

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ DİZEL MOTORLARINDA KULLANILAN
SEÇİCİ KATALİTİK İNDİRGEME
SİSTEMLERİNİN TASARIM VE PERFORMANS
AÇISINDAN İNCELENMESİ

Kubilay BAYRAMOĞLU

Ağustos, 2022
İZMİR

**GEMİ DİZEL MOTORLARINDA KULLANILAN
SEÇİCİ KATALİTİK İNDİRGEME
SİSTEMLERİNİN TASARIM VE PERFORMANS
AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

**Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı,
Deniz Ulaştırma Sistemleri Mühendisliği Programı**

Kubilay BAYRAMOĞLU

Ağustos, 2022

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

KUBİLAY BAYRAMOĞLU tarafından **DR. ÖĞR. ÜYESİ GÜNER ÖZMEN** yönetiminde hazırlanan “**GEMİ DİZEL MOTORLARINDA KULLANILAN SEÇİCİ KATALİTİK İNDİRGEME SİSTEMLERİNİN TASARIM VE PERFORMANS AÇISINDAN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Dr. Öğr. Üyesi Güner ÖZMEN

Yönetici

.....
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....
Prof. Dr. Can Özgür ÇOLPAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....
Doç. Dr. Can COŞKUN

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Görkem KÖKKÜLÜNK

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının hazırlanmasında desteklerini esirgemeyen başta danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Güner ÖZMEN olmak üzere, Tezin gelişiminde önemli katkıları olan Prof. Dr. Can Özgür ÇOLPAN ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca bu süreçte her aşamada yanımda olan çok değerli çalışma arkadaşlarım Öğr. Gör. Semih YILMAZ, Arş. Gör. Kerim Deniz KAYA ve Arş. Gör. Muammer NURDUHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak bugüne kadar yanımda olan ve bu günlere gelmemde emeği geçen başta anne ve babam olmak üzere tüm aileme şükranlarımı sunuyorum.

Kubilay BAYRAMOĞLU

GEMİ DİZEL MOTORLARINDA KULLANILAN SEÇİCİ KATALİTİK İNDİRGEME SİSTEMLERİNİN TASARIM VE PERFORMANS AÇISINDAN İNCELENMESİ

ÖZ

Gemilerden kaynaklı NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla Uluslararası Denizcilik Örgütü-International Maritime Organization (IMO) tarafından kısıtlamalar getirilmiştir. Bu kısıtlamaların sağlanmasında kullanılan en etkili yöntemlerden biri de Seçici Katalitik İndirgeme-Selective Catalytic Reduction (SCR) sistemleridir. Bu çalışmada iki zamanlı ve dört zamanlı olmak üzere iki farklı gemi dizel motoru için SCR sistem tasarımı ve performans parametreleri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analiz çalışmaları sonlu hacimler yöntemi ile zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiş ve sınır koşulları literatür verileri ile doğrulanmıştır. Modellenen sistem için SCR boyu, SCR sistem çapı, kullanılan katalizörün aktivasyon enerjisi ile karışım odası uzunluk ve konumunun en uygun değerlerinin belirlenmesi amacıyla %85 yük koşulunda parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en uygun tasarım parametreleri olan 1200 mm SCR boyu, 760 mm SCR sistem çapı ve 4000 mm karışım odası uzunluğu için SCR sistem performansı değerlendirilmiştir. Farklı motor yükleri için IMO gerekliliklerini sağlayan Üre-Su Çözeltisi-Urea-Water Solution (UWS) miktarı ile bu miktarlar için NO_x azaltma performansı ve amonyak kayma miktarı belirlenmiştir. Ayrıca herhangi bir NO_x emisyon kısıtlamasına karşılık SCR Baypas Valfi-Reactor Bypass Valve (RBV) açıklığının sistem NO_x , NH_3 kayması ve basınç düşümü üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. SCR sistemi boyunca aynı akış hızı için farklı egzoz debisi ve farklı giriş NO_x oranları için parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda her bir yük durumu için IMO Tier III sınırlamasını sağlayan UWS püskürtme miktarları sırasıyla 103 l/h, 91 l/h, 85 l/h, 62 l/h ve 38 l/h olarak belirlenmiştir. %20 RBV açıklık oranından büyük oranlarda hem NO_x emisyonları hem de amonyak kayması üstel bir şekilde artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gemi SCR sistemi, NO_x emisyonları, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), emisyon azaltma teknikleri, amonyak kayması, basınç düşümü

INVESTIGATION OF SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION (SCR) SYSTEMS USED IN MARINE DIESEL ENGINES IN TERMS OF DESIGN AND PERFORMANCE

ABSTRACT

Restrictions have been introduced by the international maritime organization (IMO) to reduce NO_x emissions from ships. Selective Catalytic Reduction (SCR) systems are one of the most effective methods used to meet these restrictions. In this study, SCR system design and performance parameters for two different marine diesel engines, two-stroke and four-stroke, were investigated numerically. Numerical analysis studies were carried out with the finite volume method, steady-state, and the boundary conditions were verified with the literature data. Parametric studies were carried out at 85% load condition to determine the optimum values of SCR length, SCR system diameter, catalyst activation energy, and mixing chamber length and location. SCR system performance was evaluated for 1200 mm SCR length, 760 mm SCR system diameter and 4000 mm mixing chamber length, which are the most suitable design parameters obtained. The amount of Urea-Water Solution (UWS), which meets the emission restrictions determined by IMO for variable engine loads, and the NO_x reduction performance and ammonia slip for these amounts were determined. In addition, the effect of SCR Bypass Valve (RBV) opening on system NO_x, ammonia slip and pressure drop against any NO_x emission restriction was evaluated. Parametric studies were carried out for variable exhaust flow rates and inlet NO_x rates for the same flow rate throughout the SCR system. As a result of the study, the UWS injection amounts, which meet the IMO Tier III limitation for each load condition, were determined as 103 l/h, 91 l/h, 85 l/h, 62 l/h and 38 l/h, respectively. Both NO_x emissions and ammonia slip increase exponentially at rates greater than 20% RBV opening ratio.

Keywords: Marine SCR system, NO_x emissions, computational fluid dynamics (CFD), emissions reduction techniques, ammonia slip, pressure drop

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
KISALTMALAR.....	xiv
SEMBOLLER LİSTESİ.....	xv

BÖLÜM 1 - GİRİŞ..... 1

1.1 NO _x Emisyon Oluşumu ve Çevresel Etkileri.....	4
1.1.1 Termal NO.....	5
1.1.2 Hızlı NO	5
1.1.3 Yakıt NO	6
1.1.4 NO _x Emisyonlarının Çevresel Etkileri	6
1.2 NO _x Emisyon Azaltma Yöntemleri	9
1.2.1 Temiz Alternatif Yakıtlar	9
1.2.2 Yanma Kontrol Teknikleri.....	12
1.2.3 Yanma Sonrası Kontrol Teknikleri.....	14
1.3 Literatür Özeti	16
1.4 Çalışmanın Önemi	25

BÖLÜM 2 – SCR SİSTEM MATEMATİK MODELİ..... 28

2.1 Yönetici Denklemler	31
2.2 RANS Denklemi.....	33
2.2.1 Standard k-ε Türbülans Model	34
2.3 Türlerin Taşınımı Modeli	35
2.4 Partikül Tanecik Modeli.....	37
2.5 Gözenekli Ortam Modeli.....	41

BÖLÜM 3 - SAYISAL MODELİN DENEY VERİLERİ İLE DOĞRULANMASI.....43

3.1 Sayısal Modelin Doğrulanmasında Kullanılan Deney Geometrisi	43
3.2 Sınır Koşulları	44
3.3 Bulgular ve Tartışma	45

BÖLÜM 4 - GEMİ SCR SİSTEMİ MODELİNİN TASARIMI 50

4.1 Problemin Tanımı.....	50
4.2 Gemi Dizel Motoru Verileri	53
4.3 SCR Model Geometrisi	57
4.4 Sınır Koşulları	58
4.5 Çözüm Açısından Bağımsızlık	61
4.6 SCR Modeli Üzerinde Yapılan Parametrik Çalışmalar.....	63
4.6.1 SCR Boyunun NO _x Emisyonları ve NH ₃ Kaymasına Etkisi.....	64
4.6.2 SCR Sistem Çapının Belirlenmesi.....	66
4.6.3 Katalizör Çıkış Formunun NO _x Emisyonlarına ve Basınç Düşümüne Etkisi.....	72
4.6.4 Katalizör Aktivasyon Enerjisinin NO _x Azaltma Performansına Etkisinin İncelenmesi.....	74
4.6.5 Karışım Odası Konumu ve Boyunun Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi.....	77
4.7 Sonuç	80

BÖLÜM 5 - AB-SCR ve YB-SCR SİSTEMLERİ İÇİN NO_x AZALTMA PERFORMANS PARAMETRELERİ.....81

5.1 UWS Püskürtme Miktarının Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi..	82
5.2 YB-SCR Sisteminde RBV Açıklığının Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi.....	90
5.3 YB-SCR ve AB-SCR Sistem Performans Parametrelerinin Karşılaştırılması	101
5.3.1 İsoyanik Asit (HNCO) Değişiminin İncelenmesi	102
5.3.2 Amonyak (NH ₃) Değişiminin İncelenmesi.....	106

5.3.3 Basınç Düşümü ve Hız Değişiminin İncelenmesi	110
5.3.4 YB-SCR ve AB-SCR Sistemlerinde Kimyasal Bileşenlerin Dağılımı..	112
5.4 Dört Zamanlı Gemi Dizel Motorlarında NO _x İndirgeme performansının İncelenmesi.....	115
5.5 Egzoz Debisinin NO _x İndirgeme Performansına Etkisinin İncelenmesi	122
5.6 SCR Giriş NO _x Miktarının DeNO _x İndirgeme Performansına Etkisinin İncelenmesi.....	123
BÖLÜM 6 - SONUÇLAR.....	126
KAYNAKLAR.....	130

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Emisyon kontrol alanları	2
Şekil 1.2 NO _x emisyon sınırlamaları.....	3
Şekil 1.3 Yanma sonucu oluşan emisyonlar.....	7
Şekil 1.4 Asit yağmuru.....	8
Şekil 1.5 NO _x azaltma yöntemleri.....	9
Şekil 1.6 Su enjeksiyonu.....	13
Şekil 1.7 EGR sistem şematiği.....	14
Şekil 2.1 SCR işlem şeması.....	28
Şekil 2.2 Sprey-duvar etkileşim şematiği.....	40
Şekil 3.1 Sayısal model doğrulanmasında kullanılan SCR geometrisi	44
Şekil 3.2 Hesaplamalı model.....	45
Şekil 3.3 Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	46
Şekil 3.4 Doğrulamada kullanılan SCR sistemi NO değişimi	47
Şekil 3.5 Doğrulamada kullanılan SCR sistemi UWS değişimi	48
Şekil 3.6 Doğrulamada kullanılan SCR sistemi NH ₃ değişimi	49
Şekil 4.1 AB-SCR sistemi.....	51
Şekil 4.2 YB-SCR sistemi.....	52
Şekil 4.3 Dizel motor ve turboşarjer yerleşimi.....	54
Şekil 4.4 Dizel yakıt için egzoz C _p değeri.....	56
Şekil 4.5 İki zamanlı gemi dizel motor SCR yerleşimi.....	58
Şekil 4.6 Hesaplamalı ağ örgüsü.....	60
Şekil 4.7 AB-SCR ve YB-SCR sistem sınır koşulları.....	60
Şekil 4.8 YB-SCR sistemi için ağ bağımsızlığı.....	61
Şekil 4.9 AB-SCR sistemi için ağ bağımsızlığı.....	63
Şekil 4.10 Parametrik SCR boyu.....	64
Şekil 4.11 SCR boyunun NO _x ve NH ₃ kayma miktarına etkisi.....	65
Şekil 4.12 SCR sistem parametrik çap değerleri.....	66

Şekil 4.13 Farklı SCR boru çapları için hız dağılımı.....	68
Şekil 4.14 Egzoz akış hızı ile NO _x ve NH ₃ miktarının değişimi.....	69
Şekil 4.15 Reynolds sayısı ile NO _x ve NH ₃ miktarının değişimi.....	69
Şekil 4.16 SCR sistem boyunca hız dağılımı.....	70
Şekil 4.17 Farklı sistem çapları için basınç düşümü.....	71
Şekil 4.18 SCR sistemi boyunca NO _x değişimi.....	72
Şekil 4.19 Farklı tip SCR tasarım geometrileri.....	73
Şekil 4.20 Farklı SCR tasarım geometrilerinin NO _x emisyonlarına etkisi.....	73
Şekil 4.21 Farklı tasarım geometrilerinin basınç düşümüne etkisi.....	74
Şekil 4.22 Katalizör aktivasyon enerjileri için NO _x ve NH ₃ kaymasına değişimi.....	75
Şekil 4.23 Farklı katalizörler için NO _x dönüşüm verimliliği.....	76
Şekil 4.24 Karışım odası boyutları.....	77
Şekil 4.25 Farklı karışım odası boyu ve konumunun HNCO bileşenlerine etkisi	79
Şekil 4.26 Farklı karışım odası boyu ve konumunun NH ₃ bileşenlerine etkisi.....	79
Şekil 5.1 SCR tasarım parametreleri.....	81
Şekil 5.2 %100 yük koşulu için UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	83
Şekil 5.3 %85 yük koşulu için UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	85
Şekil 5.4 %75 yük koşulu için UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	86
Şekil 5.5 %50 yük koşulu için UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	87
Şekil 5.6 %25 yük koşulu için UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	89
Şekil 5.7 YB-SCR sistemi boyunca NO _x emisyonlarının değişimi.....	92
Şekil 5.8 SCR sistemi boyunca RBV açıklık oranları için NO _x değişimi.....	93
Şekil 5.9 SCR sistemi boyunca RBV açıklık oranları a) HNCO ve b) NH ₃ değişimi.....	94
Şekil 5.10 %100 yük için RBV açıklık oranları için NO _x , NH ₃ ve basınç düşümü...95	
Şekil 5.11 %85 yük için RBV açıklık oranı ile NO _x , NH ₃ ve basınç düşümü	96
Şekil 5.12 %75 yük için RBV açıklık oranı ile NO _x , NH ₃ ve basınç düşümü	98
Şekil 5.13 %50 yük için RBV açıklık oranı ile NO _x , NH ₃ ve basınç düşümü.....	99
Şekil 5.14 %25 yük için RBV açıklık oranı ile NO _x , NH ₃ ve basınç düşümü.....	101
Şekil 5.15 %100 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi.....	103

Şekil 5.16 %85 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi.....	103
Şekil 5.17 %75 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi.....	104
Şekil 5.18 %50 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi.....	105
Şekil 5.19 %25 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi.....	106
Şekil 5.20 %100 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH ₃ değişimi.....	107
Şekil 5.21 %85 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH ₃ değişimi.....	107
Şekil 5.22 %75 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH ₃ değişimi.....	108
Şekil 5.23 %50 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH ₃ değişimi.....	109
Şekil 5.24 %25 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH ₃ değişimi.....	109
Şekil 5.25 %85 yük için YB-SCR sisteminde hız ve basınç dağılımı.....	110
Şekil 5.26 %85 yük için AB-SCR sisteminde hız ve basınç dağılımı.....	111
Şekil 5.27 %85 yük için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde hız dağılımı.....	112
Şekil 5.28 %85 yük için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde HNCO dağılımı.....	113
Şekil 5.29 %85 yük için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde NH ₃ dağılımı.....	113
Şekil 5.30 %85 yük için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde NO _x dağılımı.....	114
Şekil 5.31 AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde NO _x performans parametreleri.....	115
Şekil 5.32 %100 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	117
Şekil 5.33 %85 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	118
Şekil 5.34 %75 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	119
Şekil 5.35 %50 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	120
Şekil 5.36 %25 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO _x ve NH ₃ bileşenlerinin değişimi.....	121
Şekil 5.37 %85 yük için YB-SCR egzoz debisi ile NO _x emisyonlarının değişimi.....	122
Şekil 5.38 %85 yük için YB-SCR egzoz debisi ile NO _x emisyonlarının değişimi.....	123

Şekil 5.39 %85 yük için YB-SCR giriş NO_x değeri ile SCR çıkış NO_x emisyonlarının değişimi.....	124
Şekil 5.40 %85 yük için YB-SCR giriş NO_x değeri ile DeNO_x değişimi.....	124
Şekil 5.41 %85 yük için YB-SCR Giriş NO_x Değeri ile NO_x ve NH_3 Kayması değişimi.....	125



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Alternatif yakıtların özellikleri.....	12
Tablo 1.2 NO _x kontrol teknolojileri.....	15
Tablo 1.3 Gemi SCR sistemleri kapsamında yapılan çalışmalar için özet tablo.....	22
Tablo 2.1 Standard k-ε türbülans modeli katsayıları.....	34
Tablo 3.1 Sayısal model doğrulanmasında kullanılan motorun özellikleri	43
Tablo 3.2 Sayısal model doğrulanmasında kullanılan başlangıç ve sınır koşulları	44
Tablo 3.3 Sayısal model doğrulanmasında kullanılan deneysel sonuçlar	45
Tablo 3.4 Deneysel ve sayısal NO azaltma miktarları	46
Tablo 4.1 Dizel motor özellikleri.....	53
Tablo 4.2. Motor deney verileri.....	53
Tablo 4.3 Turboşarjer giriş çıkış termodinamik özellikleri.....	57
Tablo 4.4 SCR reaksiyon katsayıları.....	59
Tablo 4.5 SCR sistem sınır koşulları.....	59
Tablo 4.6 SCR sistemi parametrik çap değerleri	66
Tablo 4.7 Karışım odası tasarım parametreleri.....	78
Tablo 5.1 En uygun SCR sistem boyutları.....	81
Tablo 5.2 IMO Tier III standartlarına uygun UWS miktarı.....	90
Tablo 5.3 Farklı RBV açıklık oranları için sistem sınır koşulları	91
Tablo 5.4 Dört zamanlı dizel motor özellikleri.....	116
Tablo 5.5 Dört zamanlı dizel motor egzoz özellikleri.....	116
Tablo 5.6 Dört zamanlı motor UWS oranları.....	122

KISALTMALAR

SCR	:Seçici Katalitik İndirgeme – Selective Catalytic Reduction
UWS	:Üre Su Çözeltilisi-Urea Water Solution
IMO	:Uluslararası Denizcilik Örgütü-International Maritime Organization
RBV	:SCR Baypas Valfi-Reactor Bypass Valve
SECA	:Sülfür Kontrol Alanları-Sulphur Emissions Control Areas
EEDI	:Enerji Verimliliği Dizayn İndeks-Energy Efficiency Design Index
ECAs	:Emisyon Kontrol Alanları-Emissions Control Areas
MARPOL	:Denizlerin Gemilerden Kirlenmesini Önleme Uluslararası Sözleşmesi
HAD	:Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğı
AB-SCR	:Alçak Basınç SCR
YB-SCR	:Yüksek Basınç SCR
HFO	:Ağır Dizel Yakıt-Heavy Fuel Oil
MDO	:Gemi Dizel Yakıt-Marine Diesel Oil
PM	:Partikül Madde
EGR	:Egzoz Gaz Resirkülasyonu-Exhaust Gas Recirculation
DPF	:Dizel Partikül Filtresi
DOC	:Dizel Oksidasyon Katalizörü
DeNO _x	:NO _x emisyonu azaltma oranı
RANS	:Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes- Reynolds Average Navier-Stokes
EBV	:Egzoz Baypas Valfi
VBR	:SCR öncü valfi
VAR	:SCR Sonrası Valfi
RSV	:Reaktör Yatak Valfi

SEMBOLLER LİSTESİ

NH_3	:Amonyak
$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	:Üre
HNCO	:İzosiyanik asit
HCN	:Hidrosiyanik asit
$\dot{q}$	:Reaksiyon hızı
E_a	:Aktivasyon enerjisi
R_u	:Evrensel gaz sabiti
T	:Sıcaklık
ρ	:Yoğunluk
$\vec{V}$	:Akış hızı
P	:Basınç
g	:Yer çekimi
μ	:Akışkan vizkozitesi
k	:Isı iletim katsayısı
i	:İç enerji
S_e	:Potansiyel enerji
τ	:Viskoz gerilme tensörü
ϕ	:Herhangi bir skaler büyüklük
G_k	:Türbülans kinetik enerji üretimi
S_i	:Kaynak terimi
D_i	:i. türün kütleselel difüzyon katsayısı
J_i	:i. türün kütleselel difüzyonu
Le	:Lewis sayısı
Re	:Reynolds sayısı
M	:Molekül ağırlığı
C_D	:Direnç katsayısı
F_D	:Direnç kuvveti
d	:Partikül çapı

L	:Buharlaşma gizli ısısı
$\dot{Q}$	:Isı transfer oranı
Nu	:Nusselt sayısı
h	:Entalpi
$\dot{m}$	:Kütle debisi
c_p	:Sabit basınç özgül ısısı
$v(d)$	:Parçacık dağılım fonksiyonu
X	:Ortalama tanecik çapı
C_2	:Basınç katsayısı
a	:Geçirgenlik
L_c	:SCR boyu
Δp	:Basınç düşümü
L_c	:SCR boyu
D	:SCR sistem çapı
D_m	:Karışım odası çapı
D_K	:SCR çapı
$\dot{W}$	:Güç
P	:Motor gücü
η	:Verim

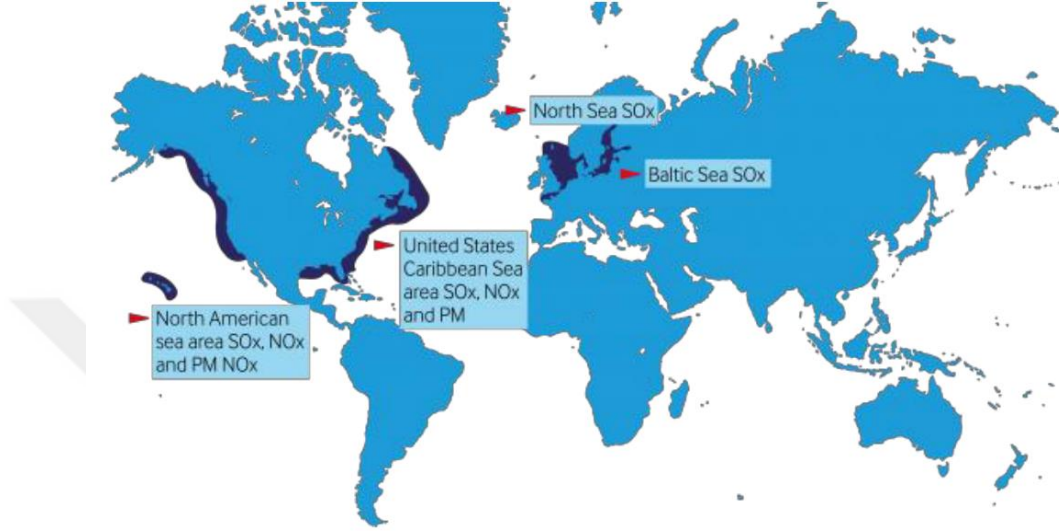
BÖLÜM 1

GİRİŞ

Uluslararası taşımacılığın yaklaşık %90'ı deniz yolu ile sağlanmaktadır (UNCTAD, 2022). Deniz yolu taşımacılığında aktif rol oynayan ticari gemilerin, seferleri sırasında farklı ülke kara sularına uğramaları çeşitli küresel sorunları da beraberinde getirmekteydi. Bu seferler sırasında gemilerin büyüklükleri, kullanılan liman, yanaşılan tesislerin güvenliği ve çevresel faktörler için uygulanan kurallar ülkeden ülkeye farklılık göstermekteydi. Ülkeden ülkeye uygulanan bu farklılıklar, deniz kazaları ve çeşitli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu durum hem deniz güvenliği hem de gemilerden kaynaklı çevresel sorunları azaltmak amacıyla tüm ülkeleri ilgilendiren uluslararası kuralların konulmasını zorunlu hale getirmiştir. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), deniz güvenliğinin sağlanması, taşımacılık veriminin artırılması ve gemilerden kaynaklı çevre kirliliğini azaltmak amacıyla tüm üye ülkeleri kapsayacak şekilde çeşitli düzenlemeler getirmiştir (Okubo ve Kuwahara, 2020a).

Günümüzde, gemilerden kaynaklı hava kirliliğinin azaltılması amacıyla IMO tarafından gemilerin yük ya da motor kapasitelerine göre NO_x, SO_x ve CO₂ emisyonları için sınırlamalar getirilmiştir. Bu sınırlamaların temel amacı, gemi kaynaklı emisyonlar sonucu oluşan sera etkisi ve küresel ısınmanın önüne geçilmesidir. 2010 yılı sonrası SO_x emisyonlarının kontrolünü sağlamak için de Sülfür Kontrol Alanları-Sulphur Emissions Control Areas (SECA) tanımlanmıştır. Küresel ısınmanın azaltılması amacıyla gemilerin birim yük taşıma kapasitesi başına atmosfere saldıkları CO₂ miktarı, Enerji Verimliliği Dizayn İndeks-Energy Efficiency Design Index (EEDI) ile IMO tarafından 2011 yılından itibaren kontrol altına alınmıştır. Ancak EEDI kapsamında maksimum salınabilecek CO₂ miktarı, gemilerin inşa aşamasında atık ısı kazanım sistemleri, alternatif sevk sistemleri gibi daha uygun tasarım parametreleri ile kontrol edilmektedir (Böckmann ve Steen, 2016). NO_x emisyon kısıtlamaları için ise IMO tarafından Emisyon Kontrol Alanları-Emissions Control Areas (ECAs) oluşturulmuş ve IMO tarafından bu bölgeler ilk defa 1997 yılında MARPOL ek VI protokolü ile tanımlanmıştır. Dünya üzerinde emisyon

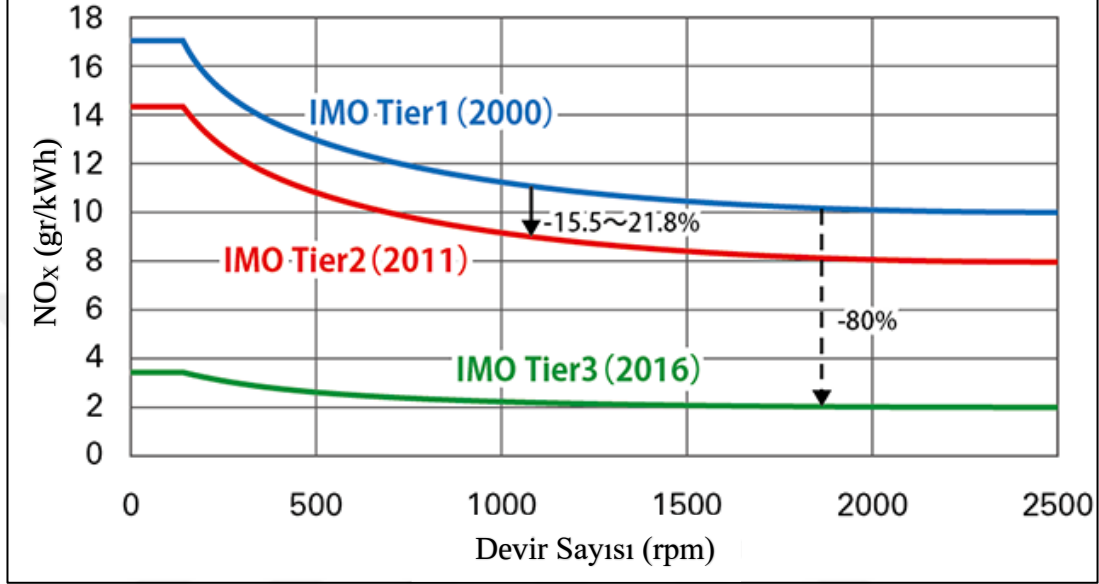
kontrolleri için getirilen düzenlemeler, ECAs bölgesi için ayrı, ECAs dışında kalan bölgeler için ayrı uygulanmaktadır. Bu kapsamda ECAs bölgesi genel hatlarıyla Şekil 1.1’de ifade edildiği üzere Baltık Denizi, Kuzey Denizi, Güney Amerika ve Karayip Denizi sahasından oluşmaktadır (L. Chen, Yip ve Mou, 2018; IMO, 2020a).



Şekil 1.1 Emisyon kontrol alanları (Tian, 2016)

NO_x, dizel motorlarda yanma sonucu oluşan ve hava kirliliğine neden olan zararlı gazlardandır. IMO tarafından Denizlerin Gemilerden Kirlenmesini Önleme Uluslararası Sözleşmesi (MARPOL 73/78) olarak bilinen sözleşme ile gemilerden kaynaklı hava kirliliğini önlemek amacıyla kısıtlamalar getirilmiştir. MARPOL Ek VI kapsamında NO_x emisyonlarına getirilen kısıtlamaların ilki Tier I olarak 1 Ocak 2000, ikincisi Tier II olarak 1 Ocak 2011 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Tier I ile Tier II düzenlemeleri ile düşük devirli gemi dizel motorlar için NO_x emisyonlarının sırasıyla 17 gr/kWh’den 14,4 gr/kWh’e kadar düşürülmesi amaçlanmaktadır. Son olarak, 1 Ocak 2016 tarihinde yürürlüğe giren ve 2021 yılına kadar emisyon kontrol bölgelerinde tüm ticari gemilerin uyması gereken Tier III düzenlemesi getirilmiştir. Tier III düzenlemesi ile NO_x emisyonlarının, Tier II düzenlemesine göre yaklaşık olarak %76 oranında azaltılarak 3,4 gr/kWh seviyesinde kadar düşürülmesi hedeflenmiştir. Gemi dizel motorlarından kaynaklı NO_x emisyonlarının istenilen seviyelere kadar düşürülmesi için, motor işletme parametrelerinin değiştirilmesi, dizel motorlarda alternatif yakıtların kullanılması ve egzoz gazından farklı kimyasal

işlemler ile emisyonların azaltılması gibi farklı NO_x emisyon azaltma teknikleri önerilmektedir (IMO, 2020b). Şekil 1.2’de MARPOL Ek VI kapsamında getirilen düzenlemeler ile izin verilen maksimum NO_x emisyon miktarları motor devir sayısına bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 1.2 NO_x emisyon sınırlamaları (IMO, 2020c)

Bu çalışmada, gemilerden kaynaklı NO_x emisyonlarının en aza indirgenmesi amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile sayısal çalışmalar yapılmıştır. Giriş bölümünde, NO_x emisyonlarının oluşumu ve çevresel etkileri, NO_x emisyonlarının azaltılmasında kullanılan teknikler değerlendirilmiş, literatür özeti ve tezin amacı sunulmuştur. İkinci bölümde ise gemi SCR sistemlerinin modellenmesinde kullanılan yönetici denklemler, sayısal modelde kullanılan türbülans modeli ve özellikleri, UWS'nin püskürtülmesinde kullanılan partikül tanecik model, SCR reaksiyonlarının tanımlanması amacıyla türlerin taşınımı modeli ve katalizörün modellenmesinde kullanılan gözenekli ortam modeli gibi matematik modeller açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, SCR sayısal modelinde kullanılan sınır ve başlangıç koşulları, literatürde gemiler üzerinde yapılan deney verileri ile doğrulanmıştır. Dördüncü bölümde, SCR sistem modeli için sistem çapı, karışım odası boyu ve konumu, aktivasyon enerjisi, SCR çıkış formu ve SCR boyu gibi en uygun tasarım boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan parametrik çalışmalar sunulmuştur.

Beşinci bölümde, gemi SCR sisteminin en uygun tasarım boyutları için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinin NO_x emisyon azaltma oranları araştırılmıştır. SCR sistemi için en uygun UWS püskürtme miktarı ile RBV açıklığının NO_x, NH₃ kayması ve basınç düşümü üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu bölümde ayrıca, AB-SCR ve YB SCR sistemleri için performans parametreleri, dört zamanlı dizel motorların SCR sistem NO_x emisyon parametreleri, SCR giriş NO_x miktarı değişimi ve egzoz debisinin NO_x azaltma performansına etkisi incelenmiştir. Sayısal çalışma sonucunda elde edilen tasarım ve performans parametrelerine ait bulgular sonuç bölümünde sunulmuştur.

1.1 NO_x Emisyon Oluşumu ve Çevresel Etkileri

İçten yanmalı motorlarda NO_x emisyonları ağırlıklı olarak NO ve NO₂ den oluşmaktadır. 1960'lı yıllardan bu yana NO_x emisyonları genel olarak motor termodinamik çevrimleri ile tahmin edilmekteydi. Günümüzde ise NO_x emisyonlarının yanma boyunca oluşumunu veya farklı türlere dönüşümünü tahmin etmek amacıyla kimyasal kinetik mekanizmaları kullanılmakta ve bu mekanizmalar daha hassas tahminler yapılması için sürekli geliştirilmektedir (Caton, 2015). NO_x oluşumunun temel kaynağı havadaki nitrojen (N₂) ve oksijen (O₂)'dir. Havanın yaklaşık %78 nitrojen, %21 ise oksijen gazından oluşmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yanmanın gerçekleşmesi için havada bulunan oksijene ihtiyaç vardır. Oksijenin saf olarak yanma odasına gönderilmesi pahalı bir işlemdir. Dolayısıyla oksijen yanma odasına bir gaz karışımı olan hava ile gönderilmektedir. Hava içerisinde atıl (inert) olan nitrojen, yanma odası içerisindeki yanma sıcaklığı ile oksijen ile birleşerek istenmeyen NO_x bileşenlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla dizel motorlarda yanma sonucu oluşan NO_x bileşenlerinin temel kaynağı havadaki nitrojen ya da yakıt içerisindeki nitrojendir (Bennett, 2009). Literatürde NO emisyonlarının üç farklı yolla oluştuğu belirtilmektedir. Bunlardan ilki atmosferdeki nitrojenin yüksek yanma odası sıcaklığı ile oksijenle tutunması sonucu Zeldovic mekanizmasına göre oluşan ısı NO (thermal NO), diğeri Fenimore mekanizması ile alev cephesinde gelişen hızlı NO (prompt NO) ve üçüncüsü ise yakıt içerisindeki nitrojen kaynaklı yakıt NO'lardır (Merker, Schwarz, Stiesch ve Otto, 2005).

1.1.1 Termal NO

Rus bilim adamı Zeldovich tarafından 1939 yılında önerilen termal NO mekanizması üç ana adımdan oluşmaktadır (Zeldovich, 1946). Temel yanma koşulları için üç aşamalı Zeldovich mekanizması Denklem 1.1, 1.2 ve 1.3'te verilmiştir.



Belirtilen reaksiyonların hızları, yanma reaksiyonlarının hızlarından daha düşük hızlarda gerçekleşmektedir. Burada, O, N₂, O₂, O, OH ve H bileşenlerinin denge durumunda olduğu kabul edilmektedir (Caton, 2015).

1.1.2 Hızlı NO

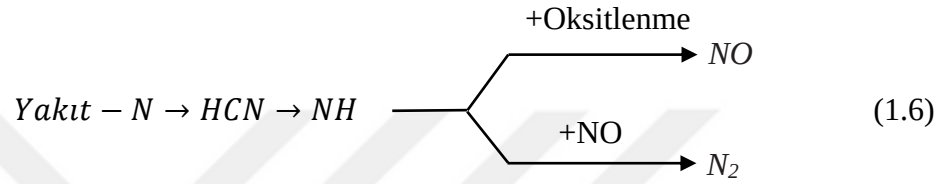
Hızlı NO mekanizması, alev bölgesinde gerçekleşen zengin yanma koşullarında NO oluşumunu ifade etmektedir (Fenimore, 1976). Hızlı NO oluşumunda ara radikaller ile NO bileşenleri oluşmaktadır. Denklem 1.4 ve 1.5, Hızlı NO oluşum mekanizmalarını ifade etmektedir (Ferguson, 1985).



Verilen ifadelerde N atomu Denklem 1.4 sonucu oluşmaktadır. Oluşan N atomu ya O₂ ile reaksiyona girerek NO oluşturmakta ya da Denklem 1.5'te ifade edildiği gibi HCN ile reaksiyona girerek NO oluşturmaktadır (McAllister, Chen ve Fernandez-Pello, 2011).

