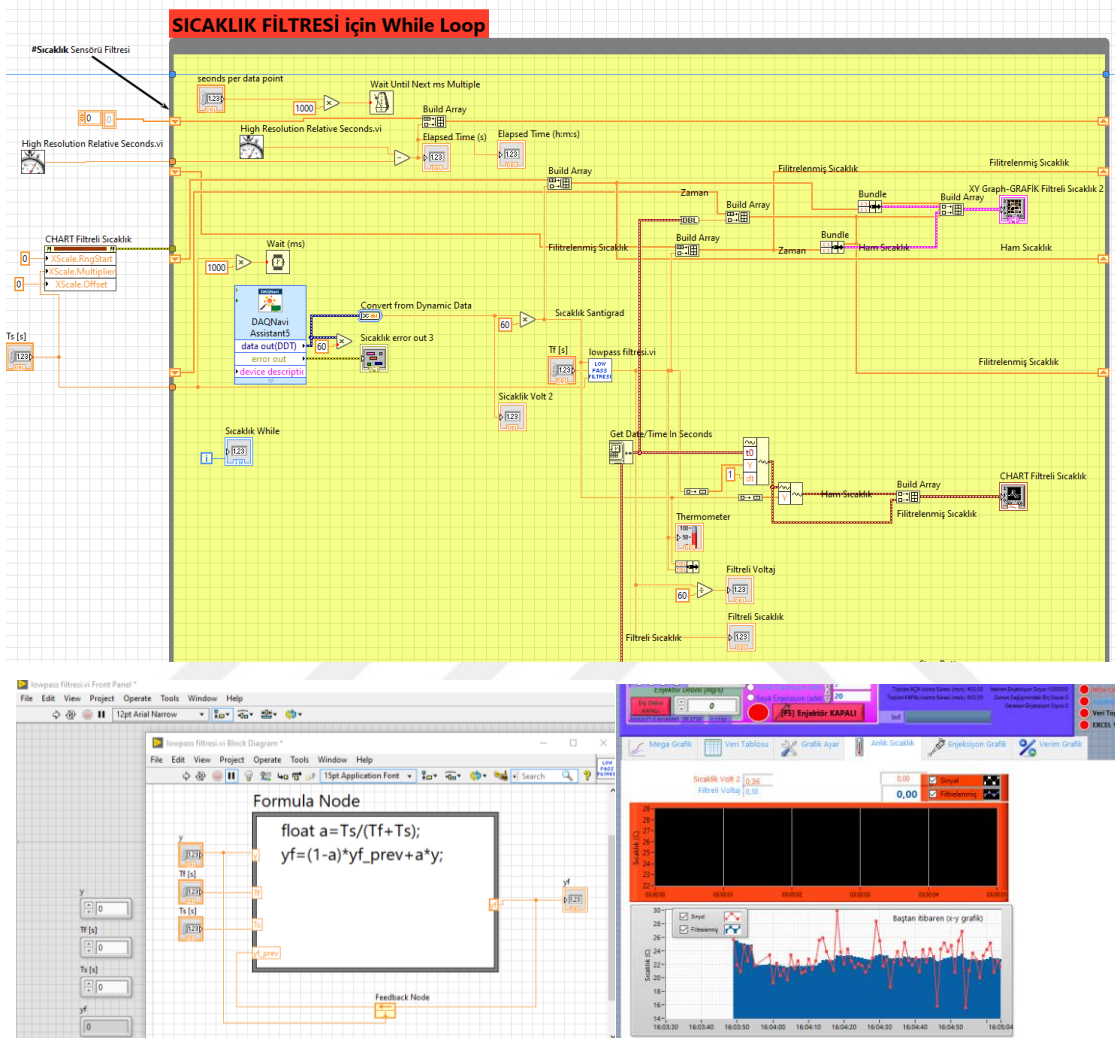
Değer \ Aralık	Sıcaklık Sensörü Ham Verileri (°C)	100 Aralıklı Hareketli Ortalama (°C)	200 Aralıklı Hareketli Ortalama (°C)	300 Aralıklı Hareketli Ortalama (°C)
Maksimum Değer	29,4891	20,8	20,2333394	20,08501877
Minimum Değer	0	19,2	19,4	19,7

Daha sonra MATLAB yazılımında bir saniyelik sıcaklık verileri işlenerek verilerin %70 üstünde ve %30 altındaki değerler aykırı veri (outlier) olarak değerlendirilip Şekil 3.10’daki merkez değerler tespit edilmiştir.



Şekil 3.10 MATLAB’da aykırı veriler ile kararlı sıcaklık verilerinin tespiti.

Son olarak LabVIEW yazılımına yine sıcaklık verilerinin eş zamanlı (real time) filtrelenmesine imkân veren Şekil 3.11’de gösterilen Lowpass filtresi eklenmiş ve buradan elde edilen değerler sıcaklık değeri olarak kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 3.11 Sıcaklık verisi işlenmiş LabVIEW blok diyagramları ve ön panel görünümü.

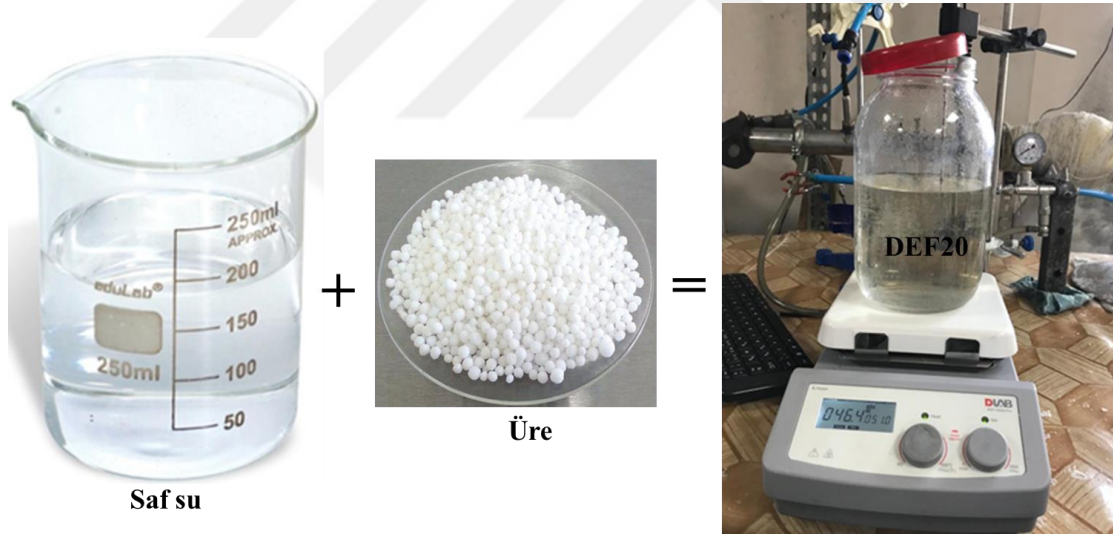
3.6 Farklı Oranlarda Dizel Egzoz Sıvısı Üretimi

Dizel egzoz sıvısı %32,5 yüksek saflıkta üre ve %67,5 demineralize sudan oluşmakta ve DEF32 olarak adlandırılmaktadır. SCR sisteminde yapılan deneylerde kullanılan DEF32 sıvısı kalite standardına uygun üretilmiş firma tarafından hazır alınmıştır. Bulgular kısmında otomotiv SCR sisteminde dizel egzoz sıvısının farklı oranlarının NO_x emisyonlarına etkisini incelemek ve karşılaştırmak için DEF20, DEF32 ve DEF50 oranlarının da deneyleri yapılmıştır. Üreticilerden edinilen bilgiye göre DEF yapımında

saf su ve ürenin karışım oranları kütleli olarak gerçekleşmektedir. Yani 100 gr DEF32 üretmek için 32,5 gr üre, 67,5 gr saf su ile karıştırılmaktadır. Karışım da katı ürenin daha iyi çözünmesi için saf su yaklaşık 40 °C dereceye kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra üre parçacıkları saf su içerisine eklenerek karıştırma yapılmaktadır.

Deney amaçlı kullanılan DEF için öncelikle demineralize edilmiş saf su ve otomotiv üresi temini sağlanmıştır. Toplam 2000 gr olan DEF20, DEF32 ve DEF50 olmak üzere 3 adet numune hazırlanmıştır.

Burada örnek olarak DEF20 üretimi anlatılacaktır. Öncelikle hassas terazide 650 gr üre ve 1350 gr saf su numuneleri hazırlanmıştır. Saf su ısıtıcı manyetik karıştırıcı üzerinde 45 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Daha sonra kap içerisindeki karıştırıcı (balık) 1000 devire getirilerek karıştırıcı kısmı çalıştırılmıştır. Hazırlanan üre saf su içerisine yavaş yavaş dökülerek içerisinde çözünmesi sağlanmıştır. Çözünme sağlandıktan sonra numune oda şartlarında soğumaya bırakılmıştır. DEF hazırlama süreci Resim 3.32'de gösterilmiştir.



Resim 3.32 DEF hazırlama süreci.

3.7 SCR Sisteminde Püskürtülecek Dizel Egzoz Sıvısı Miktarının Hesaplanması

SCR sistemlerinde püskürtülecek dizel egzoz sıvısı miktarı gerekenden az olursa NO_x dönüşümü yeterli düzeyde sağlanamamakta, fazla olursa katalizör sisteminde üre depozit oluşumu ve amonyak birikimine neden olmaktadır. Amonyak birikimi istenmeyen bir durumdur.

SCR sistemi deney düzeneğinde pompa ve enjektör komutları hem otomatik hem de manuel olarak planlanmış ve ara yüzler buna göre oluşturulmuştur. Enjektör kontrolü ile püskürtülecek dizel egzoz sıvısı miktarı hesaplanarak LabVIEW programına girilmiştir. Yapılan deneylerin amacına göre püskürtülen DEF miktarı sistem tarafından otomatik olarak hesaplanabilmekte veya kullanıcı tarafından manuel olarak girilebilmektedir.

Motorun o anki çalışma şartlarında püskürtülecek dizel egzoz sıvısı miktarının otomatik olarak hesaplanması istenirse, egzoz gazındaki NO_x 'un kütleli akış miktarı bulunmalıdır. SCR katalizör öncesi NO_x sensörü NO_x miktarını ppm olarak ölçmektedir. Sistemde püskürtülecek DEF miktarı g/h veya mg/s cinsinden hesaplanmaktadır. Egzoz gazı içeriğinde bulunan NO_x gazının kütleli akış miktarının hesaplanması için egzoz gazının kütleli debisine ($\dot{m}_e$) ihtiyaç vardır.

Kütlenin korunumu yasası dikkate alındığında denklem (3.2) 'de egzoz gazının kütleli debisinin ($\dot{m}_e$), motora alınan emme havası ($\dot{m}_a$) ve yakıt debisi ($\dot{m}_f$) toplamına eşit olduğu görülmektedir.

$$\dot{m}_e = \dot{m}_a + \dot{m}_f \quad (3.2)$$

Denklem (3.2) 'de egzoz gazının ($\dot{m}_e$), emme havasının ($\dot{m}_a$) ve motora alınan yakıtın ($\dot{m}_f$) kütleli akış miktarları g/h biriminden verilmiştir. Motora emilen hava miktarı, MAF sensörü ile ölçülerek elde edilmektedir. Bu süreçte tüketilen yakıtın kütleli akış miktarı, ilgili yükte ve güçte terazili kapta ölçüm yapılarak elde edilmektedir.

Egzoz gazının kütleli akış miktarı hesaplandıktan sonra egzoz gazı içeriğinde bulunan NO_x gazının kütleli akış miktarı denklem (3.3)'den elde edilmektedir (Reşitoğlu 2016).

$$\dot{m}_{NO_x} = \frac{NO_{x_s}}{10^6} \cdot \dot{m}_e \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'deki; $\dot{m}_{NO_x}$, NO_x gazının egzoz gazı içeriğindeki g/h cinsinden kütleli akış miktarıdır. NO_{xs} ise sistemdeki katalizör öncesi NO_x sensörünün ölçmüş olduğu ppm

değerindeki NO_x miktarını göstermektedir. Buradaki ppm, karışımdaki toplam madde miktarının milyonda bir birimlik maddesi anlamına geldiği için 10^6 değerine bölünmüştür.

SCR reaksiyonlarda NO_2/NO_x oranının büyük önem taşıdığı ve reaksiyon hızını önemli ölçüde etkilediği tezin kaynak araştırması kısmında belirtilmiştir. Yine SCR sisteminde maksimum performansın, NO/NO_2 oranının 1/1 olduğunda gösterdiği anlatılmıştır. Çünkü reaksiyon hızının yüksek olması daha iyi bir NO_x emisyon dönüşümü sağlamaktadır. Aynı zamanda SCR sistemlerinde püskürtülecek DEF kontrolünde hem amonyak birikiminin önlenmesi hem de yeterince NO_x dönüşümünün sağlanması için püskürtülecek DEF miktarı molar oranın 1/1 olduğu hızlı-SCR reaksiyonunda gerçekleştiği kabul edilmiştir. Hızlı-SCR reaksiyonunda püskürtülecek DEF miktarının açıklanması için reaksiyon Çizelge 3.12 ‘deki gibi gösterilmiştir.

Çizelge 3.12 Püskürtülecek DEF miktarı mol/moleküler ağırlık hesabı.

Reaksiyon	NO	+ NO₂	+ 2NH₃	→ 2N₂ + 3H₂O
Mol oranı (mol)	1	1	2	
Moleküler ağırlık (g/mol)	30	46	2*17=34	

Çizelge 3.12 ‘deki reaksiyon incelendiğinde mol oranlarının 1 olduğu NO ve NO_2 emisyonlarını dönüştürmek için 2 mol amonyak tepkimeye girmektedir. Bileşiklerin moleküler ağırlıkları dikkate alındığında 30 g/mol NO, 46 g/mol NO_2 ve 17 g/mol NH_3 olduğu görülmektedir. Reaksiyonda NO_x olarak tanımlanan ($\text{NO}+\text{NO}_2$) miktarı 76 gr iken 2 mol amonyak (NH_3) 34 g’dır. Oranlama yapılırsa 1 gr NO_x azaltmak için 0,448 gr amonyanın gerekli olduğu anlaşılmaktadır.