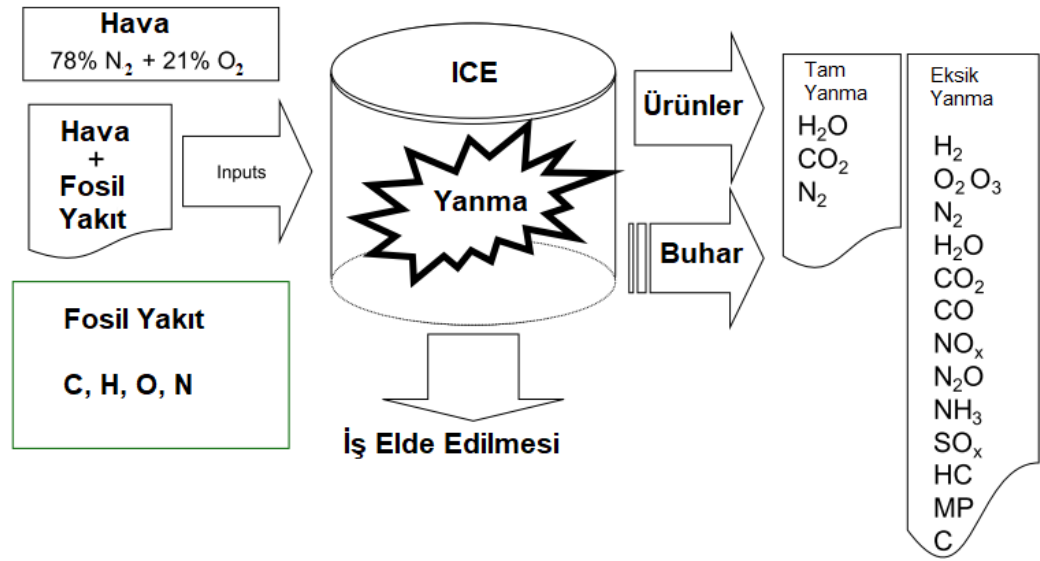
1.1.3 Yakıt NO

Dizel motorlarda kullanılan ve yapısında nitrojen atomu bulunan yakıtların yanması sonucu NO bileşenleri oluşmaktadır. Bu oluşumu etkileyen temel parametreler, yanma odası sıcaklığı ve yakıtın atomları arasındaki bağ kuvvetleridir. Yakıt NO oluşum mekanizmalarında genel olarak NH_3 (amonyak) ve HCN (Hidrosiyanik asit) oluşumu da görülmektedir. Denklem 1.6, yakıt NO oluşum mekanizmasını ifade etmektedir (Toof, 1986).



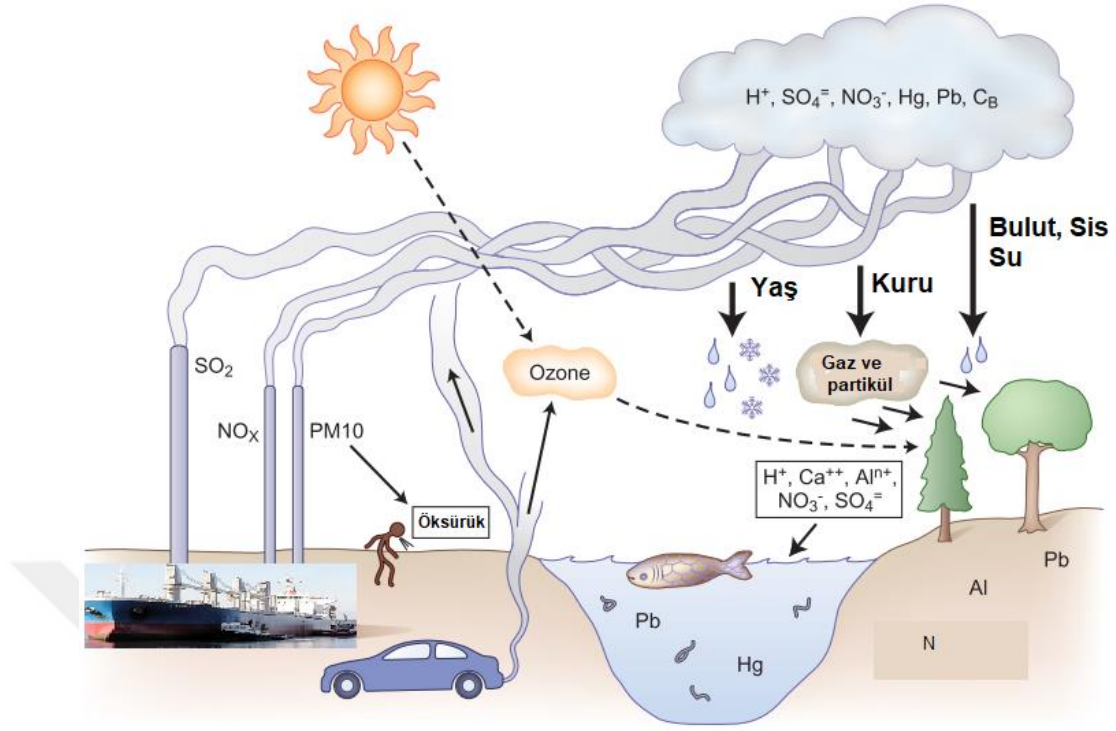
1.1.4 NO_x Emisyonlarının Çevresel Etkileri

Dünya üzerinde hava, su ve toprak kirliliğine en fazla taşımacılık sektörü sebep olmaktadır. Özellikle deniz taşımacılığının diğer taşımacılık türlerinden fazla olmasından ve yakıt olarak fosil kaynaklı yakıtların kullanılmasından dolayı gemi kaynaklı hava kirliliği diğer taşımacılık türlerine oranla daha fazladır. Atmosferik hava temel olarak %78 nitrojen, %21 oksijen ve %1 argon, karbondioksit, neon, helyum ve metan gibi gazlardan oluşmaktadır. Atmosferik havanın bu bileşimi, tüm canlı varlıkların dünya yüzeyinde uyumlu bir şekilde var olmasına olanak sağlamaktadır. İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu farklı kimyasal bileşenler oluşmaktadır. Şekil 1.3'te fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu oluşabilecek türler verilmiştir.



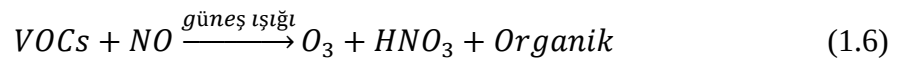
Şekil 1.3 Yanma sonucu oluşan emisyonlar (D'Agosto, 2019)

Yanma sonucu oluşan gazlar havada bulunan bileşimi bozmakta ve çevresel problemlere yol açmaktadır (D'Agosto, 2019). Yanma olaylarında yüksek sıcaklık etkisi ile oluşan NO_x ve SO_x bileşenleri asit yağmurlarının oluşmasına da neden olan başlıca kimyasal türlerdendir. Yanma sonucu oluşan SO_x ve NO_x bileşenlerinin havada bulunan su buharı ile birleşmesi sonucu sülfürik asit ve nitrik asit oluşumu asit yağmurları olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.4, NO_x ve SO_x emisyonları sonucu asit yağmuru oluşum sistemini göstermektedir (Weathers, Strayer, Likens, Pickett ve Cadenasso, 2013; Weaver, 1988).



Şekil 1.4 Asit yağmurları (Weaver, 1988)

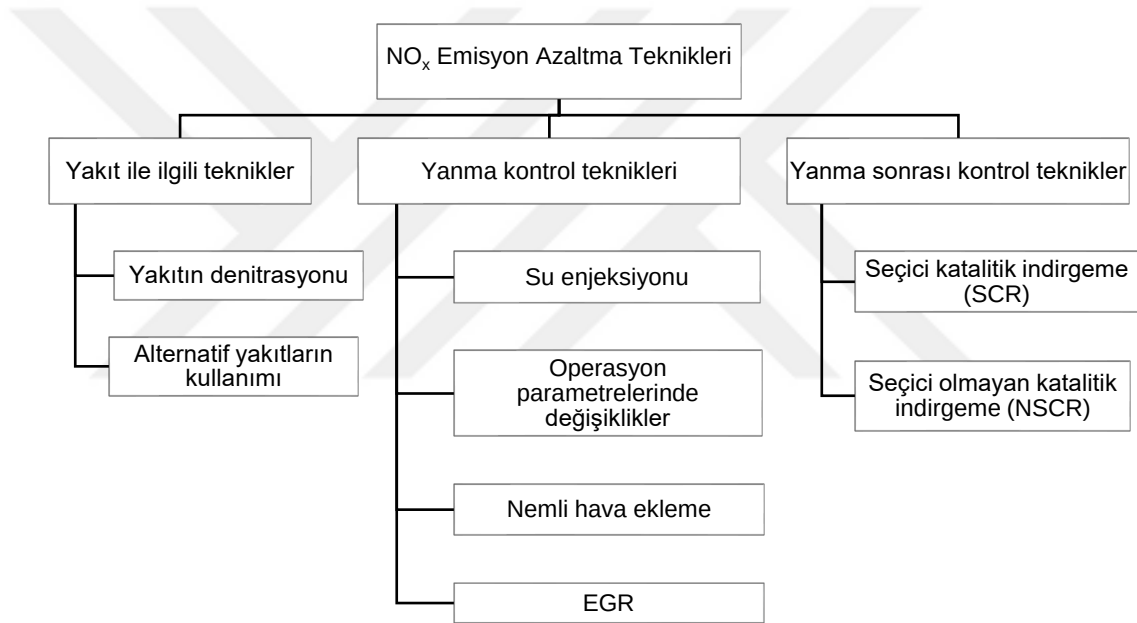
NO_x emisyonları, asit yağmurlarının yanı sıra insanlarda astım, bronşit ve solunum yolları enfeksiyonu gibi hastalıklara neden olmaktadır. NO_x emisyonları ayrıca, atmosferde fotokimyasal duman oluşumuna da neden olmaktadır. Fotokimyasal duman, atmosferde kirletici olarak bulunan NO_x ve hidrokarbonların güneş ultraviyole radyasyonunun etkisiyle oluşan kahverengi, gri bir püstür. Fotokimyasal duman, Sıcaklık dönüşümü ile zemine yakın tutulan, başlıca ozon, nitrik asit ve organik bileşikler olmak üzere antropojenik hava kirleticilerini içermektedir. Fotokimyasal duman, atmosferde oluşan duman ile karıştırılmamalıdır. Duman yapısında ozon, nitrik asit ve organik bileşikler bulunmaktadır. Fotokimyasal dumanın temel olarak içten yanmalı motorlarda, yanma kaynaklı oluşan NO_x emisyonları ile oluştuğu düşünülmektedir. Fotokimyasal duman oluşumunda en önemli kirletici ozon gazıdır. En genel formuyla fotokimyasal duman oluşum reaksiyonu Denklem 1.6'da verilmiştir (Sher, 1998).



Bu denklemde, *VOCs* atmosferde bulunan hidrokarbon ve türevlerini ifade etmektedir. Bu bileşenler kolayca buharlaşma özelliğine sahip uçucu bileşenlerdir.

1.2 NO_x Emisyon Azaltma Yöntemleri

Dizel motorlarda NO_x emisyonlarının azaltılması için üç farklı strateji izlenmektedir. Bunlar; yakıt ile ilgili düzenlemeler, yanma parametrelerinin değiştirilmesi ve yanma sonrası kontrol teknikleridir. Şekil 1.5'te temel NO_x emisyon azaltma teknikleri sınıflandırılmıştır (Raptotasios, Sakellaridis, Papagiannakis ve Hountalas, 2015).



1.2.1 Temiz Alternatif Yakıtlar

Günümüzde, gemi dizel motorlarında yaygın olarak kullanılan yakıtlar Ağır Dizel Yakıt-Heavy Fuel Oil (HFO) ve Gemi Dizel Yakıt-Marine Diesel Oil (MDO) dır. Bu yakıtlar yüksek sülfür oranına sahip olmakla beraber, yüksek yoğunluk ve viskoziteye de sahiptirler. Sülfür içermeyen ya da düşük sülfürlü yakıtlar ile karşılaştırıldığında, yüksek sülfür içerikli yakıtların yanması sonucu oluşan NO_x, SO_x ve Partikül Madde (PM) bileşenleri daha fazladır. Ancak biyodizel, metanol ve LNG gibi alternatif

yakıtların dizel motorlarda doğrudan veya karışım halinde kullanılması bu emisyon miktarlarını azaltmaktadır (Ni, Wang ve Li, 2020).

Fosil kaynaklara alternatif olarak kullanılabilecek yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak biyoyakıtlar, çevresel sorunlara neden olan emisyonların azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Biyoyakıtların temel dezavantajları, sınırlı hammadde ve yüksek üretim maliyetleridir. Belirtilen dezavantajlara rağmen biyodizeller, denizcilik sektöründe kirletici ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasında bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmalarda, iki zamanlı, düşük devirli gemi dizel motorlarında biyodizel kullanımının başta NO_x olmak üzere CO ve SO_x gibi zararlı emisyonların azaltılmasında etkin rol oynadığı belirlenmiştir (Nikolic, Marstijepovic, Cvrk, Gagic ve Filipovic, 2016). Fosil yakıt kaynaklarının azalması, enerji ihtiyacının artması ayrıca bu kaynakların çevresel sorunlara yol açması, her ülkenin enerji politikalarını değiştirmesine neden olmuştur. Ülkeler, gelecek politikalarında yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak amacıyla çeşitli planlamalar yapmaya başlamışlardır. Özellikle biyodizeller, enerji, çevre ve tarım gibi alanlarla bağlantılı sektörlerde enerji ihtiyacının karşılanmasında alternatif kaynak olarak görülmektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya yönelen ülkeler, artan enerji fiyatlarının yükünü azaltmak için biyodizel üretimine yönelmişlerdir. Özellikle ABD ve Çin gibi gelişmiş ülkeler, enerji arzının güvenliğini alternatif kaynaklarla birlikte sağlamak ve en çok ithal edilen petrole bağımlılığı azaltmak için dikkatlerini biyodizel üretimine odaklamışlardır. Biyodizellerin genel emisyon değerleri geleneksel yakıtlar ile karşılaştırıldığında, yanmamış hidrokarbon emisyonlarını yaklaşık %67 ve karbon monoksit (CO) emisyonlarını %48 oranında azalttığı belirlenmiştir. Fosil yakıtlar yerine alternatif biyodizel kullanımının NO_x emisyonlarını azaltma potansiyeli ise yaklaşık %10'dur (Aytav ve Kocar, 2013).

Bir diğer alternatif yakıt olan metanol, içten yanmalı motorlarda farklı şekillerde kullanılabilmektedir. Metanol bir yakıt olarak dizel motorlarda kullanıldığı gibi, benzinli motorlarda da kullanılabilmektedir. Metanol, dizel ve benzin gibi geleneksel yakıtlarla ve biyodizel gibi alternatif yakıtlarla belirli oranlarda karışım halinde kullanılabilmektedir. Genel olarak metanol kömür, doğalgaz, kok fırın gazı, hidrojen

ve biokütle gibi farklı kaynaklardan elde edilmektedir. Dolayısıyla metanolün üretim talebi bu kaynaklardan eksiksiz olarak karşılanabilmektedir. Metanolün geleneksel yakıtlara alternatif olarak dizel motorlarda kullanılması, çevre kirliliğinin ve üretim maliyetin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır (Zhen ve Wang, 2015). Metanol yanması dizel yakıt yanmasına göre hem düşük yanma odası sıcaklığı hem de düşük alev sıcaklığı oluşturmaktadır. Bu durum yanma ürünleri içindeki NO_x ve CO miktarının azalmasını da beraberinde getirmektedir. Metanol ve dizel yakıt karşılaştırıldığında, metanol yanması sonucu daha az yanmamış hidrokarbon oluşmaktadır. Ayrıca metanolün daha düşük yanma odası sıcaklığı oluşturmaması hem ısı miktarını hem de NO_x oluşumunu düşürmektedir.

Gemi dizel motorlarından kaynaklı emisyonları azaltmak amacıyla kullanılan alternatif yakıtlardan bir diğeri de LNG yakıtıdır. Bir deniz yakıtı olarak LNG, SO_x emisyonu oluşturmaz. Ayrıca, geleneksel deniz yakıtları ile karşılaştırıldığında LNG, CO₂ emisyonlarını %10 ila %20, NO_x emisyonlarını %80 ila %90 ve partikül madde emisyonunu %98 ila %100 oranında azaltma potansiyeline sahiptir. Lloyd's Register tarafından Nisan 2011'de LNG yakıtlı açık deniz taşımacılığı hakkında yaptırılan bir çalışma, rekabetçi piyasa fiyatı nedeniyle, LNG'nin gelecekte bir deniz yakıtı olarak yaygın bir şekilde benimsenmesinin muhtemel olduğunu doğruladı. Bir deniz yakıtı olarak LNG'nin kullanımının yaygınlaşması iki faktörle ilişkilidir. Bu faktörlerden ilki yeterli yakıt ikmal altyapısının geliştirilmesi, ikincisi ise yeni gemilerin inşası (veya mevcut gemilerin değiştirilmesi) ile yeterli ve kapsamlı bir planlamanın yapılmasıdır. Belirtilen faktörlerde hangisinin öncelikli olacağına karar verilememesi LNG kullanımının yaygınlaşması önündeki en büyük engel olarak görülmektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular, LNG'yi tercih eden gemilerin sayısı ve türlerinin son yıllarda giderek arttığını göstermektedir. Bazı limanlar, LNG'nin bir deniz yakıtı olarak ikmal edilmesini düzenlemek için çeşitli düzenlemeler yürürlüğe koymuştur. Bu düzenlemeler bazı ülkeler tarafından kabul edilmişken, bazıları tarafından taslak olarak kabul edilmeyi beklemektedir (Xu, Testa ve Mukherjee, 2015). Tablo 1.1'de biyodizel, methanol, LNG, MDO, HFO ve geleneksel dizel yakıt özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Ni vd., 2020).

Tablo 1.1 Alternatif yakıtların özellikleri (Ni vd., 2020).

Özellik	Birim	Biyodizel	Metanol	LNG	HFO	MDO	Dizel
Yoğunluk	Kg/m ³	890	795	443,3	934,8	<900	847
Viskozite (40°)	mm ² /s	4-6	0,58	-	24,27	<11	2,72
Setan sayısı	-	50	3	-	>20	>35	51
Kül oranı	%	-	-	-	0,042	<0,01	<0,01
Alt ısııl değer	MJ/kg	37,5	20,26	50	41,62	42	42,5
Oksijen kütle oranı	%	11	50	-	0,65	-	0

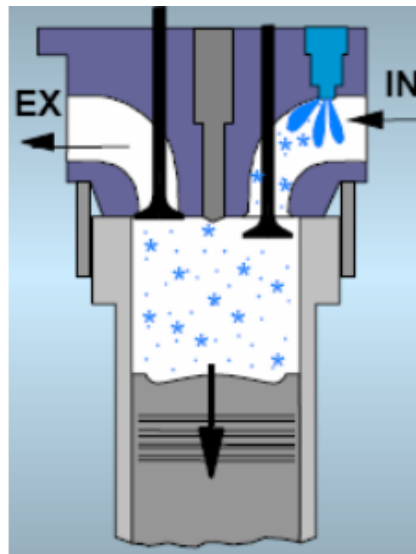
1.2.2 Yanma Kontrol Teknikleri

Dizel motorlarda NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla kullanılan yaklaşımlardan bir diğeri ise motor yanma parametrelerinin değiştirilmesidir. Yanma odasına buhar-su enjeksiyonu, içten yanmalı motorlarda yanma kalitesini etkileyerek NO_x emisyonlarının azaltılmasını sağlayan bir yöntemdir. Su-buhar enjeksiyonu ayrıca motor performansının artmasını da beraberinde getirmektedir (Kayadelen ve Ust, 2013). Dizel motorlarda NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla su ya da buhar, yanma odasına enjeksiyon ile dört farklı şekilde gönderilmektedir. Bunlardan ilki, bir enjektör aracılığı ile suyun dizel yakıt ile karışım halinde gönderilmesi, ikinci yöntem suyun ayrı bir enjektör aracılığı ile doğrudan yanma odasına püskürtülmesi, üçüncü yöntem püskürtülen su ve dizel yakıtın birbirine karışmadan kademeli bir şekilde tek bir enjektör aracılığı ile yanma odasına gönderilmesi, son yöntem ise emme manifoldundan hava ile verilmesidir. Yapılan çalışmalarda, dizel motora su enjeksiyonunun NO_x emisyonlarını yaklaşık %50 seviyelerine kadar azalttığı belirlenmiştir (Ayhan, 2009).

Dizel motorlarda NO_x emisyonlarını etkileyen parametrelerden biri de motor operasyon parametrelerinin değiştirilmesidir (McTaggart-Cowan, Bushe, Rogak, Hill ve Munshi, 2003). Dizel motorlarda motor performans ve emisyonlarının kontrol edilmesi amacıyla yapılan çalışmalar, genellikle valf kaldırma yüksekliklerinin değişimi, yakıt püskürtme zamanlaması, emme havası basınç ve sıcaklıklarının değiştirilmesi gibi motor operasyon parametrelerinin değiştirilmesini kapsamaktadır. Emme valfi kaldırma yüksekliğinin değişimi motor içerisine alınan hava miktarını etkileyen temel parametredir. Uygun valf kaldırma yüksekliği, yanma verimini artırarak sıcaklık artışına bağlı NO_x emisyonlarının artmasına neden olmaktadır

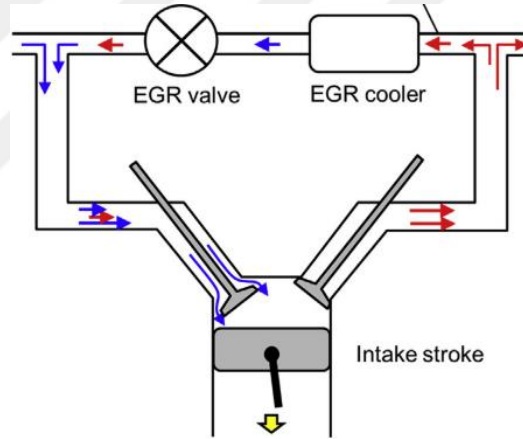
(Bayramoğlu, Yılmaz ve Kaya, 2019). Aynı şekilde yakıt püskürtme parametrelerinin değiştirilmesi, yanma odası hava-yakıt karışımını etkilemektedir. Erken püskürtme zamanlaması yanmanın etkin gerçekleşmemesine, geç püskürtme zamanlaması ise yeterli sıcaklık ve basınç koşullarının oluşmaması nedeniyle performans düşümüne neden olmaktadır. Optimum püskürtme zamanlaması ise yanma odasının sıcaklığının arttırması ile özellikle NO_x emisyonlarının oluşumu üzerinde önemli etkiye sahiptir (Bayramoğlu, 2018; Bayramoğlu ve Nuran, 2020).

Dizel motorlarda NO_x emisyonlarını azaltmada kullanılan tekniklerden biri de emme havası ile yanma odasına nemli hava gönderilmesidir. Emme havasından gönderilen hava ile dengede olan su, içerisinde farklı oranlarda çözünmüş O₂ ve N₂ içermektedir (Pirola ve diğerleri, 2020). Dizel motorlarda emilen havanın kütleli olarak %1'i kadar su püskürtüldüğünde, NO_x emisyonlarında %20'lik azalma gösterdiği deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Emme manifolduna gereğinden fazla su göndermenin çeşitli dezavantajları da mevcuttur. Yanma odasına gönderilen fazla suyun buharlaşmaması, silindir yağlamada kullanılan yağın bozulmasına, yağlama yağındaki bozulmalar ise silindirlerde aşınmalara neden olmaktadır. Ayrıca püskürtülen fazla su, emme supabında korozyon oluşumunu da beraberinde getirmektedir. Şekil 1.6, emme havasına su enjeksiyonunu göstermektedir (Ayhan, 2009).



Şekil 1.6 Su enjeksiyonu (Ayhan, 2009).

Egzoz Gaz Resirkülasyonu-Exhaust Gas Recirculation (EGR) dizel motorlarda NO_x emisyonlarının azaltılmasında kullanılan en etkin emisyon kontrol tekniklerinden biridir. EGR sistemi, dizel motorlarda egzoz gazlarının bir bölümünü tekrar emme havası ile yanma odasına gönderilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem, emme havası kalitesinin kötüleşmesi ile yanma verimliliğini ve motor performansını düşürmektedir. Yanma performansının azalması ortalama yanma odası sıcaklığını düşürmektedir. Azalan yanma odası sıcaklığı, NO_x emisyonlarının oluşum mekanizmasını etkileyerek bu emisyonların azalmasını sağlamaktadır. Bu durum yanma sürecindeki oksijen konsantrasyonunun doğrudan etkilediği Zeldovich NO mekanizmalarından biri olan hızlı NO mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 1.7’de dizel motorlarda kullanılan EGR sistem yerleşimi verilmiştir (Okubo ve Kuwahara, 2020b).



Şekil 1.7 EGR sistem şematığı (Okubo ve Kuwahara, 2020b).

1.2.3 Yanma Sonrası Kontrol Teknikleri

İçten yanmalı motorlarda, özellikle ağır yakıt ile çalışan dizel motorlarda NO_x emisyonlarının azaltılmasında kullanılan tekniklerden biri de Seçici Katalitik İndirgeme sistemleridir. Gemilerde Tier III emisyon düzenlemesi ile NO_x emisyonlarının Tier II düzenlemesine göre yaklaşık %80 oranında azaltılması amaçlanmaktadır. Bu oranın sağlanması ya yenilenebilir temiz alternatif yakıtların ve daha çevreci güç sistemlerinin kullanımı ya da SCR gibi yüksek NO_x azaltma performansına sahip bir sistemin kullanılması ile mümkündür. SCR sistemi dizel

motor egzoz sistemine UWS püskürtülmesi ile NO_x emisyonlarının azaltılmasını sağlamaktadır. Tablo 1.2’de çeşitli NO_x kontrol teknolojilerinin emisyon azaltma verimlilikleri gösterilmiştir.

Tablo 1.2 NO_x kontrol teknolojileri (Corbett ve Fischbeck, 2002)

Metot	Yakıt	NO _x indirgeme verimliliği
Seçici Katalitik İndirgeme (SCR)	Gaz veya Dizel	%90
EGR	Dizel	%30-%50
Su-Buhar püskürtülmesi	Gaz veya Dizel	%30-%50
Operasyon parametrelerinin değiştirilmesi	Gaz ve Dizel	%20

Yüksek egzoz sıcaklıklarında NO_x emisyonları seçici olmayan katalitik indirgeme sistemleri ile sağlanmaktadır. Seçici olmayan katalitik indirgeme sistemleri ise 850 °C ile 1050 °C arası egzoz sıcaklıklarda katalizör kullanılmadan NO_x emisyonlarını azaltmada kullanılan tekniklerdendir. Bu sistemlerde termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan amonyak bileşenleri doğrudan NO_x emisyonları ile reaksiyona girerek su buharı ve serbest azot atomlarını oluşturmaktadır (Masera ve Hossain, 2021).

Gemi dizel motorlarında SCR sistemi gibi egzoz sistemine uygulanan NO_x emisyon azaltma teknikleri motor performansını en az etkilemektedir. Bu sistemlerin dizel motorlarda kullanımının tek dezavantajı ise motor egzoz sisteminde kullanılan katalizörlerden kaynaklı karşı basınç oluşturmaktır. Egzoz karşı basıncı, dizel motorlarda SCR, dizel partikül filtresi (DPF) ve dizel oksidasyon katalizörü (DOC) kullanımına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Dizel motorlarda karşı basınç hem motor performansının azalmasına hem de yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca yanma performansını etkileyerek emisyonların artmasına da neden olmaktadır. Dolayısıyla dizel motorlarda karşı basınç etkisinin azaltılması amacıyla egzoz sistemine uygulanan sistemler üzerinde yer alan ekipmanlar için en uygun tasarımların yapılması gerekmektedir. Temel olarak SCR sistemlerinde kullanılan katalizör ve statik karıştırıcıların basınç düşümünü en aza indirecek şekilde tasarlanması, karşı basıncın azaltılmasında önemli bir parametredir (Gülmez ve Özmen, 2021; Martyr ve Plint, 2012).

1.3 Literatür Özeti

Sung vd. (2020) tarafından yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda SCR sisteminin NO_x emisyon azaltma performansı, NH_3 kayma miktarı ve minimum üre tüketimi belirlenmiştir. Bu çalışmada, maksimum NO_x azaltma performansına karşılık, kullanılan minimum üre miktarı araştırılmıştır. Çalışmada katalizöre giden NH_3 'ün homojen dağılımının sağlanması amacıyla dört farklı karışım odası tasarlanmış ve parametrik çalışmalar ile her bir tasarımın NH_3 homojenliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan parametrik çalışmalar ile ayrıca %100, %75, %50 ve %25 yük koşulları için NO_x azaltma performansı ve üre tüketim miktarı belirlenmiştir. Sayısal olarak yapılan parametrik çalışmalar ile, SCR sistemi boyunca amonyak, üre ve izosiyanik asit gibi kimyasal bileşenlerin dağılımı incelenmiştir.

Zhu, Li, Xia, Feng ve Zhou (2020), farklı yük koşullarında yüksek basınç SCR sistemi için NH_3/NO_x homojen dağılımını incelemek için beş farklı karıştırıcı tasarlanmıştır. Çalışmada, karıştırıcıların performansları, basınç düşüm oranı, homojenlik katsayısı ve NH_3/NO_x standart sapması gibi parametreler sayısal yöntemlerle belirlenmiştir. Çalışmalar iki zamanlı gemi dizel motor egzoz verileri için yapılmıştır.

Park vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, amonyak homojenliğini sağlayan iki farklı karıştırıcı tasarlanmış ve performans parametreleri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlar homojenlik indeksi bakımından karşılaştırılmış ve her karıştırıcı tipi için karıştırıcı kanatları 30° , 45° ve 60° olacak şekilde parametrik olarak değerlendirilmiştir. SCR sisteminde katalizör geometrisi, gözenekli ortam modeli yaklaşımı ile basınç düşümü denklemlerinden yararlanılarak sayısal olarak modellenmiştir.

Zhu vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, yüksek basınç koşulları altında çalışan bir SCR sistemi için farklı yük koşullarında ve farklı statik karıştırıcı tasarımlarında SCR sisteminde meydana gelen basınç düşümü sayısal olarak hesaplanmıştır. Çalışmada farklı karıştırıcıların yanı sıra SCR sistemi boyunca dirseklerde ve ani

genişleme bölgelerinde basınç düşümünü engellemek amacıyla akım düzenleyiciler yerleştirilmiştir. Çalışma iki zamanlı düşük devir sayılarında çalışan gemi dizel motoru SCR sisteminde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda farklı karıştırıcı ve akım düzenleyiciler ile basınç düşümünün yaklaşık 4910 Pa'dan 4387 Pa'a ve hız standart sapma değerinin ise %37,77'dan %10,17'ye kadar azaldığı belirlenmiştir.

Guo, Deng, Zhang, Shen ve Wilson (2017), yaptıkları çalışmada, zamana bağlı NO_x azaltma performansını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma, egzoz gazının tüpler aracılığı ile N₂, O₂ ve NH₃ gazlarından oluşacak şekilde istenilen akış oranlarında SCR sistemine aktarılması ile sağlanmıştır. NO_x indirgenmesi için gerekli egzoz sıcaklığı için ön ısıtıcı kullanılmıştır. Yapılan çalışmada üre yerine SCR sistemine doğrudan tüplerden amonyak püskürtülmüş ve SCR sisteminde gerçekleşmesi gereken buharlaşma, termoliz ve hidroliz reaksiyonları yapılan çalışma kapsamında incelenmemiştir. Çalışma sonucunda SCR sistem boyunca NO_x azaltma oranı farklı nozul çapları için belirlenmiştir.

Choi, Sung, Choi ve Kim (2015) tarafından yapılan çalışmada, %25, %50, %75 ve %100 yüklerinde püskürtülen ürenin amonyağa dönüşüm ve NO_x azaltma performans verimliliği sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmalar farklı yük koşullarına bağlı sıcaklık, hız ve ortalama üre tanecik çapı sınır koşullar altında yapılmıştır. Amonyak dönüşüm verimliliği zamana bağlı olarak sayısal olarak incelenmiş ve çalışma sonucunda farklı püskürtme hızlarına bağlı NO_x azaltma performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Zhang, Shi, Yin, Wu ve Dai (2020) tarafından gemi dizel motor verileri ile yapılan çalışmada, SCR sistemine püskürtülen üre ile NO_x azaltma performans verimliliği arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada 31 veri yapay sinir ağları yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu analizlerde, makine yükü ve devir sayısı giriş verisi olarak kullanılmış ve bu verilerden egzoz akış oranı, NO_x konsantrasyonu ve egzoz sıcaklıkları tahmin edilmiştir.

Zhu vd. (2019) çalışmalarında egzoz içerisinde bulunan SO_x ve NO_x bileşenlerinin NH_3 kimyasalları ile reaksiyona girmesi ile istenmeyen gazların oluşum potansiyelini araştırmışlardır. Çalışma iki zamanlı gemi dizel motoru SCR sistemi için egzoz verileri kullanılarak GT Power yazılım aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında SO_x ve NO_x ile NH_3 kimyasal türlerinin nitrat ve sülfata dönüşümünü sağlayan kimyasal indirgenme mekanizmaları tanımlanmış ve çalışma sonucunda farklı sıcaklıklara bağlı oluşum verimlilikleri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca gemilerde sülfür katkılı yakıtların kullanımı sonucu zararlı kimyasalların SCR sistemlerinde oluşma mekanizmaları da tartışılmıştır.

Lu vd. (2021) tarafından yüksek basınç gemi dizel motoru SCR sisteminde baypas valfi kontrolü ve sistem termodinamik modeli teorik olarak incelenmiştir. Çalışma dört farklı motor yükü koşulu için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kontrol mekanizması ile %0, %18 ve %42,8 CBV valf açıklık oranlarında emme havası basıncı, egzoz basıncı, sistem basınç düşümü, hava akış oranı ve egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi araştırılmıştır. Artan baypas kontrol valfi oranı ile egzoz sıcaklığı ve basıncı artmış, buna karşılık silindir basınç düşümü ve hava kütle akış oranı azalmıştır. SCR sistemi uyarlanmış dizel motor için sistem boyunca egzoz basınç düşümü, sıcaklık değişimi ve yakıt tüketimi incelenmiştir. Ayrıca yakıt içerisindeki sülfür oranının SCR sistemi kullanımı ile yakıt tüketimini arttırdığı da çalışma sonucunda elde edilen bulgulardandır. SCR kullanımı ile yüksek kükürt oranına sahip yakıt için yakıt tüketimi 0,04 gr/kWh artarken, SCR sistemi kullanılmadığında bu değer 2,08 gr/kWh olarak belirlenmiştir. Bunun yanında, turboşarjer kullanımının, Tier II, düşük sülfür Tier III ve Yüksek sülfür Tier III koşulları için, maksimum silindir basıncı, hava akış oranı, emme havası basıncı, emme havası sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklık ve basıncı üzerine etkileri de çalışma sonucunda belirlenen diğer parametrelerdendir.

Jang, Na, Roh, Ahn ve Choi (2021) tarafından yapılan sayısal çalışmada, termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan NH_3 bileşenlerinin dönüşüm performansı ve sistem boyunca homojen dağılımı incelenmiştir. Ayrıca sayısal çalışmalarda, iki farklı statik mikser kullanılmış ve kullanılan statik mikserlerin homojen NH_3 dağılımına etkisi belirlenmiştir. Analiz sonuçları püskürtülen ürenin NH_3 bileşenlerine

dönüşümünde egzoz sıcaklığının yanı sıra yeterli zaman ve mesafenin de önemli olduğunu ortaya koymuştur.

Jia vd. (2021) tarafından yapılan deneysel çalışmada, bir gemi dizel motoru SCR sisteminde ticari oksit ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and TiO_2) destekli geçiş metali oksitleri katalizörlerinin NO_x emisyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada ağırlıklı olarak %2 oranında $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ katalizör kullanımının, NO_x emisyonlarını yaklaşık olarak %94 oranında azalttığı yapılan deneyler ile belirlenmiştir.

Kim ve Lee (2019), bir gemi SCR sistemi için biri detaylı, diğeri temel olmak üzere iki farklı tasarım gerçekleştirmişlerdir. Tasarımlar üzerinde ilk olarak üre püskürtme nozul açısının ve konumunun NO_x azaltma performansına etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. 30° , 40° ve 55° nozul açılarındaki gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda 40° püskürtme açısında NO_x azaltma performansının diğer açılara oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca üre püskürtme nozulu egzoz çıkışından itibaren sistem çapı D olacak şekilde 2D, 3D, 4D ve 5D mesafelere yerleştirilmiş, en yüksek NO_x indirgeme oranının 5D konumunda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada incelenen bir diğer konu ise kademeli ve girdaplı statik karıştırıcıların SCR sisteminde basınç düşümü ve NH_3 kayması üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Parametrik çalışmalar %25, %50, %75 ve %100 yük koşulları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve elde edilen NO_x sonuçlarının Tier III düzenlemesi ile uyumluluğu değerlendirilmiştir.

Y. Zhu vd. (2019) tarafından sayısal olarak yapılan çalışmada, iki farklı türbülans yapıcı statik karıştırıcı ile dirsek ve ani genişleme bölgelerine yerleştirilen akım düzenleyicilerin NH_3 dönüşüm verimliliğine, NH_3 homojen dağılımına ve NO_x azaltma performansına etkisi araştırılmıştır. Sayısal çalışmalarda dirsek bölgesinde kullanılmak üzere üç farklı ve ani genişleme bölgesinde kullanılmak üzere yedi farklı model için parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar SCR sistemi boyunca homojen hız dağılımının akım düzenleyici kullanılması ile arttığını göstermiştir. Akım düzenleyici kullanılmama durumunda hız dağılımı standart sapması %27 iken dirsek bölgesinde kullanılması sonucu bu oran %34 seviyelerine

kadar artmıştır. Genişleme bölgesinde kullanılması ise hız standart sapmasını yaklaşık %11 seviyelerine kadar azalttığı görülmüştür. Basınç düşümü incelendiğinde ise akım düzenleyici ekipmanların kullanılmasının SCR sistemi basınç düşüm miktarını azalttığı da elde edilen bulgulardandır. Ayrıca akım düzenleyicilerin kullanılması SCR katalizör girişinde NH_3 bileşenlerinin daha homojen dağılmasını sağlayarak NO_x emisyonlarının daha da azalmasını beraberinde getirmiştir.

Wardana, Hyun ve Lim (2019), üre püskürtme zamanlamasının dizel motorunda NO_x emisyon azaltma performansına etkisini incelemişlerdir. Parametrik çalışmalar sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Sayısal çalışmalarda üre püskürtme zamanlamasının 20 saniye altında olduğu durumlarda modelin stabil davranmadığı ortaya konulmuştur. Bu durumun sebebi ise ürenin SCR sistem duvarlarında sıkışması ve buharlaşma sürecinin etkili bir şekilde gerçekleşememesidir. Elde edilen sonuçlar, NO_x indirgeme ve üre parçalanma reaksiyonlarının etkili bir şekilde gerçekleşmesi için uygun püskürtme zamanlamasının en az 20 saniye olması gerektiğini göstermiştir.

Jung vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, Cu-zeolite, Fe-zeolite, vanadyum ve V ve Cu zeolite katalizörlerin N_2O , NO_2 ve NO emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda vanadyum katalizörü en düşük N_2O emisyon miktarını sağlarken, Fe-zeolite ve Cu-zeolite en yüksek N_2O miktarına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, NO_2 ve NO_x bileşenleri incelendiğinde, SCR giriş sıcaklığından N_2O bileşenlerinin NO_x bileşenlerinden daha az etkilendiği de araştırma kapsamında elde edilen bulgulardandır.

Y. Zhang, Lou, Tan, Hu ve Fang (2022) tarafından ağır yük koşullarında çalışan bir dizel motorunda, dizel oksidasyon katalizörü (DOC), dizel partikül filtresi (DPF) ve SCR sisteminin partikül, NO_x emisyonlarını azaltma performanslarına ve amonyak kaymasına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan ekipmanların motor performansı ve yakıt tüketimine etkisi de araştırılan diğer konulardandır. Çalışma sonucunda motor torku, egzoz sıcaklığının DOC, DPF ve SCR kullanımı ile azaldığı, yakıt tüketiminin ise arttığı belirlenmiştir. PM emisyonlarının DPF çıkışında, NO_x

emisyollarının ise SCR çıkışında yüksek oranda azaldığı da belirlenen diğler sonuçlardandır. Artan motor devirlerinde NH₃ dönüşüm verimliliğinin arttığı, NH₃ kaymasının ise azaldığı belirlenmiştir. Çalışma, dizel motorlarda kullanılacak DOC, DPF ve SCR kullanılacak sistemlerin motor performansı ve emisyonlara etkisi göz önünde bulundurularak en uygun sistem seçiminin yapılması konusunda bilgi vermektedir.

Raza, Woo ve Kim (2022) deneysel olarak yaptıkları çalışmada, SCR sistemine NO_x emisyonlarının indirgenmesinde kullanılan amonyağın oluşumu için üre-su zeltisi (UWS) yerine amonyum karbamat kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada UWS ve amonyum karbamat kullanımının pşkrtme eşik sıcaklığına, DeNO_x performansına, NH₃ kaymasına etkisi değlerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda amonyum karbamat kullanımı, UWS ile karşılaştırıldığında DeNO_x oranı amonyum karbamat kullanımı ile yaklaşık %8 ile %14 oranında artmaktadır. Pşkrtme eşik sıcaklığı 200 C'den 100 C seviyelerinde olup, azalan sıcaklık ile NH₃ dönüşüm verimliliğinin arttığı belirlenmiştir. Son olarak yapılan deneysel çalışmalarda NH₃ kaymasının oluşumu gözlemlenmemiştir.

Yukarıda detaylı olarak incelenen çalışmalara ek olarak 2012-2022 yılları arasında “Gemilerde Seçici İndirgeme Sistemleri” başlığı altında Web of Science veri tabanında taranan çalışmalar konu ve yöntem içererek şekilde Tablo 1.3'te zet olarak verilmiştir.

Tablo 1.3 Gemi SCR sistemleri kapsamında yapılan çalışmalar için özet tablo

Yazar	Yöntem	Konu
(Tian, Zhang, Xiao ve Zhou, 2012)	Sayısal	SCR sistemlerinde statik karıştırıcıların NH_3 homojenliğine etkisinin değerlendirilmesi
(Österman ve Magnusson, 2013)	Teorik	Gemilerde SCR yerleşiminin teknik ve maliyet açısından değerlendirilmesi
(Oh ve Lee, 2014)	Deneysel	Bir SCR sisteminde püskürtme noktası ve statik karıştırıcı konumunun tanecik homojenliğine ve NO_x dönüşüm verimliliğine etkisinin değerlendirilmesi
(Y. H. Xiao, Chu ve Tian, 2014)	Sayısal	UWS püskürtme nozul çapı ve püskürtme açısının gemi SCR sisteminde NO_x dönüşüm verimliliğine etkisinin değerlendirilmesi
(Y. Xiao, Tian, Zhou ve Zhang, 2014)	Teorik	SCR sistemlerinde UWS parçacıklarının buharlaşma ve parçalanma işlemlerinin değerlendirilmesi
(Ku, Hong, Park, Chung ve Sohn, 2014)	Deneysel	SCR sistemlerinde UWS parçalanma reaksiyonlarının NO_x azaltma performansına etkisinin değerlendirilmesi
(Ku ve Hong, 2015)	Deneysel	Ölçeklendirilmiş bir reaktörde UWS parçalanmasının farklı termo-akışkan koşullarında değerlendirilmesi
(Ku, Hong ve Park, 2015)	Sayısal	Bir SCR sisteminde UWS püskürtme noktası ile katalizör arasındaki mesafenin UWS ayrışmasına olan etkisinin değerlendirilmesi
(Y. Chen ve Lv, 2015)	Sayısal	SCR ve Susturucu sistemlerinin birlikte kullanıldığı bir sistemin tasarım ve performans parametrelerinin değerlendirilmesi
(Tian, Xiao, Zhou, Zhang, ve diğerleri, 2015)	Sayısal	SCR sisteminde statik karıştırıcıların performansa etkisinin değerlendirilmesi

Tablo 1.3 devamı

(Tian, Xiao, Zhou ve Zhang, 2015)	Teorik	SCR sisteminde UWS püskürtme konumunun optimizasyonu
(H. Zhang, Wang ve Wang, 2015)	Teorik	Gemilerde amonyak kayma miktarının ANFIS metodu ile optimize edilmesi
(Magnusson, Fridell ve Härelind, 2016)	Deneyisel	Vanadyum Tabanlı gemi SCR sistemlerinin düşük sıcaklıklarda NO ₂ /NO _x oranı değişiminin sistem performansına etkisinin değerlendirilmesi
(Cao ve Jiang, 2016)	Teorik	Bir gemi SCR sisteminde giriş parametrelerinin Kalman Filtresi ile tahmin edilmesi
(Jiang, Cao ve Wei, 2016)	Teorik	Dizel motorlarda amonyak yoğunluğunun Kalman Filtresi ile tahmin edilmesi
(Krastev ve diğerleri, 2016)	Sayısal	Bir gemi SCR sisteminde farklı katalizör yapılarının sistem performansına etkisinin optimize edilmesi
(Jang ve Park, 2016)	Sayısal	Gemi SCR sistemlerinde UWS püskürtme parametreleri ile UWS karışımının statik karıştırıcı kullanımına göre değerlendirilmesi
(Jiang vd., 2016)	Teorik	Tasarım aşamasında amonyak kesit hassasiyet faktörü nün tahmini için NO _x sensor kullanımının değerlendirilmesi
(Lee, 2017)	Sayısal	Dizel motorda UWS püskürtme noktası ve statik karıştırıcı konumunun UWS parçacık dağılımına etkisinin değerlendirilmesi
(Ryu, Kim, Cho ve Nam, 2017)	Deneyisel	Gemi SCR sisteminde farklı kalınlıklardaki katalizör kullanımının motor performansı ve basınç düşümüne etkisinin değerlendirilmesi

Tablo 1.3 devamı

(Y. Guo, Deng, Zhang, Shen ve Wilson, 2017)	Deneyisel	Bir gemi SCR sisteminde farklı katalizör uzunluklarının toplam denitrifikasyona etkisinin değerlendirilmesi
(Ma ve Meng, 2017)	Teorik	UWS püskürtme miktarının dinamik olarak kontrolünün sağlanması
(Konstandopoulos ve diğerleri, 2017)	Deneyisel	SCR katalizörler yapısının basınç düşümü ve performansa etkisinin değerlendirilmesi
(S. Park ve Oh, 2018)	Deneyisel	SCR performansının artırılması amacıyla Amonyak homojenliğinin belirlenmesinde ısı sensörü kullanımının değerlendirilmesi
(Lee, 2018)	Sayısal ve Deneyisel	UWS buharlaşması ve homojenliğinin farklı statik karıştırıcılar kullanılarak değerlendirilmesi
(You, Wei ve Jiang, 2018))	Teorik	Bulanık mantık yöntemiyle UWS dozunun kontrolünün sağlanması
(M. Wang, Zhang ve Gong, 2019)	Sayısal	Farklı nozul parametreleri ile SCR sistem akış homojenliğinin sağlanması
(F. Guo, Duan ve Huang, 2019)	Deneyisel	Gemi dizel motoru için SCR sistem tasarımının sağlanması
(Foteinos, Konstantinidis, Kyrtatos ve Busk, 2019)	Teorik	Gemi dizel motorlarında SCR çıkış sıcaklık değişiminin araştırılması
(Mehdi, Zhou, Zhu, Shah ve Chand, 2019)	Sayısal	SCR Karışım performansının artırılması amacıyla statik karıştırıcı tasarımı parametrelerinin araştırılması
(Um, Kim ve Kim, 2019)	Sayısal	AB-SCR sisteminde UWS karışım odası tasarım parametrelerinin değerlendirilmesi
(Kleinhenz, Fiedler, Lauer ve Döring, 2019)	Deneyisel	SCR- DPF ve DOC kullanımının sülfür direnci ve NO ₂ emisyonlarına etkisinin araştırılması

Tablo 1.3 devamı

(Youhong Xiao, Zhao, Tian ve Tan, 2018)	Teorik	Amonyak kaymasının en aza indirgenmesi amacıyla UWS püskürtme miktarının belirlenmesini sağlayan kontrolcü parametrelerinin değerlendirilmesi
(Liang, Zhao, Zhang ve Liu, 2019)	Teorik	Basınç düşümünü minimum yapacak SCR sistem tasarımının gerçekleştirilmesi
(Man, Hongpeng, Dian ve Zhenqiang, 2019)	Sayısal	SCR sistemi içerisinde UWS püskürtme parametreleri ile hız, basınç ve sıcaklık dağılımının belirlenmesi
(Foteinos, Christofilis ve Kyrtatos, 2020)	Sayısal	Dalgalı koşullarda ticari bir geminin SCR sisteminin tork, egzoz gazı sıcaklığına ve performansa etkisinin değerlendirilmesi
(Z. Wang, Zhu, Zhou ve Feng, 2020)	Sayısal ve Deneysel	Vanadyum tabanlı katalizörün NO ve NO ₂ bileşenlerini indirgeme performansının değerlendirilmesi
(G. Zhang ve diğerleri, 2021)	Teorik	Gemi SCR sistemlerinde emisyon ve ekonomik analiz ilişkisinin belirlenmesi
(Resitoglu, 2021)	Deneysel	Birincil yakıt olarak kullanılan biyodizel, DOC ve SCR etkinliği üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi
(Yu ve Zhang, 2021)	Sayısal	Bakır-zeolite katalizörlü bir SCR sisteminde kütle transferi ve fazlar arası değişimin incelenmesi
(Zhiqing Zhang ve diğerleri, 2022)	Sayısal	SCR sisteminde üniform olmayan gözenekli katalizör üzerinde basınç düşümü, hız dağılımının değerlendirilmesi

1.4 Çalışmanın Amacı

Gemi dizel motorlarından kaynaklı NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla çeşitli teknikler uygulanmaktadır. IMO tarafından 2016 yılında yürürlüğe konulan Tier III düzenlemesi ile, gemi kaynaklı emisyonların emisyon kontrol alanlarında 3,4 gr/kWh

seviyelerine kadar azaltılması amaçlanmıştır. Tier III düzenlemesi gereği gemi dizel motorlarında NO_x emisyonlarının azaltılması, temiz alternatif yakıtların kullanılması, motor yanma parametrelerinin değiştirilmesi ya da egzoz gazının kimyasal teknikler ile arıtılması yöntemleri ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada, “dizel motorlardan kaynaklı NO_x emisyonları için getirilen Tier III sınırlaması, SCR sistemleri ile karşılanabilmektedir” hipotezi kurulmuş ve hipotezin doğrulanması amacıyla SCR sisteminin gemi dizel motorlarında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, SCR sistemi NH₃ dönüşüm verimliliği ve NO_x azaltma performansı, hem SCR model geometrik parametreler ile hem de RBV gibi operasyon parametreleri ile incelenmiştir.

Literatürde NH₃ dönüşüm verimliliği ve NO_x azaltma performansının artırılması amacıyla genel olarak statik karıştırıcılar kullanılmaktadır. Literatürde yapılan statik karıştırıcılara alternatif olarak, SCR model tasarım parametrelerinin sistem performansına etkisi araştırılmıştır. YB-SCR Sistemi için %85 yük koşullarında, sistem çapı, SCR uzunluğu, karışım odası boyu ve konumu gibi geometrik parametrelerin SCR sistem performansına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma, bu yönüyle, gemi dizel motorları için en uygun SCR sistem boyutlarının belirlenmesi bakımından literatüre önemli katkılar sunacaktır.

SCR sistemlerinde NO_x indirgenmesi, egzoz sistemine UWS püskürtülmesi ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada, iki zamanlı ve dört zamanlı dizel motor SCR sistemleri için IMO Tier III düzenlemesini sağlayabilecek en uygun UWS miktarları belirlenmiş, YB-SCR sisteminde farklı RBV açıklıklarının SCR sistemi NO_x azaltma performansı, NH₃ kayması ve basınç düşümü gibi parametrelere etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, IMO Tier III düzenlemesine göre değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların, gelecekte uygulanabilecek yeni düzenlemelere göre RBV açıklığı ve gerekli UWS püskürtme miktarının belirlenmesi konusunda önemli katkılar sunması beklenmektedir.

Çalışmada ortaya konulan bir diğer konu da ele alınan aynı hız koşullarına sahip farklı oranlarda egzoz debisinin sistem performansına etkisinin incelenmesidir. Aynı

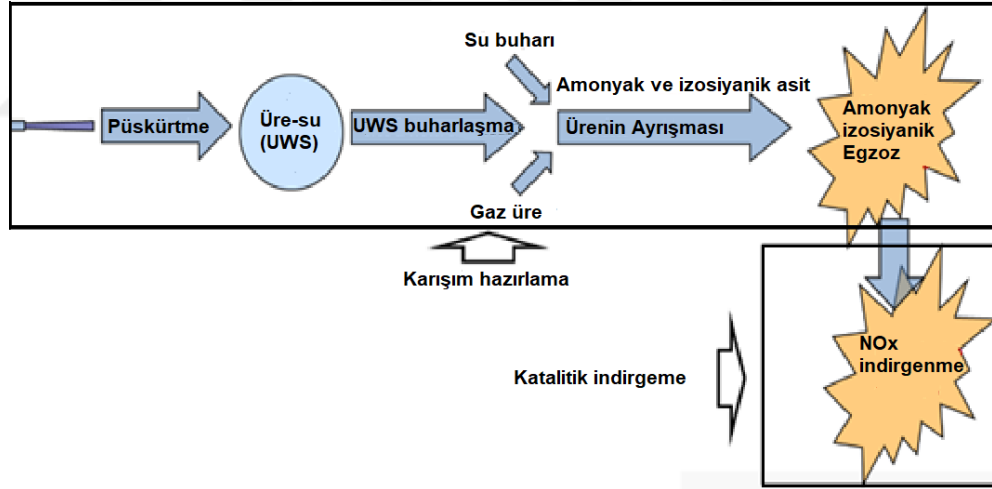
yük koşullarında egzoz debisi motor gücü ile değişmektedir. Dolayısıyla aynı hız koşullarında farklı egzoz debilerinin incelenmesi farklı güç kapasitelerine sahip gemi dizel motorları için uygun SCR sistem parametrelerinin belirlenmesi açısından önemlidir. SCR girişinde farklı oranlarda NO_x bileşenlerinin SCR çıkış NO_x miktarına etkisi de araştırılan diğer bir konudur. Böylece farklı teknikler ile belirli oranlarda azaltılan NO_x emisyonlarının ilgili düzenlemelere göre azaltılmasında kullanılacak SCR sistem parametrelerinin belirlenmesi sağlanacaktır.



BÖLÜM 2

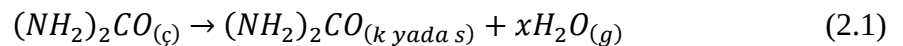
SCR SİSTEM MATEMATİK MODELİ

SCR sistemlerinde UWS'nin fiziksel ve kimyasal ayrışma sürecini anlamak için SCR işlemini detaylı bir şekilde incelemek gerekmektedir. SCR sisteminde UWS bir enjektör ile dizel motor egzoz sistemine püskürtülmektedir. Püskürtülen UWS, yaklaşık %40 üre ve %60 su içermektedir. Üre oranı, otomobil SCR sistemlerinde %32,5'lere kadar düşmektedir. Püskürtülen UWS, egzoz gazı sıcaklığı etkisi ile farklı kimyasal türlere dönüşmektedir. Bu dönüşüm farklı kimyasal reaksiyonlarla gerçekleşmektedir. Kimyasal reaksiyonların verimli bir şekilde gerçekleşmesinde sistem tasarım parametrelerinin büyük etkisi vardır. SCR sisteminde püskürtülen UWS Şekil 2.1'de gösterildiği gibi egzoz gazı sıcaklığı etkisi ile ayrılmaktadır. UWS'nin ayrışması sonucu oluşan NH_3 , katalizörde NO_x emisyonlarının azaltılmasını sağlayan temel kimyasal bileşendir (Mutyal, Faltsi ve Braun, 2014; Tian, 2016).



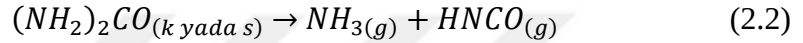
Şekil 2.1 SCR işlem şeması (Mutyal, Faltsi ve Braun, 2014)

UWS'de bulunan su, SCR karışım odasında egzoz gazı sıcaklığı ile buharlaşmaktadır. Buharlaşma sonucunda SCR karışım odasında su buharı ve katı ya da sıvı fazda üre bulunmaktadır. Denklem 2.1, UWS'nin buharlaşma reaksiyonunu ifade etmektedir.

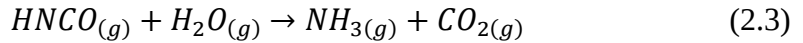


Burada, $(NH_2)_2CO_{(c)}$ UWS'yi, $(NH_2)_2CO_{(k\ yada\ s)}$ ise katı ya da sıvı fazdaki üreyi ifade etmektedir. UWS taneciklerinden suyun buharlaşması ısı ve kütle transferi ile sağlanmaktadır. Kütle transferi ile üre-su çözeltisinin zamana bağlı olarak tanecik kütlesi azalmakta ve gaz fazında hareket etmektedir (Chiang, Raju ve Sirignano, 1992; Wu, Zhang ve Zhang, 2016).

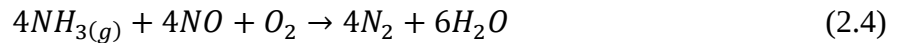
UWS'den su buharlaştıktan sonra katı ya da sıvı fazdaki üre, izosiyanik asit ve amonyağa dönüşmektedir. Ürenin bu dönüşüm reaksiyonuna termoliz reaksiyonu adı verilmekte ve Denklem 2.2'deki gibi ifade edilmektedir.



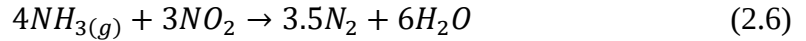
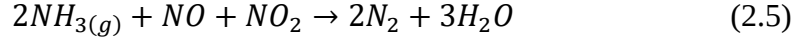
Verilen denklemde $HNCO_{(g)}$ gaz fazındaki izosiyanik asidi, $NH_{3(g)}$ ise amonyağı ifade etmektedir. SCR reaksiyonlarında ürenin tamamının amonyağa dönüşmesi en sistem performansı için önemlidir. Dolayısıyla sonraki adımda buharlaşan su buharı ile izosiyanik asit hidroliz adı verilen reaksiyon ile amonyak ve karbondioksit dönüşmektedir. Denklem 2.3, SCR karışım odasında gerçekleşen hidroliz reaksiyonunu ifade etmektedir (Abu-Ramadan, Saha ve Li, 2011; Olsson, Sjövall ve Blint, 2008; Tian, 2016).



UWS'nin buharlaşma, termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu elde edilen amonyak, uygun katalizörde NO_x emisyonları ile reaksiyona girerek bu emisyonların azalmasını sağlamaktadır. NO_x emisyonlarının indirgenmesinde kullanılan katalizörler genellikle bal peteği formunda tek parça bakır, demir, mangan, çinko ya da vanadyum tabanlı elementlerden imal edilmektedir. SCR reaktörlerinde NO_x ile NH_3 kimyasalları arasında üç temel reaksiyon gerçekleşmektedir. Bunlardan ilki "standart SCR" reaksiyonu olup, Denklem 2.4'teki gibi ifade edilmektedir.



Dizel makinelerde oluşan NO_x emisyonlarının yaklaşık %90 NO olmasına karşın geri kalan kısmı NO₂ ve N₂O bileşenleridir. NO₂ emisyonlarının NH₃ kimyasalları ile reaksiyonları “hızlı SCR” ve “NO₂ SCR” olarak sırasıyla Denklem 2.5 ve 2.6’da verilmiştir (Eichelbaum, Farrauto ve Castaldi, 2010; Gieshoff ve diğerleri, 2001; Olsson ve diğerleri, 2008; Savcı, 2015).



Çalışma kapsamında enjektörden püskürtülen UWS’nin buharlaşmasından sonra meydana gelen termoliz, hidroliz ve NO_x azaltma reaksiyonlarının tamamı Arrhenius eşitliği ile sayısal modele tanımlanmaktadır. Tanımlamalar sıcaklığın fonksiyonu olarak her bir reaksiyona ait Arrhenius eşitlik katsayıları ile sağlanmıştır.

SCR sistemi boyunca egzoz gazı sıcaklık ve basınç gibi termodinamik özelliklerin belirlenmesi, sistem içerisinde gerçekleşen kimyasal kinetik mekanizmaların zamana bağlı analizlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. *A* ve *B* kimyasallarının reaksiyona girerek *C* ve *D* ürünleri oluşturduğu temel bir kimyasal reaksiyon Denklem 2.7’de verilmiştir.



Burada, *a, b, c, d* sırasıyla stokiyometrik katsayıları ifade etmektedir. Denklem 2.7’de ifade edilen kimyasal denklemin reaksiyon hızı Denklem 2.8’deki gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{q}_{RXT} = k[A]^a[B]^b \quad (2.8)$$

Verilen denklemde, *k* Arrhenius oran sabiti olarak tanımlanmakta ve Denklem 2.9’deki gibi ifade edilmektedir.

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{R_u T}} \quad (2.9)$$

Burada, A frekans ifadesi, E_a aktivasyon enerjisini, R_u evrensel gaz sabitini ve T ortam sıcaklığını ifade etmektedir (McAllister ve diğerleri, 2011; Yim ve diğerleri, 2004). Eşitlikte verilen sıcaklık değişimi, sistem boyunca enerji denklemi ile çözülerek reaksiyon hızının belirlenmesini sağlamaktadır.

2.1 Yönetici Denklemler

SCR sistemi boyunca egzoz gazı akışı sayısal yöntemler ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında SCR sistemi boyunca egzoz akış ve sıcaklığının değişimi süreklilik, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri ile sağlanmaktadır. Denklem 2.10, kartezyen koordinatlarda bir akışkanın diferansiyel elemanı için kütle korunumu (süreklilik) denklemini ifade etmektedir (Kınacı, 2013).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.10)$$

Verilen ifade de ρ akışkan yoğunluğunu, t zamanı ve $\vec{V}$ ise akış hızını ifade etmektedir (Bayramoğlu, Yılmaz ve Kaya, 2019; Versteeg and Malalasekera, 2007). Sıkıştırılabilir akış için 2.10'da verilen denklemde hız ifadesinin diverjansı sıfıra eşittir. Akış problemlerinde Navier-Stokes denklemi olarak da bilinen momentum denklemini sonsuz küçük, sıkıştırılabilir akış kabulü ile x , y ve z yönünde Denklem 2.11-2.13'teki gibi ifade edebiliriz.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \rho g_x \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho g_y \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + \rho g_z \quad (2.13)$$

Burada, P akışkan statik basıncını, μ akışkan viskozitesini ve g ifadesi ise yerçekimi kuvvetlerini ifade etmektedir. SCR sisteminde enerjinin korunumu ifadesi Denklem 2.14'teki gibi yazılabilir (Baleta ve diğerleri, 2017; Kaario, Vuorinen, Zhu, Larmi ve Liu, 2017).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho i) + \nabla \cdot (\rho i \vec{V}) = -P(\nabla \cdot \vec{V}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_e \quad (2.14)$$

Verilen denklemde k ısı iletim katsayısını, i iç enerjiyi ve S_e ise potansiyel enerji ve kimyasal reaksiyon kaynaklı kaynak terimini ifade etmektedir. Verilen ifadelerin ortak noktaları göz önüne alındığında bir akışkan elemanının genel korunum formu ϕ genel değişkenine bağlı olarak Denklem 2.15'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \nabla \cdot (\rho \phi \vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (2.15)$$

Skaler büyüklüklerin genel taşınım formları fiziksel ve içsel özelliklere göre ayrıklaştırılabilir. Ayrıklaştırma sonucu 2.15'te verilen denklem eşitliğinin sol tarafındaki ilk ifade genel değişken olan ϕ 'nin zamanla değişimini, ikinci terim ise aynı değişkenin konveksiyonla taşınımını ifade etmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim genel değişkenin difüzyon ile taşınımını, ikinci terim ise yukarıda verilen süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinde yer almayan ifadeleri göstermektedir. Dolayısıyla Denklem 2.15'te verilen ifade, genel taşınım denklemi olarak SCR sisteminde yer alan genel HAD teorisinin temel yapısını oluşturmaktadır (Baleta ve diğerleri, 2017).

Tez kapsamında SCR sisteminde gerçekleşen akış koşulları HAD yöntemi ile incelenmiştir. Sonlu hacimler yöntemi kullanılarak ticari bir HAD yazılımı olan Ansys-Fluent ile süreklilik, momentum ve enerji gibi genel transport denklemleri çözülmektedir. İfade edilen denklemler HAD uygulamalarında özel bir denkleme dönüşerek analitik olarak çözümü mümkün olmayan SCR gibi akış ve kimyasal reaksiyon içeren problemlerin küçük hacimler üzerinde çözümlenmesini sağlamaktadır. Türbülans modeli temel transport denklemlerinin küçük hacimler ile çözümüne olanak sağlamaktadır (Doğrul, 2015).

2.2 RANS Denklemi

Tez kapsamında kullanılan türbülans modeli, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes-Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) tabanlı kompleks bir modeldir. RANS denklemleri, ikinci dereceden yakınsama modelleri olarak bilinen sıfır, bir ve iki denklemlidir. İki denklemliler türbülans modelleri, son kırk yıldır üzerinde en çok çalışılan modellerdir. RANS denklemleri, akışın türbülans yapısı ve türbülanslı akışın doğru bir şekilde tahmin edilmesinde kullanılan tam bir modeldir (Rodriguez, 2019). Reynolds ortalama ifadesinde kullanılan parametreler, tam Navier-Stokes denklemlerinde ortalama ile anlık dalgalanmaların toplamı olarak ifade edilmektedir. Reynolds, herhangi bir parametre ifadesini Denklem 2.16'daki gibi ifade etmektedir (Reynolds, 1894).

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.16)$$

Burada ϕ herhangi bir skaler büyüklüğü ifade ederken, ϕ' bu büyüklüğün ortalama değerini, $\bar{\phi}$ ise dalgalanma değerini ifade etmektedir. Bu büyüklükler hız, basınç, sıcaklık gibi değişkenler olabilir.

Denklem 2.15'te verilen genel transport denkleminde türetilen momentum denklemi tensörel notasyonda Denklem 2.17'de verilmiştir (Doğrul, 2015; Wilcox, 2006).

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (2.17)$$

Burada, τ_{ji} , viskoz gerilme tensörü olup Denklem 2.18'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\tau_{ji} = 2\mu S_{ij} \quad (2.18)$$

μ moleküler viskozite, S_{ij} ise gerilme oranı tensörüdür ve Denklem 2.19'da verilmiştir.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.19)$$

Akış problemlerinde türbülansın karmaşık yapısı ve zaman içinde kestirilemeyen davranışı sebebiyle modelde kullanılan parametrelerin Denklem 2.15'te belirtildiği gibi ortalama değerlerinin alınması, sonucun daha kolay elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Zaman ortalamalı Navier-Stokes denkleminin kapalı formu Denklem 2.20'de verilmiştir (Doğrul, 2015).

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \overline{\rho u'_j u'_i}) \quad (2.20)$$

Verilen ifadede $\overline{\rho u'_j u'_i}$ terimi Reynolds-gerilme tensörünün ortalama değeridir.

2.2.1 Standard k - ε Türbülans Model

RANS tabanlı Standard k - ε türbülans modeli, k ve ε terimlerini içeren taşınım denklemleri tarafından yönetilmektedir. Taşınım denklemleri ve model sabitleri belirtilen model için hesaplanmaktadır. İki denklemlili k - ε türbülans modeli, iki ayrı taşınım denklemini çözerek hem türbülans uzunluğu hem de zaman ölçeğinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Standard k - ε türbülans modeli, ısı transferi ve endüstriyel akış problemlerinde hem hızlı hem de doğru çözümler sunması nedeniyle geniş kullanım alanına sahip yarı ampirik bir modeldir.

Standard k - ε türbülans modeli, türbülans kinetik enerji (k) ve onun yayılım oranına (ε) dayalı bir modeldir. Türbülans kinetik enerji için taşınım denklemleri tam denklemlerden, yayılım oranı ise fiziksel akıl yürütme ile elde edilmektedir (Wilcox, 2006). Standard k - ε türbülans modeli, tam türbülanslı akışlar için geçerli olup, moleküllerin viskozite etkisi göz ardı edilmektedir. Verilen Denklem 2.21, Standard k - ε türbülans modeli için türbülans kinetik enerji (k) ifadesini göstermektedir (Bayramoğlu, 2018).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (2.21)$$

Enerji yayılım oranı (ε) ise Denklem 2.22'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.22)$$

Verilen ifadede G_k türbülans kinetik enerji üretimini ifade etmektedir. Denklem 2.23 türbülans kinetik enerji üretimini ifade etmektedir.

$$G_k = \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.23)$$

Standard k - ε türbülans modeli için türbülans viskozitesi Denklem 2.24'te verilmiştir.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.24)$$

Denklem 2.20-2.23 arasındaki ifadelerde kullanılan katsayılar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1 Standard k - ε türbülans modeli katsayıları

Katsayı	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
Değer	1,44	1,92	0,09	1	1,3

2.3 Türlerin Taşınımı Modeli

Türlerin taşınımı modeli, sayısal analizde her bir tür için iletim, taşınım ve kimyasal reaksiyon kaynaklarını kütlelerin korunumu prensibine göre tanımlayan modeldir. SCR sistemi içerisinde egzoz gazı karışımını ve kimyasal türlerin tanımlanması bu model ile sağlanmaktadır. Kontrol hacmi içerisinde yer alan türler arasındaki reaksiyonlar, bu modelde yer alan hacimsel reaksiyonlar aracılığı ile tanımlanmaktadır.

Kontrol hacmi içerisinde herhangi bir Y_i türünün taşınım ve difüzyon denklemleri korunum denklemleri ile sağlanmaktadır. Denklem 2.25 genel bir tür için korunum denklemlerini ifade etmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (2.25)$$

Burada R_i kimyasal reaksiyonlarda i . türün ürünlerinin net oranını, S_i kaynak terimini ifade etmektedir. Gözenekli ortam modeli gibi laminar akış karakteristiği gösteren kontrol hacminde kütleli difüzyon, Fick kanununa göre Denklem 2.26'daki gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{J}_i = \rho D_{i,m} \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (2.26)$$

Burada $D_{i,m}$ karışımda bulunan her bir tür için kütleli difüzyon katsayısını ve $D_{T,i}$ ise termal difüzyon katsayısını ifade etmektedir. Akış içerisinde tamamıyla çoklu yapı difüzyonuna sahip laminar akış koşullarında bu yaklaşım geçerlidir. SCR sistemi içerisinde UWS çözeltilisinin egzoz bileşenlerine püskürtülmesi çoklu bileşen ile gerçekleşmektedir. Bileşenler, içerisinde %40 üre ve %60 su bulunan bir çözelti olarak püskürtülmektedir. Akış karakteristiğinin türbülanslı olduğu akış hacmi için kütleli difüzyon Denklem 2.27'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{SC_t} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (2.27)$$

Verilen ifadede, SC_t türbülans Schmidt sayısı, μ_t türbülans viskozitesi ve D_T türbülans difüzyonunu ifade etmektedir. Kütle transferinde kullanılan temel ifadelerden biri de Denklem 2.28'de verilen Lewis sayısıdır.

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \quad (2.28)$$

Burada k termal iletkenlik katsayısını ifade etmektedir. Ayrıca türlerin taşınımı modelinde tanımlanan kimyasal reaksiyonlar, hacimsel olarak sonlu oran modeli ile yapılmaktadır. Sonlu oran modeli, her bir kimyasal tür için Arrhenius reaksiyon kaynağının toplamı olarak Denklem 2.29 ile ifade edilmektedir.

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} R_{i,r} \quad (2.29)$$

Burada $M_{w,i}$ i. türün moleküler ağırlığını ve $R_{i,r}$ oluşan ya da yok olan her bir türün Arrhenius mol oranını ifade etmektedir (Ansys, 2015).

2.4 Partikül Tanecik Modeli

SCR sistemlerinde egzoz sistemine püskürtülen UWS'nin yayılması partikül tanecik modeli ile sağlanmaktadır. Bu model, UWS taneciklerinin serbest halde yayılımının ve çok fazlı ortamda taneciklerin birbiriyle etkileşiminin sayısal olarak çözümlenmesinde büyük bir öneme sahiptir. Belirtilen mühendislik uygulamalarının zorlu ve kompleks bir geometriye sahip olması, modelin belirli sınır koşullarında uygulanmasını gerektirmektedir. HAD uygulamalarında kullanılan partikül tanecik modeli ile akışkanların hareketi üç farklı metot ile incelenmektedir. Bu modeller Eulerian Model, Lagrangian Model ve Eulerian-Lagrangian Model olarak adlandırılmaktadır (He, Bayly ve Hassanpour, 2018). Lagrangian Model parçacıkların hareketini izlerken, Eulerian Model sürekli faz için simülasyonlarda kullanılmaktadır.

SCR sistemlerinde UWS partiküllerinin Lagrangian Modeli için hareket yörüngesinde sıvı-gaz fazının korunum denklemlerini çözümlemeye, partikül tanecik modeli kullanılmaktadır. Serbest olarak hareket eden bir tanecik için kuvvet dengesi Denklem 2.30'daki gibi ifade edilmektedir (Zahari ve diğerleri, 2018).