SCR reaksiyonlarında anlatıldığı üzere egzoz gazı içerisine püskürtülen DEF sıvısı ürenin ayrışması ile Çizelge 3.13 ‘de görüldüğü gibi iki aşamalı bir reaksiyon gerçekleşmektedir. 1. aşamada termoliz reaksiyonu ile 1 mol amonyak (NH_3) ve 1 mol izosiyanik asit (HNCO) oluşurken 2. aşamada izosiyanik asit (HNCO), amonyak (NH_3) ve karbon dioksit (CO_2) olarak hidrolize uğramaktadır.

Çizelge 3.13 Üre ayrışması mol/moleküler ağırlık hesabı.

Termoliz Reaksiyonu	$CO(NH_2)_2$	+	Isı	→	NH_3	+	$HNCO$
Mol oranı (mol)	1				1		
Moleküler ağırlık (g/mol)	60				17		
Hidroliz Reaksiyonu	$HNCO$	+	H_2O	→	NH_3	+	CO_2
Mol oranı (mol)	1				1		
Moleküler ağırlık (g/mol)	43				17		

Çizelge 3.13 incelendiğinde reaksiyonlar sonucu 1 mol üre çözeltisinden 2 mol NH_3 elde edildiği görülmektedir. Moleküler ağırlıklar dikkate alındığında 34 gram amonyak oluşması için 60 gr üre çözeltisine ihtiyaç duyulmaktadır. Yukarıda 1 gr NO_x azaltmak için 0,448 gr amonyağa ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Oranlama yapılırsa 0,448 gr amonyak için 0,789 gr üre çözeltisi gereklidir. Piyasadaki DEF sıvısı kütleli olarak %33 oranında üre çözeltisi $(NH_2)_2CO$ ve % 67 oranında saf sudan oluşmaktadır. Sonuç olarak kütleli oranları dikkate alındığında 1gr NO_x emisyonunu azaltmak için gerekli olan DEF sıvı miktarı 2,39 (0,789/0,33) gram olmaktadır.

NO_x gazının kütleli akış miktarı yukarıda hesaplanmıştır. Püskürtülecek DEF sıvısının kütleli akış miktarı ise denklem (3.4) ile hesaplanır.

$$\dot{m}_{DEF} = \dot{m}_{NO_x} \cdot 2,39 \quad (3.4)$$

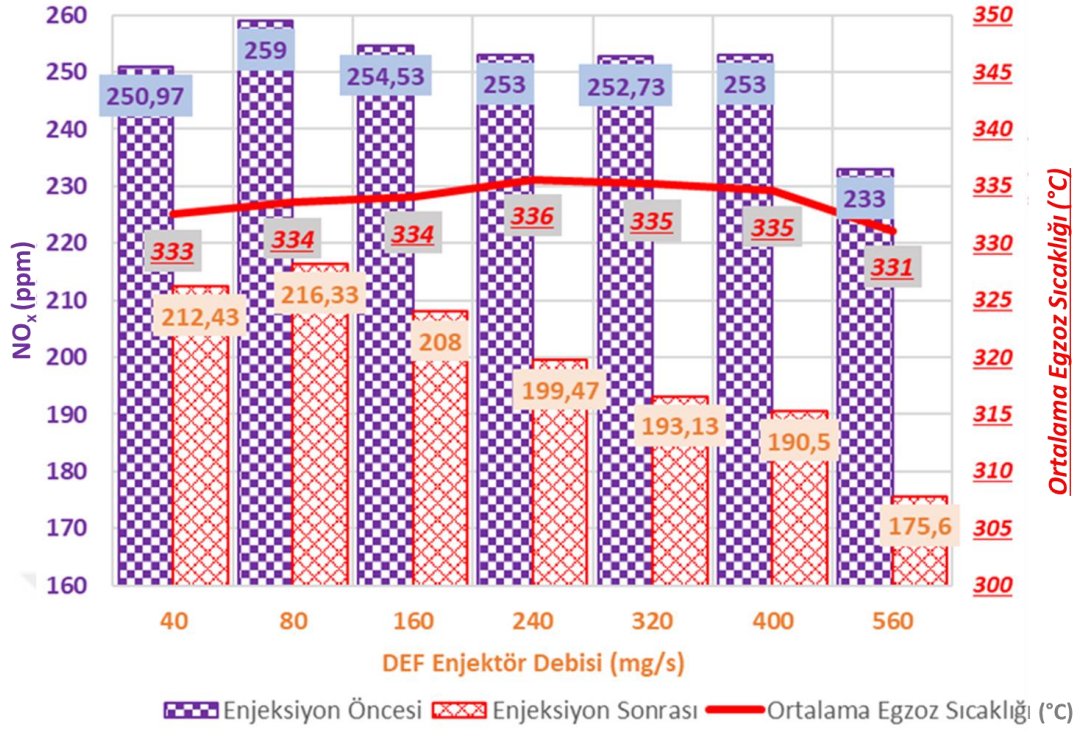
Denklem (3.4) 'deki; $\dot{m}_{DEF}$, DEF sıvısının kütleli akış miktarını, $\dot{m}_{NO_x}$ ise NO_x gazının kütleli akış miktarını g/h olarak göstermektedir.

4. BULGULAR

4.1 Enjeksiyon Miktarının NO_x Emisyonlarına Etkisi

Tek silindirli motora uyarlanan SCR sistemi deney düzeneğinin genel olarak etkinliğini ve performansını belirlemek amacıyla yapılan ilk deney enjeksiyon miktarı değişiminin NO_x emisyonlarına etkisinin incelenmesi olmuştur. Deneyler farklı DEF enjektör debilerinde en az üçer defa tekrarlanarak her bir debi için azot oksit değerlerinin ortalaması alınarak yapılmıştır. Dizel motorlarda meydana gelen NO_x emisyonları motorun o anki çalışma şartlarına göre çeşitli parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı deneyler sabit motor yükü ve sabit egzoz gazı sıcaklığında yapılmıştır. DEF enjektöründen bir dakika boyunca egzoz gazına farklı debilerde (40, 80, 160, 240, 320, 400 ve 560 mg/s) püskürtme yapılarak emisyon cihazında NO_x emisyonlarının değişimi gözlemlenmiştir.

Şekil 4.1’de, sabit motor yükünde ve egzoz gazı sıcaklığı 330-335 °C aralığında iken farklı debilerde püskürtülen DEF sıvısının NO_x emisyonlarındaki etkisi, enjeksiyon öncesi ve sonrasındaki NO_x değerleri ile gösterilmektedir (Erçek ve Baydır 2023).



Şekil 4.1 Enjeksiyon öncesi ve sonrasındaki NO_x emisyonları.

Egzoz gazı sıcaklığı 330-335 °C’de aralığında sabitlendiği anda emisyon cihazı ile NO_x emisyonları 250,97 ppm olarak ölçülmüştür. Bir dakika boyunca 40 mg/s dizel egzoz sıvısı püskürtüldüğünde NO_x emisyon değeri 212,43 ppm’e düşerek 38,54 ppm’lik fark oluşturmuştur. Yani 40 mg/s püskürtmede NO_x emisyonlarında %15,4’lük bir düşüş elde edilmiştir.

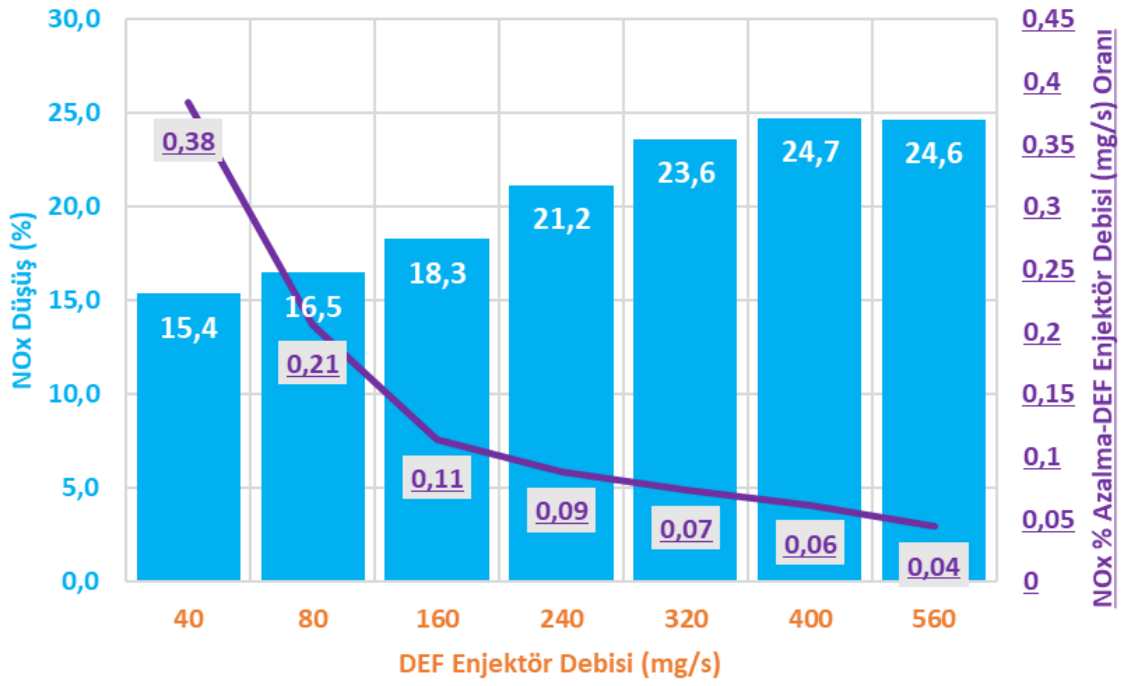
Daha sonra püskürtme etkisi ile düşen NO_x emisyon değeri tekrar eski haline gelmesi beklenmiş ve bu süreçte NO_x değerleri 259 ppm değerine ulaşmıştır. Motor yük ve egzoz gazı sıcaklık koşulları bir önceki şartlarda iken bu sefer debi artırılarak bir dakika boyunca 80 mg/s dizel egzoz sıvısı püskürtülmüş ve NO_x değerleri 216,33 ppm değerlerine düşerek %16,5’lik NO_x düşüşü gözlemlenmiştir.

Aynı motor yükünde tekrarlanan deneylerde 160 mg/s püskürtmede NO_x emisyonlarındaki azalma %18,3, 240 mg/s’lik püskürtmede %21,2 tespit edilmiştir. 40, 80, 160 mg/s’lik püskürtmelerde NO_x değişimleri sırasıyla %15,4, %16,5 ve %18,3 olarak birbirine yakın değerler iken 240 mg/s’lik püskürtmede %21,2’lik bir değişim olduğu

dikkat çekmektedir. Benzer şekilde 320 mg/s'lik püskürtmede NO_x değerlerinde %23,6'lık bir azalma meydana gelmiştir.

İlgili deney şartlarındaki NO_x değişimlerinin püskürtülen sıvıya oranla maksimum ne kadar düşebileceğini gözlemlemek için DEF enjektör debisi artırılarak 400 mg/s püskürtme gerçekleştirilmiş ve NO_x düşüşü %24,7 olarak elde edilmiştir. 320 mg/s'lik değişime oranla %0,9 gibi düşük bir fark elde edilmiştir. Bunun üzerine debi biraz daha artırılarak 560 mg/s'lik bir püskürtme gerçekleştirilmiş ve NO_x düşüşü %24,6 olarak elde edilmiştir. 560 mg/s püskürtmedeki NO_x değişimi 400 mg/s püskürtmedeki NO_x düşüşü ile yaklaşık aynı hatta daha düşük olduğu görülmüştür.

Bir dakika boyunca egzoz hattına DEF enjektöründen püskürtülen 40, 80, 160, 240, 320, 400 ve 560 mg/s debilere göre NO_x emisyonlarındaki düşüş yüzdeleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



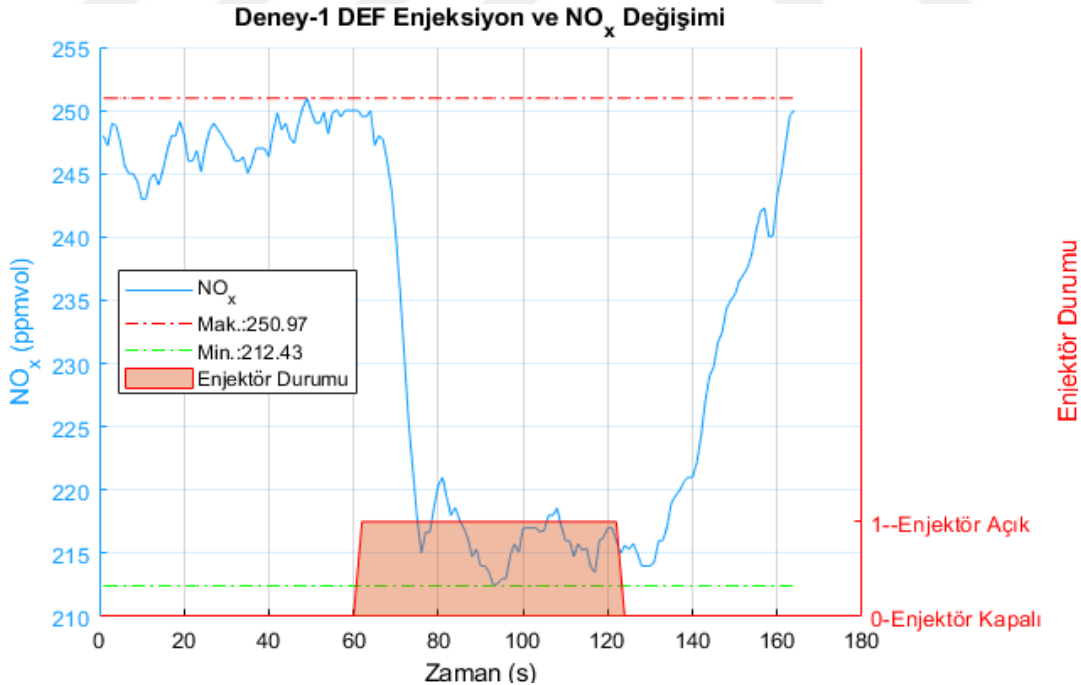
Şekil 4.2 Enjektör debisine göre NO_x düşüşlerinin değişimi.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi püskürtme miktarı artırılmasına rağmen NO_x emisyonunda %25'ten fazla düşüş olmamıştır. SCR sisteminde gerçekleşen reaksiyonlarda DEF püskürtüldüğünde öncelikle amonyak oluşmaktadır. Meydana gelen amonyak (NH₃) azot

oksitler (NO_x) ile reaksiyona girerek zararsız ve daha az zararlı gazlara dönüşmektedir. Burada DEF püskürtülmesi gerekenden az olursa yeterince NO_x dönüşümü gerçekleşmemekte fazla olursa sistemde amonyak birikmesi meydana getirmektedir. Buradan anlaşıldığı üzere kullanılan deney motoru ve uyarlanan SCR sistemine göre ilgili egzoz sıcaklık ve motor çalışma şartlarında 400 mg/s üzerindeki enjektör debilerinde kayda değer bir NO_x düşüşünün olmadığı göstermiştir. Bu durum SCR sistemlerinde DEF tüketimi ve sistemin verimliliği açısından enjektör debi miktarının da önemini göstermektedir.