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (2.30)$$

Verilen ifadede $\vec{u}_p$ taneciğin akışkan içindeki hızını, $\vec{g}$ yerçekimi ivmesini ve F_D taneciğin maruz kaldığı direnç kuvvetini ifade etmektedir. Taneciğin maruz kaldığı direnç kuvveti Denklem 2.31'deki gibi ifade edilmektedir (Kharoua, AlShehhi ve Khezzar, 2015).

$$F_D = \frac{3\mu C_D Re_p}{4\rho_p d^2} \quad (2.31)$$

Verilen denklemde ρ_p taneciklerin yoğunluğunu, C_D direnç katsayısını ve Re_p göreceli Reynolds sayısını ifade etmektedir. Taneciklerin göreceli Reynolds sayısı Denklem 2.32’de verilmiştir.

$$Re_p = \frac{\rho d_d |\rho_d - \rho|}{\mu} \quad (2.32)$$

Burada, μ dinamik viskozite ve d_d taneciklerin çapını göstermektedir. C_D direnç katsayısını küresel geometrili tanecik için Denklem 2.33, küresel olmayan tanecik için ise Denklem 2.34’teki gibi ifade edilebilir.

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p} \quad (2.33)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_{küre}} (1 + b_1 Re_{küre}^{b_2}) + \frac{b_3 Re_{küre}}{b_4 + Re_{küre}} \quad (2.34)$$

Verilen denklemlerde, a_1 , a_2 ve a_3 sabittir. $Re_{küre}$ küre geometriye sahip parçacıkların Reynolds sayısını, b_1 , b_2 , b_3 ve b_4 ise küre yüzeyinin fonksiyonu şeklinde tanımlanmış sabitleridir. Schiller-Naumann (Schiller ve Naumann, 1993) tarafından sunulan ampirik sürtünme katsayısının tanecik Reynolds sayısı ile değişimi Denklem 2.35’te sunulmuştur.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & Re_p \leq 0.1 \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & 0.1 \leq Re_p \leq 10^3 \\ 0.44 & Re_p \geq 10^3 \end{cases} \quad (2.35)$$

SCR sisteminde egzoz gazı sıcaklığı etkisi ile UWS tanecikleri buharlaşmaktadır. Egzoz gazından partiküllere olan ısı transferi Denklem 2.36’daki gibi ifade edilmektedir (Tian, 2016).

$$\dot{Q}_{eg} = \dot{Q}_p + \dot{Q}_{buh} \quad (2.36)$$

Verilen ifadede $\dot{Q}_{eg}$ egzozdan taneciklere olan ısı transfer oranını, $\dot{Q}_p$ taneciklerin ısısının artmasını sağlayan ısı transfer oranını ve $\dot{Q}_{buh}$ ise buharlaşmada kullanılan ısı transfer oranını ifade etmektedir. SCR sisteminde egzozdan UWS taneciklerine olan ısı transfer oranı, Nusselt sayısı tarafından boyutsuzlaştırılabilen ısı transfer katsayısı ile Denklem 2.37’de verilmiştir (Som, 2008).

$$\dot{Q}_{eg} = 4\pi r_s^2 h (T_\infty - T_s) = \pi D Nu \lambda_{g,karışım} (T_\infty - T_p) \quad (2.37)$$

Burada, h ısı transfer katsayısını, Nu Nusselt sayısını, T_∞ egzoz sıcaklığını, T_p tanecik sıcaklığını ifade etmektedir. Taneciklerin ısınmasında kullanılan ısı transfer oranı ise Denklem 2.38’deki gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{Q}_p = m C_p \frac{dT_p}{dt} \quad (2.38)$$

Verilen ifadede, C_p taneciklerin ısı kapasitesini ifade etmektedir. UWS deki suyun buharlaşmasında kullanılan ısı transfer oranı ise Denklem 2.39’da verilmiştir.

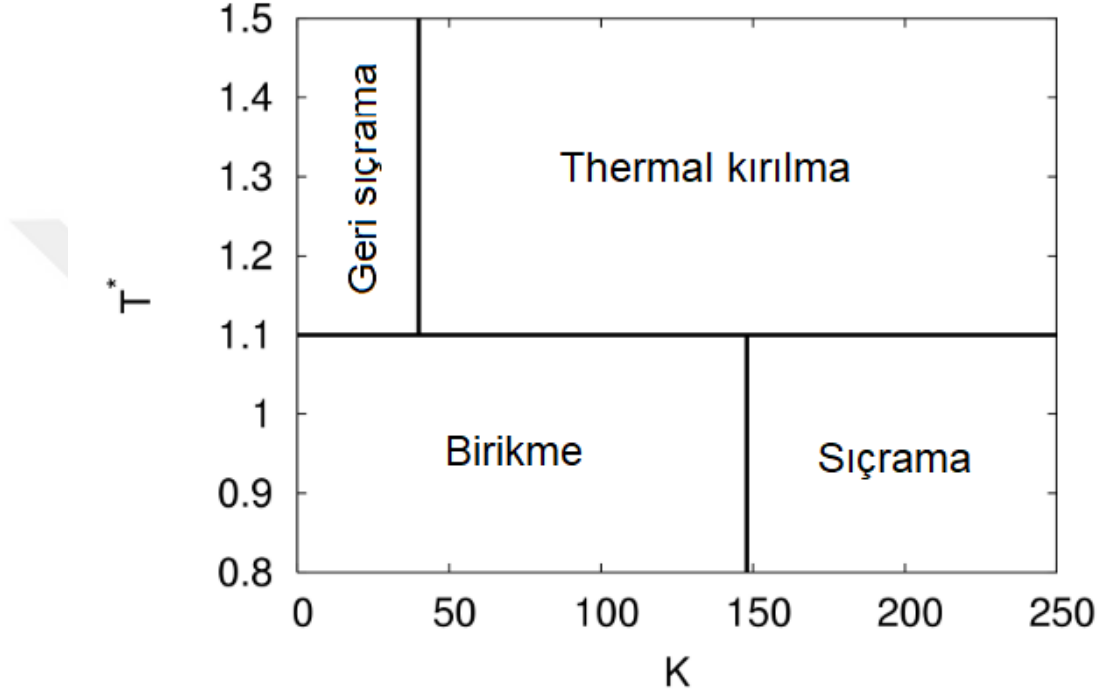
$$\dot{Q}_{buh} = L \frac{dm}{dt} = 2\pi DL \left(\frac{\lambda_{g,karışım}}{C_{p,karışım}} \right) \ln (1 + B_m) \quad (2.39)$$

Burada, L buharlaşma gizli ısını ifade etmektedir. 2.35-2.38 arasında verilen ifadelerden elde edilen damlacık sıcaklığının zamansal farkı Denklem 2.40’ta verilmiştir .

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{D Nu \lambda_{g,karışım} (T_\infty - T_p) - 2\pi DL \left(\frac{C_{p,karışım}}{\lambda_{g,karışım}} \right) \ln (1 + B_m)}{m C_p} \quad (2.40)$$

Sprey olarak püskürtülen ürenin SCR sisteminde duvar ile etkileşiminin fiziksel mekanizmasının belirlenmesi hidroliz ve termoliz reaksiyonları için önemlidir. Sprey duvar etkileşiminde parçacıkların hareketini belirleyen en önemli parametre spreynin dağılımı ve sıcaklığıdır. Partikül tanecik modelinde püskürtülen UWS’nin spreynin duvar

etkileşimi, ilk olarak Kuhnke tarafından ortaya atılmıştır (Kuhnke, 2004). Kuhnke tarafından sunulan modelde, püskürtülen UWS çözeltisinin duvara çarpması olayı birikme, sıçrama, geri tepme ve termal kırılma şeklinde tanımlamaktadır. Kritik sıcaklığa bağlı sprej duvar etkileşim grafiği Şekil 2.2’de verilmiştir (Birkhold, Meingast, Wassermann ve Deutschmann, 2006).



Şekil 2.2 Sprey-duvar etkileşim şematiği (J. Wang, Fu, Hu, Cai ve Chen, 2020)

Verilen ifadede K ve T^* ifadeleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. Burada K parametresi, parçacık hızı, yoğunluğu ve çapına bağlı olarak ifade edilmektedir (Lee, 2018). K sayısı ve kritik sıcaklık (T^*) ifadesi Denklem 2.41 ve 2.42’de verilmiştir.

$$K = \frac{(\rho D)^{\frac{3}{4}} u_d^{\frac{5}{4}}}{\sigma_d^{1/2} \mu_d^{1/4}} Ca^{\frac{5}{4}} \cdot La^{\frac{3}{4}} \quad (2.41)$$

$$T^* = \frac{T_w}{T_{sat}} \quad (2.42)$$

Verilen ifadelerde Ca Capillary sayısını, La Laplace sayısını ifade etmektedir. UWS'nin SCR sisteminde Rosin-Rammler dağılım fonksiyonuna göre dağıldığı kabul edilmiştir. Rosin-Rammler dağılım fonksiyonu Denklem 2.43'teki gibi ifade edilmektedir (J. Y. Kim, Ryu ve Ha, 2004).

$$1 - v(d) = \exp \left[- \left(\frac{d}{x} \right)^q \right] \quad (2.43)$$

Burada, $v(d)$ parçacık dağılım fonksiyonunu, X ortalama tanecik çapını ve q yayılım parametresini ifade etmektedir.

2.5 Gözenekli Ortam Modeli

Gözenekli ortamlara çeşitli doğal ya da insan yapımı sistemlerde rastlanmaktadır. Gözenekli ortamlara yakıt hücrelerindeki işlemler, kâğıt hamuru kurutma, gıda üretimi ve güvenliği, filtre teknolojileri, beton, seramik, nem emiciler, tekstil, boya, kurutma, polimer kompozitler, gemi scrubber ve katalizör sistemleri gibi pek çok endüstriyel uygulama alanında ihtiyaç vardır. Çok fazlı akış ve taşınımı sağlayan en iyi gözenekli ortamlar topraklar, akiferler, petrol ve gaz rezervuarlarıdır (COMSOL Multiphysics, 2020).

Gözenekli Ortam Modelinde akış ve taşınım olayları ile inşaat, kimya, makine gibi pek çok mühendislik biliminde karşılaşılmaktadır. Gözenekli ortamlarda çeşitli akış şekilleri gerçekleştirilebilir. Bunlar; sabit, kararsız, laminar veya türbülanslı akışlar, çok fazlı akışlarda akışkan ara yüzeyleri, basınç sıcaklık, konsantrasyon ve faz değişimi gibi denge dışı fenomenler tarafından kontrol edilir. Gözenekli ortam modellerinde akış ve taşınım olayları yapının sahip olduğu katı ve boşluk yapısına bağlı olarak değişmektedir. Uygulamaların çoğunda gözenek geometrisindeki düzensizlikler, akış ve taşınım olaylarının sabitletmesinde önemli rol oynar. Dolayısıyla yönetici denklemler ile gözenekli ortam geçirgenliğinin belirlenmesi akış problemlerinin modellenmesi açısından önemlidir. (Das, Mukherjee ve Muralidhar, 2018).

Tez kapsamında yapılan sayısal analiz çalışması, sıkıştırılamaz, zamana bağlı olmayan akış ve 3D RANS denklemleri ile yönetilen Standard $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan katalizör gözenekli yapı olarak modellenmiş ve gözenekli ortam modeli için momentum ifadesi Denklem 2.44'te verilmiştir.

$$S_i = \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho u_j u_j \quad (2.44)$$

Tanımlanan denklem, atalet kayıpları ve viskoz eklentisinden oluşmaktadır. Gözenekli ortamda, katalizör boyunca basınç düşümü Darcy Kanununa göre Denklem 2.45'teki gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{a} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2\right) \Delta m \quad (2.45)$$

Burada, Δp basınç düşümü, μ dinamik viskozite, a gözeneklerin geçirgenliği, C_2 basınç katsayısı, v gözenek yüzeylerindeki normal hız ve Δm gözenekli ortam kalınlığı olarak tanımlanmaktadır.

Hyundai şirketinden tarafından sağlanan katalizör verilerden elde edilen sonuçlara göre, katalizör boyunca basıncın akış hızı ile değişimini veren ikinci dereceden ifade Denklem 2.46'da sunulmuştur.

$$p = 1.29v^2 - 411v \quad (2.46)$$

Tez kapsamında gözenekli ortam, Cu-ZSM-5 tipli katalizör ile modellenmiştir. Cu elementi içeren katalizörler NO_x emisyonlarının azaltılmasında SCR sistemlerinde en yaygın kullanılan katalizörlerdendir. Cu-ZSM-5 tipli katalizörler geniş sıcaklık aralıklarında indirgeme sağlaması açısından da diğer katalizörlere göre daha kullanışlıdır. Ancak bu tip katalizörlerin düşük SO_x toleransı nedeniyle dezavantajları da mevcuttur (Ziółek, Sobczak, Nowak, Daturi ve Lavalley, 2000).

BÖLÜM 3

SAYISAL MODELİN DENEY VERİLERİ İLE DOĞRULANMASI

HAD yaklaşımı ile elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile test edilmesi, analizin doğruluğu açısından önemli bir parametredir. Sayısal analiz çalışmaları, belirli sınır koşulları ve kabul edilebilir hata aralıklarında, mühendislik problemlerinin çözümüne olanak sağlamaktadır. Parametrik çalışmalarda kullanılan sınır koşullarının yapılan sayısal analizlere uygunluğunun araştırılması gerekmektedir. Bu bölümde gemi SCR sistemi üzerinde yapılan sayısal çalışmalarda kullanılan türbülans, püskürtme ve kimyasal reaksiyonlar gibi sınır koşulları, literatürden alınan deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Ayrıca tez kapsamında gerçekleştirilen sayısal çalışma ve çözücü seçimi de deneysel çalışma verileri ile karşılaştırılmış ve parametrik çalışmalara uygunluğu tartışılmıştır. Sonraki bölümlerde doğrulaması yapılan sayısal çalışma üzerinde parametrik çalışmalar yapılarak değerlendirmelerde bulunulmuştur.

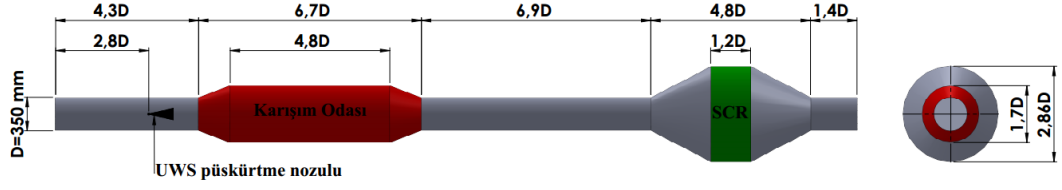
3.1 Sayısal Modelin Doğrulanmasında Kullanılan Deney Geometrisi

Sayısal model sınır koşullarının doğrulanması Sung vd. (2020) tarafından literatüre sunulan deneysel çalışma sonuçları ile sağlanmıştır. Yapılan çalışmada, gemi SCR sistemi NO indirgeme performansının artırılması ve katalizör çıkışındaki NH₃ kayma miktarının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Deneysel SCR sisteminde kullanılan dizel motor özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Sayısal model doğrulanmasında kullanılan motorun özellikleri

Motor özellikleri	Birim	Değer
Egzoz gaz sıcaklığı	°C	310
NO _x konsantrasyonu	ppm	600
Tam yük koşulları	kW	920 @900 rpm
Maksimum akış oranı	kg/h	7081

Tez kapsamında yapılan sayısal analiz çalışmalarına ait sınır koşulları, Şekil 3.1’de verilen deneysel SCR model geometrisi ile doğrulanmıştır. Model, püskürtme nozulu, karışım odası ve SCR yapılarından oluşmaktadır.



Şekil 3.1 Sayısal model doğrulanmasında kullanılan SCR geometrisi

İki ve dört zamanlı gemi dizel motoru SCR sisteminde kullanılan sınır koşulları, aşağıda tanımlanan sayısal model sınır koşulları ile aynıdır. Böylece püskürtme, katalizör ve kimyasal ifadelerin çözümünde kullanılan parametrelerin doğrulanması sağlanmıştır.

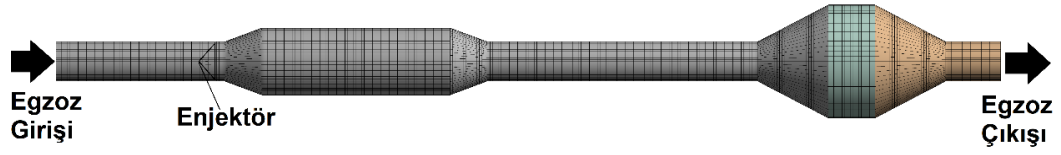
3.2 Sınır Koşulları

Sung vd. (2020) tarafından yapılan deneylerden elde edilen NO indirgeme oranı ile tez kapsamında kullanılan sınır koşullarını içeren sayısal analiz sonucu elde edilen NO indirgeme oranları karşılaştırılmıştır. Sayısal modelde kullanılan sınır ve başlangıç koşulları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Sayısal model doğrulanmasında kullanılan başlangıç ve sınır koşulları

	Parametre	Birim	Değer
Sınır koşulları	Egzoz hızı	m/s	28
	Egzoz sıcaklığı	K	592
	Egzoz çıkışı	-	Basınç çıkışı
	Duvar	-	Adyabatik duvar
	Katalizör	-	Gözenekli ortam, Basınç katsayısı $1,12 \cdot 10^7$
Başlangıç koşulları	UWS malzemesi	-	UWS (%40 üre, %60 su)
	UWS püskürtme hızı	m/s	10,6
	UWS püskürtme açısı	-	70°
	Nozul ve püskürtme özellikleri	-	22µm ortalama çap, yayılım parametresi 3,27, 6 delikli katı koni tipinde

Sayısal çalışma, Tablo 3.1’de egzoz debisi ve sıcaklığı belirtilen gemi dizel motorunun %75 yük koşulu için Tablo 3.2’de belirtilen sınır ve başlangıç koşulları için yapılmıştır. Deneysel çalışma koşulları ile aynı olan sayısal çalışma ağ yapısı ve sınır koşulları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Hesaplamalı model

Hesaplamalı model, kuadratik olarak yapısal ağ yapısı ile modellenmiştir. 226k eleman kullanılmıştır. Ağ yapısı Ansys meshing yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. %75 yük koşullarında gerçekleştirilen deneysel çalışma altı farklı UWS püskürtme miktarında gerçekleştirilmiş ve her bir koşul için elde edilen NO oranları Tablo 3.3'te sunulmuştur.

Tablo 3.3 Sayısal model doğrulanmasında kullanılan deneysel sonuçlar

Analiz No	Egzoz debisi [kg/s]	Egzoz sıcaklığı [K]	SCR girişi NO miktarı [ppm]	UWS püskürtme miktarı [kg/s]	Katalizör Çıkışı NO miktarı [ppm]
1	1,503	592	600	$1,1 \cdot 10^{-3}$	335
2				$1,56 \cdot 10^{-3}$	265
3				$1,925 \cdot 10^{-3}$	190
4				$2,11 \cdot 10^{-3}$	165
5				$2,2 \cdot 10^{-3}$	130
6				$2,69 \cdot 10^{-3}$	77

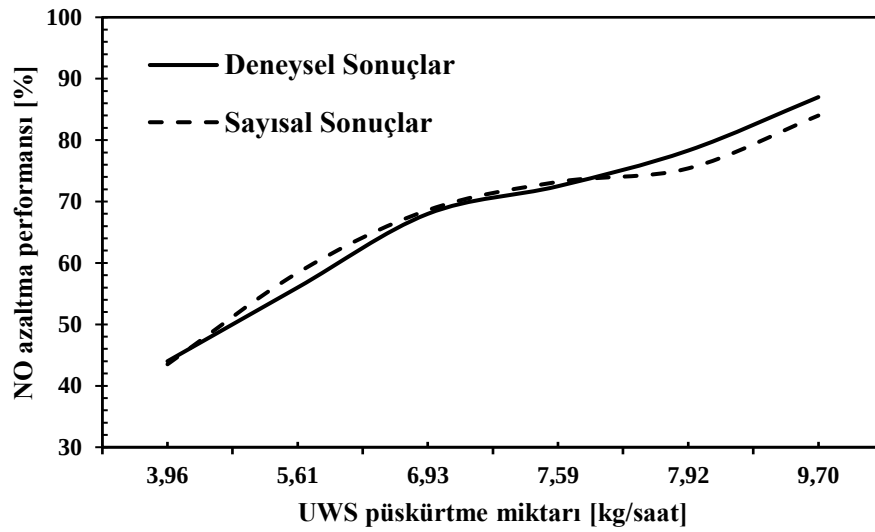
3.3 Bulgular ve Tartışma

Yukarıda ifade edilen motor verileri için deneysel SCR sistemi, belirtilen sınır ve başlangıç koşulları altında 3B modellenerek HAD yaklaşımı ile sayısal olarak yapılmıştır. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları altı farklı UWS püskürtme değeri için hesaplanmış ve sonuçları Tablo 3.4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar SCR sistem çıkışındaki NO emisyonlarının ppm cinsinden sonuçlarını ve NO indirgeme performansını göstermektedir. Elde edilen veriler sonucunda, artan UWS püskürtme miktarına karşılık NO oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3.4 Deneysel ve sayısal NO azaltma miktarları

Analiz No	Deneysel NO miktarı [ppm]	Deneysel NO indirgeme performansı (%)	Sayısal NO miktarı [ppm]	Sayısal NO indirgeme performansı (%)	Hata [%]
1	335	44	339	43,5	1,1
2	265	56	249,332	58,4	4,1
3	190	68	188,24	68,6	0,87
4	165	72.5	160,61	73,2	0,95
5	130	78.3	147,335	75,4	3,7
6	77	87	96,18	84	3,4

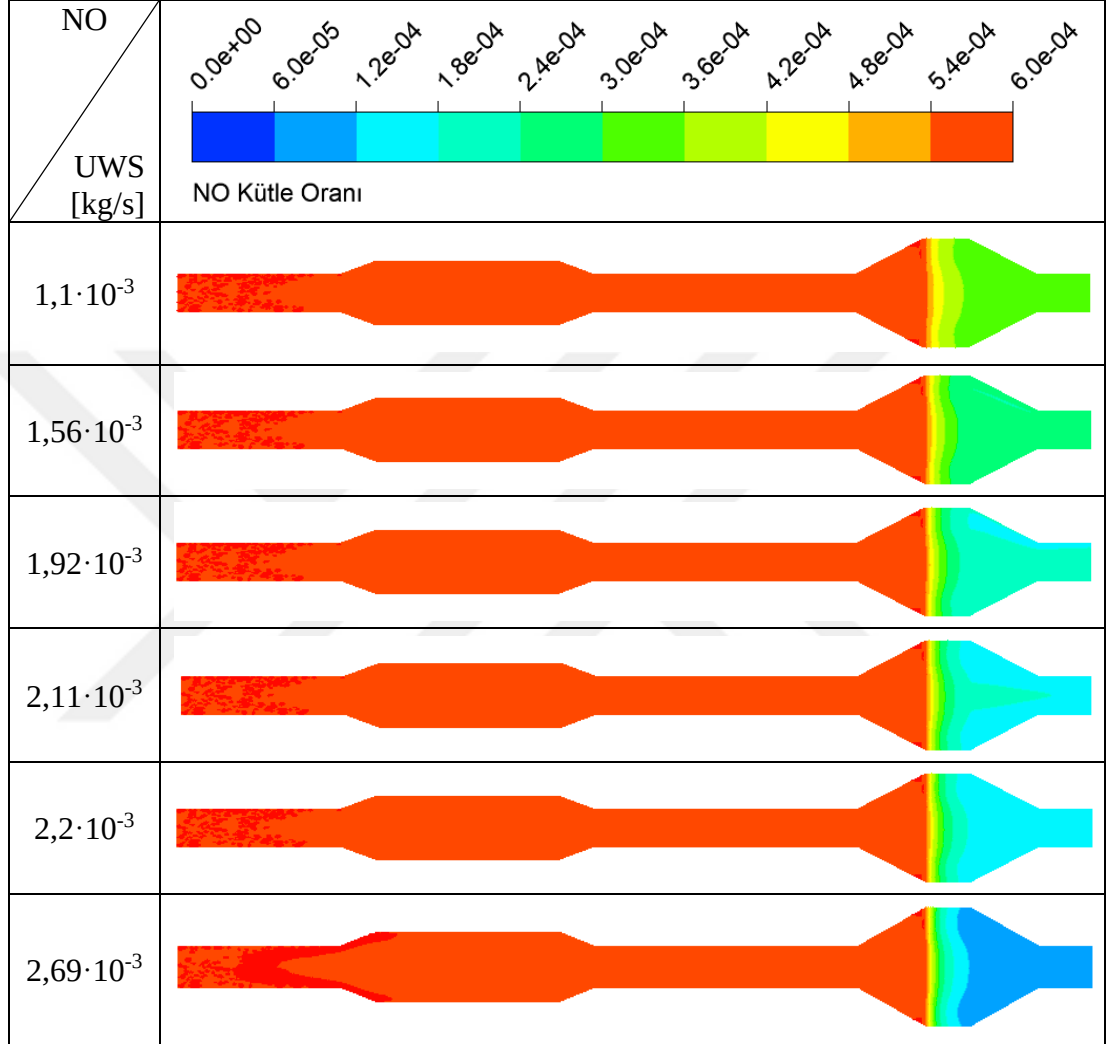
Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarına göre UWS püskürtme miktarı ile NO azaltma performans verimlilikleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde en düşük hata oranının %0,87 ile 3 numaralı püskürtme miktarı ile, buna karşılık en yüksek hata oranı ise 5 numaralı analiz ile %3,7 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.3 deneysel ve sayısal NO indirgeme performans oranlarını yüzdesel olarak ifade etmektedir.



Şekil 3.3 Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

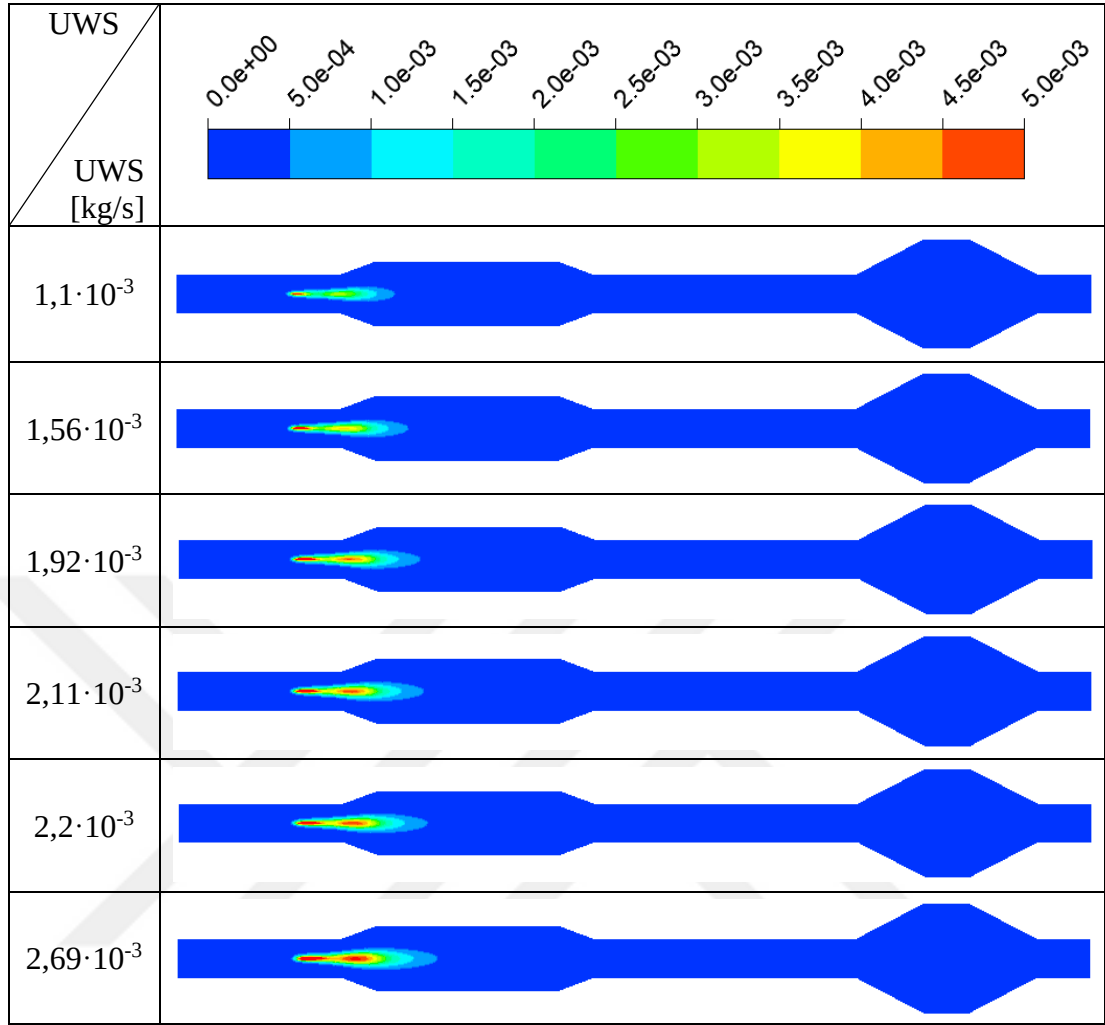
Elde edilen sonuçlar, sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Her iki analiz türü içinde artan UWS çözeltisi ile NO indirgeme performansının arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.4'te SCR sistemde NO emisyonlarının değişimi gösterilmiştir. SCR girişinde 600 ppm olarak belirlenen NO emisyonları SCR çıkışında önemli ölçüde azalmıştır. NO emisyonlarının azaldığı nokta SCR sisteminde katalizörün olduğu bölgede gözlemlenmiştir. NO bileşenleri SCR sisteminde NH_3

bileşenleri ile reaksiyona girmiş ve dolayısıyla egzoz çıkışındaki NO bileşenleri su buharı ve serbest azot atomlarına dönüşmüştür. Şekil 3.4 farklı UWS püskürtme miktarları için NO dağılımını ifade etmektedir.



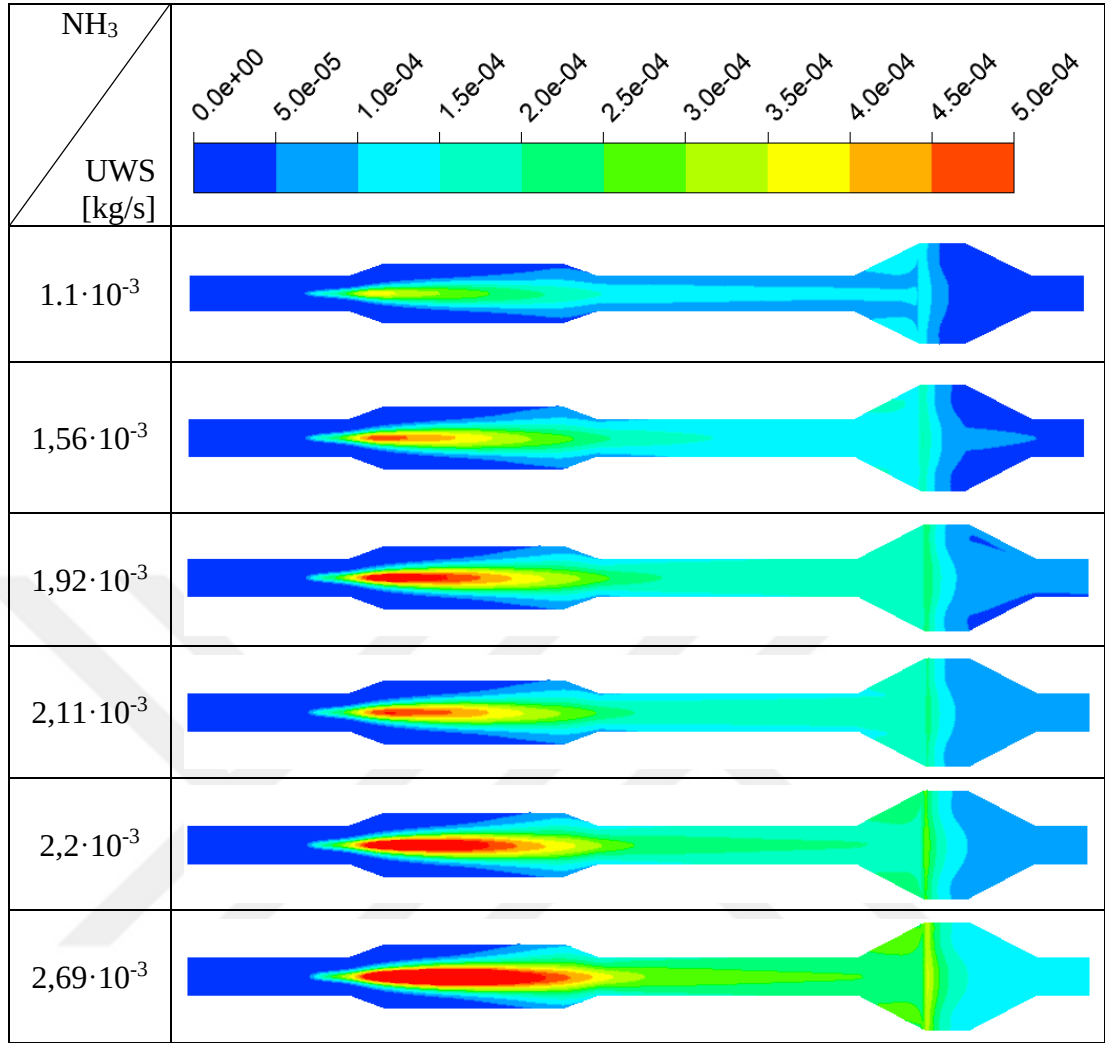
Şekil 3.4 Doğrulamada kullanılan SCR sistemi NO değişimi

SCR sistemine püskürtülen UWS'nin değişimi Şekil 3.5'te verilmiştir. Verilen şekilde, UWS'nin karışım odası öncesinde egzoz gazı sıcaklığı ile önce içerisindeki suyun buharlaştığı sonrasında ise termoliz ve hidroliz reaksiyonları ile ürenin tamamen yok olduğu bilinmektedir. SCR sisteminde gerçekleşen buharlaşma, termoliz ve hidroliz reaksiyonlarının gerçekleşmesinde egzoz gazı sıcaklığının doğrudan etkisi vardır. Yetersiz egzoz gazı sıcaklığı katalizör girişinde izosiyanik asit gibi ara kimyasallar oluşabilmektedir. Bu durumda egzoz ile dışarı istenmeyen gazların atılmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.5 Doğulamada kullanılan SCR sistemi UWS değişimi

Termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan NH_3 kimyasalları katalizörde NO emisyonları ile reaksiyona girerek NO emisyonlarının azaltılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla katalizör girişine gelmeden püskürtülen UWS'nin tamamının NH_3 bileşenine dönüşmesi gerekmektedir. Şekil 3.6'da farklı UWS püskürtme miktarları için NH_3 kimyasallarının dağılımı gösterilmektedir. NH_3 dağılımının katalizör girişine kadar en yüksek seviyelerde olduğu katalizörden sonra ise azaldığı görülmektedir. SCR sistemleri çıkışında NH_3 kimyasallarının oluşumu istenmeyen bir durumdur. Dolayısıyla aşağıda UWS'nin artması sonucu çıkışta NH_3 kimyasallarının oluşumu gözlemlenmiştir. SCR analizlerinde uygun egzoz sıcaklığı ve püskürtülen UWS miktarının optimize edilmesi son derece önemlidir.



Şekil 3.6 Doğrulamada kullanılan SCR sistemi NH₃ değişimi

BÖLÜM 4

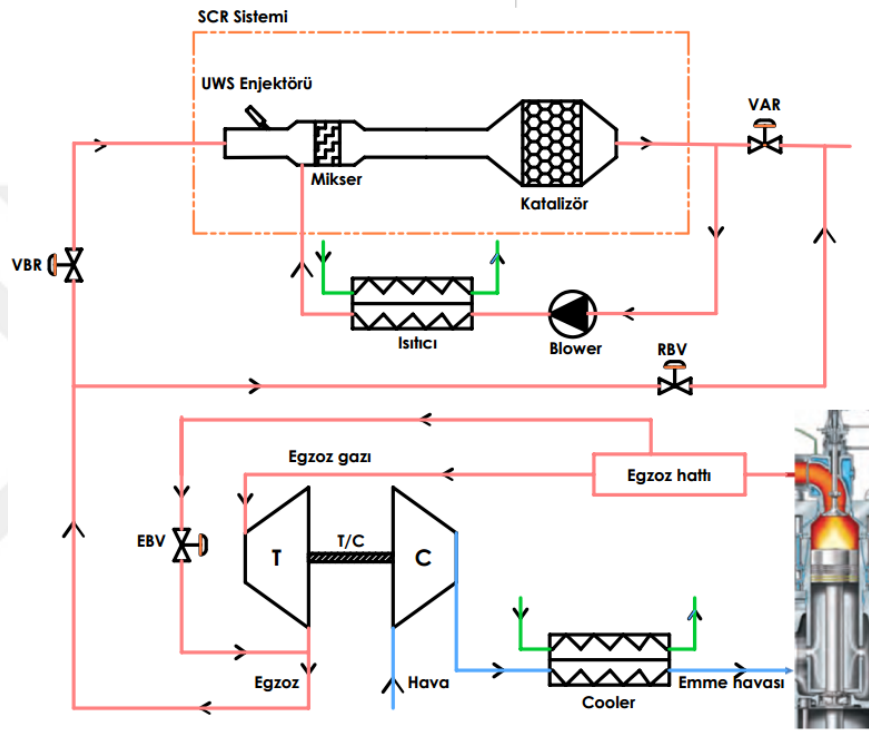
GEMİ SCR SİSTEM MODEL TASARIMI

Gemi dizel motorlarından kaynaklı NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla yürürlüğe giren Tier III gerekliliklerini sağlayabilecek en muhtemel teknolojilerden biri gemi SCR sistemleridir. Tier II düzenlemesine uygun olarak işletilmekte olan bir gemi dizel motorundan salınan NO_x emisyonlarının, Tier III düzenlemesi ile Tier II düzenlemesine göre yaklaşık %76 oranında azaltılması amaçlanmaktadır. Dört zamanlı gemi dizel motorlarında SCR sistemi kolaylıkla uygulanabilmekte iken, özellikle düşük yük koşulları altında çalışan iki zamanlı dizel motorlarında çeşitli sorunlar ile karşılaşmaktadır. Bu sorunların ortadan kaldırılması ya da en aza indirgenmesi için motor yükü ve çalışma moduna en uygun SCR sistem yerleşimi ve model tasarımının yapılması gerekmektedir.

4.1 Problemin Tanımı

Tier II standartlarına uygun gemilerde, egzoz gazı önce turboşarjer türbininde güç üreterek, turboşarjer kompresörünün tahrik edilmesini sağlamaktadır. Sonrasında türbinden çıkan egzoz gazı, kazanda buhar üretmek için kullanılmakta ve devamında da atmosfere salınmaktadır. Tier II standartlarına uygun NO_x emisyonlarının azaltılması, EGR ya da diğer yöntemlerle kolaylıkla sağlanmaktadır. 1 Ocak 2016 tarihinde yürürlüğe giren Tier III düzenlemesinin getirdiği NO_x emisyonu gereklilikleri, geleneksel dizel yakıtların kullanımı durumunda ancak SCR sistemi gibi yüksek emisyon azaltma performansına sahip sistemler ile karşılanabilmektedir. SCR sistemlerinin gerekli NO_x standartlarını sağlayabilmesi için uygun yerleşimin yapılması son derece önemlidir. Gemilerde kurulumu gerçekleştirilecek SCR sistemlerinin verimli çalışabilmeleri, ancak uygun egzoz gazı sıcaklık değeri ile mümkündür. Dolayısıyla egzoz gazı sıcaklığı, SCR sisteminde püskürtülen ürenin termoliz ve hidroliz reaksiyonları ile NO_x emisyonlarının indirgenmesinde kullanılan NH₃ bileşenlerine dönüşümünün sağlayan en önemli parametredir. Bu çalışmada, iki zamanlı ve dört zamanlı gemi dizel motorları için, NO_x emisyon azaltma performansını maksimum yapacak SCR sistem tasarımı, farklı parametrik çalışmalar

ile modellenmiştir. Sistem tasarımı, egzoz gazının sıcaklığı ve akış debisine göre yapılmaktadır. Dört zamanlı ve yüksek yük koşullarında çalışan gemi dizel motorları yüksek egzoz gazı sıcaklığına ve akış hızına sahiptir. Dolayısıyla bu koşullarda SCR sistemi, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi turboşarjer türbininin çıkışına yerleştirilmektedir. Böylece SCR sistemi alçak basınç (AB-SCR) koşullarında çalışmaktadır.

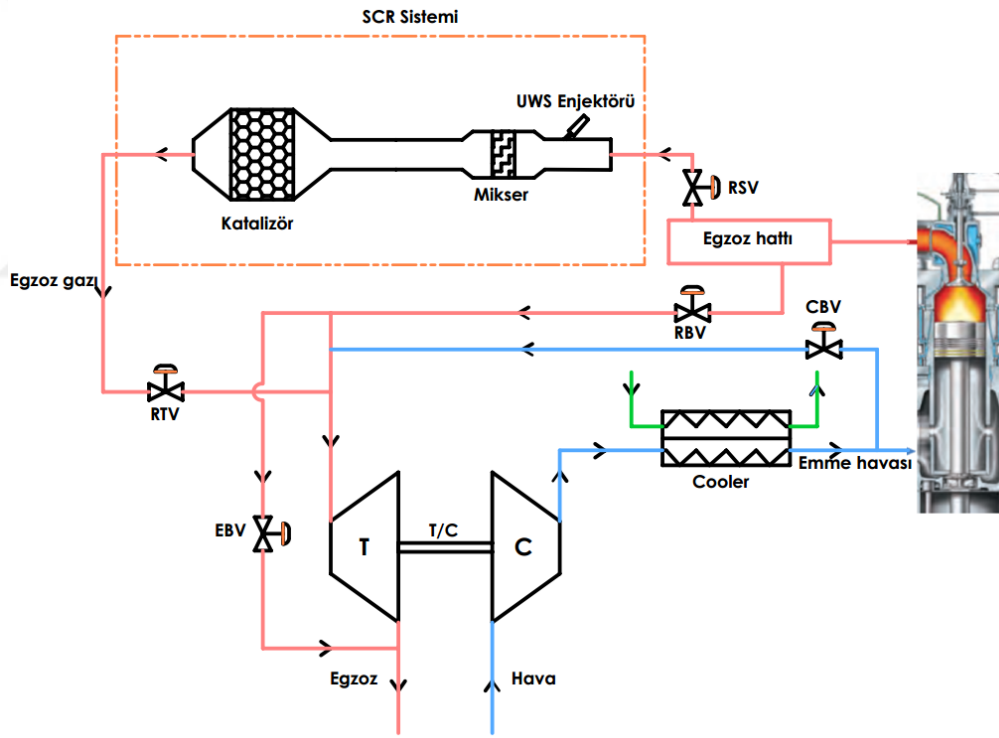


Şekil 4.1 AB-SCR sistemi

Tanımlanan model üzerinde farklı bağlantı noktalarında bulunan valfler, SCR sisteminin emisyon kontrol alanlarında veya emisyon kontrol alanları dışında devreye alınması ya da devre dışı bırakılmasında kullanılmaktadır. Ayrıca NO_x indirgeme performansı, valf açıklıkları ile egzoz debisine göre ayarlanabilmektedir. Sistem üzerinde yüksek yük koşullarında egzoz baypas valfi (EBV) kapalı tutularak egzozun tamamının türbinden geçirilip, daha sonra SCR sistemine verilmesi sağlanmaktadır. Daha düşük yük koşullarında ise türbin çıkışındaki egzoz gazı enerji potansiyeli düşük olacağından, EBV’nin uygun açıklığı ile SCR girişindeki egzoz gazı sıcaklığının artırılması sağlanacaktır. Böylece üretilen parçalanma reaksiyonları için uygun egzoz

gazı sıcaklık değeri, tanımlanan valfler yardımıyla ayarlanacak ve en uygun çalışma parametreleri belirlenecektir. Yine benzer şekilde RBV, SCR öncü valfi (VBR) ve SCR Sonrası valfi (VAR) valfleri, SCR sistemindeki akış debisinin ayarlanmasında ve maksimum NO_x azaltma verimliliğine sahip sistemin tasarlanmasında kullanılmaktadır.

Daha düşük devir sayılarında çalışan iki zamanlı gemi dizel motorlarında egzoz gazı sıcaklığı düşük olduğundan, SCR sistemi doğrudan motor çıkışına yerleştirilmektedir. Böylece yüksek enerjiye sahip ve yüksek basınçlı egzoz gazları ile SCR emisyon azaltma performansı artırılmış olacaktır. Şekil 4.2’de SCR sisteminin yüksek basınç (YB-SCR) koşullarında çalışma modeli verilmiştir.



Şekil 4.2 YB-SCR sistemi

Yukarıda tanımlanan sistem modelleri için SCR sistem sayısal analizi, üçüncü bölümde doğrulaması yapılan sınır koşulları altında yapılmıştır. Sistem tasarımı iki zamanlı gemi dizel motoru egzoz verileri için %85 yük koşulunda gerçekleştirilmiştir.

4.2 Gemi Dizel Motoru Verileri

Dizel motorlarda SCR tasarımı, motor egzoz koşullarına göre yapılmaktadır. Dizel motor egzoz gazının sıcaklığı, akış oranı ve içinde bulunan bileşenler sistemi etkileyen temel parametrelerdendir. Bu çalışmada, %100 yük koşulunda aynı güce sahip (5400 kW) iki zamanlı ve dört zamanlı gemi dizel motorlar için, SCR sistem çalışma parametreleri belirlenmiştir. Tablo 4.1’de SCR sistem tasarımı yapılan iki zamanlı dizel motor teknik özellikleri sunulmuştur.

Tablo 4.1 Dizel motor özellikleri

Motor Parametreleri	Birim	Değer
Motor tipi	-	2 Stroke-5G45ME
Silindir çapı	mm	450
Kurs boyu	mm	2250
Güç	kW	5400 (tam yük)
Turboşarjer	-	MAN TCR22-21

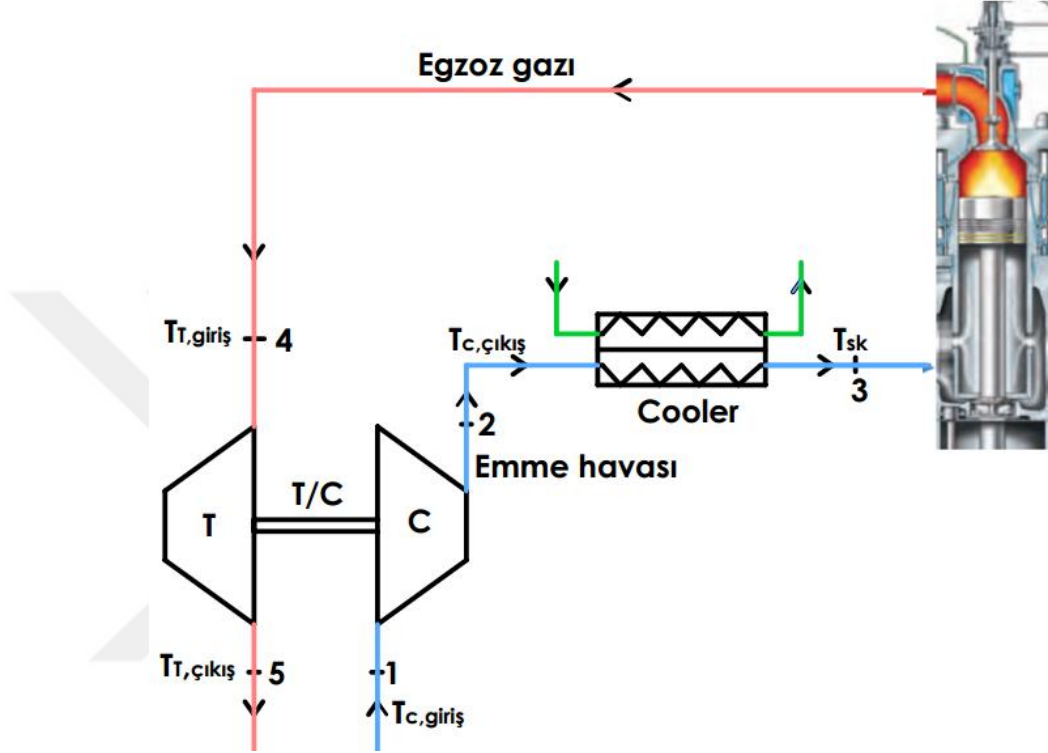
Belirtilen motorun üretici firması olan MAN enerji çözümlerinden, %100, %85, %75, %50 ve %25 motor yük koşulları için deneysel yollarla elde edilmiş türbin çıkışı egzoz gazı sıcaklığı, egzoz debisi, skavenç havası sıcaklık ve basınç gibi termodinamik özellikler alınmıştır. Alınan bu termodinamik özelliklere göre, SCR sistem verimliliği, her bir yük koşulu için ayrı ayrı hesaplanmış ve en uygun çalışma parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. MAN enerji çözümleri firmasından alınan deneysel veriler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Motor deney verileri

Motor Yüğü	Power (kW)	Egzoz Debisi (kg/s)	$T_{T,çıkış}$ (°C)	Hava Debisi (kg/s)	$P_{c,çıkış}$ (bar)	T_{sk} (°C)	$\dot{W}_{sk}$ (kW)
100	5400	11,7	249	11,4	4,23	37	2030
85	4590	10,4	221	10,1	3,56	34	1530
75	4050	9,6	204	9,4	3,32	32	1330
50	2700	6,9	219	6,7	2,28	28	630
25	1350	3,6	249	3,5	1,47	32	150

MAN marka 5G45ME-C9 tipi gemi dizel motorunda, MAN TCR22-21 tipi turboşarjer yer almaktadır. YB-SCR giriş koşullarında yüksek basınç koşullarında

alışan iki zamanlı dizel motorların SCR giriş sıcaklığı turboşarjer türbini giriş sıcaklığı ile aynıdır. Bu değeri, turboşarjer türbin ve kompresör termodinamik bağıntıları ile belirlenmektedir. Şekil 4.3, dizel motor ve turboşarjer yerleşimini göstermektedir.



Şekil 4.3 Dizel motor ve turboşarjer yerleşimi

Verilen şekilde, 1 noktası kompresör giriş havasını, 2 noktası kompresör çıkış havasını ifade etmektedir. 2 noktasında sıkışan havanın sıcaklığı coolerde soğutularak 3 noktasından motor yanma odasına verilmektedir. Aynı şekilde 4 noktası egzoz çıkış noktası olup yüksek basınç ve yüksek sıcaklığa sahiptir. Egzoz gazı turboşarjer türbininde genişleyerek, kompresörün tahrik edilmesinde kullanılan enerjiyi sağlamaktadır. Dolayısıyla 5 noktasında, düşük sıcaklık ve düşük basınca sahip egzoz gazı bulunmaktadır.

Şekil 4.1’de belirtilen düşük basınç koşullarında çalışan AB-SCR sistemi, türbin çıkışında 5 noktasına yerleştirildiğinden dolayı Tablo 4.2 verileri bu sistemin tasarımı için yeterli veriyi sağlamaktadır. Ancak Şekil 4.2’de şematik olarak verilen yüksek

basınç koşullarında, doğrudan motor egzoz sistemine yerleştirilen YB-SCR sistemi için 4 noktası egzoz gazı özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Türbin öncesi egzoz gazı sıcaklığının tahmin edilmesinde turboşarjer kompresör ve türbin termodinamik bağıntıları kullanılmıştır. Sistem üzerinde kompresör giriş hava özellikleri (atmosfere açık nokta), basınç 1 bar ve sıcaklık 300 K olarak kabul edilmiştir. Kompresör çıkışında basıncı ve sıcaklığı artan havanın, bir soğutucudan geçirilip aynı basınç değerinde sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir (Zhu ve diğerleri, 2020). Motor üreticisi tarafından yapılan deneyler ile motor skavenç (emme) havasının kaç dereceye kadar soğutulduğunu (T_{sk}), bu soğutma sırasında ısınan havadan ne kadar enerji çekildiğini ve hava akış debisi bilgilerini içeren deneysel veriler alınmıştır. Kompresör çıkışında ısınan havanın sıcaklığı ($T_{c,çıkış}$) Denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır (Cengel ve Boles, 2012; Zhu ve diğerleri, 2020).

$$\dot{W}_{sk} = \dot{m}_{hava} \cdot [h_{c,çıkış} - h_{sk}] \quad (4.1)$$

Burada, $\dot{W}_{sk}$ (kW) skavenç havasının soğutulması için sıcak havadan çekilen gücü, $\dot{m}_{hava}$ (kg/s) kompresörden geçen havanın akış oranını, h_{sk} ($\frac{kJ}{kg}$) skavenç havası entalpisini ve $h_{c,çıkış}$ ise kompresör çıkışı sıcak hava entalpisini ifade etmektedir.

Kompresörde havanın sıkıştırılması için gerekli güç $\dot{W}_c$ ise kompresör giriş ($h_{c,giriş}$) ve çıkış ($h_{c,çıkış}$) entalpilerine bağlı olarak Denklem 4.2 ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{W}_c = \dot{m}_{hava} \cdot \frac{(h_{c,çıkış} - h_{c,giriş})}{\eta_c} \quad (4.2)$$

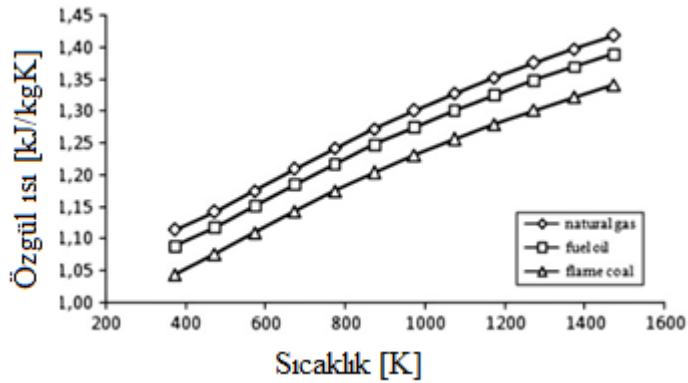
Verilen ifadede η_c kompresör izantropik verimini ifade etmektedir. Turboşarjer türbin gücü, egzoz gazlarının türbinde genişlemesi sonucu elde edilmektedir. Dolayısıyla yüksek basınçlı SCR sisteminde ürenin termoliz ve hidroliz reaksiyonlarının gerçekleşmesini sağlayacak olan türbin giriş sıcaklığı Denklem 4.3 ve 4.4 yardımıyla hesaplanabilir (Zhu, Ma, Zhang ve Deng, 2020).

$$\dot{W}_T = \dot{W}_C \quad (4.3)$$

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{egzoz} \cdot \left(\int_{T_{T,çıkış}}^{T_{T,giriş}} c_{p,egzoz} dT \right) \cdot \eta_T \quad (4.4)$$

Burada, $\dot{W}_T$ türbinden elde edilen gücü, η_T türbin izentropik verimini, $T_{T,giriş}$ ve $T_{T,çıkış}$ sırasıyla türbin giriş ve çıkış sıcaklıklarını, $c_{p,egzoz}$ egzoz özgül ısısını, $\dot{m}_{egzoz}$ ise türbinden geçen egzoz gazlarının miktarını ifade etmektedir. Böylece yukarıda tanımlanan denklemler kullanılarak, YB-SCR sistemi için, giriş sıcaklık ve egzoz gaz debisi gibi sınır koşulları belirlenmiş olacaktır.

Şekil 4.4'te dizel yakıtı ait egzoz gazlarının sıcaklık ile sabit basınç altındaki özgül ısı değerleri verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda $c_{p,egzoz}$ değerine grafikte ifade edildiği üzere bir eğri uydurularak sıcaklığın fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır (Coskun, Oktay ve Ilten, 2009).



Şekil 4.4 Dizel yakıtı için egzoz C_p değeri

Verilen şekil için eğri uydurulduğunda modelde kullanılacak olan sıcaklık sabit basınç özgül ısı arasındaki ilişki Denklem 4.5'te ifade edilmiştir.

$$C_p(T) = -2,26 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 - 1,53 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 3,68 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,95 \quad (4.5)$$

Yukarıda verilen eşitlikler ile YB-SCR sistemi çalışma parametreleri belirlenmiş ve Tablo 4.3'te verilmiştir. Elde edilen veriler doğrudan motor egzoz sisteminden SCR

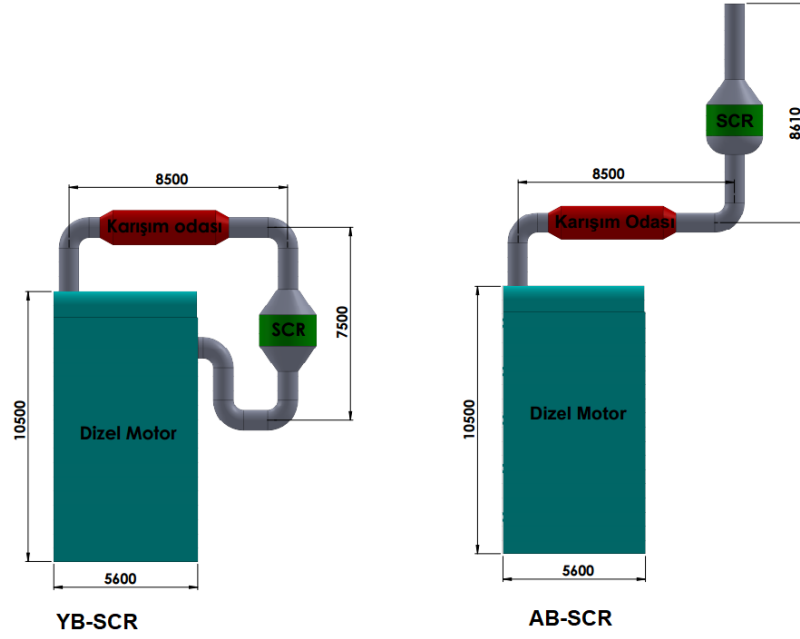
sistemine giren sıcaklık değerleridir. Böylece elde edilen termodinamik özellikler yardımıyla SCR sistem performans parametrelerinin değerlendirilmesi mümkün hale gelmektedir.

Tablo 4.3 Turboşarjer giriş çıkış termodinamik özellikleri

Motor Yüğü	Kompresör				Türbin		
	T _{c,çıkış} (°C)	P _{c,çıkış} (bar)	h _{c,çıkış} (kJ/kg)	W _c (kW)	W _T (kW)	T _{T,çıkış} (°C)	T _{T,giriş} (°C)
100	212	4,23	487,6	2397	2664	249	443,9
85	183,2	3,56	458,2	1794	1993	221	387
75	171,5	3,32	446,3	1544	1716	204	359,9
50	121	2,28	395,1	719,7	799,7	219	320,4
25	74,5	1,47	348,2	193,5	215,1	249	301,2

4.3 SCR Model Geometrisi

Gemi dizel motorlarında farklı çalışma modları için SCR sistemlerinin yerleşimi Bölüm 4.1’de verilmiştir. Bu sistemlerin gemi makine dairesinde alan kısıtından dolayı uygun yerleşiminin yapılması gerekmektedir. Yüksek basınç SCR sistemleri doğrudan motor çıkışına yerleştirilmektedir. Bu durumda, SCR sisteminin çıkışı turboşarjer türbin girişine açılmaktadır. Alçak basınç altında çalışan iki zamanlı ve dört zamanlı dizel motorlarda, SCR sistemi motor türbin çıkışına bağlı olduklarından sistem çıkışı atmosfere açılmaktadır. Şekil 4.5, düşük ve yüksek basınç koşullarında çalışan SCR sistemlerinin dizel motora yerleşimini göstermektedir. YB-SCR sistemi, gemi ana makinesi etrafında dört dirsekten oluşan bir geometrik yapıya sahiptir. Dolayısıyla bu sistemin en büyük dezavantajı, dirseklere bağlı basınç düşümü ve yerleşim alanlarının kısıtlı olmasıdır. Alçak basınç altında çalışan iki zamanlı ve dört zamanlı gemi dizel motorlarına uygulanan SCR sisteminin çıkışı atmosfere açıldığı için makine dairesinde yerleşimi daha kolaydır.



Şekil 4.5 İki zamanlı gemi dizel motor SCR yerleşimi

4.4 Sınır Koşulları

SCR sistem tasarım parametrelerinin ve NO_x azaltma performans parametrelerinin belirlenmesinde kullanılacak sayısal modelin sınır ve başlangıç koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Sayısal modelde kullanılacak türbülans, püskürtme parametreleri ve kimyasal denklemler gibi sınır koşullarının üçüncü bölümde doğrulaması yapılmıştır. Sayısal analizler aşağıda belirtilen kısıtlar altında gerçekleştirilmiştir.

- ✓ Üç boyutlu Zamandan bağımsız olarak
- ✓ 9,81 m/s² yerçekimi ivmesinde ve 101 kPa operasyon basıncında
- ✓ Basınç tabanlı çözücü ile sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Denklem 2.1-2.6 arasında tanımlanan UWS buharlaşma, termoliz ve hidroliz reaksiyonları ile NO_x indirgeme reaksiyonları sayısal modelde tanımlanmıştır. Sayısal modelde ilgili reaksiyonların tanımlanması, Denklem 2.9'da verilen Arrhenius eşitliğindeki katsayılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tanımlanan reaksiyonlar için deneysel verilerden elde edilen katsayılar, Tablo 4.4'te ifade edilmiştir (Baik ve diğerleri, 2006; Yim ve diğerleri, 2004).

Tablo 4.4 SCR reaksiyon katsayıları

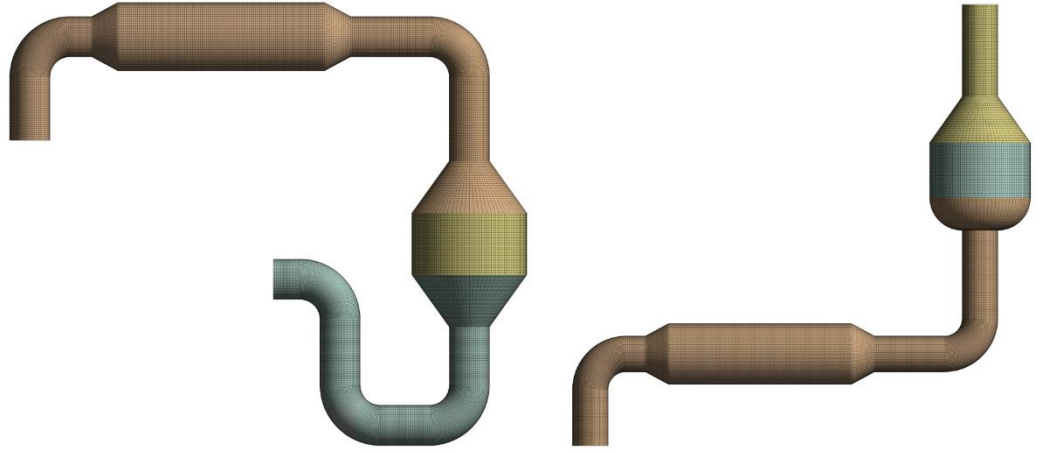
Reaksiyon	Termal Ayrışma		Katalitik Ayrışma	
	A	E_a [J/kmol]	A	E_a [J/kmol]
Termoliz	$4,9 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^7$	$4,5 \cdot 10^3$	$2,26 \cdot 10^7$
Hidroliz	$2,5 \cdot 10^5$	$6,22 \cdot 10^7$	$3,1 \cdot 10^4$	$1,58 \cdot 10^7$
Standard SCR	-	-	$2,3 \cdot 10^8$	$84,9 \cdot 10^3$
Hızlı SCR			$1,9 \cdot 10^{12}$	$8,51 \cdot 10^4$

İki zamanlı ve dört zamanlı motorlarda tasarlanan sayısal model sınır ve başlangıç koşulları Tablo 4.5'te verilmiştir. Sınır koşulları, geometri, katalizör, püskürtme ve egzoz gazı içeriklerini içermektedir. Çalışmada çözücü olarak Couple algoritması kullanılmıştır. Basınç, ağırlıklı cisim kuvveti olarak alınmıştır. Ayrıca çözüm şeması olarak momentum, hacimsel oran, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı ikinci mertebe ileri fonksiyonlar ile tanımlanmıştır. Parametrik çalışmalar literatürde var olan çalışmalara uygun olarak k - ε türbülans modeli kullanılarak üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir (Zheng, 2016).

Tablo 4.5 SCR sistem sınır koşulları

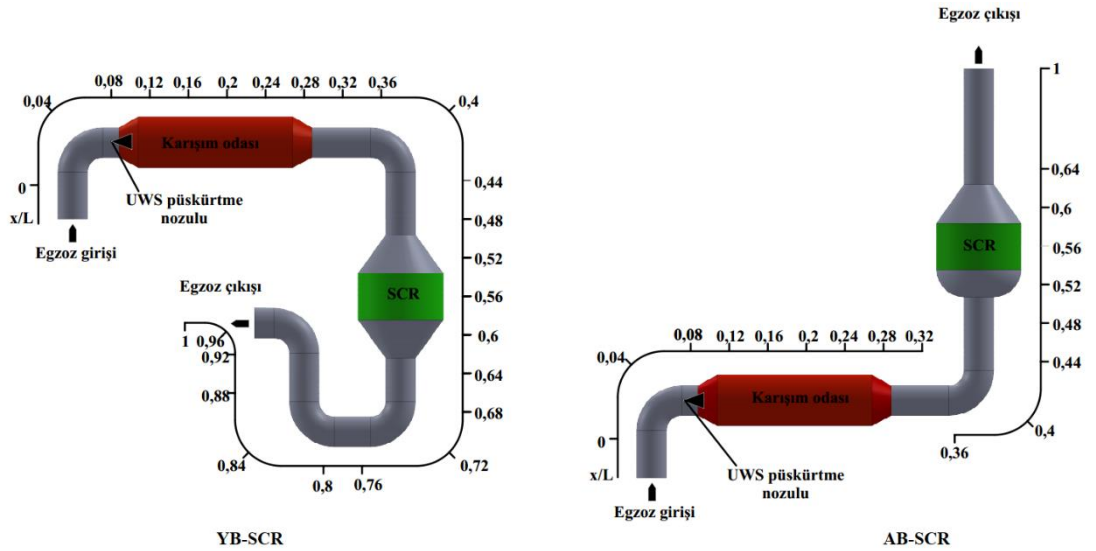
Sınır koşulları		Birim	Değer
Geometri	Giriş	kg/s	Debi
		K	Egzoz gazı sıcaklığı
	Çıkış	-	Basınç çıkışı
	Duvar	-	Adyabatik duvar
Katalizör	Basınç katsayısı (C_2)	$1/m^2$	$1,12 \cdot 10^7$
	Geçirgenlik	$1/m$	3,72
	Katalizör boyutları (DxL)	mm	2220x1200
Püskürtme	Malzeme	-	%40 üre-%60 su
	Oran	l/h	105-90-75-60-45
	Hız	m/s	10.6
	Koni açısı	°	70
	Ortalama çap	mm	0,022
	Yayılım parametresi		3,27
Egzoz bileşenleri	NO _x	ppm	1500
	SO _x	ppm	600
	O ₂	%	13
	CO ₂	%	5,2
	H ₂ O	%	5,35

SCR sistemi HAD analizlerinde kullanılan hesaplamalı ağ örgüsü Şekil 4.6'da sunulmuştur. Modelde kullanılan elemanların tamamı yapısal olup, yaklaşık 1M eleman sayısında analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6 Hesaplamalı ağ örgüsü

Hesaplamalı modele tanımlanan sınır koşulları ise Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Yüksek basınç koşullarında çalışan SCR sistemi için SCR girişi, SCR kütle akış oranı olarak, SCR çıkışı ise atmosfer basınçlı çıkış olarak tanımlanmıştır. Alçak basınç koşullarında çalışan SCR sistemlerinde ise, türbinde genişleyen egzoz SCR girişinde kütle akış oranı olarak tanımlanmaktadır.



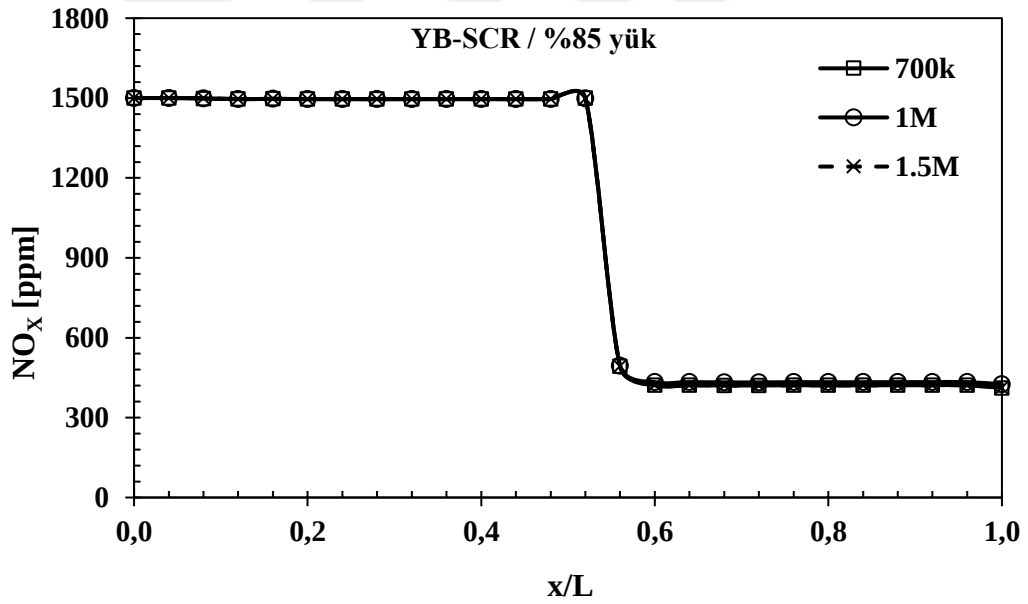
Şekil 4.7 AB-SCR ve YB-SCR sistem sınır koşulları

Şekil 4.7’de sistem girişi ile çıkış arası farklı x/L oranlarına bölünmüştür. Böylece sistem boyunca gerçekleşen fiziksel olayların, x/L oranı boyunca değişimi ifade edilmiştir.

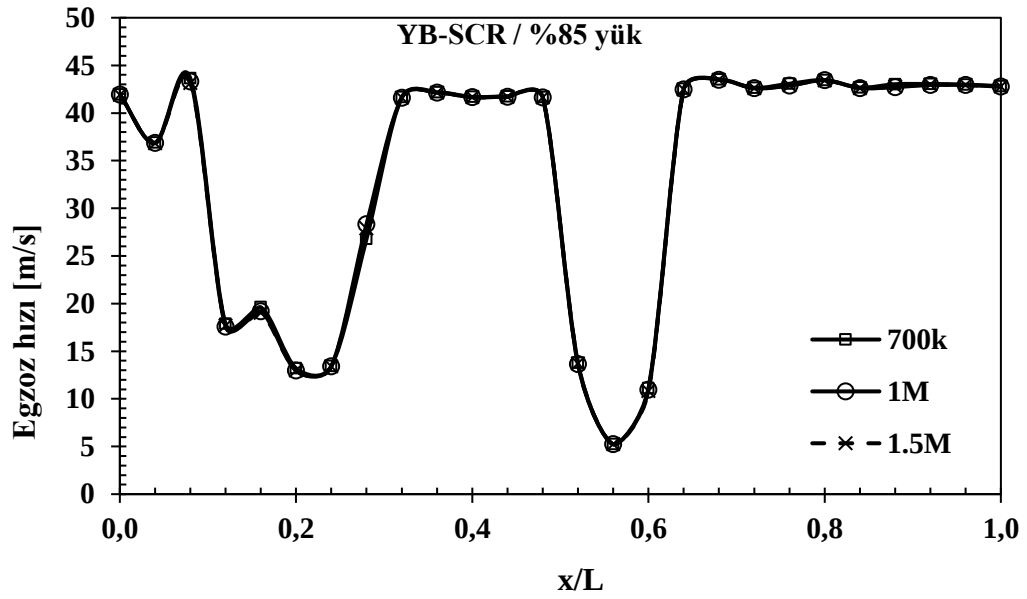
4.5 Çözüm Ağından Bağımsızlık

Çalışma kapsamında yapılan çözüm ağından bağımsızlık analizi, 5400 kW gücünde hem iki zamanlı hem de dört zamanlı gemi dizel motoru için tasarlanan SCR sistemleri için yapılmıştır. Tasarlanan modeller için çözüm ağından bağımsızlık analizleri, %85 yük koşulları için yapılmıştır.

Şekil 4.8, iki zamanlı yüksek basınç koşullarında çalışan SCR sistemi için, ağdan bağımsızlık analizi sonuçlarını ifade etmektedir. 700k, 1M ve 1,5M eleman sayılarında gerçekleştirilen ağdan bağımsızlık analizlerinde, SCR sistemi boyunca egzoz hızı ve NO_x miktarının değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu ve değişen ağ sayısından bağımsız olduğu belirlenmiş olup, YB-SCR sistemi için parametrik çalışmalar 1M ağ sayısında yapılmıştır.