En az DEF ile en fazla NO_x emisyonu düşüşünün tespiti için NO_x emisyonundaki % azalma ile enjektör debisi (mg/s) oranlanmıştır. Şekil 4.2’de gösterilen bu oranlara göre en yüksek sonuç 0,38 değeri ile 40 mg/s’lik püskürtme yapılan birinci deneyde elde edilmiştir.

40 mg/s’lik püskürtme yapılan 1’inci deneyde zamana göre DEF enjeksiyonuna bağlı olarak NO_x emisyon değişimi Şekil 4.3’de gösterilmektedir.

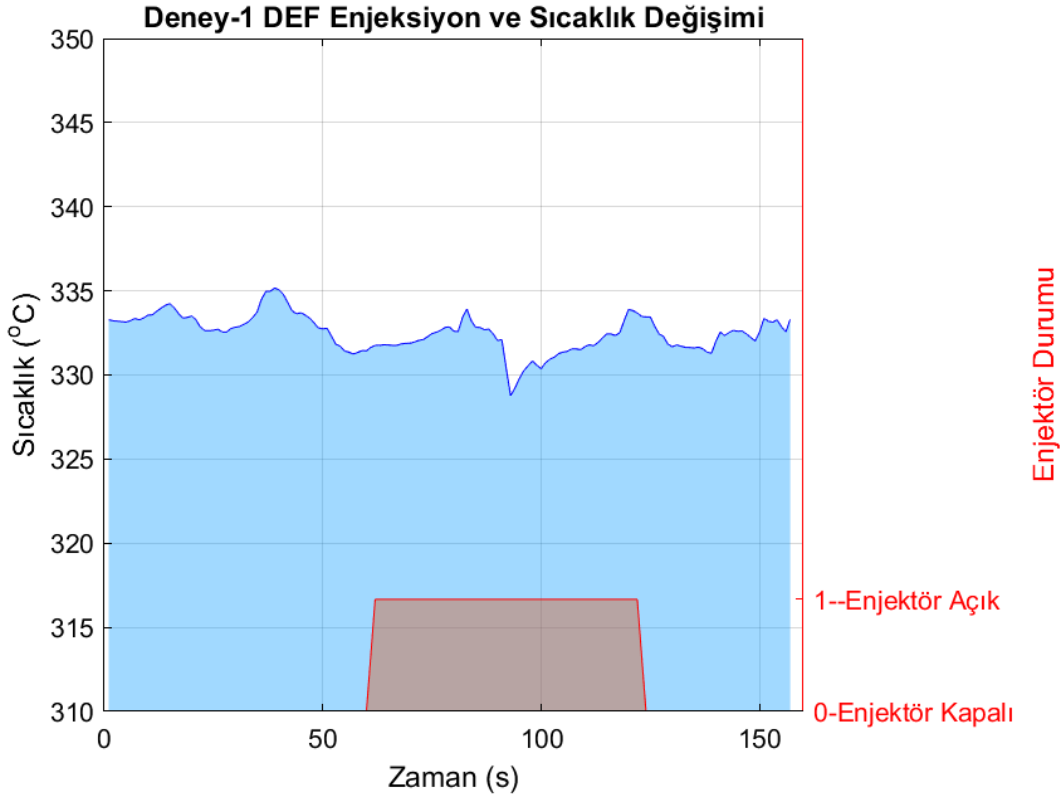


Şekil 4.3 40 mg/s’lik debide DEF enjeksiyon süreci ve NO_x değişimi.

Şekil 4.3’de enjeksiyonun başlamasından kısa bir süre sonra NO_x dönüşümü başlamakta

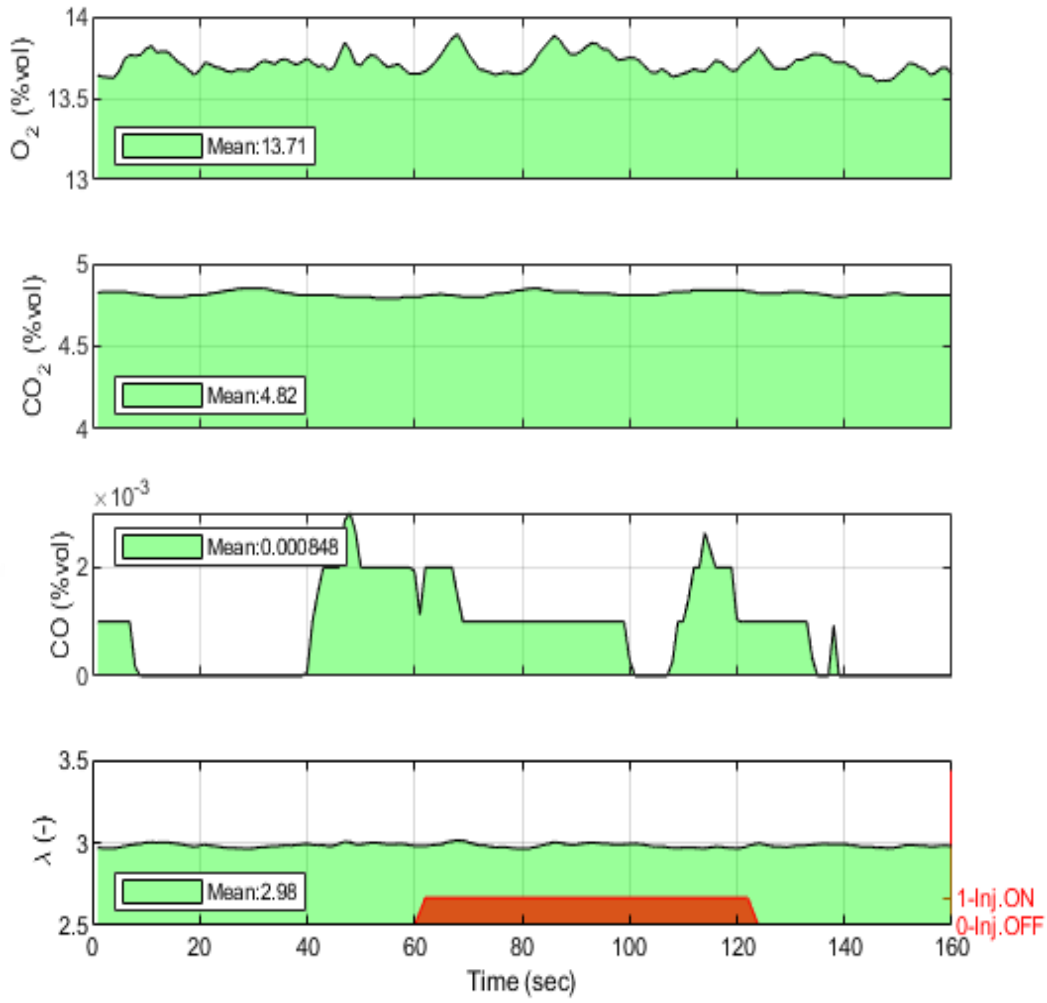
ve enjeksiyon süresince devam etmektedir. Enjeksiyon bitiminde NO_x düşüşü bir süre devam etmekte ve belli süre sonunda artışa geçmektedir.

40 mg/s'lik deney süresince egzoz gazı sıcaklık değişimi Şekil 4.4'de gösterilmektedir.



Şekil 4.4 40 mg/s'lik DEF enjeksiyon süresince sıcaklık değişimi.

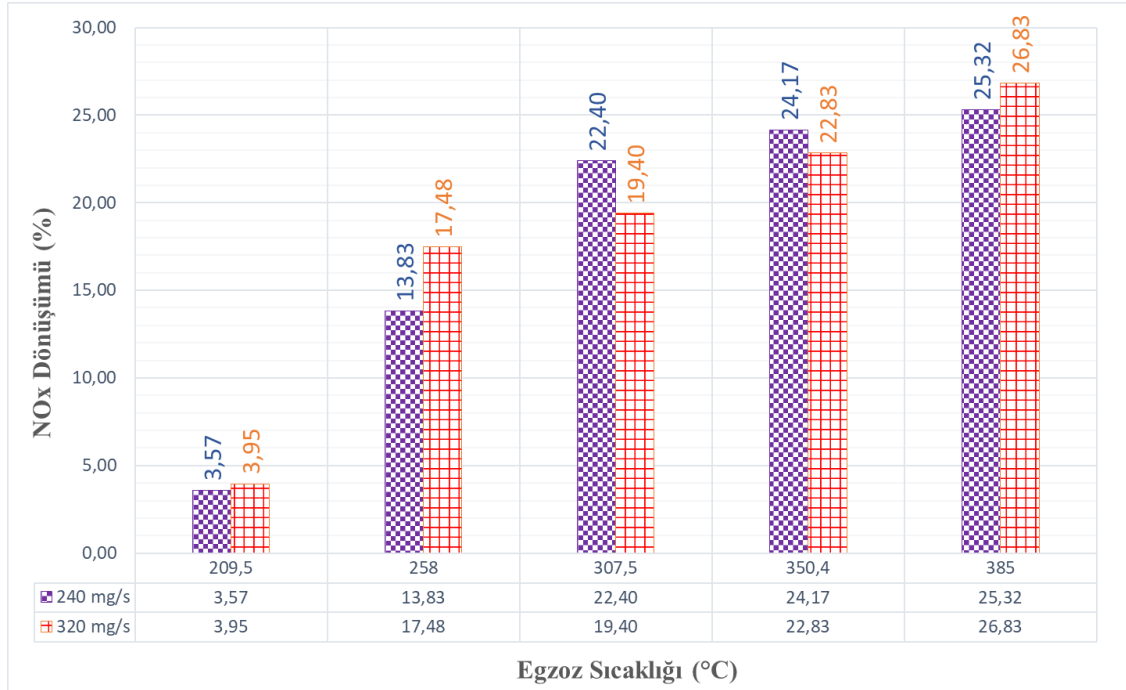
40 mg/s'lik püskürtme yapılan deneydeki O_2 , CO_2 , CO ve λ değişimleri Şekil 4.5'te gösterilmektedir. NO_x emisyonu dışındaki değerlerde DEF enjektör debisi değişimine bağlı gözle görünür bir değişiklik tespit edilememiştir (Erçek ve Baydır 2023).



Şekil 4.5 40 mg/s’lik DEF enjeksiyon süresince diğer emisyon değerlerinin değişimi.

4.2 Egzoz Gazı Sıcaklıklarının NO_x Emisyonlarına Etkisi

Yapılan akademik çalışmalarda SCR sistemlerinde egzoz gazı sıcaklığının NO_x emisyonları üzerine büyük etkilerinin olduğu bilinmektedir. SCR sistemlerinde özellikle düşük sıcaklıklarda NO_x dönüşümü üzerinde çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Proje kapsamında kurulan SCR sistemi deneyleri tek silindirli motorda gerçekleştiği için belli aralıklarda değişen egzoz gazı sıcaklıklarına (210, 258, 308, 350, 385 °C) göre NO_x emisyonlarındaki değişimler incelenmiştir. Egzoz gazı sıcaklığına göre DEF püskürtüldükten sonra NO_x emisyonlarındaki yüzdesel düşüşler Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Egzoz sıcaklığının NO_x emisyonlarına etkisi.

Motor dinamometre vasıtasıyla yüke bindirilerek egzoz gazı 210 °C sıcaklığa getirilmiştir. Bu süreçte egzoz gaz sıcaklığını sabit tutmak için motor o anki yükte tutulmuştur. Bu egzoz gazı sıcaklığında DEF sıvısı 240 ve 320 mg/s olarak iki farklı debide püskürtülerek NO_x değişimi incelenmiştir.

Şekil 4.6 incelendiğinde 210 °C egzoz gazı sıcaklığında 240 mg/s debide DEF püskürtüldüğünde %3,57 NO_x düşüşü gözlemlenirken 320 mg/s debide DEF püskürtüldüğünde %3,95 NO_x düşüşü gözlemlenmiştir. Aynı işlem egzoz gazı sıcaklığı yaklaşık 50 °C artırılarak 258 °C sıcaklıkta DEF püskürtüldüğünde 240 mg/s debide %13,83, 320 mg/s debide %17,48 NO_x düşüşü elde edilmiştir. Egzoz gazı sıcaklığı 210 °C'den 258 °C sıcaklığa çıkartıldığında NO_x % değişimleri 240 ve 320 mg/s'de sırasıyla %10,26 ve %13,53'lık artış gözlemlenmiştir.