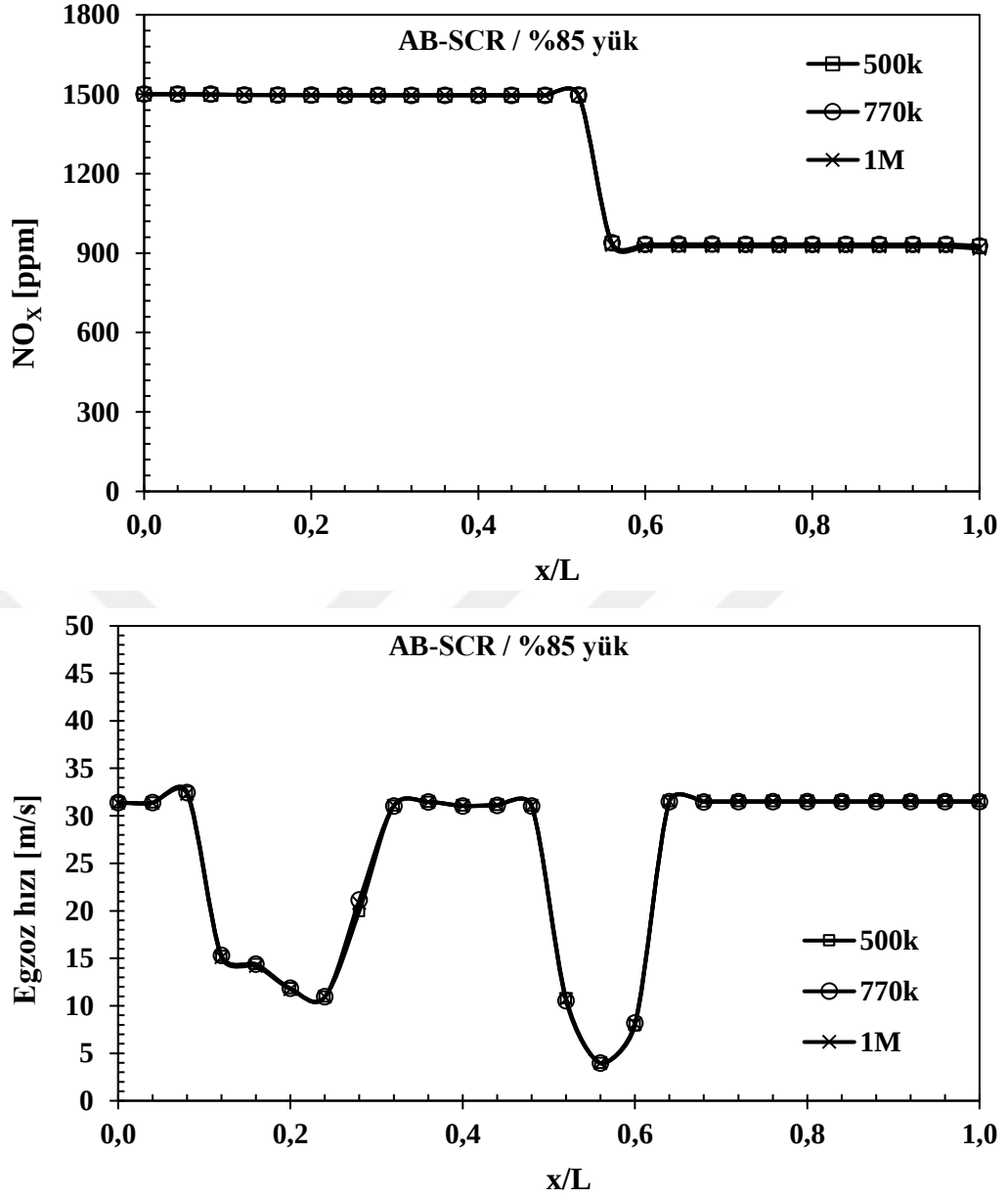


Şekil 4.8 YB-SCR sistemi için ağ bağımsızlığı



Şekil 4.8 devamı

YB-SCR sisteminde kullanılan ağ yapısı ve boyutları ile AB-SCR ve dört zamanlı dizel motor SCR sistem ağ yapısı aynıdır. Şekil 4.9, AB-SCR sistemi ve dört zamanlı dizel motor SCR sistemi yaklaşık olarak 500k, 770k ve 1M ağ sayısında olacak şekilde ağdan bağımsızlık analizini göstermektedir. SCR sistem boyunca üç farklı ağ sayısı için NO_x ve egzoz akış hızının değişimi incelenmiştir. Elde edilen bulgularla, değişken ağ yapısında egzoz gazı hızı ve NO_x miktarlarının benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. AB-SCR ve dört zamanlı SCR sistemlerinde gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda 770k eleman sayılı ağ yapısı kullanılmıştır.



Şekil 4.9 AB-SCR sistemi için ağ bağımsızlığı

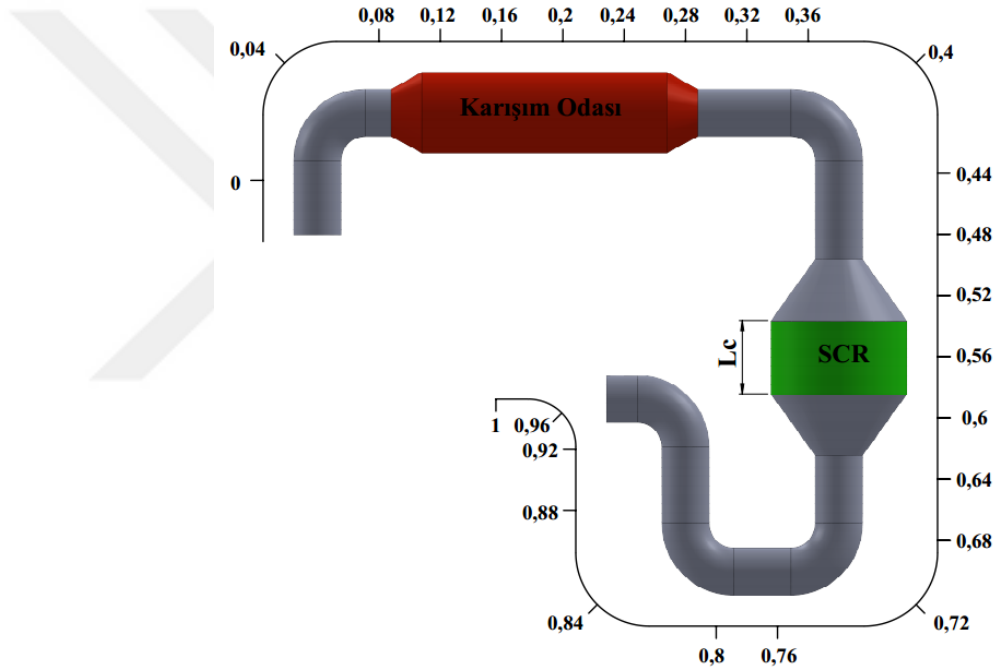
4.6 SCR Modeli Üzerinde Yapılan Parametrik Çalışmalar

Bu bölümde SCR sistem tasarım parametreleri ve bu parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Parametrik çalışmalar, NO_x emisyonları azaltma performansı ve basınç düşüm oranına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Temel olarak SCR boyunun, SCR sistem çapının, SCR çıkış formunun, SCR katalizör aktivasyon enerjisinin, karışım odası konumu ve boyunun

sistem performansına etkisi araştırılmıştır. Yapılan parametrik çalışmalar neticesinde en uygun tasarım parametreleri belirlenmiştir.

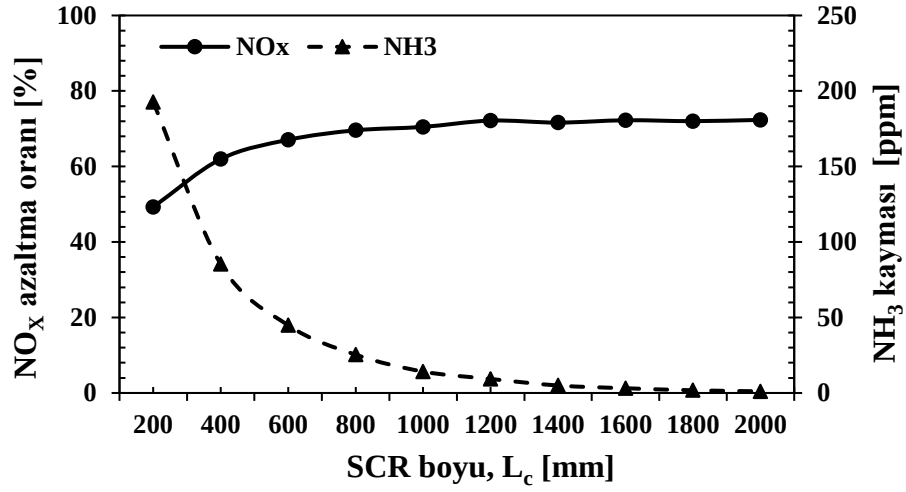
4.6.1 SCR Boyunun NO_x Emisyonları ve NH_3 Kaymasına Etkisi

SCR sistemlerinde NO_x emisyonlarının azaltılmasını sağlayan temel yapı katalizörlerdir. Bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizlerde, gözenekli ortam modeli olarak modellenen katalizörün matematiksel modeli Bölüm 2.5'te verilmiştir. Şekil 4.10, incelenen SCR sistemi için L_C SCR boyunu göstermektedir.



Şekil 4.10 Parametrik SCR boyu

SCR boyunun belirlenmesi amacıyla yapılan sayısal analizler, %85 yük koşulundaki gemi dizel motoru için yapılmıştır. %85 yük için 90 l/h UWS püskürtme miktarında gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda, farklı SCR boy (L_C) değerleri için NO_x azaltma performansı ve NH_3 kayma miktarı belirlenmiştir. Parametrik çalışmalar, L_C SCR boyunun 200 mm ile 2000 mm arasında olduğu durumlar için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11, katalizör boyu değişiminin sistem performansına olan etkisini göstermektedir.



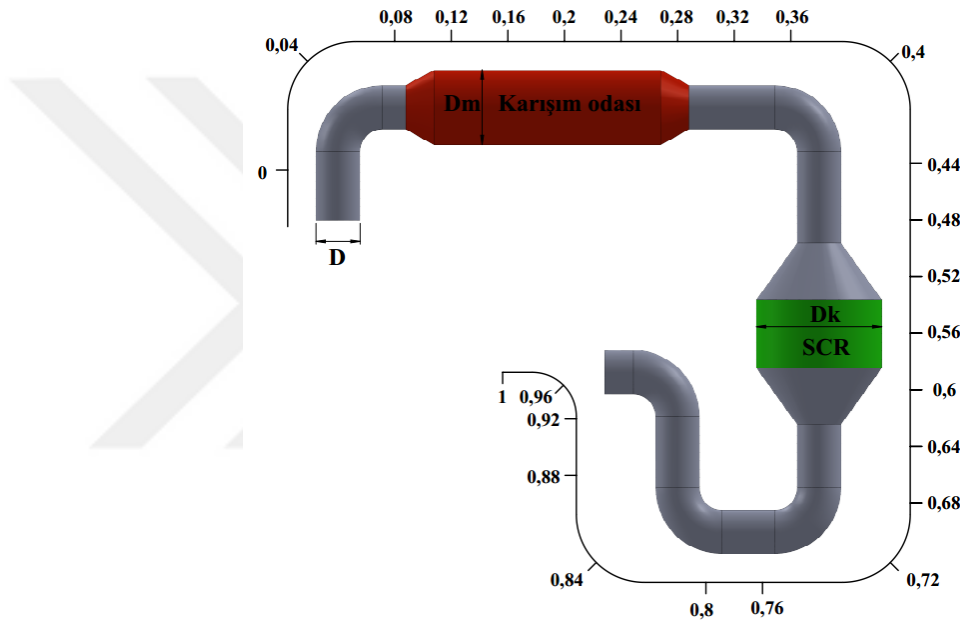
Şekil 4.11 SCR boyunun NO_x ve NH_3 kayma miktarına etkisi

SCR boyundaki değişimin NO_x indirgeme performansına ve egzoz çıkışında NH_3 kaymasına olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. 2000 mm SCR boyunda NO_x azalma oranı yaklaşık %75 iken, bu değer 1200 mm SCR boyunda %70 oranlarındadır. Ancak 1200 mm SCR boyundan küçük değerlerde, NO_x oranı önce lineer sonra üstel olarak azalmaktadır.

Termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan NH_3 bileşenlerinin katalizörde NO_x bileşenleri ile reaksiyona girerek yok olması beklenmektedir. Ancak katalizörde NO_x/NH_3 bileşenlerini içeren kimyasal reaksiyon, stokiyometrik olarak gerçekleşmez ise NH_3 bileşenleri egzoz ile atmosfere atılmakta ve NH_3 kayması meydana gelmektedir. SCR boyunun yeteri kadar uzun olmaması, SCR reaksiyonlarının gerçekleşmemesine ve NH_3 kaymasına neden olmaktadır. SCR boyunun 2000 mm olduğu durumda NH_3 kayması 1,1 ppm mertebelerinde iken, 1200 mm olduğu durumda bu değer 10 ppm olarak ölçülmüştür. SCR boyunun 1200 mm'den az olduğu durumlarda ise NH_3 kayması üstel bir şekilde artmış ve 200 mm SCR boyunda yaklaşık 80 ppm olarak ölçülmüştür. Elde edilen bulgular neticesinde 1200 mm SCR boyu, yapılan SCR sistemi için en uygun SCR boyu olarak belirlenmiştir. SCR boyunun 1200 mm'den az olduğu durumlarda NO_x indirgeme oranı azalırken, NH_3 kayması da artmaktadır.

4.6.2 SCR Sistem Çapının Belirlenmesi

Borularda akış hızının belirlenmesi akış karakteristiği ve duvarlardaki sürtünmenin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (White, 2011). Bu kapsamda SCR sistemi içerisindeki akış hızı ve karakteristiğinin belirlenmesi amacıyla farklı boru çaplarında parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik olarak incelenen boyutlar, Şekil 4.12’de verilmiştir. Parametrik çalışmalar, YB-SCR için %85 yük koşulunda 90 l/h püskürtme miktarında yapılmıştır.



Şekil 4.12 SCR sistem parametrik çap değerleri

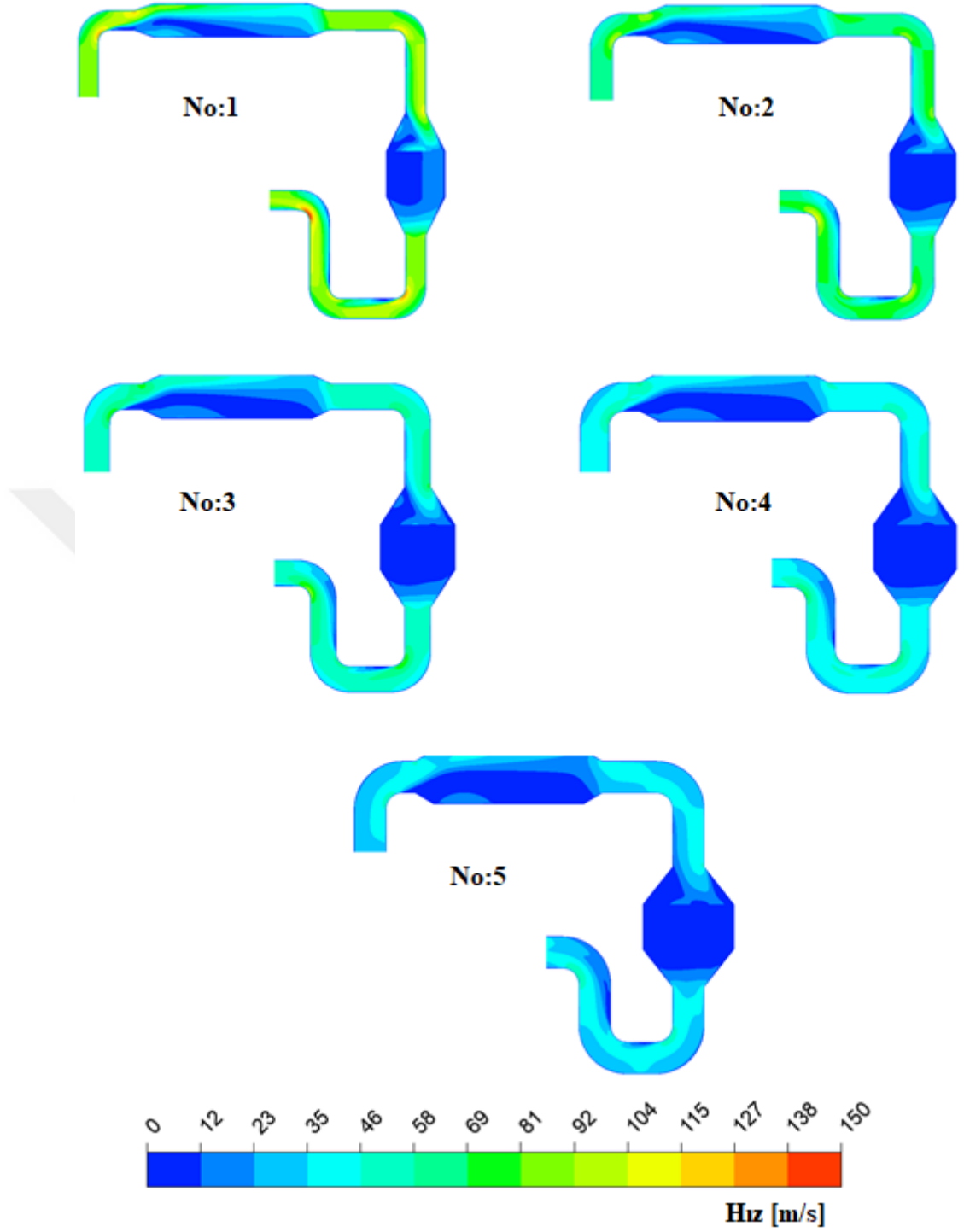
Yapılan parametrik çalışmalarda, beş farklı çap değerinin sistem performansına etkisi incelenmiştir. Parametrik çalışmalarda kullanılan D sistem çapı, D_m karışım odası çapı ve D_k SCR çapı değişkenleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6 SCR sistemi parametrik çap değerleri

No	Sistem çapı (D)	Karışım odası çapı (D_m)	SCR çapı (D_k)
1	540	900	1540
2	620	1050	1770
3	700	1190	2000
4	780	1320	2220
5	860	1460	2450

Belirlenen ap deęerleri birbiri ile orantılı olup, her bir çap kořulunun NO_x azaltma performansına ve basınç dūřūmūne etkisi incelenmiřtir. Ayrıca her bir çap deęeri için hız profilleri incelenerek, sistem boyunca deęiřimi belirlenmiřtir. řekil 4.13, SCR sistem boyunca hız daęılımını gōstermektedir.

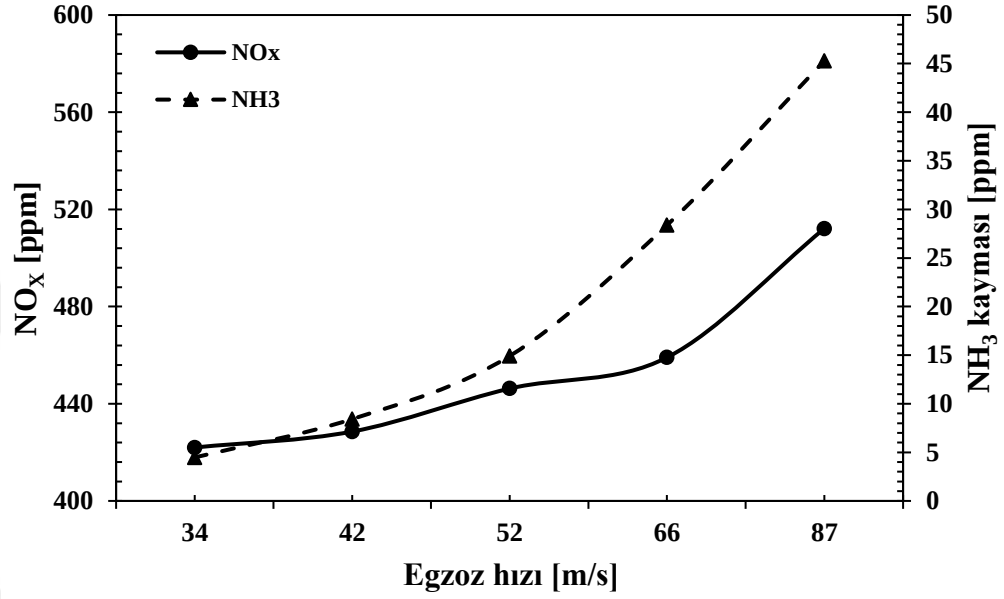
Sistem boyunca egzoz hızı değişimi incelendiğinde, karışım odasında akış hızının azaldığı gōzlemlenmiřtir. Akış hızının karışım odasında azalması, termoliz ve hidroliz reaksiyonlarının daha etkin bir şekilde gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Akış hızının sistem çapı ile ters orantılı olarak değiştiği hız profillerinde açıkça gōr÷lmektedir. Ayrıca katalizōr girişinde hız dağılımının homojen olmaması, SCR öncesi dirsek geometrisinden kaynaklanmaktadır. Sistem boyunca ortalama hız değerinin 1 numaralı sistem için yaklaşık 87 m/s iken, 5 numaralı sistem için 34 m/s olduğu belirlenmiştir. Hızın en y÷ksek değeri ise, yaklaşık 150 m/s ile 1 numaralı tasarım giriş dirseklerinde oluşmaktadır.



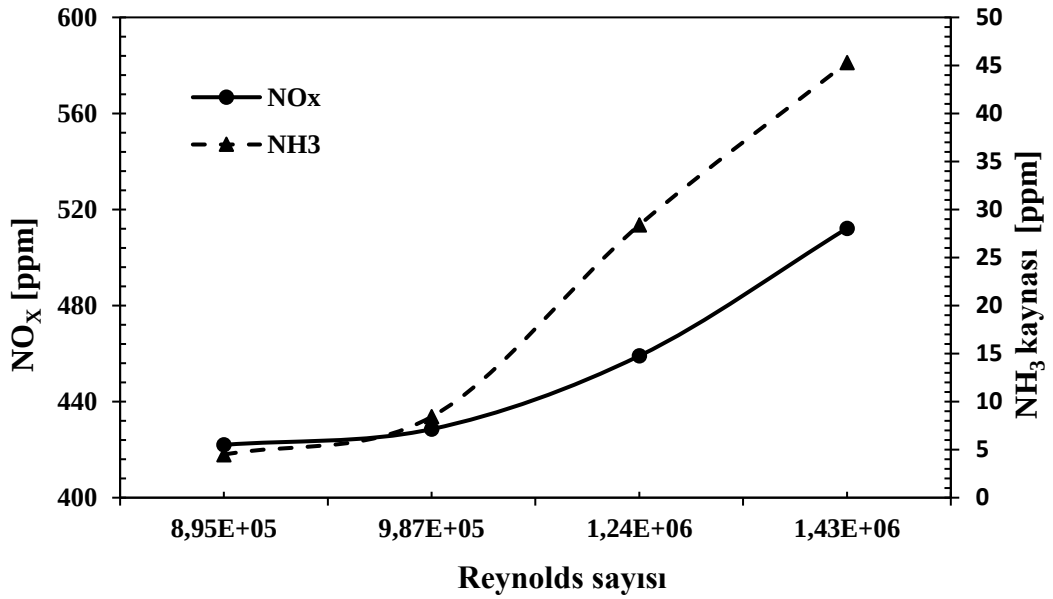
Şekil 4.13 Farklı SCR boru çapları için hız dağılımı

Her bir çap değeri için SCR girişindeki hız değerleri ve bu hızlara karşılık gelen Reynolds sayıları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.14 ve 4.15'te verilmiştir. Sonuçlar, azalan hız ve Reynolds sayısı ile SCR sistem çıkışında ölçülen NO_x emisyonlarının azaldığını göstermektedir. Bulgular, sistem çapının 780 mm'den,

hız değerinin 42 m/s'den düşük olduğu durumlarda, sistem çıkışındaki NO_x oranının daha az etkilendiğini göstermektedir. Aynı şekilde NH_3 kaymasının da azalan hız ile azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, SCR sistemi boyunca hızın azalmasına bağlı akışkanın boru boyunca geçirdiği sürenin uzun olması ile açıklanmaktadır. Hızın azalması, reaksiyonların daha verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır.

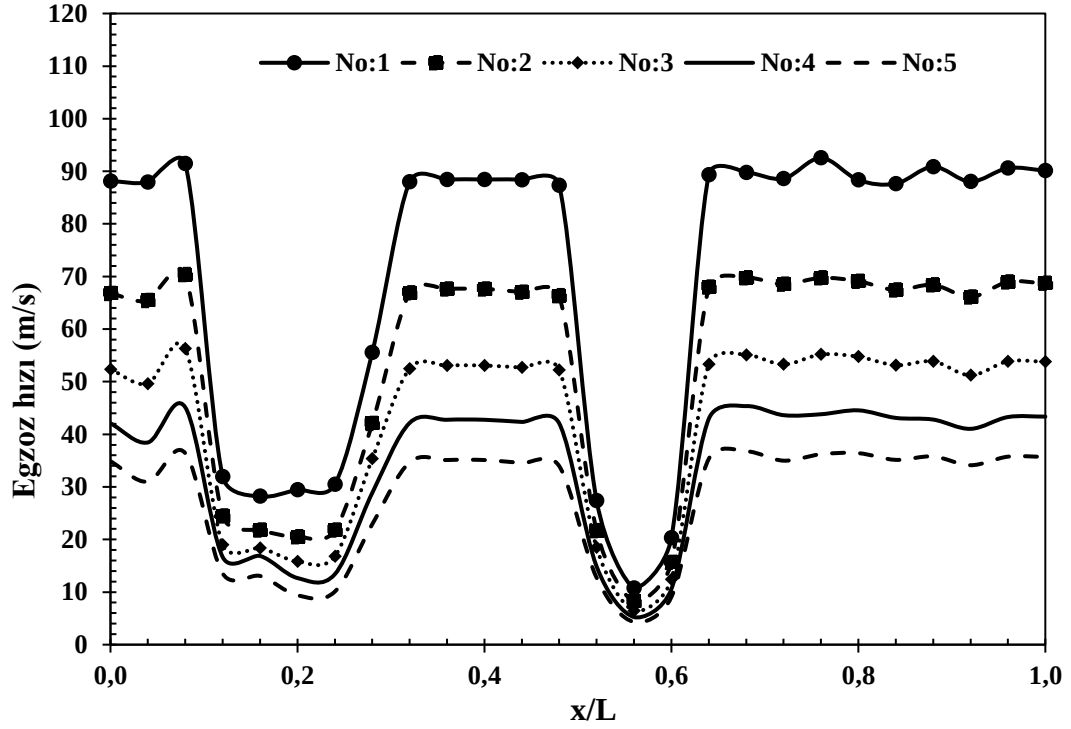


Şekil 4.14 Egzoz akış hızı ile NO_x ve NH_3 miktarının değişimi



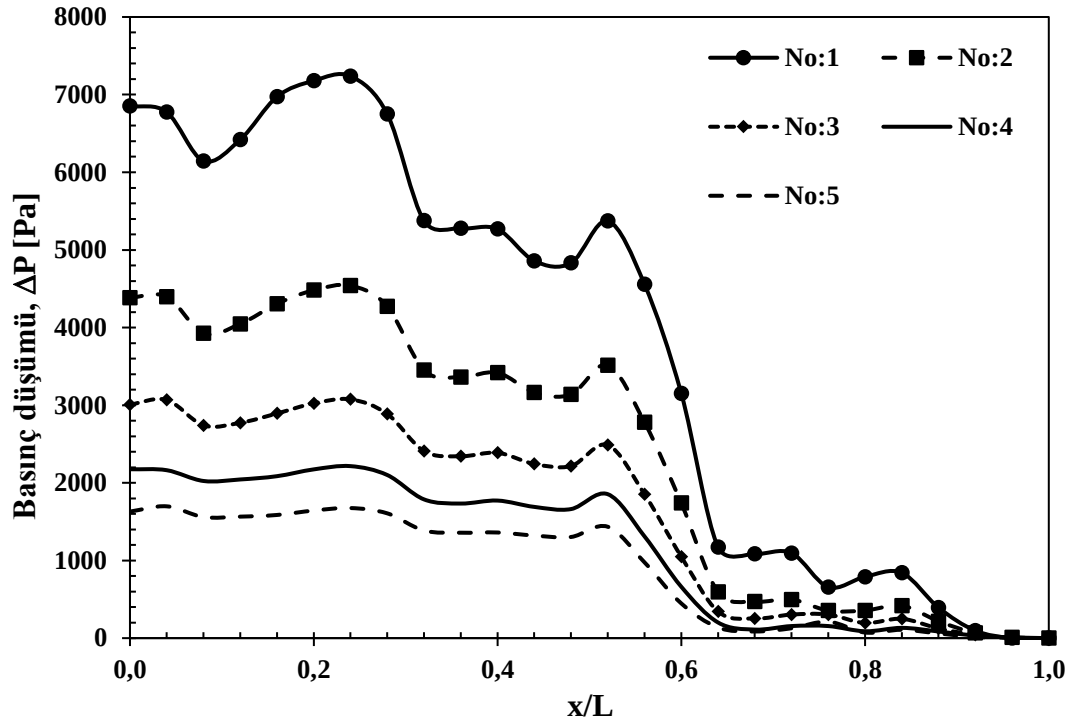
Şekil 4.15 Reynolds sayısı ile NO_x ve NH_3 miktarının değişimi

Şekil 4.16 ise, egzoz akış hızının SCR sistem boyunca her bir çap değeri için değişimini ifade etmektedir. Sistem boyunca hızın karışım odası ve SCR’de düştüğü, diğer bölümlerde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Katalizör boyunca hızın 5 m/s’lere kadar düşmesi gözenekli ortam yapısından kaynaklanmaktadır. Gözenekli ortam modeli filtre yapısına sahip olup, akış bu bölgede laminar karakteristik göstermektedir.



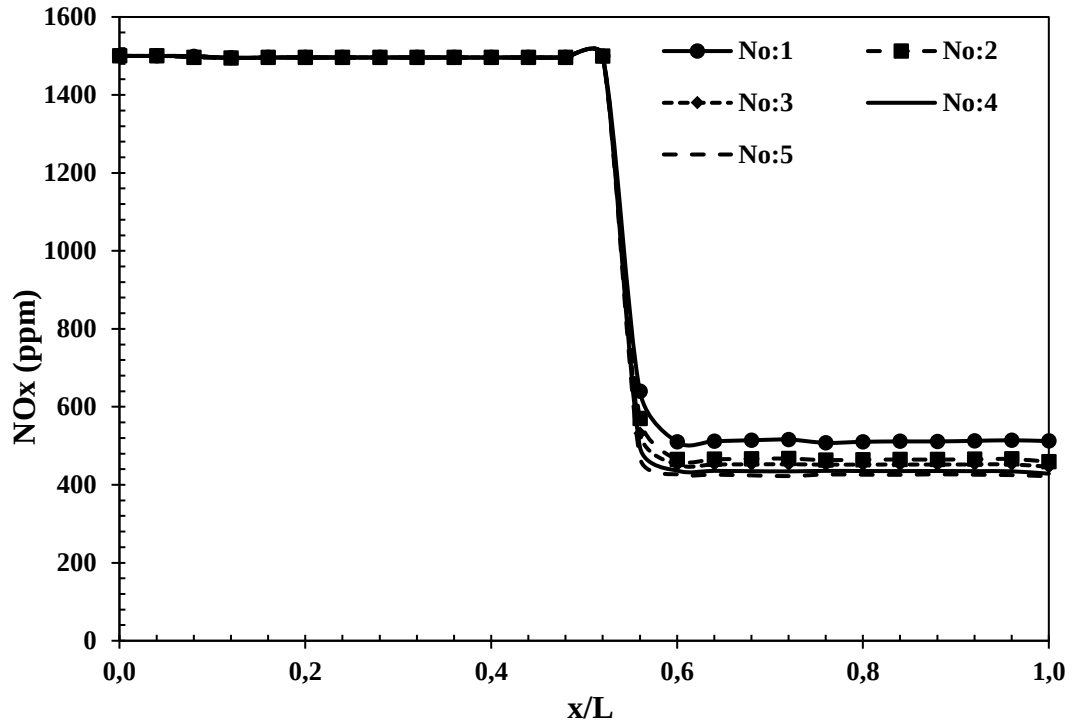
Şekil 4.16 SCR sistem boyunca hız dağılımı

Dizel motorlarda yanma performansını etkileyen parametrelerden biri de karşı basıncın oluşmasıdır. Karşı basınç, egzoz sistemlerinde istenmeyen bir durumdur. Farklı SCR boru çapları için, basınç düşümü oranının sistem boyunca değişimi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sistem boyunca basınç düşüm oranının en fazla 540 mm çap değerinde olduğu belirlenmiş ve artan çap değerlerine karşılık basınç düşüm oranının azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 540 ile 620 mm boru çapları için basınç düşüm değerinin yaklaşık 2500 Pa, 780 ile 860 mm arasında bu değer 600 Pa olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla optimal sistem çapı 780 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca maksimum basınç düşümünün hız dağılımında olduğu gibi SCR katalizörü bölgesi boyunca olduğu da belirlenen sonuçlardandır. Şekil 4.17, SCR sistem boyunca oluşan basınç düşümünü göstermektedir.



Şekil 4.17 Farklı sistem çapları için basınç düşümü

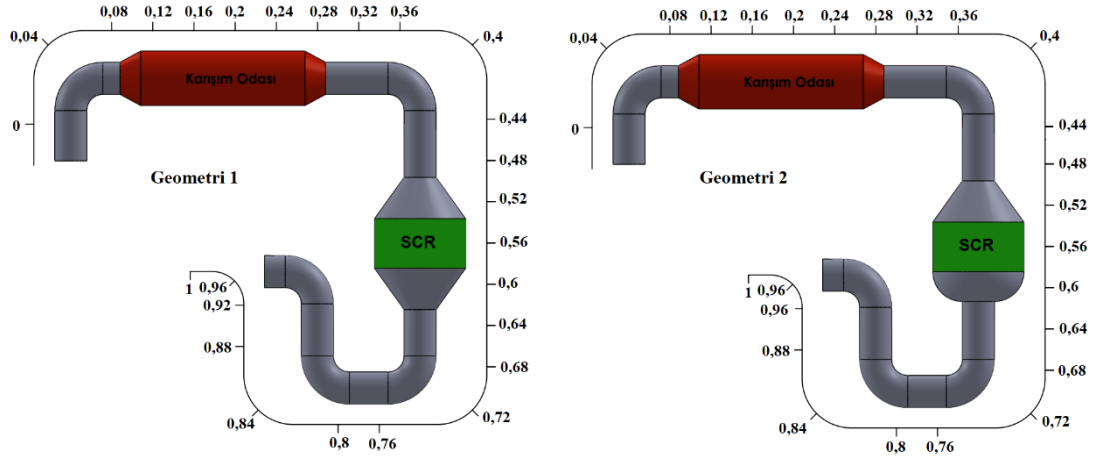
Sistem NO_x emisyonları indirgeme performansları, farklı boru çapları için Şekil 4.18’de verilmiştir. Artan boru çapı ile SCR NO_x emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir. NO_x emisyonları SCR sistem egzoz hızına bağlı olarak değişmektedir. Akış hızının düşük olması, sistem boyunca reaksiyonların gerçekleşmesi için uygun ortamın hazırlanmasını sağlamaktadır. SCR sistemi çıkışında ölçülen NO_x emisyonlarının, 540 mm boru çapı için en yüksek değerinde olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, 780 mm ve 860 mm boru çapları için NO_x emisyon değerleri arasındaki farkın azaldığını göstermektedir. SCR sistemi boyunca NO_x emisyonlarının sistem girişinden katalizör bölgesi girişine kadar değişmediği, katalizörün bulunduğu bölgede NH₃ bileşenleri ile reaksiyona girerek indirgendiği elde edilen sonuçlarda açıkça görülmektedir.



Şekil 4.18 SCR sistemi boyunca NO_x değişimi

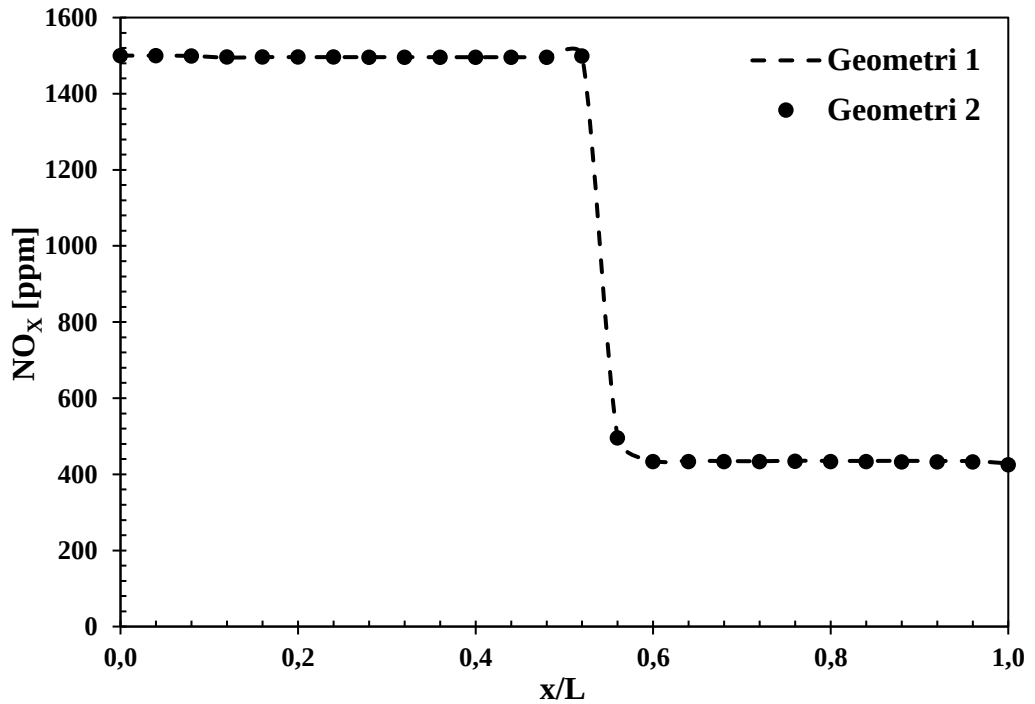
4.6.3 Katalizör Çıkış Formunun NO_x Emisyonlarına ve Basınç Düşümüne Etkisi

Dizel motorlardaki SCR sistemlerinde kullanılan katalizörler, farklı geometrik özelliklere sahip olabilir. SCR çıkış formunun SCR sistem performansına etkisini incelemek amacıyla, Şekil 4.19’da belirtilen iki farklı SCR sistem geometrisi karşılaştırılmıştır. Seçilen SCR çıkış geometrileri, SCR sistemlerinde sıklıkla kullanılan iki formdur. Her iki SCR çıkış geometrisi içinde de sistem parametreleri sabit alınmıştır. Sayısal çalışmalar, YB-SCR sisteminde %85 yük ve 90 l/h UWS püskürtme miktarı için yapılmıştır. Her iki sistem için de SCR boyları eşit olup, Geometri 1 için SCR çıkışı 1000 mm boyunda konik, Geometri 2 ise 680 mm boyunda yarıküre şeklinde modellenmiştir.



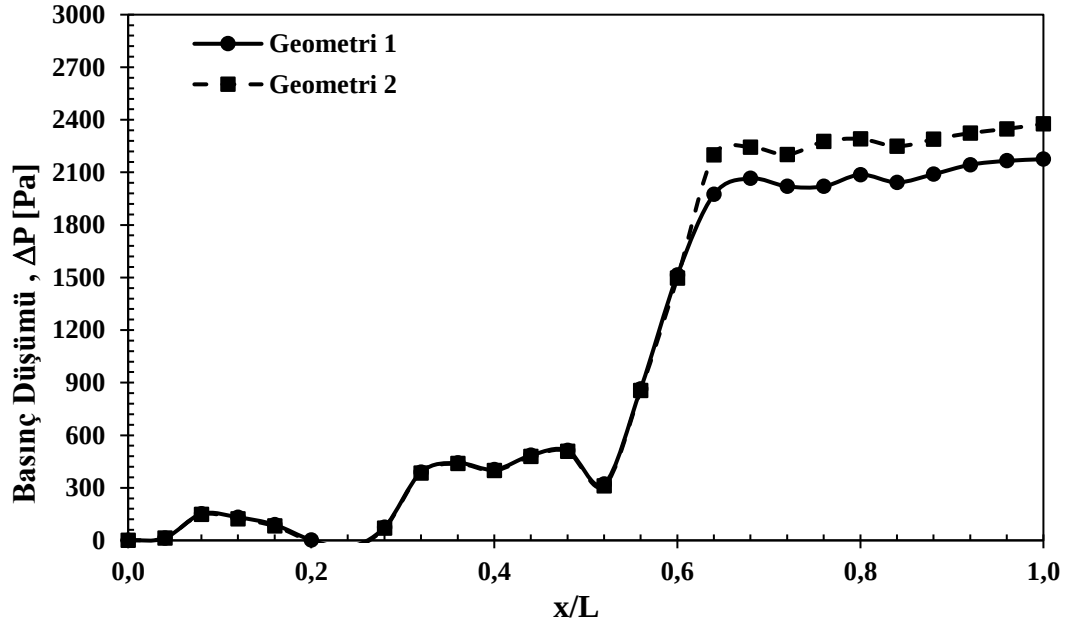
Şekil 4.19 Farklı tip SCR tasarım geometrileri

Şekil 4.20 iki farklı geometri için SCR sistemi boyunca NO_x emisyon değişim miktarını göstermektedir. Her iki durum için de NO_x emisyon miktarları benzerlik göstermektedir. Bu durum reaksiyonların SCR bölgesinde tamamlandığını göstermektedir.



Şekil 4.20 Farklı tasarım geometrilerinin NO_x emisyonlarına etkisi

Şekil 4.21, iki farklı katalizör çıkış geometrisi için basınç düşüm miktarını göstermektedir. NO_x emisyonları her iki geometri için aynı olmasına rağmen, basınç düşüm miktarları arasında farklılıklar vardır. SCR çıkış geometrisinin küresel olduğu Geometri 2 için basınç düşüm oranı Geometri 1'e göre daha fazladır. Dolayısıyla konik katalizör çıkış geometrisi iki sistem arasında en uygun geometriyi ifade etmektedir.

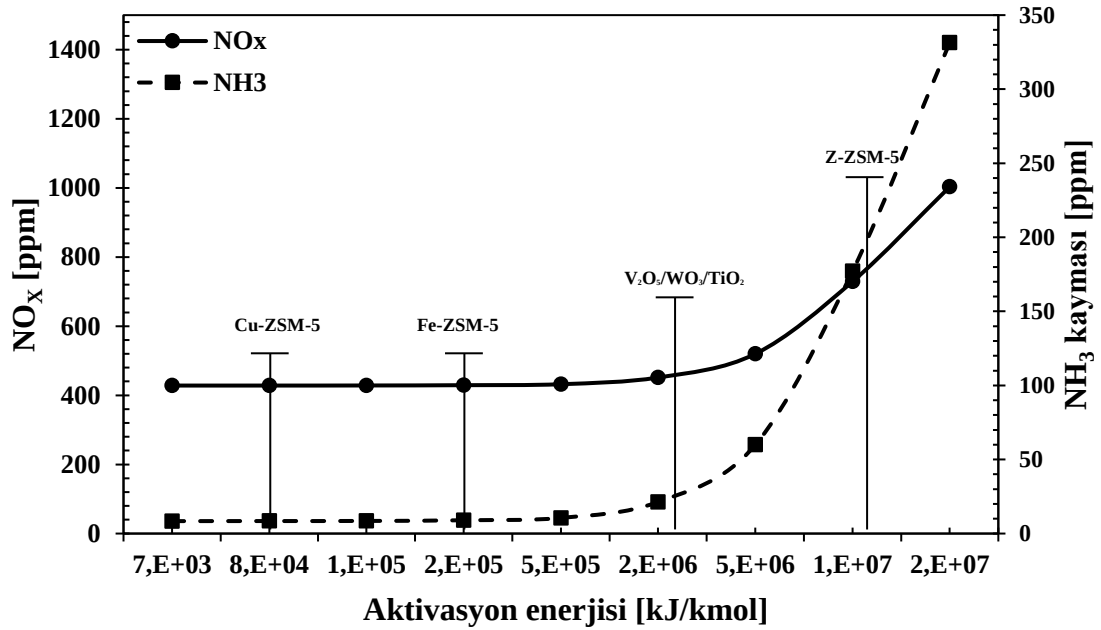


Şekil 4.21 Farklı tasarım geometrilerinin basınç düşümüne etkisi

4.6.4 Katalizör Aktivasyon Enerjisinin NO_x Azaltma Performansına Etkisinin İncelenmesi

SCR sistemlerinde kullanılan katalizörler, NO_x ve NH₃ bileşenlerinin reaksiyona girerek serbest azot (N₂) ve su (H₂O) oluşumunu sağlamaktadır. Ancak NO_x ile NH₃ bileşenlerinin sistemde herhangi bir katalizör kullanmadan reaksiyona girmesi için, gerekli ortam sıcaklığının yaklaşık 875 °C ile 1050 °C arasında olması gerekmektedir. Bu sıcaklık koşullarında SNCR olarak adlandırılan sistemler sadece fırın, kazan gibi büyük endüstriyel tesislerde kullanılmaktadır (Hao, Yu, Lu, Zhang ve Zhu, 2015). Bu sıcaklıklar altında bulunan ortamlarda, NO_x ile NH₃ arasındaki reaksiyonların etkinlikleri azalmaktadır (Hao ve diğerleri, 2015). Şekil 4.22'de YB-SCR tasarımı yapılan iki zamanlı bir dizel motor yüksek basınç koşullarında çalışan sistem katalizörünün, farklı aktivasyon enerjileri için NO_x ve NH₃ kayma miktarları

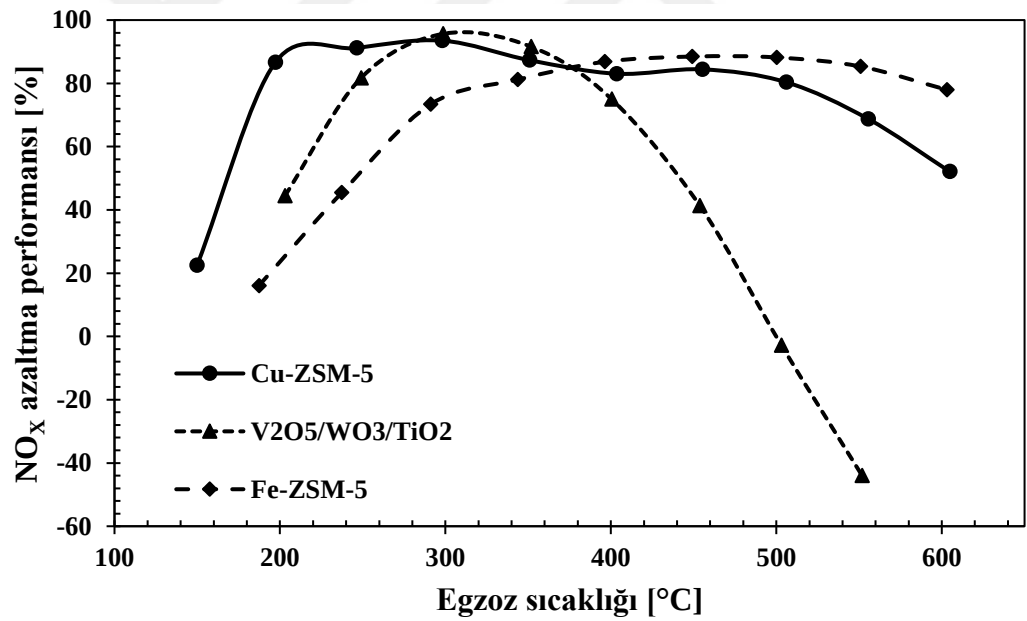
verilmiştir. Elde edilen bulgular, $5 \cdot 10^{-6}$ J/kmol ve daha düşük aktivasyon enerjisine sahip katalizörlerin, SCR sistemi çıkışında ölçülen NO_x emisyon miktarını yaklaşık %80-90 seviyelerine kadar azalttığını göstermektedir. Daha yüksek aktivasyon enerjisi değerlerinde ise, SCR sistem çıkışında NO_x emisyonları ve NH_3 kayma değerlerinin istenilen seviyelere ulaşmadığını göstermektedir. Yüksek aktivasyon enerjilerinde, NH_3 ve NO_x bileşenlerinin reaksiyona girme eğilimleri azalmaktadır. Egzoz gazı sıcaklığı etkisi ile ayrıştırılan UWS sonucunda oluşan NH_3 bileşenlerinin katalizörde NO_x ile stokiyometrik olarak reaksiyona girmemesi sonucu SCR çıkışında NH_3 kayması meydana gelmektedir. Dolayısıyla artan aktivasyon enerjisi hem NO_x emisyonlarının yeteri oranda düşürülmemesini hem de NH_3 kayma oranının artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.22 Farklı aktivasyon enerjileri için NO_x ve NH_3 kayması değişimi

Literatürde kullanılan katalizör tipleri incelendiğinde, SCR sistemlerinde en çok tercih edilen katalizör tipleri Cu-zeolite, Fe-zeolite, H-zeolite ve $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ gibi katalizörlerdir. Şekil 4.22 üzerinde, farklı aktivasyon enerjisi değerleri ile SCR sistem çıkışı NO_x ve NH_3 kayma değerleri verilmiştir. Literatürden alınan indirgeme oranları ve aktivasyon enerjilerine göre grafik üzerinde çeşitli katalizörlerin konumları verilmiştir. Verilen konumlar için H-ZSM-5 katalizörü indirgeme verileri Jabłońska ve ark. (Jabłońska vd., 2021) tarafından yapılan çalışmadan, Fe-ZSM-5 ve Cu-ZSM-5

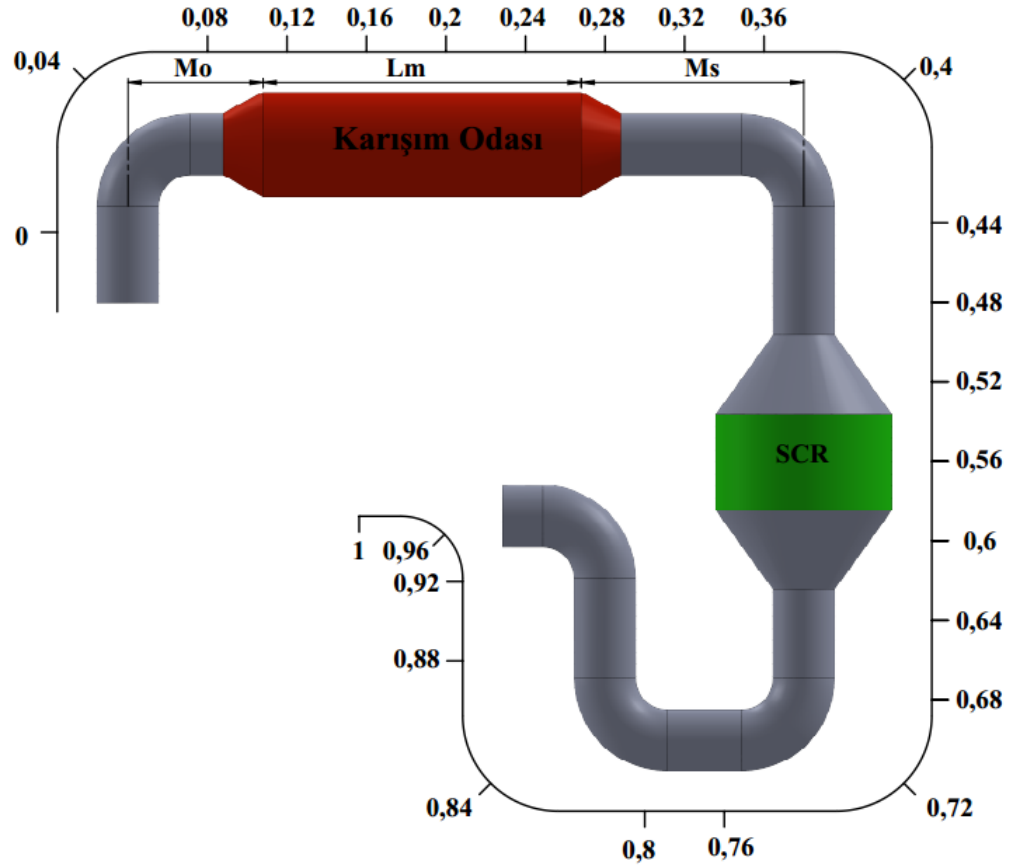
katalizörlerinin karşılaştırması Sultana ve ark. (Sultana, Sasaki, Suzuki ve Hamada, 2013) tarafından yapılan çalışmadan, Fe-ZSM-5 katalizörü için aktivasyon enerjisi Bulushev ve ark. (Bulushev, Kiwi-minsker ve Renken, 2002) tarafından yapılan çalışmadan ve son olarak $V_2O_5/WO_3/TiO_2$ verileri ise Kamasamudram ve ark. (Kamasamudram, Currier, Chen ve Yezerets, 2010) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan Cu-ZSM-5 katalizörünün sıcaklığa bağlı olarak NO_x indirgeme performansı Şekil 4.23'te verilmiştir. Elde edilen veriler Cu-ZSM-5 katalizörünün geniş sıcaklık aralıklarında diğer katalizörlere oranla NO_x azaltma performansının daha iyi olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla 300 °C – 400 °C egzoz gazı sıcaklığına sahip gemi dizel motorlarındaki SCR sistemleri için, en uygun katalizörün Cu-ZSM-5 tipi katalizör olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında farklı metal karışımları ile farklı aktivasyon enerjilerine sahip daha uygun katalizörler, SCR sistemleri için geliştirilebilir ve NO_x emisyonlarının azaltılmasında kullanılabilir.



Şekil 4.23 Farklı katalizörler için NO_x dönüşüm verimliliği

4.6.5 Karışım Odası Konumu ve Boyunun Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi

SCR sistemlerinde püskürtülen UWS'nin egzoz gazı sıcaklığı ile önce buharlaşması ardından termoliz ve hidroliz reaksiyonları ile ayrışması önemlidir. UWS'nin ayrışması sonucu oluşan NH_3 bileşenlerinin, egzoz gazı içerisindeki NO_x bileşenleri ile homojen karışımı sistem performansı açısından önemli bir parametredir. Püskürtülen UWS, ilk olarak izosiyanik aside (HNCO) sonrasında da tamamen ara ürünlerin amonyağa dönüşmesi karışım odasında gerçekleşmektedir. Farklı uzunlukta karışım odası boy ve konumunun termoliz ve hidroliz reaksiyonlarına etkisini incelemek için, beş farklı parametrik çalışma yapılmıştır. Şekil 4.24, karışım odası uzunluk ölçülerini ifade etmektedir.



Şekil 4.24 Karışım odası boyutları

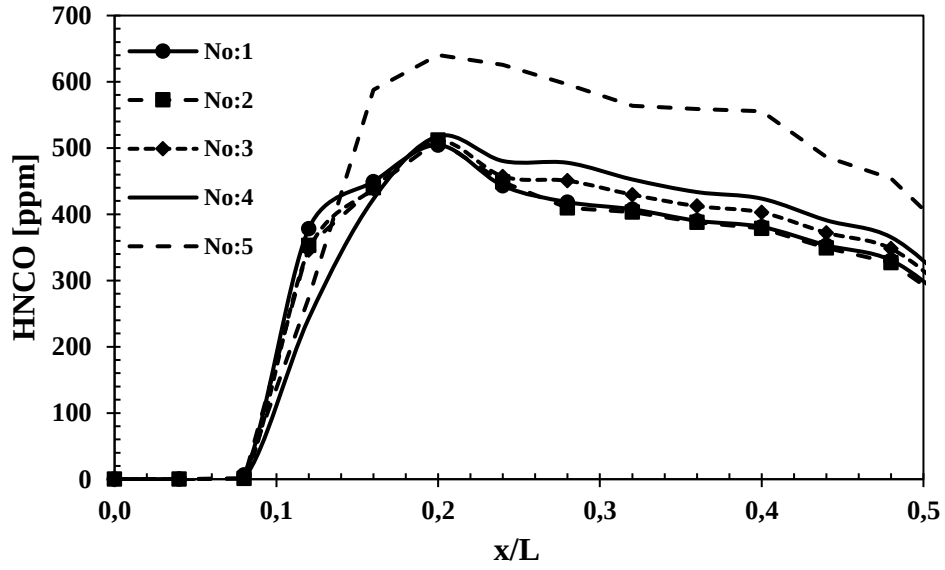
Burada, M_O karışım odası başlangıç noktasının egzoz gazı giriş eksenine uzaklığını, L_m karışım odası uzunluğunu ve M_S ise karışım odası bitiş noktasının dirsek eksenine mesafesini ifade etmektedir. Tüm parametrik hesaplamalarda $M_O+L_m+M_S$ toplamı sabit olarak alınmıştır.

Beş farklı koşul için karışım odası boyu ve konumu için boyutlar Tablo 4.7’de gösterilmiştir. Birinci ve ikinci parametrik boyutlarda karışım odası uzunluğu sabit alınmış olup, sadece konumu değiştirilmiştir. İkinci ve üçüncü parametrik boyutlarda ise, karışım odası aynı konumda olup sadece boyu değiştirilmiştir. Son olarak beşinci koşul ise, sistemde karışım odası olmadığı durumu ifade etmektedir.

Tablo 4.7 Karışım odası tasarım parametreleri

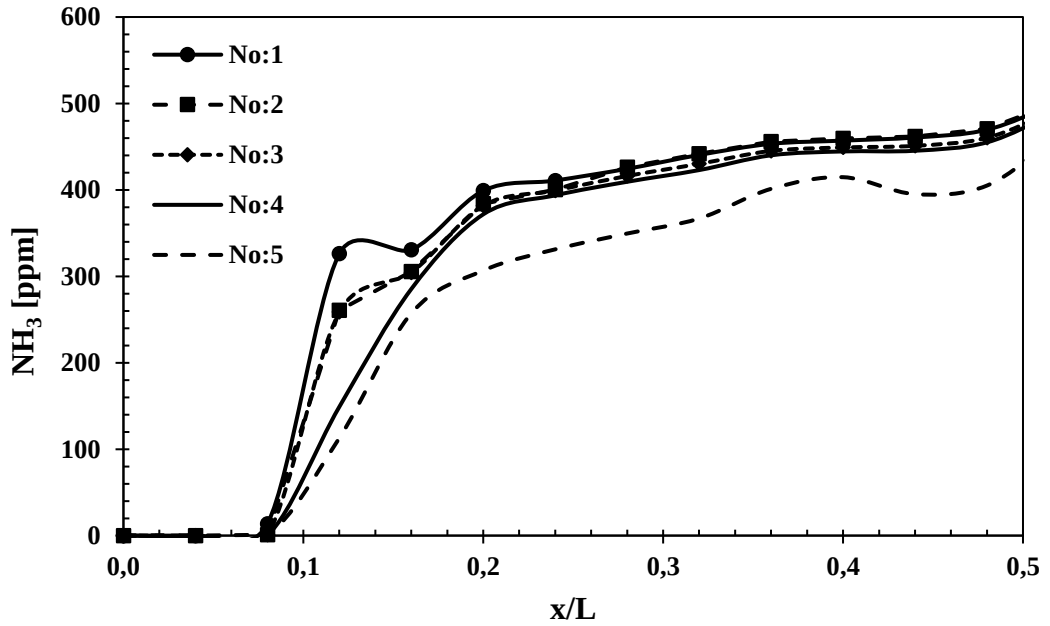
No	Birim	M_O	L_m	M_S
1	mm	1200	4000	2300
2	mm	1500	4000	2000
3	mm	1500	3400	2600
4	mm	1800	2800	2900
5	-	Karışım odası yok		

Karışım odası geometrik uzunlukları ile gerçekleştirilen parametrik çalışmalar, YB-SCR sistemi için %85 yük koşulunda 90 l/h püskürtme miktarında yapılmıştır. Farklı parametrik boyutlarda yapılan analizler sonucunda, $HNCO$ ve NH_3 bileşenlerinin değişimleri araştırılmıştır. Şekil 4.25, SCR sistem girişinden SCR katalizör bölgesi girişine kadar olan uzunluk için termoliz reaksiyonu sonucu oluşan $HNCO$ bileşenlerinin değişimini göstermektedir. En yüksek $HNCO$ oluşumunun, karışım odası olmayan geometri için olduğu gözlemlenmiştir. Karışım odası uzunluğunun azalması ile $HNCO$ miktarının sistem boyunca arttığı görülmektedir. $HNCO$ miktarının en az olduğu koşul ise, karışım odası boyunun 4000 mm olduğu tasarım şartları için geçerlidir. SCR sistemlerinde termoliz reaksiyonları sonucu oluşan $HNCO$ kimyasalları daha sonra NH_3 bileşenlerine dönüşmektedir. Dolayısıyla $HNCO$ bileşenlerinin katalizör girişinde azalıp, NH_3 ’e dönüşmesi gerekmektedir.



Şekil 4.25 Farklı karışım odası boyu ve konumunun H₂CO bileşenlerine etkisi

Aynı şekilde NH₃ dönüşüm verimliliği de sistem performansı açısından önemlidir. Şekil 4.26, SCR sistemi için SCR katalizör bölgesine kadar olan kısım için NH₃ değerlerini göstermektedir. Katalizör girişinde NH₃ oluşumu ne kadar yüksek ise NO_x azaltma performansı da o kadar yüksektir. Dolayısıyla daha küçük karışım odası uzunlukları için, NH₃ dönüşüm oranı diğer boyutlara oranla daha düşüktür. Karışım odası boyunun büyük olması, NH₃ bileşenlerinin miktarını da arttırmaktadır.



Şekil 4.26 Farklı karışım odası boyu ve konumunun NH₃ bileşenlerine etkisi

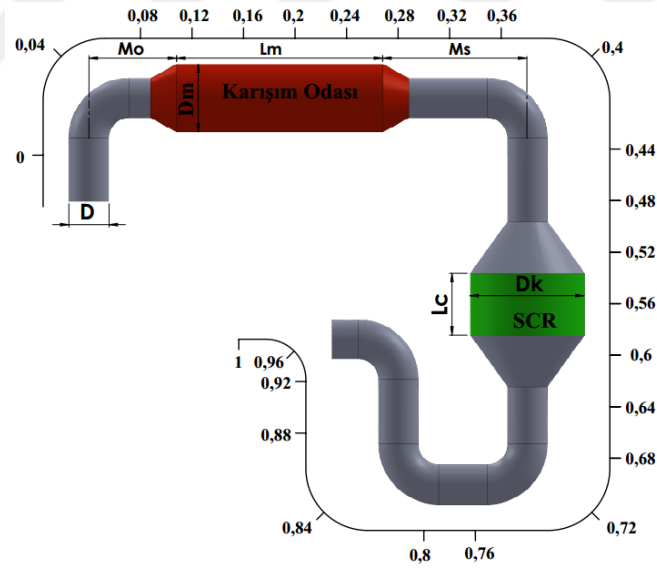
4.7 Sonuç

Bu bölümde sistem tasarım unsurlarının, SCR performansına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Yüksek basınç koşullarında çalışan SCR sistemi egzoz özelliklerinin belirlenmesi için, turboşarjer türbin ve kompresör giriş-çıkış termodinamik özellikleri ile ilgili hesaplamalar yapılmıştır. Sonrasında SCR boyunun, NO_x indirgeme performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. En uygun SCR boyunun 1200 mm olduğu belirlenmiştir. 1200 mm'den daha düşük SCR boylarında NO_x emisyon azaltımı azalırken, NH₃ kayma miktarı artmaktadır. SCR boru çapının ve buna bağlı akış hızının SCR sisteminde değişmesi, sistem performansını etkileyen diğer parametrelerdendir. Boru çapı arttıkça, NO_x azaltma oranı artmış, basınç düşümü azalmıştır. En uygun SCR sistem çapı 780 mm olarak belirlenmiştir. İncelenen parametrik çalışmalardan bir diğeri de SCR çıkış formunun etkisidir. İki farklı geometriye sahip SCR çıkış formu için, NO_x azaltma oranları benzerlik gösterirken, küresel çıkış formunda konik çıkış formuna göre daha yüksek basınç düşümü meydana gelmiştir. SCR sistemlerinde kullanılan katalizörlerin temel görevi, NO_x ve NH₃ bileşenlerinin oluşmasını sağlayan reaksiyonların aktivasyon enerjisini düşürüp egzoz gazındaki NO_x emisyon oranlarını azaltmaktır. Farklı katalizör aktivasyon enerjisi koşulları için gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda, $5 \cdot 10^{-6}$ J/kmol ve daha düşük aktivasyon enerjisine sahip katalizör yapılarının, yüksek basınç koşullarında çalışan SCR sistemleri için uygun model oldukları belirlenmiştir. Son olarak, farklı karışım odası boyu ve konumunun, sistem UWS ayrışması üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan parametrik çalışmalarda beş farklı konum ve uzunluk değeri alınmış, termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan HNCO ve NH₃ gibi iki önemli türün sistem boyunca değişimi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, HNCO bileşenlerinin SCR girişinde NH₃ bileşenlerine dönüşmesini sağlayan en uygun karışım odası uzunluğunu ve konumunu ifade eden, M_O, L_O ve M_S ölçüleri sırasıyla 1800 mm, 2800 mm ve 2900 mm olarak belirlenmiştir.

BÖLÜM 5

AB-SCR ve YB-SCR SİSTEMLERİ İÇİN NO_x AZALTMA PERFORMANS PARAMETRELERİ

Bir önceki bölümde elde edilen en uygun SCR sistem tasarımı için, SCR sistemi NO_x azaltma performansını etkileyen parametreler bu bölümde araştırılmıştır. Performans parametreleri, iki zamanlı gemi dizel motoru yüksek basınç, alçak basınç ve dört zamanlı gemi dizel motor SCR sistemleri için yapılmıştır. SCR sistemlerinde kullanılan sınır koşullarından sıcaklık, bir önceki bölümde ifade edilen termodinamik hesaplamalardan elde edilmiş olup, egzoz debisi ise motor üreticisinden alınmıştır. Türbülans model, reaksiyon kinetiği gibi model sınır koşullarının ise literatürden alınan deneysel çalışmalar ile doğrulanması yapılmış olup, parametrik çalışmalarda kullanılmıştır. Şekil 5.1, bir önceki bölümde optimize edilmiş en uygun SCR sistem boyutlarını ifade etmektedir. Tablo 5.1 ise, parametrik çalışmalar sonucu elde edilmiş en uygun sistem boyutlarını ifade etmektedir.



Şekil 5.1 En uygun SCR sistem boyutları

Tablo 5.1 Optimal SCR boyutları

Boyut [mm]	M _O	L _M	M _S	D	D _m	D _k	L _C
	1200	4000	2300	780	1320	2220	1200

Bilindiği üzere iki zamanlı gemi dizel motorlarında kullanılan YB-SCR sistemleri egzoz çıkışı ile turboşarjer türbini arasına yerleştirilmektedir. Dolayısıyla bu sistemlerde kurulum alanı dar olduğundan sistem tasarım alanları kısıtlıdır. AB-SCR sistemi ise türbinden sonra yerleştirilmekte olup çıkışı atmosfere açılmaktadır. SCR sistemlerinin gemi dizel makinelerinde kullanılmasının, motor performansı üzerinde bir takım olumsuz etkileri de söz konusudur. Bu etkilerden en önemlisi egzoz sisteminde bu sistemlerin oluşturduğu karşı basıncıdır. Egzoz hattında oluşan bu karşı basıncı en aza indirmek amacıyla sistem üzerinde çeşitli geometrik parametreler değiştirilmekte veya baypas devreleri kullanılmaktadır. AB-SCR ve YB-SCR ve dört zamanlı dizel motor SCR sistemleri çalışma performans parametrelerinin belirlenmesi amacıyla bu bölümde çeşitli parametrik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan parametrik çalışmalar, YB-SCR sistemi, AB-SCR sistemi ve dört zamanlı dizel motor SCR sistemi için %100, %85, %75, %50 ve %25 motor yüklerinde en uygun UWS miktarının belirlenmesi ile sistem üzerinde bulunan RBV açıklık oranının sistem performansına ve basınç düşümüne etkisinin incelenmesini amaçlamaktadır.

Parametrik çalışmalardan elde edilen sonuçlar, IMO Tier III düzenlemesine göre gr/kWh cinsinden ifade edilmiştir. Kütlesel oran cinsinden elde edilen NO_x değerlerinin gr/kWh cinsinden değeri, Denklem 5.1’de verilen ifade ile belirlenmiştir. (Ağbulut, Sarıdemir ve Albayrak, 2019; Pilusa, Mollagee ve Muzenda, 2012).

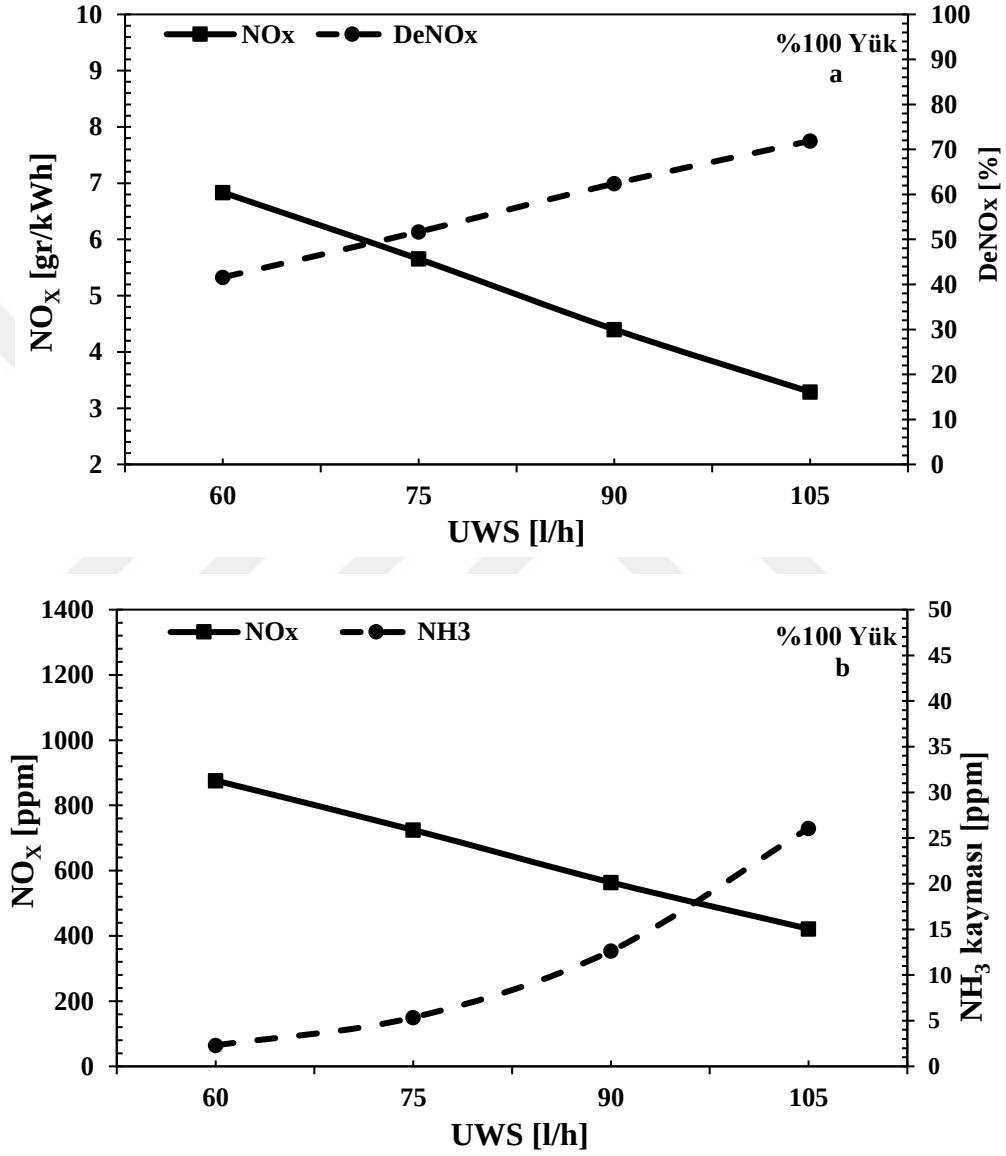
$$NO_{X [gr/kWh]} = NO_{X [k\ddot{u}tle \text{ oranı}]} \cdot \frac{\dot{m}_{egzoz}}{P_{motor}} \quad (5.1)$$

Verilen ifadede $\dot{m}_{egzoz}$ verilen güçteki egzoz akış oranını, P_{motor} verilen yük durumu için dizel motor gücünü, $NO_{X [k\ddot{u}tle \text{ oranı}]}$ ise sayısal analizler sonucu egzoz gazında bulunan NO_x bileşenlerinin kütlesel oranını ifade etmektedir.