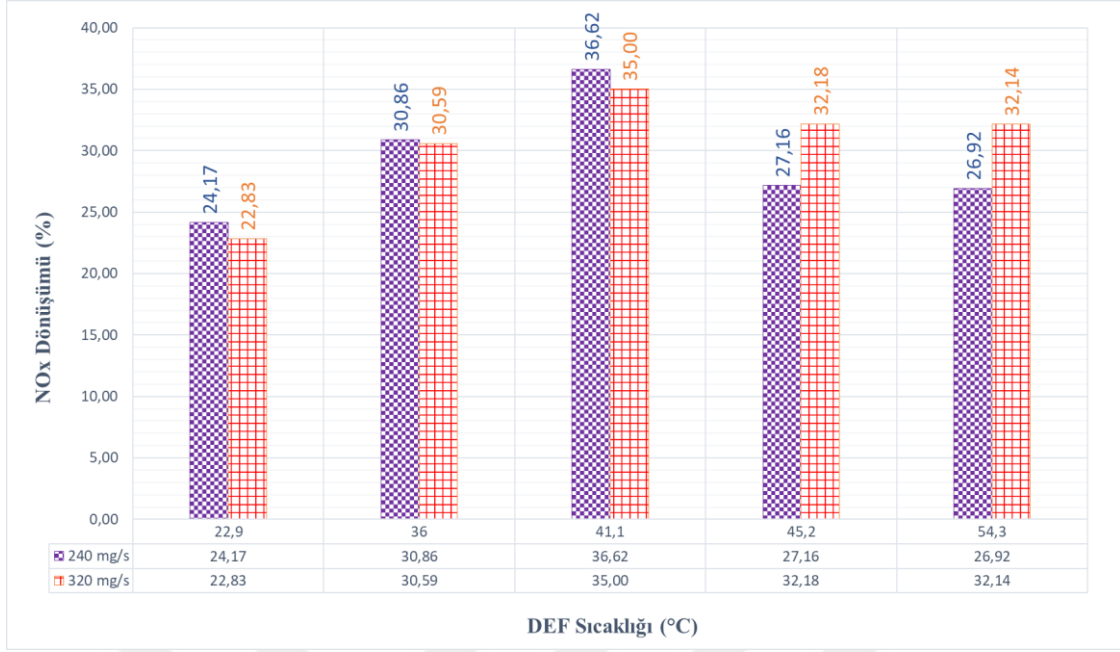
Bu deneyler yine egzoz gazı sıcaklıkları artırılarak 308, 350 ve 385 °C sıcaklıklarda tekrarlanmıştır. DEF sıvısı 240 mg/s debide püskürtüldüğünde ilgili sıcaklıklarda sırasıyla NO_x emisyonlarında %22,40, %24,17 ve %25,32 olurken 320 mg/s debide %19,40, %22,83 ve %26,83'lık değişimler göstermiştir. Dikkat edilirse 308 ve 350 °C sıcaklıklarda 240 mg/s debide, 320 mg/s debiye oranla daha az DEF püskürtülmesine

rağmen daha fazla NO_x değişimi gözlemlenmiştir. Yapılan akademik çalışmalar ve yapılan deneyde egzoz gazı sıcaklığına göre model oluşturularak NO_x dönüşüm verimliliğinin analiz edilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.3 Dizel Egzoz Sıvısı Sıcaklığının NO_x Emisyonlarına Etkisi

SCR sistemlerinde NO_x emisyonlarının azaltılmasına etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler optimum şartlara getirildiğinde SCR verimi ve performansı önemli ölçüde değişmektedir. Bugüne kadar SCR sistemi üzerine yapılan akademik çalışmalarda verimi ve performansına etki eden belli başlı faktörler incelenmiş ve çalışmalar yapılmıştır. SCR sisteminde katalizör önüne püskürtülen DEF sıvısının donma noktasının -11 °C olduğu belirtilmiştir. Bu sıcaklık altında püskürtme yapılamadığı için DEF depolarında bulunan ısıtma sistemi ile sıvı hale getirilmektedir. DEF sıvısının yüksek sıcaklıklarda ise içerisinde bulunan sudan dolayı buharlaşma riski bulunmaktadır. Ancak sistemin çalışmasında önemli bir risk oluşturmamaktadır.

SCR sisteminde DEF sıvısının püskürtüldüğü egzoz gazı sıcaklığının NO_x dönüşümü üzerinde büyük etkisinin olduğu bilinmektedir. Hazırlanan deney düzeneğinde SCR sisteminde egzoz gazı sıcaklığının NO_x emisyonları üzerindeki etkisi bir önceki başlıkta incelenmiştir. Burada gerçekleşen kimyasal olaylar göz önüne alındığında acaba DEF sıvısının sıcaklığının SCR performansına etkisini incelemek için deneyler yapılmıştır. Egzoz gazı sıcaklığı 350 °C’de iken DEF sıvısı farklı sıcaklıklarda iken sisteme püskürtülmüş ve NO_x emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.7’de dizel egzoz sıvısı sıcaklığının NO_x emisyonlarına etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.7 DEF sıcaklığının NO_x emisyonlarına etkisi.

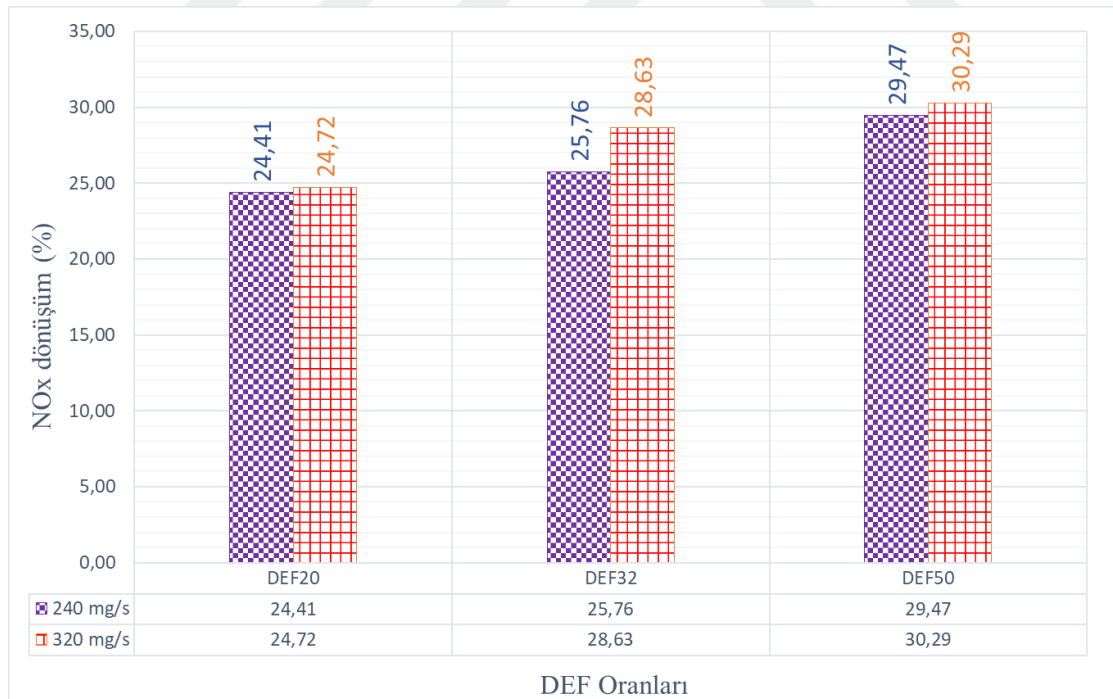
Deneylerde DEF sıcaklığı yaklaşık olarak 23, 36, 41, 45 ve 54 °C sıcaklıklarda iken 240 ve 320 mg/s debilerde olmak üzere iki farklı püskürtme yapılmıştır. Şekil 4.7’de grafik incelendiğinde iki farklı debide de DEF sıcaklığı 41 °C dolaylarında iken maksimum NO_x dönüşümünün olduğu dikkat çekmektedir. DEF sıcaklığı 41 °C altında ve üstünde iken NO_x dönüşümleri yaklaşık olarak birbirlerine yakın değerlerdedir. Bu deneyler 3 kere tekrarlanarak yapıldığında yine 40-45 °C sıcaklıklarında maksimum NO_x dönüşümü olduğu görülmüştür. Yani DEF sıcaklığının belli bir noktaya kadar artırıldığında NO_x dönüşüm verimliliği artmakta ve belli sıcaklıktan sonra NO_x dönüşüm verimliliğinin azaldığı görülmektedir. Her iki debi içinde Şekil 4.7 incelendiğinde NO_x dönüşümlerinde DEF sıcaklığına bağlı olarak çan eğrisi olduğu görülmektedir. Burada DEF sıvısının SCR sisteminde optimum sıcaklık şartlarının belirlenmesi noktasında yeni bir kavram ortaya çıktığı söylenebilir.

4.4 Dizel Egzoz Sıvısı Oranlarının NO_x Emisyonlarına Etkisi

Dizel egzoz sıvısı %32,5 oranında temizlenmiş yüksek saflıkta üre ile %67,5 oranında saf sudan oluşan DEF32 olarak adlandırılan çözeltilidir. Otomotiv dizel motorlarında kullanılan SCR sistemlerinde DEF oranı (DEF32) standardı bu şekilde belirlenmiştir. Bu oranda standartlaştırılmasının en önemli nedeni en düşük donma noktasının bu oranda

olmasıdır. DEF azot oksitleri azaltmak amacıyla otomotiv alanı dışında, yakma tesisleri, endüstriyel fırınlar, fabrikalar ve büyük deniz araçları dizel motorlarında SCR ve SNCR sistemlerinde kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına göre DEF oranları DEF20, DEF32, DEF40 ve DEF50 gibi farklılıklar göstermektedir. DEF20 genelde yakma sistemlerindeki duman kalıntılarından meydana gelen NO_x gazının temizlenmesinde kullanılan %20 oranında üre solüsyonudur. DEF40 ve DEF50 ise endüstriyel fırınlarda, fabrikalarda ve büyük deniz araçları dizel motorlarında yaygın olarak kullanılan %40 ve %50 oranlarında üre solüsyonlarıdır.

Kurulan deney sisteminde DEF32 deneyleri yanında SCR sistemine DEF20 ve DEF50 püskürtülerek NO_x oranlarındaki değişimler incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. DEF20, DEF32 ve DEF50 deneyleri 240 ve 320 mg/s olarak iki farklı debide üçer defa tekrarlanarak denenmiş ve yüzdesel NO_x emisyonları değişimlerinin ortalamaları alınarak kıyaslama yapılmıştır. Deneyler ortalama 345 °C egzoz gazı sıcaklığında gerçekleşmiştir. DEF oranlarına göre NO_x dönüşüm oranları Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 DEF oranlarının NO_x emisyonlarına etkisi.

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi her iki debide de DEF oranları arttıkça NO_x dönüşüm yüzdesi artmıştır. Yalnız grafiğe dikkat edilirse DEF20 ve DEF50’de iki farklı debideki NO_x

dönüşüm oranı yüzdeleri birbirine çok yakın iken DEF32’de bu dönüşüm oranı yüzdesi farkı biraz daha fazladır. DEF20’de 240 mg/s’deki debide NO_x dönüşüm oranı yüzdesi %24,41 iken 320 mg/s’deki debide %24,72’dir. Artan debi miktarına oranla fark % 0,31’dir. Aynı şekilde DEF50’de 240 mg/s’deki debide NO_x dönüşüm oranı yüzdesi %29,47 iken 320 mg/s’deki debide %30,29’ dur. Artan debi miktarına oranla fark % 0,82 olmuştur. DEF32’de debiler arasındaki NO_x dönüşüm oranları yüzdesel farkı %2,87 (28,63-25,76) dir.

DEF20’de debinin artırılmasına rağmen çözültide su oranı fazla olduğu için yeterli buharlaşmanın gerçekleşmemiş olması ve NO_x emisyonunu yok etmek için yeterince amonyak oluşumunun gerçekleşmemesinden kaynaklı NO_x düşüşünde gözle görülür bir değişikliğin olmadığı düşünülebilir. DEF50 oranında ise kimyasal süreçte katalizörde gereğinden fazla üre birikmesinden kaynaklı NO_x dönüşümü oranı yüzdesinin çok fazla değişmediği yorumu yapılabilir. DEF32 oranı donma noktası konusunda avantaj sağlarken aynı zamanda artırılan debiye göre NO_x değişim yüzdesinde de orantılı olarak değişiklik göstermektedir. Bu NO_x değişim yüzdesi motor çalışma şartlarına ve egzoz sıcaklığına göre değişiklik gösterecektir. Otomotiv dizel motorlarında kullanılan DEF oranın (DEF32) bu açıdan da en uygun olduğunu göstermektedir.

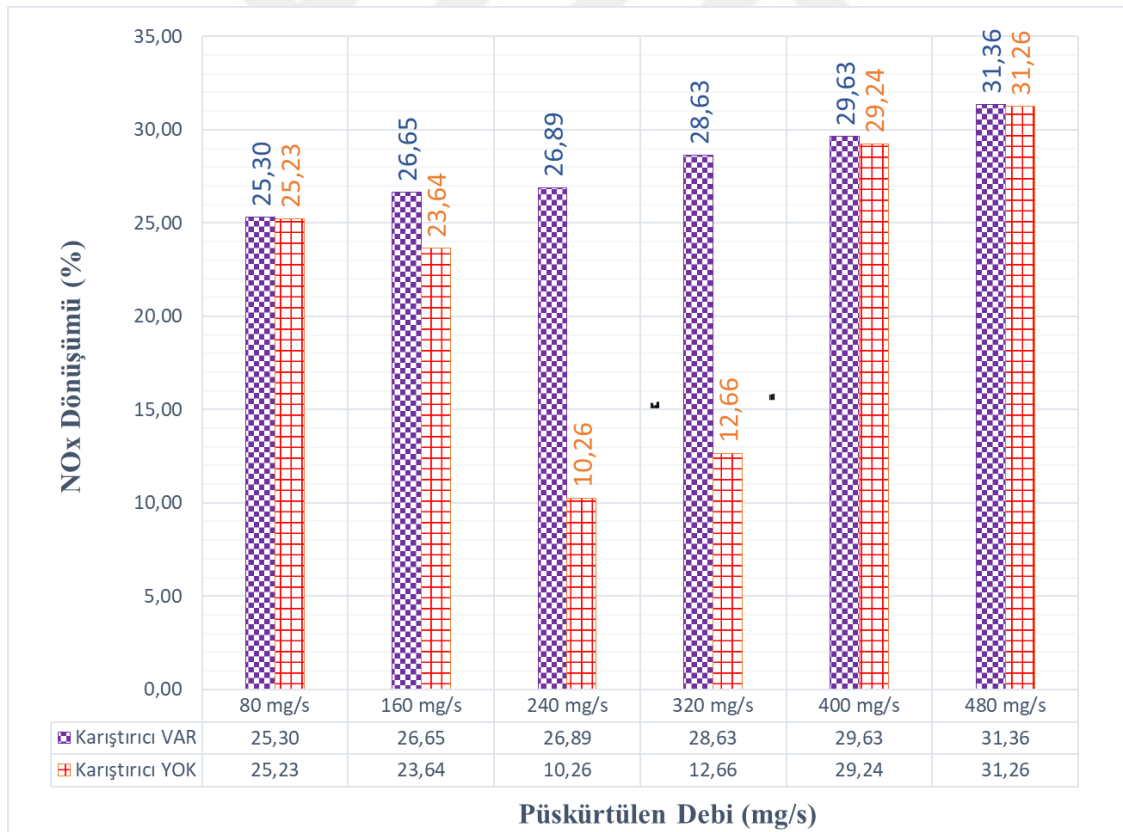
4.5 SCR Karıştırıcısının NO_x Emisyonlarına Etkisi

SCR sistemlerinde katalizör önüne sıcak egzoz gazına püskürtülen DEF, termoliz ve hidroliz reaksiyonlarının gerçekleşmesi ile NH_3 gazı üretimi sağlar. SCR katalizöründe NH_3 gazı ile NO_x emisyonları tepkimeye girerek azot ve oksijene ayrışması gerçekleşir. Üre-SCR reaktörleri yüksek NO_x dönüşüm performansı, düşük NH_3 kayması ve düşük üre tüketimini sağlayacak şekilde kontrol edilir. NO_x dönüşüm verimini en üst düzeye çıkarmak ve NH_3 kaymasını en aza indirmek için püskürtülen DEF sıvısı ile egzoz gazı akışının türbülanslı karıştırılması ve SCR katalizörü önünde homojen bir akış elde edilmesi önemlidir. Özellikle, ürenin NH_3 ’e ayrışma hızını iyileştirmek ve NH_3 ile HNCO ’nun homojen dağılımını sağlamak için sisteme karıştırıcılar eklenmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda motor tipi ve büyüklüğüne bağlı olarak karıştırıcıların

%20 oranında NO_x dönüşümüne etki ettiği görülmüştür. SCR deney sistemi tasarımı bu durumu göz önüne tutarak sisteme portatif takılıp çıkarılabilir statik karıştırıcı eklenmiştir. Karıştırıcı sisteme dahil edildiğinde veya çıkarıldığında SCR sisteminin verimi test edilmiştir.

SCR karıştırıcı performans deneyleri 80, 160, 240, 320, 400 ve 480 mg/s olarak altı farklı debide en az üçer defa tekrarlanarak yapılmış ve yüzdesel NO_x dönüşümlerinin ortalamaları alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Deneylerde ortalama egzoz gazı sıcaklığı 345-350 °C aralığında ve DEF sıcaklığı oda şartlarında gerçekleşmiştir. Sistemde öncelikle karıştırıcı var iken ilgili debilerde ölçümler yapılmış ve karıştırıcı çıkartılıp aynı deneyler aynı şartlarda tekrar edilmiştir. Sistemde karıştırıcı var ve karıştırıcı yok iken NO_x dönüşüm oranları belirlenmiştir. SCR karıştırıcısının NO_x emisyonlarına etkisi Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 SCR karıştırıcısının NO_x emisyonlarına etkisi

Şekil 4.9’da 80 mg/s’lik debide karıştırıcı olduğunda %25,30, olmadığında %25,23’lük bir NO_x dönüşümü gerçekleşmiştir. Arada büyük bir fark olmadığı neredeyse aynı

performansın olduğu söylenebilir. Bunun nedenin püskürtülen miktar çok düşük olduğundan dolayı DEF püskürtüldüğü anda egzoz gazı basıncı ve hızı ile yeterince türbülansın meydana geldiği ve karışımın katalizöre girmeden homojen hale geldiği söylenebilir. Debi miktarı artırılıp 160 mg/s'ye çıkarıldığında karıştırıcı olduğunda %26,65'lik NO_x dönüşümü gerçekleşirken karıştırıcı olmadığına bu oran %23,64'e düşmektedir. Karıştırıcının etkisini görebilmek için debi 240 mg/s'ye çıkarıldığında karıştırıcının varlığında %26,89'luk bir değişim gerçekleşirken karıştırıcı kaldırıldığında bu oran %10,26'lara kadar düşmektedir. Önceki deneyler göz önüne alındığında debi artırılarak 320 mg/s'de aynı deneyler gerçekleştirilmiş ve karıştırıcı var ve yok iken sırasıyla %28,63 ve %12,66'lık bir değişim gerçekleştiği görülmüştür. Özellikle 240 ve 320 mg/s'lik debilerde karıştırıcının SCR performansı üzerinde büyük rol oynadığı görülmektedir. Karıştırıcı olduğunda NO_x dönüşümünde yaklaşık %16'lık bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Debiler artırılarak 400 ve 480 mg/s'de deneyler yapıldığında karıştırıcının etkisinin çok olmadığı görülmüştür. Bu durumun da NH₃ kayması gibi nedenlerden kaynaklandığı söylenebilir. Yani yüksek debilerde olması gerekenden daha fazla DEF püskürtüldüğü için ortamda yeterince NH₃ oluşmuş ve karışım yoğun bir şekilde kendi içinde homojenlik sağlamıştır. SCR sistemine püskürtülecek DEF miktarı için optimum şartlar sağlandığında karıştırıcının büyük ölçüde önem taşıdığı yapılan deneylerde görülmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Dizel motorlarda benzinli motorlardan farklı olarak egzoz gazlarındaki kirleticilerin çevreye ve insan sağlığına karşı riskli olanları, partikül madde (PM) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarıdır. Sadece motor sistemi içerisinde yapılan çalışmalarla PM ve NO_x emisyonları, Euro 6 ve sonrası standartlarındaki sağlanması gereken emisyon değerlerine düşürülememektedir. Bu yüzden otomotiv üreticileri tarafından, egzoz gazı resirkülasyon sistemleri (EGR), dizel partikül filtreleri (DPF), dizel oksidasyon katalizörleri (DOC) ve seçici katalitik indirgeme sistemleri (SCR) gibi emisyon azaltıcı sistemler geliştirilmeye devam etmektedir (Gall 2015).

Bu sistemlerden NO_x emisyon standartlarını sağlama konusunda en yaygın olarak kullanılanı SCR sistemidir. SCR sisteminde, katalizör yanı sıra dizel egzoz sıvısı kullanılması ek sistemler gerektirmektedir. Euro standartlarına göre NO_x emisyonlarının ilerleyen zamanlarda istenilen emisyon değerlerini sağlayabilmesi için SCR sistemlerinin verimliliğinin artırılmasına ihtiyaç duyulacaktır. Ayrıca SCR sisteminin doğru ve düzenli bir şekilde kontrol edilebilmesi ve istenilen emisyon değerlerinin sağlanabilmesi gerekmektedir (Erçek ve Baydır 2023). Yapılan akademik çalışmalarda sistemin verimliliği açısından önemli rolü olan katalizör tipi, egzoz sıcaklığı ve püskürtülen DEF miktarı gibi kontrol edilmesi gereken çeşitli parametreler bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında yapılan deneyler sonucunda SCR sistemi üzerinde bazı parametrelerin NO_x emisyonlarına etkisi incelenmiştir. SCR sisteminin gerçek çalışma koşullarında test edilmesi amacıyla, Afyon Kocatepe Üniversitesi İYM Laboratuvarında özel bir deney düzeneği kurulmuştur. Deney motoruna özel bir egzoz sistemi tasarlanarak motora montajı sağlanmıştır. SCR sisteminin kontrol edilmesi amacıyla elektronik kontrol sistemi ve yazılımı gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım ile sistemin öncelikle enjektör püskürtme karakteristiği elde edilmiştir. Bu karakteristik ile sisteme püskürtülecek DEF miktarının maksimum (üst sınır) ve optimum debilerini belirlemek amacıyla püskürtülen debi miktarına göre NO_x emisyonları değişimini gözlemlemek için deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bulgular kısmında püskürtülen DEF miktarının NO_x emisyonlarına etkisini incelemek için DEF enjektöründen farklı debilerde (40, 80, 160, 240, 320, 400 ve 560 mg/s) püskürtme yapılarak NO_x emisyonlarındaki düşüş gözlemlenmiştir. Her bir debide NO_x emisyon düşüşleri incelendiğinde 40 mg/s 'den 400 mg/s'ye kadar artan debiye oranla yüzdesel olarak NO_x emisyonundaki dönüşümler orantılı olarak artış göstermiştir. 40 mg/s'de NO_x düşüş oranı %15,4 iken 400 mg/s'de %24,7 olarak gözlemlenmiştir. Debi 560 mg/s'ye artırıldığında NO_x düşüş oranı %24,6 olarak ölçülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalarda SCR sistemlerinin boyutlarına göre püskürtülen DEF gerekenden az olursa yeterince NO_x dönüşümünün olmadığı gereğinden fazla olursa sistemde istenmeyen amonyak salınımının gerçekleştiği bilinmektedir. Buradan anlaşıldığı üzere kurulan deney sistemine göre ilgili egzoz sıcaklık ve motor yüküne göre 560 mg/s üzerindeki enjektör debilerinde 400 mg/s'deki debiye oranla kayda değer bir NO_x düşüşü elde edilemediği görülmektedir. Sonuç olarak kurulan deney sisteminde yaklaşık 500 mg/s üzerindeki debilerde yeterince NH_3 üretilmediği veya NH_3 kayması olayının gerçekleştiği söylenebilir. Yapılan deneylerde O_2 , CO_2 , CO ve λ değişimlerinde incelenmiştir. NO_x dışındaki değerlerde DEF enjektör debisi değişimine bağlı küçük dalgalanmalar olsa da gözle görünür bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

Deney sisteminde yapılan bir diğer çalışma ise SCR sisteminde farklı egzoz gazı sıcaklıklarında NO_x emisyonları değişimleri incelenmiştir. Deney şartları önceki yapılan enjeksiyon miktarı deneyleri göz önüne alınarak burada da 240 ve 320 mg/s olarak iki farklı debide gerçekleşmiştir. Egzoz sıcaklıkları 210, 258, 308, 350 ve 385 °C'lerde iki farklı debide deneyler yapılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda olduğu gibi iki farklı debide de sıcaklık artışı ile birlikte NO_x emisyon dönüşümlerinde de artışlar olmuştur. Ancak bu deneylerde bazı sıcaklıklarda dikkat çeken nokta 240 mg/s debideki NO_x dönüşümü 320 mg/s'dekine göre daha fazla gerçekleşmiştir. Örneğin 308 °C'de 240 mg/s debideki NO_x düşüşü %22,40 iken 320 mg/s debide % 19,40 olmuştur. Benzer şekilde 350 °C'de 240 mg/s debideki NO_x düşüşü %24,17 iken 320 mg/s debide % 22,83'tür. Seçici katalitik indirgeme sistemleri dizel araçlardan kaynaklanan azot oksit (NO_x) emisyonlarını azaltmak için en yaygın kullanılan teknik olduğu açıklanmıştır. Ancak, SCR sistemindeki aynı enjeksiyon yöntemi ve aynı çalışma modunda bile NO_x emisyonlarında önemli farklılıklar göstermektedir. Bu tür bir heterojenlik, emisyon

envanterlerinin geliştirilmesinde ve emisyon düşüşlerinin değerlendirilmesinde zorluklar doğurur. Mevcut çalışmalar, bu farklılıkların egzoz sıcaklığı ile ilgili olduğunu göstermektedir (Wang vd. 2019). SCR sistemlerinde verimlilik açısından egzoz gazı sıcaklığı ve üre tüketim modellerinin geliştirilmesi daha iyi bir NO_x dönüşümü ve daha düşük DEF tüketiminin sağlanabileceğini göstermektedir.

SCR sisteminde egzoz gazı sıcaklığının NO_x emisyonlarının düşürmesi üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir ve yukarıda açıklanmıştır. Bu olayda DEF sıvısının sıcak egzoz gazı üzerine püskürtülmesi ile meydana gelen kimyasal tepkimelerin sıcaklıklardan etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumu göz önüne alarak sabit egzoz gazı sıcaklığında farklı sıcaklıklardaki DEF sıvısının NO_x emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Egzoz gazı sıcaklığı 350 °C’de iken DEF sıcaklığı 23, 36, 41, 45 ve 54 °C sıcaklıklarda 240 ve 320 mg/s olarak iki farklı debide sisteme püskürtülmüştür. Her iki debide de DEF sıcaklığı arttıkça NO_x dönüşüm oranı önce artmış daha sonra tekrar düşme görülmüştür. Örneğin 240 mg/s’deki debide DEF sıcaklıkları 23, 36, 41, 45 ve 54 °C iken NO_x dönüşüm oran yüzdeleri sırasıyla %24,17, %30,86, %36,62, %27,16, %26,92 olarak ölçülmüştür. Yani belirtilen DEF sıcaklıklarına göre NO_x dönüşüm yüzdeleri ters çan eğrisi grafiği oluşturmuştur. Her iki debi içinde DEF sıcaklığı 41 °C dolaylarında iken maksimum NO_x dönüşümünün olduğu dikkat çekmektedir. Bu deneysel çalışma bize SCR sisteminin verimliliğinde püskürtülen DEF miktarı yanı sıra DEF sıcaklığının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

SCR sistemlerinde katalizör önüne püskürtülen DEF, kullanım alanlarına göre DEF20, DEF32, DEF40 ve DEF50 gibi farklı oranlarda olmaktadır. Otomotiv dizel motorlarında kullanılan SCR sistemlerinde en düşük donma noktasının üre oranının %32,5 olduğu DEF32 standardında belirlenmiştir. Otomotiv dizel motorlarında diğer DEF oranlarının kullanılmasının NO_x emisyonlarındaki değişimlerini gözlemlemek ve karşılaştırma yapmak için kurulan deney sisteminde DEF32 yanında DEF20 ve DEF50 deneyleri yapılmıştır. Deneyler egzoz gazı sıcaklığı sabit (345 °C) iken iki farklı debide (240 ve 320 mg/s) gerçekleşmiştir. Sonuçlara bakıldığında DEF oranı içerisindeki üre oranı arttıkça her iki debide de NO_x dönüşüm oranı yüzdelinde artış görülmüştür. 320 mg/s’deki debide DEF20, DEF32 ve DEF50 oranlarındaki NO_x dönüşüm oranı yüzdeleri sırasıyla

%24,72, %28,63 ve %30,29 olarak ölçülmüştür. Ancak DEF20 ve DEF50 oranlarında debi miktarı artmasına rağmen NO_x dönüşüm oranları arasındaki yüzdesel fark sırasıyla %0,31 ve %0,82 iken DEF32’de bu değişim %2,87 olarak elde edilmiştir. Bunun nedenin debi artırılmasına rağmen DEF20’de kimyasal süreçte yeterince amonyak meydana gelmemesi DEF50’de ise fazla amonyak birikimi gibi nedenden kaynaklandığı belirlenmiştir. Otomotiv dizel motorlarında kullanılan DEF32 oranı donma noktası konusunda avantaj sağlarken aynı zamanda artırılan debiye göre NO_x değişim yüzdesinde de orantılı olarak değişiklik göstermesi açısından da uygun olduğu bulunmuştur.

SCR sistemlerinde püskürtülen DEF sıvısı ile egzoz gazı akışının homojen karışımının sağlanması katalizör önünde düzgün dağılımlı bir akış elde edilmesi önemlidir. Özellikle, ürenin NH_3 ’e ayrışma hızını iyileştirmek ve NH_3 ile izosiyanik asidin (HNCO) homojen dağılımını sağlamak için sisteme karıştırıcılar eklenmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda motor tipi ve büyüklüğüne bağlı olarak karıştırıcıların %20-30 oranlarında NO_x dönüşümüne etki ettiğini göstermiştir. Kurulan SCR deney sistemi tasarımında bu durumu göz önüne tutarak sisteme portatif takılıp çıkarılabilir statik karıştırıcı eklenmiştir. Deneyler ortalama egzoz gazı sıcaklığı 345-350 °C aralığında ve DEF sıcaklığı oda şartlarında iken 80, 160, 240, 320, 400 ve 480 mg/s olarak altı farklı debide gerçekleştirilmiştir. Bu debi değerlerinde sistemde karıştırıcı var ve yok iken NO_x dönüşüm değerleri arasındaki yüzdesel farklar sırasıyla %0,07, %3,01, %16,63, %15,97, %0,39 ve %0,1 olarak ölçülmüştür. Özellikle 240 ve 320 mg/s’lik debilerde karıştırıcının SCR performansı üzerinde büyük etkisinin olduğu görülmektedir. Karıştırıcı olduğunda NO_x dönüşümünde yaklaşık %17’lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Abdulhamid ve ark. SCR katalizör girişine bıçaklı karıştırıcı ve kanatlı karıştırıcı olmak üzere iki farklı tipte statik karıştırıcı yerleştirerek dört farklı konfigürasyonda deneyler yaparak karşılaştırmışlardır. En iyi üre dönüşüm veriminin, her iki mikserinde sisteme kurulduğunda %91,7’lik bir değer elde edildiğini, tek başına kanatlı mikserin ise bıçaklı miksere göre %10,86 daha yüksek üre dönüşüm verimliliği sağladığını ortaya koymuşlardır (Abdulhamid vd. 2017). Düşük debilerde arada büyük bir fark olmadığı püskürtülen miktarın çok düşük olduğundan püskürtülen DEF’in egzoz gazı ile yeterince homojen karıştığı söylenebilir. Yüksek debilerde ise gereğinden fazla DEF püskürtüldüğü için ortamda yeterince NH_3 oluşmuş

ve karışım yoğun bir şekilde kendi içinde homojenlik sağlamıştır. SCR sistemine püskürtülecek DEF miktarı için optimum şartlar sağlandığında karıştırıcının büyük ölçüde önem taşıdığı yapılan deneylerde görülmektedir.

Yapılan deneysel çalışma ve literatürdeki akademik çalışmalar incelendiğinde SCR sistemlerinde verimliliği artırmak için aşağıdaki öneriler dikkate alınmalıdır;

- ✓ SCR teknolojisinde enjeksiyon miktarının artması genel olarak NO_x dönüşüm verimliliğini artırdığı fakat belli miktardan sonra sabitlendiği görülmektedir.
- ✓ SCR sistemlerinde amonyak kayması diye tabir edilen amonyak birikimini önlemek için püskürtülmesi gereken miktarın doğru bir şekilde belirlenmesi gerektiği ve katalizörde tıkanıklığın önlenerek aynı zamanda NH₃ emisyonun azaltılması dikkate alınmalıdır.
- ✓ SCR sisteminde egzoz sıcaklığının NO_x dönüşümüne büyük etkisinin olduğu ancak bunun yanı sıra egzoz sıcaklığına göre DEF debisinin ayarlanması göz önüne tutulması gerektiğini göstermektedir.
- ✓ SCR sisteminde Egzoz gazı sıcaklığına göre NO_x dönüşümü planlanırken aynı zamanda DEF sıvısı sıcaklığının da SCR verimi üzerindeki etkisinin önemli olduğu anlaşılmaktadır.
- ✓ Otomotiv dizel motorlarında SCR sisteminde farklı DEF oranlarının (DEF20, DEF32, DEF50) kullanılması neticesinde SCR verimi ve kullanım şartları açısından en iyi oran DEF32 olmaktadır.
- ✓ SCR sistemlerinde Optimum püskürtme miktarları sağlandığında NO_x dönüşüm oranında karıştırıcıların gözle görülür bir verim artışı olduğu görülmektedir. Burada karıştırıcı tasarımları değiştirilerek verimin daha da artırılacağı anlaşılmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Abdulhamid J, Bhanuprakash T V K, Rao P V J M, 2017, Numerical Analysis of the Effect of Static Mixer on SCR System Performance of Marine Diesel Engine, *International Journal of Engineering and Techniques*, 3, 183–188.
- Ali N, Islam F, 2020, The Effects of Air Pollution on COVID-19 Infection and Mortality- A Review on Recent Evidence, *Frontiers in Public Health*, 8, Article number 580057, doi: 10.3389/fpubh.2020.580057.
- Anar N, Bayram P, 2018, Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) Sistemi ve Araçlara Adaptasyonu, *Politeknik Dergisi*, 21, 941–950, doi: 10.2339/politeknik.403973.
- Antoniotti M, 2017, Optimization of the AdBlue Evaporation Module for Scania V8 Engines KTH Royal Institute of Technology, School of Industrial Engineering and Management, M.Sc. Thesis, 147p.
- Avolio G, Brück R, Grimm J, Maiwald O, Rösel G, Zhang H, 2018, Super Clean Electrified Diesel : Towards Real NO_x Emissions below 35 mg/km, 27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology Aachen.
- Bosch R, 2006, Diesel-Engine Management - 4th, Wiley–Blackwell, 504p, Germany.
- Brack W, Heine B, Birkhold F, Kruse M, Deutschmann O, 2016, Formation of Urea-Based Deposits in an Exhaust System: Numerical Predictions and Experimental Observations on a Hot Gas Test Bench, *Emission Control Science and Technology* *Emission Control Science and Technology*, 2, 115–123. doi: 10.1007/s40825-016-0042-2.
- Braun P, 2019, Investigations on the Reduction of Engine-Nitrogen-oxide Emissions at Low Temperatures University of Regensburg, Faculty of Chemistry and Pharmacy, Ph.D. Thesis, 139p. doi: 10.5283/epub.40737.
- Braun P, Rabl H, Matysik F, 2019, Investigations on the Liquid-Phase Decomposition of AdBlue Urea for the Selective Catalytic Reduction Process, *Chemie Ingenieur Technik*, 91, 961–968. doi: 10.1002/cite.201800055.
- Demirtürk D, 2021, Sürdürülebilir Ulaşım da Sera Gazı Etkisini Azaltmaya Yönelik

Çalışmalar, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9, 1080–1092. doi: 10.21923/jesd.932385.

Elfeky A, 2018, Methods of Calibration for Different Functions of a SCR-system, KTH Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, M.Sc. Thesis, 74p.

Erçek E, 2011, Diesel Araçlarda Biyomotorin Karışımlarının Yanmasının ve Egzoz Gazı Ürünlerinin Modellenmesi Üzerine Bir Araştırma, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s.

Erçek E, Baydır Ş A, 2023, A Study on the Effect of Injection Amount on NO_x Emissions in the Selective Catalytic Reduction (SCR) System in a Single Cylinder Diesel Engine, International Journal of Automotive Science and Technology, 7, 37–43. doi: 10.30939/ijastech.1217346.

Fayyazbakhsh A, Bell M L, Zhu X, Mei X, Koutný M, Hajinajaf N, vd., 2022, Engine Emissions with Air Pollutants and Greenhouse Gases and Their Control Technologies, Journal of Cleaner Production Elsevier Ltd, 376, 134260. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134260.

Gall M, 2015, Study of SCR Using Cu-Zeolite catalysts on a Light-Duty Diesel Engine Under Steady State and Transient Conditions Coventry University, Unpublished PhD Thesis, 91p.

Habchi C, Nicolle A, Gillet N, 2015, Numerical Study of Urea-Water Solution Injection and Deposits Formation in an SCR System, ICLASS 2015, 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems Rueil-Malmaison, doi: 10.13140/RG.2.1.3171.2481.

Holmström T, 2014, Investigation of Urea Deposit Formation in Vehicles with Selective Catalytic Reduction System Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics Division of Combustion, M.Sc. Thesis, 58p.

Indrajit N Y, 2011, AdBlue: An Overview, International Journal of Environmental Sciences, 2, 756–764.

- Jung Y, Pyo Y D, Jang J, Kim G C, Cho C P, Yang C, 2019, NO, NO₂ and N₂O Emissions Over a SCR Using DOC and DPF Systems with Pt Reduction, *Chemical Engineering Journal Elsevier*, 369, 1059–1067. doi: 10.1016/j.cej.2019.03.137.
- Kannepalli S, 2017, Mathematical Methods for Design of Zone Structured Catalysts and Optimization of Inlet Trajectories in Selective Catalytic Reduction (SCR) and Three Way Catalyst (TWC), Von der KIT-Fakultät für Chemie und Biowissenschaften des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Ph.D. Thesis, 114p.
- Kurzydym D, Żmudka Z, Perrone D, Klimanek A, 2022, Experimental and Numerical Investigation of Nitrogen Oxides Reduction in Diesel Engine Selective Catalytic Reduction System, *Fuel*, 313, 122971. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122971.
- Kuttiapurath J, Patel V K, Pathak M, Singh A, 2022, Improvements in SO₂ Pollution in India: Role of Technology and Environmental Regulations, *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 78637–78649. doi: 10.1007/s11356-022-21319-2.
- Lakshminarayanan P A, Aghav Y V, 2010, Modelling Diesel Combustion, Leckie F A (Ed.), *Mechanical Engineering Series*, Springer, Netherlands, 305p, Dordrecht, doi: 10.1007/978-90-481-3885-2.
- Latha H S, Prakash K V, Veerangouda M, Maski D, Ramappa K T, 2019, A Review on SCR System for NO_x Reduction in Diesel Engine, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 1553–1559.
- Lisi L, Landi G, Di Sarli V, 2020, The Issue of Soot-Catalyst Contact in Regeneration of Catalytic Diesel Particulate Filters: A Critical Review, *Catalysts*, 10, 1307, doi: 10.3390/catal10111307.
- Malbec L M, Habchi C, Bohbot J, Drennan S, Quan S, Maciejewski D, 2019, On the Behaviour of Urea on a Heated Wall A Revealed Leidenfrost Like Temperature During Urea Thermolysis, *ILASS–Europe 2019, 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2-4 September 2019, Paris. Available at: <https://ilass19.sciencesconf.org/browse/author?authorid=678869>.
- Mazzoleni C, Moosmüller H, Kuhns H D, Keislar R E, Barber P W, Nikolic D, vd., 2004,

- Correlation Between Automotive CO, HC, NO, and PM Emission Factors From On-Road Remote Sensing: Implications for Inspection and Maintenance Programs, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Pergamon, 9, 477–496. doi: 10.1016/j.trd.2004.08.006.
- Mert M, Aykan H, 2022, Büyüme ve Emisyonlar Arasındaki Asimetrik Nedensellik Analizi: Türkiye Örneği, *Ekoist: Journal of Econometrics and Statistics*, 36, 235–255. doi: 10.26650/ekoist.2022.36.1077521.
- Reşitoğlu İ A, 2016, Dizel Motorlarda Kirletici Emisyonların Kontrol Edilmesine Yönelik Fe₂O₃ Esaslı Katalizörlerin Kullanıldığı DOC ve SCR Sistemlerinin Geliştirilmesi Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 123s.
- Reşitoğlu İ A, 2018, NO_x Pollutants from Diesel Vehicles and Trends in the Control Technologies, Viskup, R. (ed.) Austria: IntechOpen, 200p.
- Reşitoğlu İ A, Keskin A, 2017, Hydrogen Applications in Selective Catalytic Reduction Of NO_x Emissions from Diesel Engines, *International Journal of Hydrogen Energy* Elsevier Ltd, 42, 23389–23394. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.011.
- Rogóż R, Kapusta Ł J, Bachanek J, Vankan J, Teodorczyk A, 2020, Improved Urea-Water Solution Spray Model for Simulations of Selective Catalytic Reduction Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Pergamon, 120, 109616. doi: 10.1016/j.rser.2019.109616.
- Sassykova L R, Aubakirov Y A, Sendilvelan S, Tashmukhambetova Z K, Faizullaeva M F, Bhaskar K, vd., 2019, The Main Components of Vehicle Exhaust Gases and Their Effective Catalytic Neutralization, *Oriental Journal of Chemistry*, 35, 110–127. doi: 10.13005/ojc/350112.
- Semakula M, Inambao P F, 2018, The Formation, Effects and Control of Oxides of Nitrogen in Diesel Engines, *International Journal of Applied Engineering Research*, 13, 3200–3209, Available at: <http://www.ripublication.com>3200.
- Shin J, Choi G, Hong S, 2022, Vanadium Catalyst Based on a Tungsten Trioxide Structure Modified with Antimony in NH₃-Selective Catalytic Reduction for Improved Low-Temperature Activity, *Applied Surface Science* Elsevier B.V., 574, 151571, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151571.

- Sorrels J L, Randall D D, Schaffner K S, Fry C R, 2019, Selective Catalytic Reduction, 107p, https://www3.epa.gov/ttn/ecas/docs/SCRCostManualchapter7thEdition_2016.pdf
- Stelzer D M, 2014, Design and Evaluation of an Improved Mixer for a Selective Catalytic Reduction System University of Toronto, Graduate Department of Mechanical Engineering & Industrial Engineering, M.Sc. Thesis, 68p.
- Thangavel P, Park D, Lee Y C, 2022, Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview, International Journal of Environmental Research and Public Health, 19, 7511. doi: 10.3390/ijerph19127511.
- TÜİK, 2022, Turkish Greenhouse Gas Inventory Report 1990-2020, Available at: <https://iklim.gov.tr/db/turkce/dokumanlar/turkish-greenhouse--8230-63-20220921094441.pdf>
- Uyumaz A, Boz F, Yılmaz E, Solmaz H, Polat S, 2017, Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler, 4. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal ve Teknik Bilimler Kongresi, Burdur, 965–980.
- Verma P, Zare A, Jafari M, Bodisco T A, Rainey T, Ristovski Z D, vd., 2018, Diesel Engine Performance and Emissions with Fuels Derived from Waste Tyres, Scientific Reports, Springer US, 8, 2457. doi: 10.1038/s41598-018-19330-0.
- Vignesh R, Ashok B, 2020, Critical Interpretative Review on Current Outlook and Prospects of Selective Catalytic Reduction System for De-NO_x Strategy in Compression Ignition Engine, Fuel Elsevier, 276, 117996.
- Wang X, Song G, Wu Y, Yu L, Zhai Z, 2019, A NO_x Emission Model Incorporating Temperature for Heavy-Duty Diesel Vehicles with Urea-SCR Systems Based on Field Operating Modes, Atmosphere, 10, 337. doi: 10.3390/atmos10060337.
- Zhang Y, Yang S, Zhu X, Xu X, Huang F, Yang Z, vd., 2022, Effects of Sulfation on Hematite for Selective Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides with Ammonia, Journal of Colloid and Interface Science, Elsevier Inc., 606, 1445–1456. doi: 10.1016/j.jcis.2021.08.088
- Zhang Z, Li J, Tian J, Zhong Y, Zou Z, Dong R, vd., 2022, The Effects of Mn-based Catalysts on the Selective Catalytic Reduction of NO_x with NH₃ at Low

Temperature: A review, Fuel Processing Technology, 230, 107213. doi: 10.1016/j.fuproc.2022.107213.

Zhu Y, Zhou W, Xia C, Hou Q, 2022, Application and Development of Selective Catalytic Reduction Technology for Marine Low-Speed Diesel Engine: Trade-Off among High Sulfur Fuel, High Thermal Efficiency, and Low Pollution Emission, Atmosphere, 13, 731. doi: 10.3390/atmos13050731.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.mctrux.com/check-out--DPF-FAQs>, 27.11.2022
- 2- <https://sunpettr.com.tr/urun/opet-adbluer-9>, 22.09.2021
- 3- <https://shellcarcareproducts.com/files/products/tds/shell-adblue-tds-tr.pdf>, 13.12.2022
- 4- https://www.bp.com/content/dam/bp/countrysites/tr_tr/turkey/home/%C3%BCr%C3%Cn-ve-hizmetler/pdf/%C3%BCr%C3%BCng%C3%BCvenlilikformlar%C4%B1/adblue.pdf, 13.12.2022
- 5- <https://www.fluidlife.com/resource-center/def-specifications-iso-22241/>, 13.12.2022
- 6- <https://pdf4pro.com/amp/view/adblue-m-6221-e-11-2006-28bc27.html>, 11.06.2023

Yayınları (SCI ve diğer) :

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

Erçek E, Baydır Ş A, 2023, A Study on the Effect of Injection Injection Amount on NO_x Emissions in the Selective Catalytic Reduction (SCR) System in a Single Cylinder Diesel Engine, International Journal of Automotive Science and Technology, 7, 37–43.

Yavuz İ, Erçek E, Yuran F, 2021, Ulaştırma Sektöründe İmdat Çekici Tasarımı ve 3B Yazıcı ile Üretimi, International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 5, 46–49.

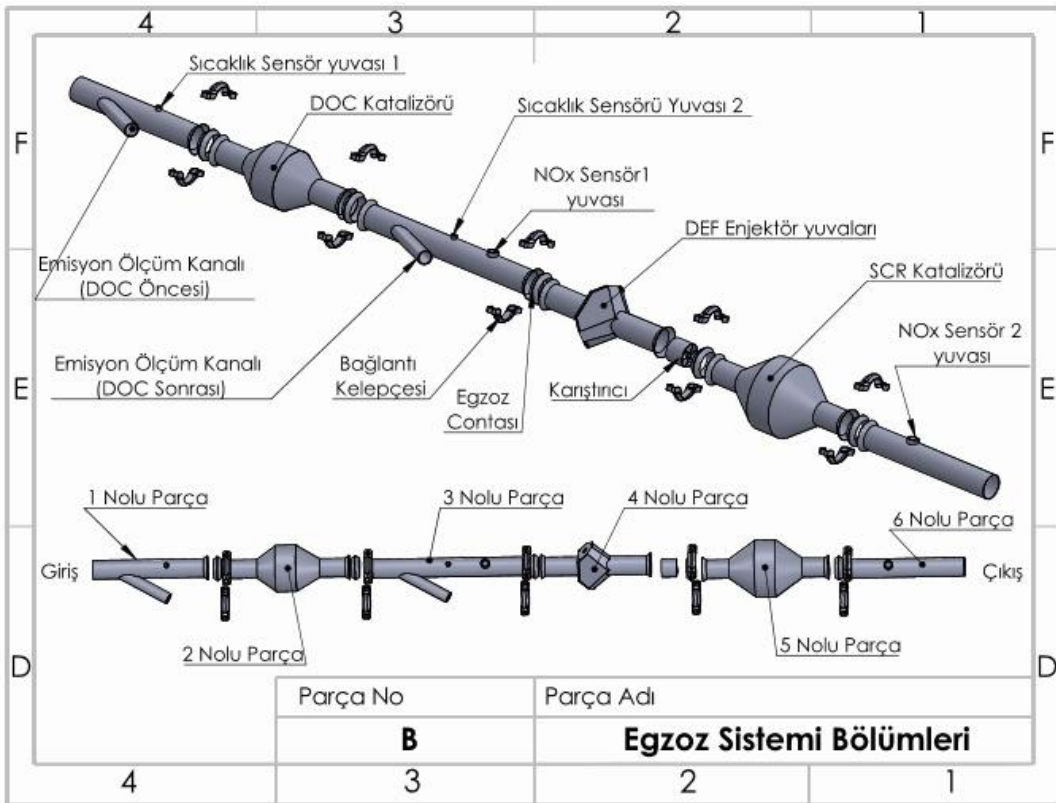
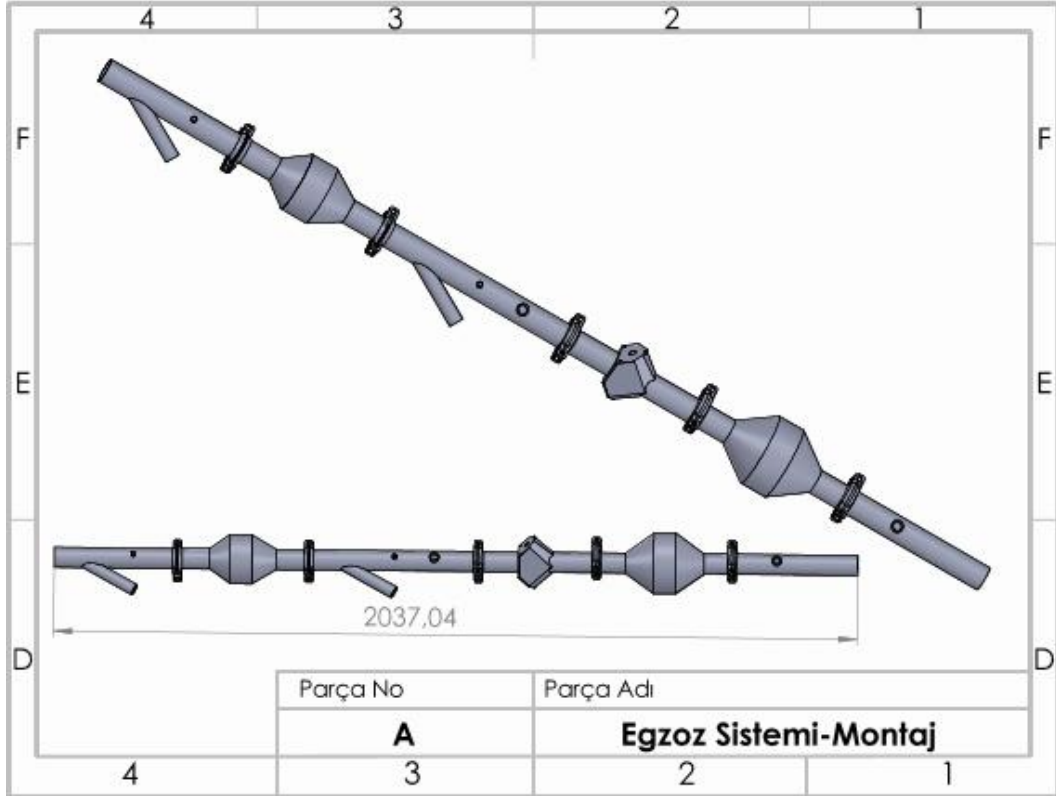
Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

Mutlu İ, Yavuz İ, Erçek E, Çetinkaya S, Yıldırım A, Farklı Malzemeden Yapılmış Çarpışma Kutularının Karşılaştırılması, International Engineering and Technology Symposium (İETS) 2018, 3-5 Mayıs, Batman, 880-883.

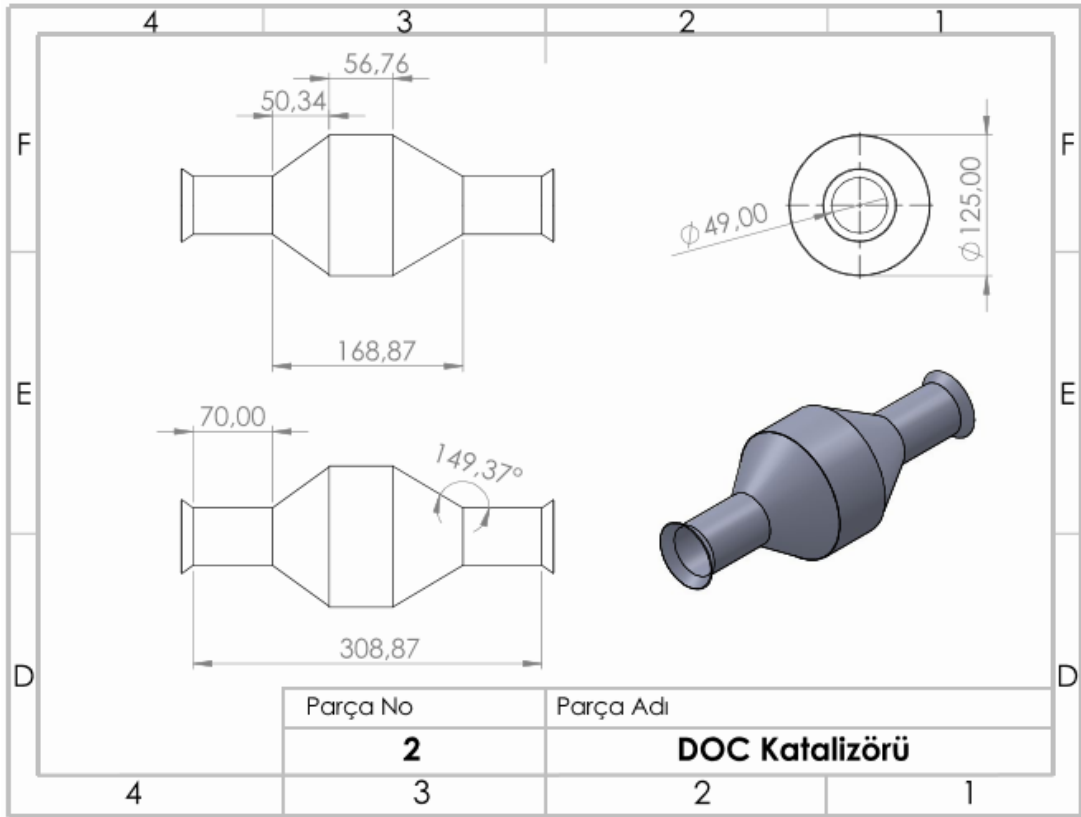
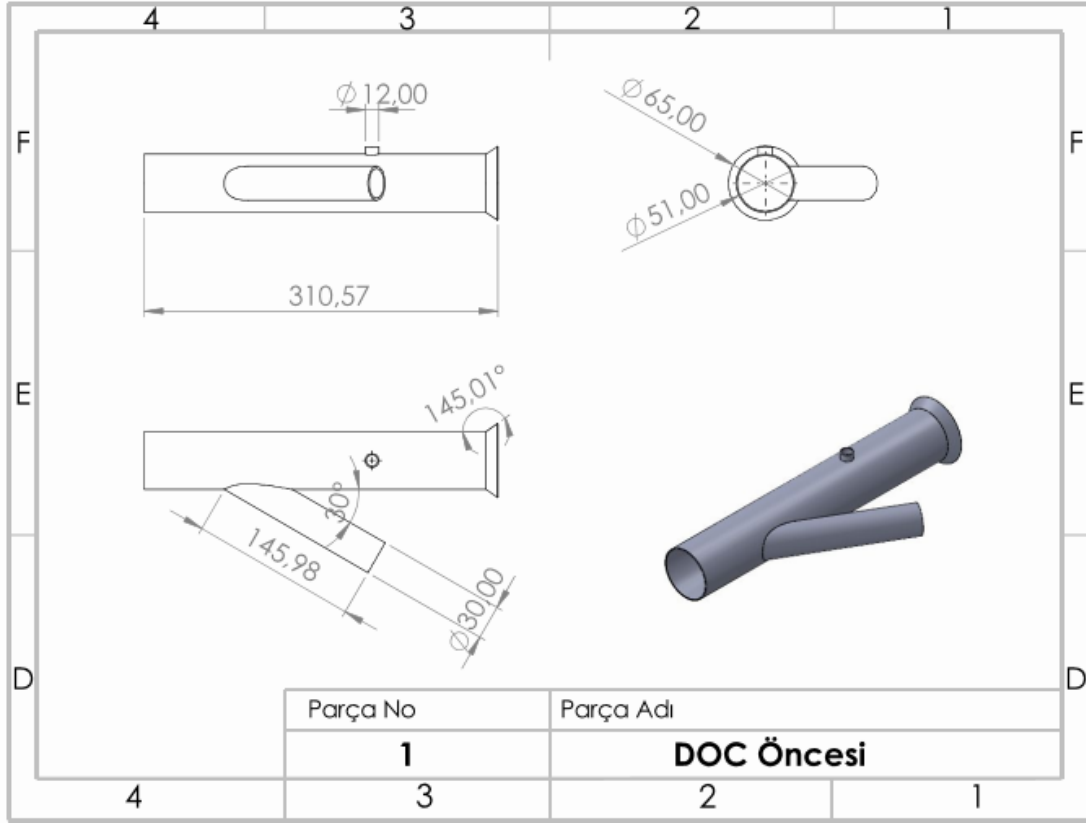
Mutlu İ, Erçek E, Çengelci E, Şimşir E, Kunt M, Yavuz İ, 2018, Türkiye’de Doğalgazın Otomotiv Yakıtı Olarak Kullanımı ve Çin Örneği, 14th International Combustion Sysmposium (INCOS2018), 25-27 Nisan, Karabük.

EKLER

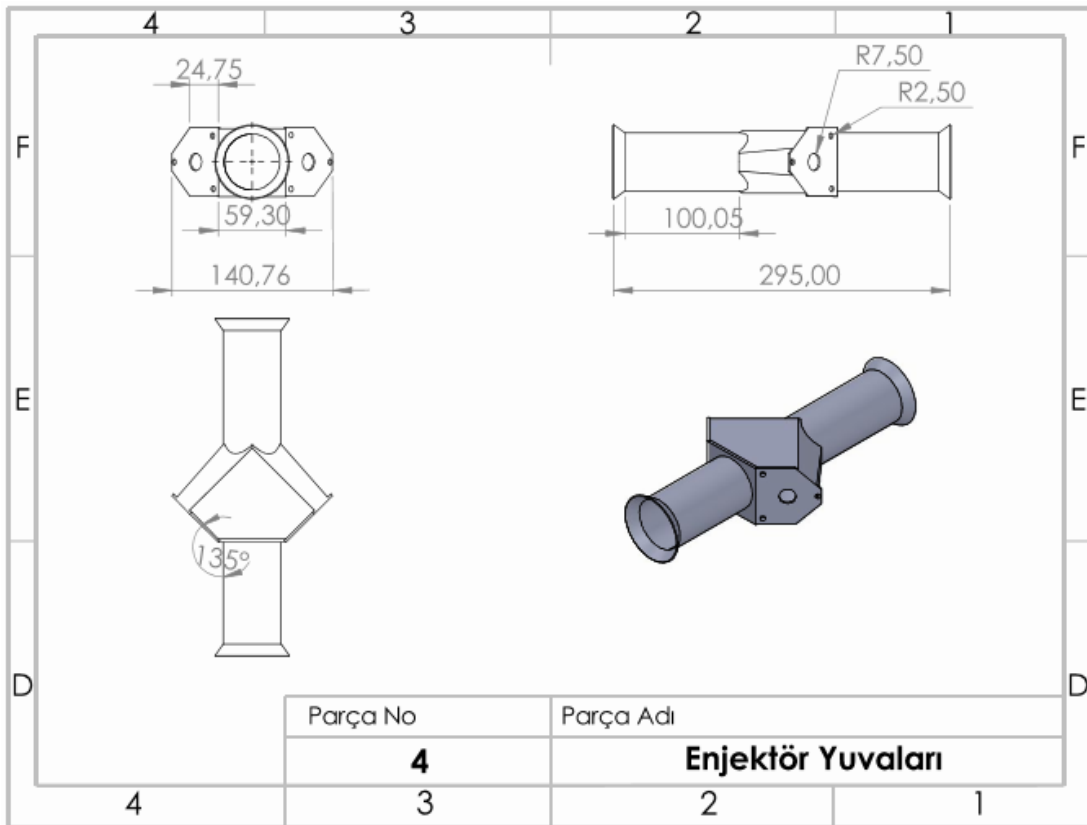
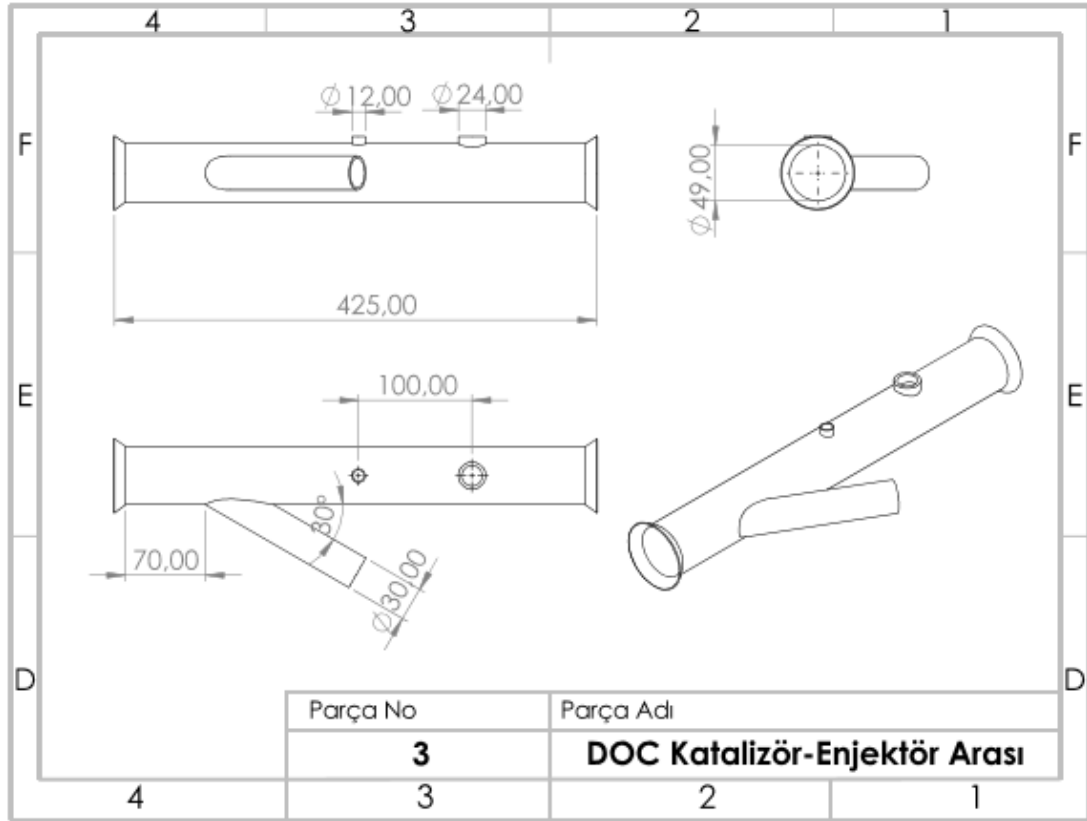
EK 1. Egzoz Sistemi Detaylı Çizim ve Ölçüleri



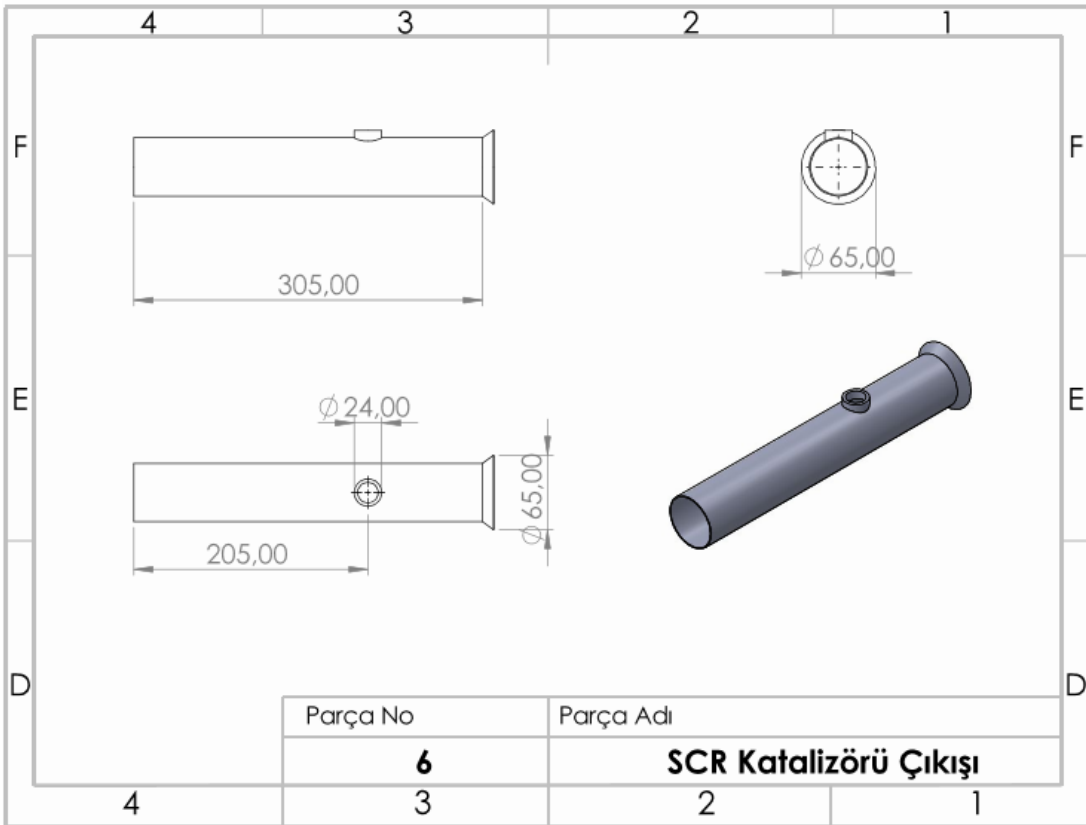
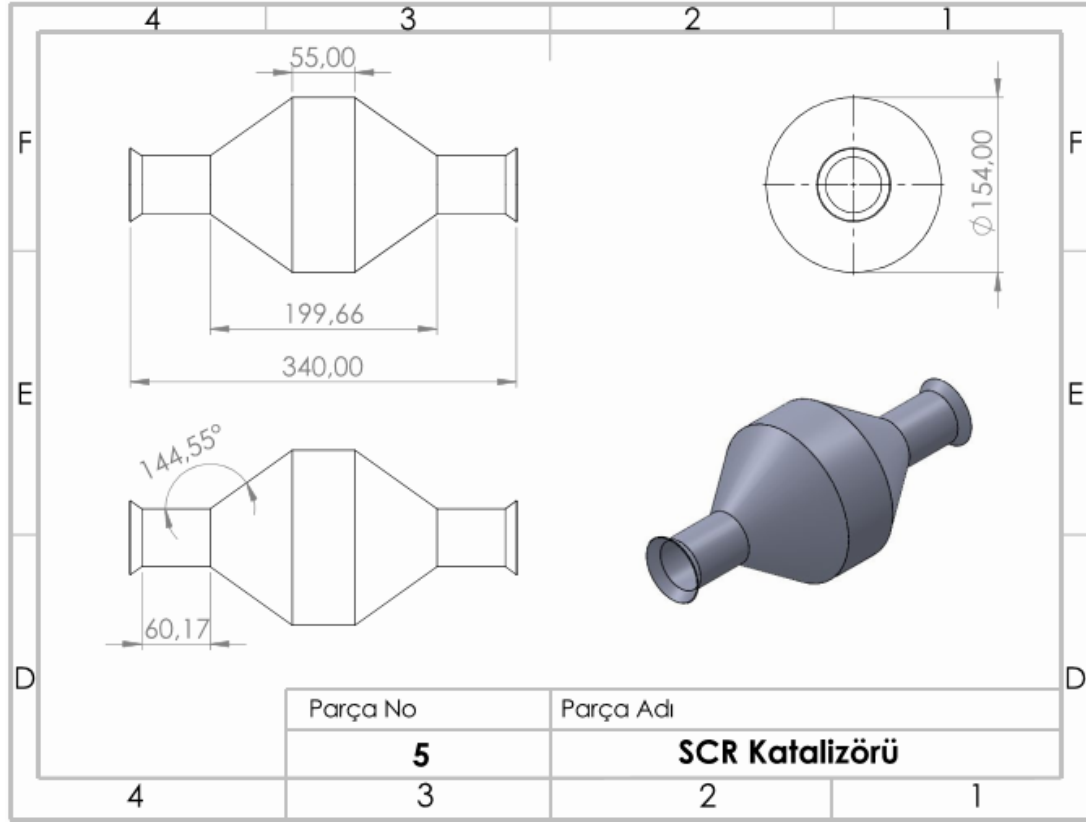
EK 1. (Devam) Egzoz Sistemi Detaylı Çizim ve Ölçüleri



EK 1. (Devam) Egzoz Sistemi Detaylı Çizim ve Ölçüleri



EK 1. (Devam) Egroz Sistemi Detaylı Çizim ve Ölçüleri



EK 1. (Devam) Egzoz Sistemi Detaylı Çizim ve Ölçüleri