5.1 UWS Püskürtme Miktarının Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi

Farklı yük koşullarında AB-SCR sisteminde UWS püskürtme miktarının, NO_x emisyonlarına ve NH_3 kaymasına etkisi bu bölümde incelenmiştir. UWS püskürtme miktarları, IMO Tier III standartları dikkate alınarak belirlenmiştir. Yapılan

parametrik çalışmalarda, 45, 60, 75, 90 ve 105 l/h oranlarında UWS püskürtülmüştür. Şekil 5.2a ve 5.2b’de farklı UWS püskürtme miktarına karşılık NO_x ve NH_3 bileşenlerinin değişimi verilmiştir. Artan UWS miktarı ile NO_x emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir.

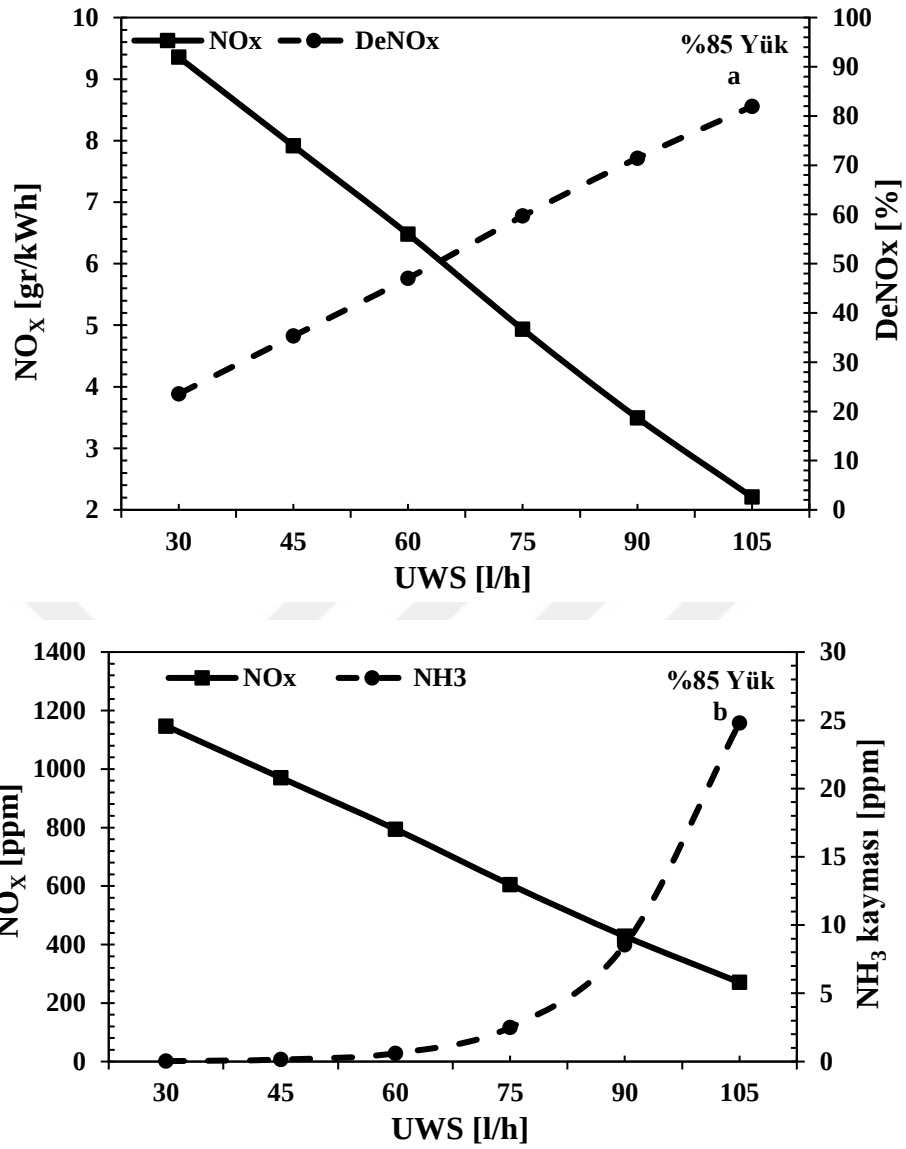


Şekil 5.2 %100 yük koşulu için UWS ile NO_x ve NH_3 bileşenlerinin değişimi

UWS püskürtme miktarı ile NO_x , NH_3 kayması ve DeNO_x değerleri belirlenmiştir. %100 yük koşulu için başlangıç egzoz gazı NO_x miktarı 11,7 gr/kWh iken, IMO Tier III düzenlemesi olan 3,4 gr/kWh değerinin, yaklaşık 103,5 l/h UWS püskürtme miktarı ile sağlandığı belirlenmiştir. 105 l/h püskürtme miktarı ile SCR NO_x indirgeme

performansının (DeNO_x) %73 seviyelerinde olduğu da elde edilen bulgulardandır. SCR sistemlerinde UWS'nin fazla olması ya da NO_x emisyonlarında yeterli indirgenmenin sağlanamaması durumlarında, egzozda NH₃ kayması görülmektedir. %100 yük koşulu için NH₃ kayma değerinin yaklaşık 25 ppm değerine kadar çıktığı belirlenmiştir. Bu değer artan UWS miktarı ile üstel bir şekilde artmaktadır.

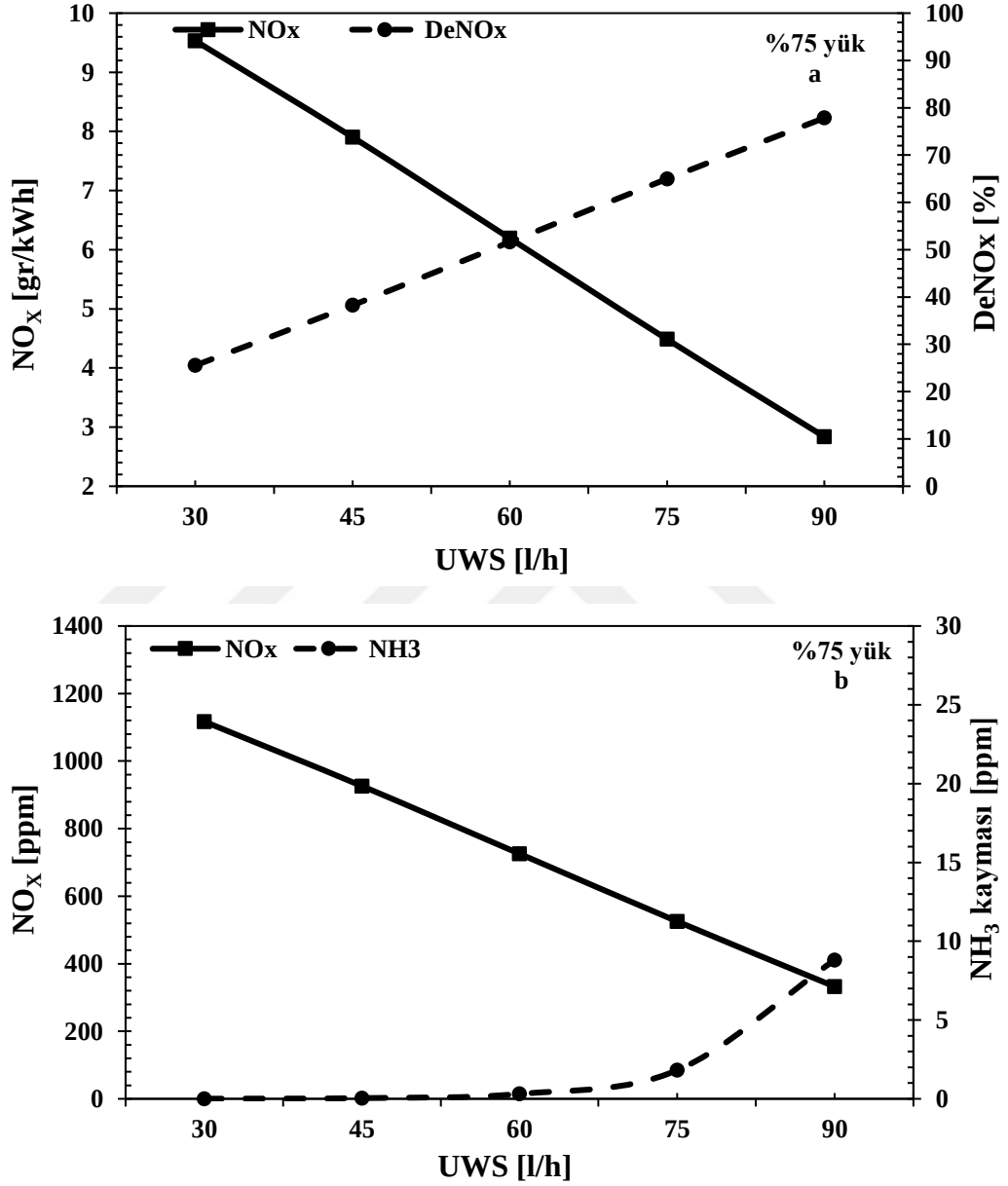
Şekil 5.3, Gemilerin seyirlerinin büyük bir kısmını gerçekleştirdiği %85 yük koşulu için, UWS püskürtme miktarının, NO_x emisyonlarına ve NH₃ kaymasına etkisini göstermektedir. Şekil 5.3a'ya göre %85 yük koşulunda başlangıçta 12,24 gr/kWh olan NO_x emisyonlarının, 105 l/h UWS püskürtülmesi ile yaklaşık 2,2 g/kWh seviyelerine kadar azaltıldığı görülmektedir. Belirlenen sınır koşulları altında, IMO Tier III düzenlemesini sağlayan püskürtme miktarı yaklaşık 91 l/h olarak belirlenmiştir. YB-SCR sisteminin NO_x emisyon azaltma performansının ise, 105 l/h UWS püskürtme miktarı ile %85 seviyelerine kadar yükseldiği görülmektedir. Şekil 5.3b ise, başlangıçta 1500 ppm olarak alınan NO_x emisyonlarının, 200 ppm seviyelerine kadar düştüğünü göstermektedir. Belirtilen yük koşulu için, NH₃ kayması değerinin 75 l/h UWS püskürtme miktarından sonra üstel bir şekilde arttığı da gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3 %85 yük koşulu için UWS ile NO_x ve NH₃ bileşenlerinin değişimi

%75 yük koşulu için egzoz sistemine 30 l/h ile 90 l/h oranlarında UWS püskürtülmüştür. SCR sistem çıkışında oluşan NO_x emisyonları ve NH₃ kayma değerleri, Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Şekil 5.4a'da başlangıçta 12,8 gr/kWh olarak belirlenen NO_x emisyonlarının, 90 l/h UWS püskürtülmesi ile 3 gr/kWh değerinin altına düştüğü gözlemlenmiştir. 85 l/h UWS miktarının, IMO Tier III standartlarını sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca NO_x emisyonları azaltma performansının %80 seviyelerinde olduğu da gözlemlenmiştir. Şekil 5.4b ise, NO_x ve NH₃ kayma değerlerinin UWS ile değişimini göstermektedir. NO_x emisyonları 90 l/h püskürtme değeri ile 1500 ppm' den 400 ppm'e kadar azaltılmıştır. Ayrıca NH₃ kayma değerleri

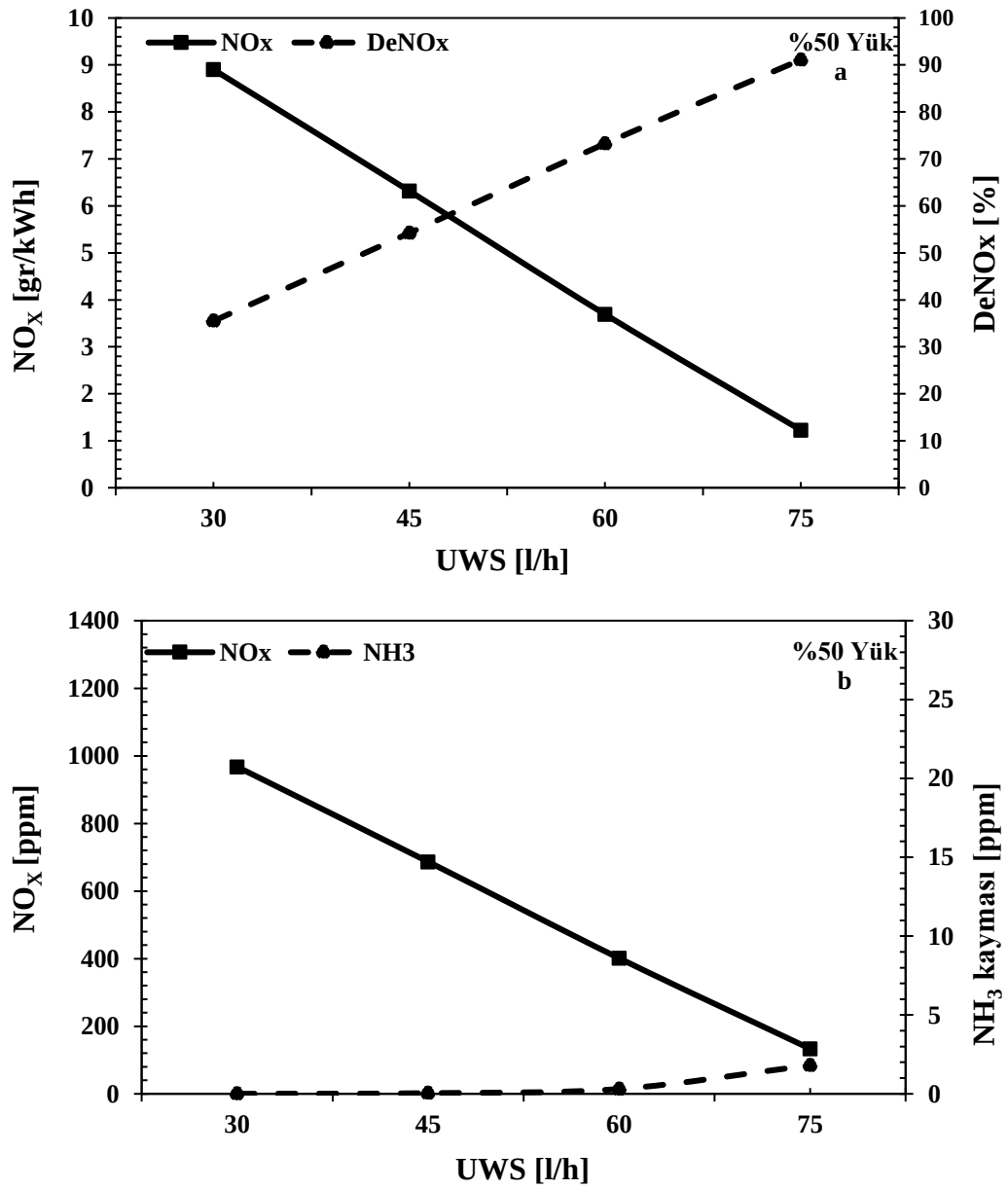
ise, 75 l/h UWS püskürtme değerinden sonra üstel bir şekilde artmaktadır. Elde edilen bulgular, Tier III düzenlemesini sağlayan UWS püskürtme miktarı için, NH_3 kayma değerinin 10 ppm'e kadar yükseldiğini göstermektedir.



Şekil 5.4 %75 yük koşulu için UWS ile NO_x ve NH_3 bileşenlerinin değişimi

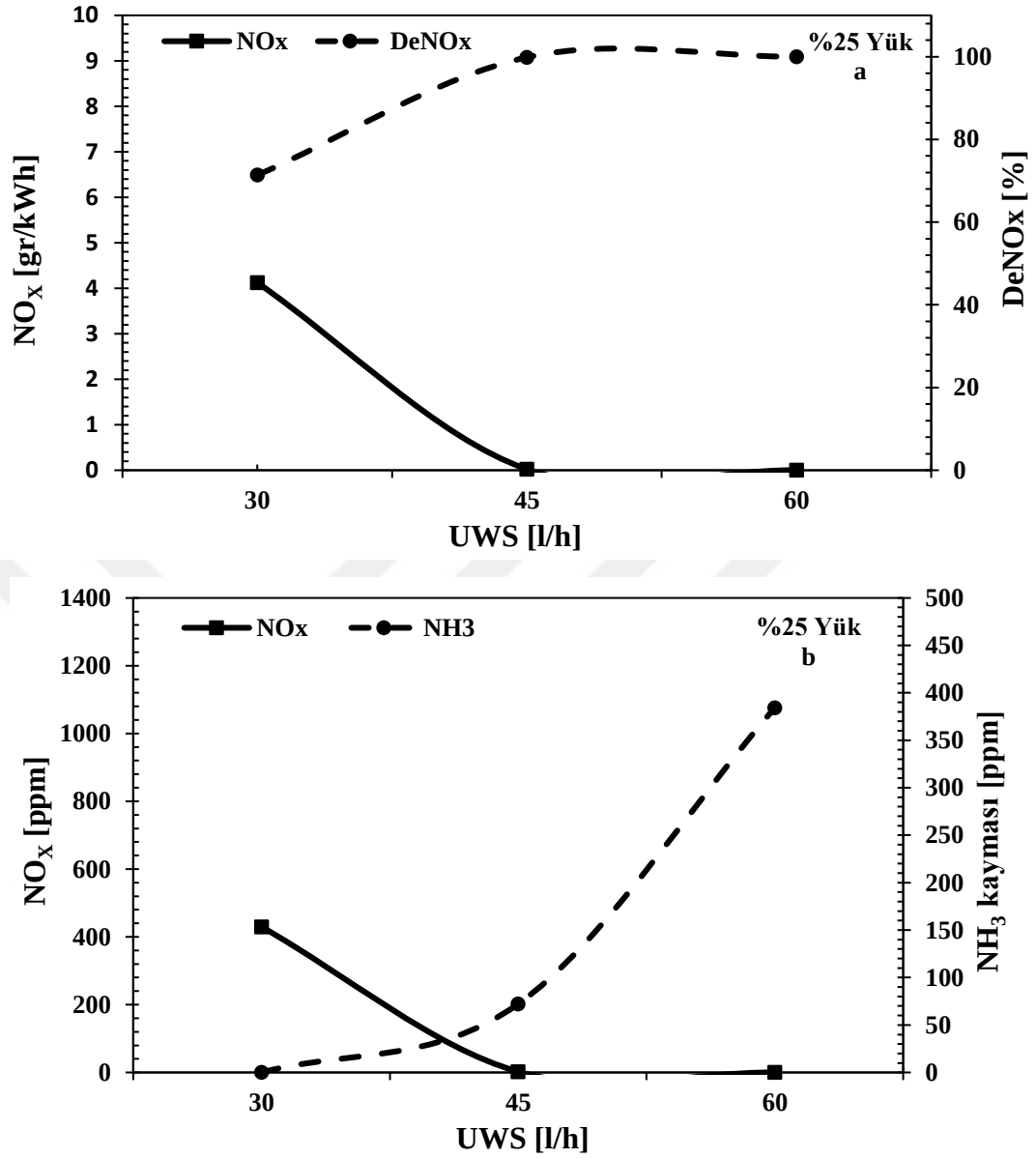
%50 yük koşulu için 30 l/h - 75 l/h aralığında UWS püskürtülmesinin, NO_x emisyonlarına ve NH_3 kaymasına etkisi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Şekil 5.5a, başlangıçta 13,8 gr/kWh olarak belirlenen NO_x emisyonlarının, 75 l/h UWS püskürtülmesi ile yaklaşık 1 gr/kWh seviyelerine kadar azaltıldığını göstermektedir.

75 l/h UWS püskürtme miktarında, NO_x emisyonlarının yaklaşık %90 oranında azaltıldığı da belirlenmiştir. IMO Tier III standardı olan 3,4 gr/kWh NO_x emisyon değerinin, yaklaşık 62 l/h UWS püskürtme miktarı ile sağlandığı da elde edilen bulgulardandır. Şekil 5.5b’de ise UWS oranı ile NO_x ve NH_3 bileşenlerinin değişimi gösterilmiştir. NO_x emisyonları, 75 l/h UWS püskürtme miktarı ile 1500 ppm değerinden 150 ppm değerine kadar azalmıştır. 30 l/h - 60 l/h UWS püskürtme aralığında NH_3 kayması görülmezken, bu değerden sonra NH_3 bileşenlerinin olduğu ve 75 l/h püskürtme ile yaklaşık 1.81 ppm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.5 %50 yük koşulu için UWS ile NO_x ve NH_3 bileşenlerinin değişimi

Son olarak, %25 yük koşulu için UWS püskürtme miktarı ile NO_x emisyonları ve NH₃ kayma değişimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Şekil 5.6a, 30 l/h - 60 l/h aralığında UWS püskürtülmesinin NO_x emisyonlarına ve emisyon azaltma performansına etkisini göstermektedir. Başlangıçta 14,4 gr/kWh NO_x emisyonu oluşurken, SCR sistemi ile bu değer 45 l/h püskürtme miktarından sonra tamamen yok olmuştur. SCR sistem NO_x emisyonları azaltma performansı, %25 yük koşulunda belirtilen UWS püskürtme miktarlarında %100 seviyelerine kadar yükselmiştir. Ayrıca IMO Tier III düzenlemesine göre, 3,4 gr/kWh olan NO_x emisyon değerinin sağlanması amacıyla bu yük koşulunda püskürtülmesi gereken UWS miktarı, yapılan sayısal analizler ile yaklaşık 38 l/h olarak belirlenmiştir. Şekil 5.6b'de ise NO_x ve NH₃ kayma değerlerinin farklı oranlarda püskürtülen UWS değerleri ile değişimi gösterilmiştir. Diğer yük koşullarında olduğu gibi %25 yük koşulunda da başlangıçta 1500 ppm NO_x emisyonu tanımlanmış ve bu değer 45 l/h UWS püskürtme miktarı ile tamamen yok olduğu gözlemlenmiştir. SCR çıkışında gözlemlenen NH₃ kayma değeri ise, 45 l/h UWS püskürtme miktarından sonra üstel bir şekilde artmıştır. NH₃ bileşenleri 60 l/h UWS püskürtme miktarında 400 ppm'e seviyelerine kadar çıkmıştır. Bu değer tüm yük koşulları dikkate alındığında egzoz sisteminde gözlemlenen en yüksek NH₃ kayma değeridir. Bu değer fazla olmasının nedeni, püskürtülen UWS miktarının egzoz hattındaki NO_x emisyonları yaklaşık sıfır seviyelerine kadar azaltması ve fazla UWS'nin NH₃'e dönüşüp egzozdan atılmasıdır.



Şekil 5.6 %25 yük koşulu için UWS ile NO_x ve NH₃ bileşenlerinin değişimi

Sayısal çalışmalarda, %100, %85, %75, %50 ve %25 yük koşulunda YB-SCR sistemi için, sistem giriş ve çıkışlardaki NO_x emisyonları ile püskürtülmesi gereken UWS miktarları belirlenmiş ve Tablo 5.2’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yukarıda verilen grafiklerden elde edilmiş olup en az IMO Tier III düzenlemesini sağlayan UWS püskürtme miktarlarını ifade etmektedir. gr/kWh cinsinden SCR giriş NO_x değerleri 1500 ppm referans alınarak, her bir yük durumu için motor gücüne bağlı olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.2 IMO Tier III standartlarına uygun UWS miktarı

Yük	SCR Giriş NO _x [gr/kWh]	UWS [l/h]	SCR Giriş NO _x [gr/kWh]
100	14,4	103,5	3,4
85	13,8	91	3,4
75	12,8	85	3,4
50	12,24	62	3,4
25	11,7	38	3,4

5.2 YB-SCR Sisteminde RBV Açıklığının Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi

İçten yanmalı motorlardan kaynaklı zararlı emisyonların azaltılması amacıyla çeşitli teknikler uygulanmaktadır. Ancak uygulanan tekniklerin pek çoğu motor performansının düşmesine neden olmaktadır (Z. Wang, Zhou, Feng ve Zhu, 2017). SCR sistemleri, motorda performans düşümü oluşturmada egzoz sisteminden sadece kimyasal teknikler ile NO_x emisyonlarının azaltılmasını sağlamaktadır. SCR sistemlerinde düşük sıcaklıklarda, NO_x ve NH₃ bileşenlerinin birbiri ile reaksiyona girmesini sağlayan temel yapı katalizördür. Katalizör gözenekli ortam modeli yapısına sahip olup, SCR sistemi boyunca basınç düşümünün en fazla görüldüğü bölümdür. Sistem boyunca basınç düşümünü en aza indirmek ve sistem performansını arttırmak amacıyla farklı valfler kullanılmaktadır. Kullanılan bu valflerden biri de YB-SCR sistemlerinde, SCR ünitesi ile motor egzoz çıkışı arasına yerleştirilen RBV'dir.

RBV'nin gemi dizel motorlarında kullanımının bir diğer avantajı ise, herhangi bir emisyon kısıtına karşı azaltılması gereken NO_x miktarını sağlamasıdır. IMO tarafından yürürlüğe giren Tier III düzenlemesi, günümüzde sadece emisyon kontrol alanlarında uygulanmaktadır. Emisyon kontrol alanları dışında geçerli emisyon kısıtları RBV açıklığı ile kontrol edilebilecektir. Gelecekte sülfür düzenlemesinde olduğu gibi NO_x emisyonlarına da emisyon kontrol alanları dışında farklı kısıtlamalar getirilmesi durumunda, RBV açıklığı ile hem istenilen NO_x emisyon değerlerinin hem de motor çıkışında oluşan karşı basıncının uygun seviyelerde kontrolü sağlanabilecektir.

Bu çalışmada, RBV açıklığının beş farklı motor yükü için NO_x emisyonlarına, basınç düşümüne ve NH₃ kaymasına etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Parametrik

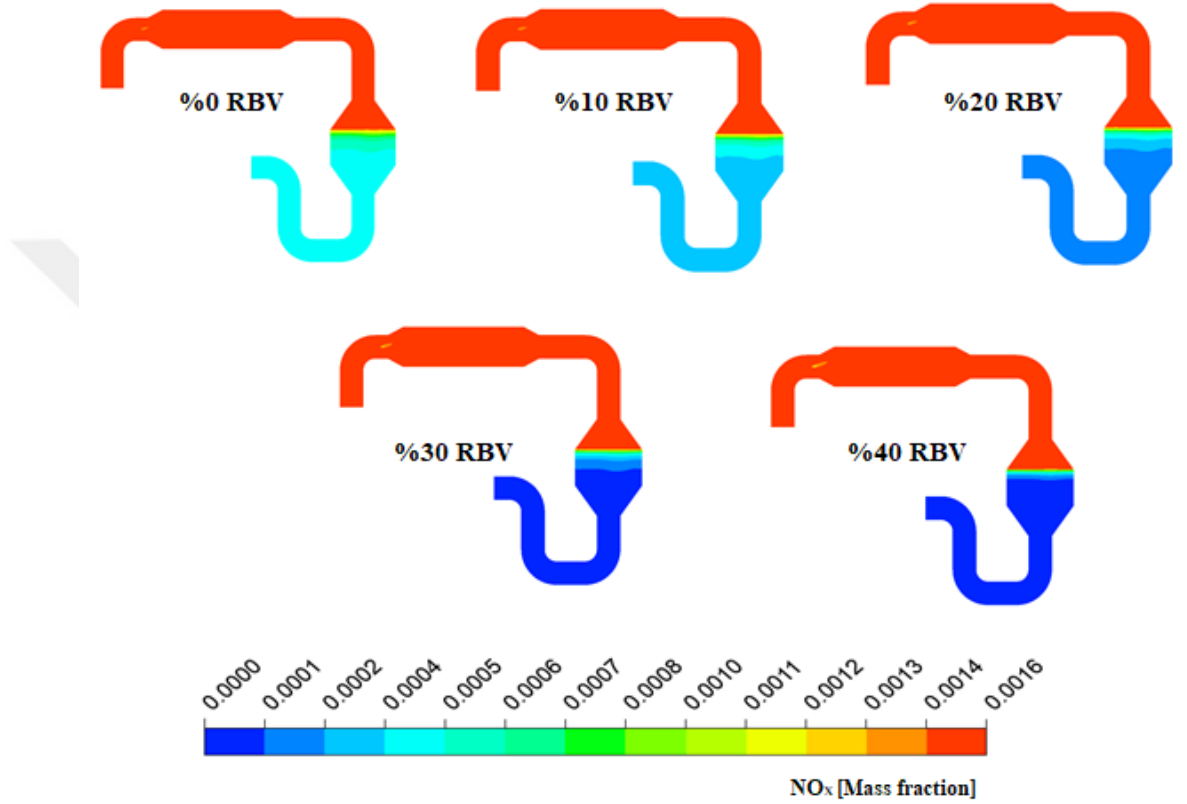
çalışmalar, her bir motor yükü için beş farklı RBV açıklık oranında yapılmıştır. Her bir RBV açıklık oranı için SCR sistemindeki egzoz gazı akış miktarı Tablo 5.3'te verilmiştir. Ayrıca her bir koşul için SCR sisteminde püskürtülmesi gereken UWS miktarı, bir önceki bölümde belirtilen Tier III standartlarını sağlayacak şekilde farklı oranlarda yapılan parametrik çalışmalar ile belirlenmiştir. RBV açıklık oranları ile SCR sisteminden geçen egzoz gazı miktarı, toplam egzoz oranının RBV açıklık oranı ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Şekil 4.2'de verilen YB-SCR sistemi için yapılan parametrik çalışmalarda, RSV valfinin tamamen açık olduğu kabul edilmiş ve RBV'nin belirli açıklık oranlarında sistem performansına olan etkisi araştırılmıştır.

Tablo 5.3 Farklı RBV açıklık oranları için sistem sınır koşulları

Motor yükü [%]	RBV [%]	$\dot{m}_{\text{egzoz}}$ [kg/s]	T_{egzoz} [K]	V_{UWS} [l/h]
100	0	11,7	716,9	105
	10	10,53		
	20	9,36		
	30	8,19		
	40	7,02		
85	0	10,4	660	90
	10	9,36		
	20	8,32		
	30	7,28		
	40	6,24		
75	0	9,6	632,6	90
	10	8,64		
	20	7,68		
	30	6,72		
	40	5,76		
50	0	6,9	593,4	60
	10	6,21		
	20	5,52		
	30	4,83		
	40	4,14		
25	0	3,6	574,2	30
	10	3,24		
	20	2,88		
	30	2,52		
	40	2,16		

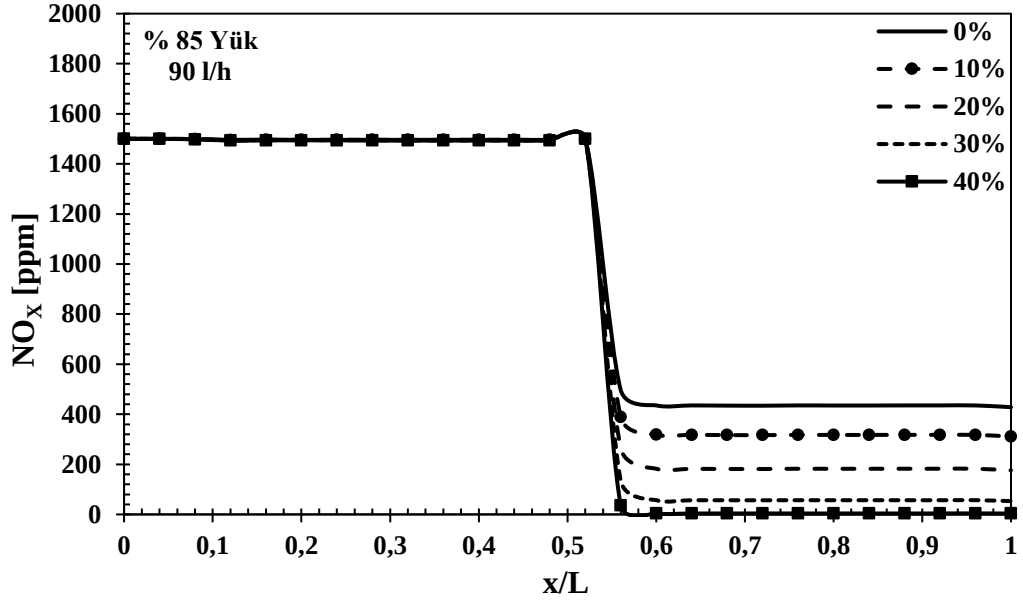
%85 yük koşulu için farklı oranlarda RBV açıklıklarına göre SCR sistemi boyunca NO_x emisyonlarının dağılımı Şekil 5.7'de gösterilmiştir. 90 l/h UWS püskürtülmesine karşılık, SCR sistemi çıkışında %40 RBV açıklık oranında, NO_x emisyonlarının neredeyse tamamının yok olduğu belirlenmiştir. NO_x emisyon miktarı RBV açıklığı azaldıkça sistem çıkışında azalmaktadır. Bu durum UWS bileşenlerinin buharlaşma,

termoliz ve hidroliz reaksiyonları ile parçalanması sonucu oluşan NH_3 bileşenlerinin aynı olmasına karşılık, NO_x emisyon miktarının egzoz debisinde bağlı olarak azalmasından kaynaklanmaktadır. Kısaca, RBV açıklık oranının azalması ile aynı miktar NH_3 bileşenine karşılık NO_x emisyon miktarı azalmaktadır. Bu durum SCR çıkışında oluşan NO_x emisyon miktarını da etkilemektedir.



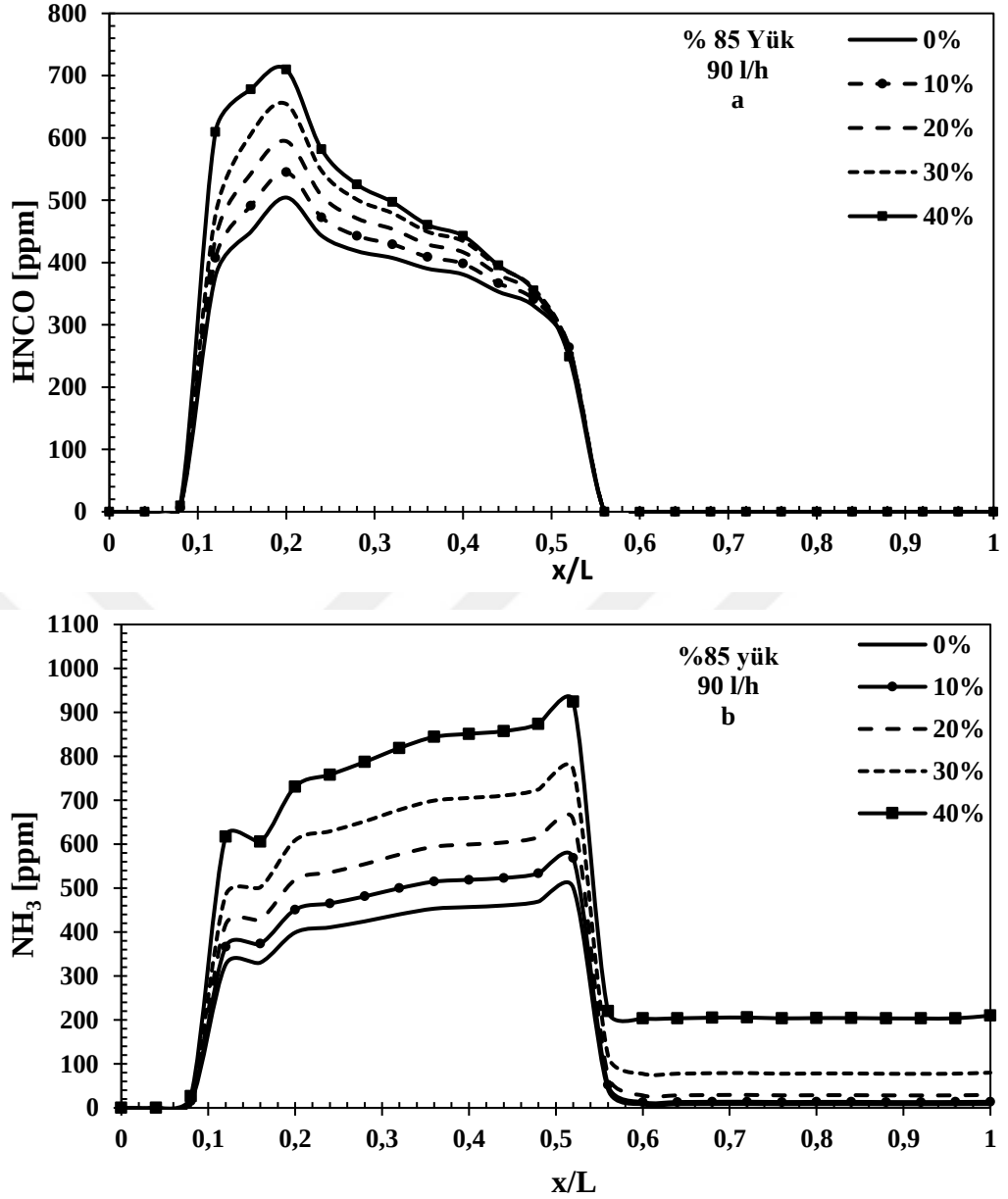
Şekil 5.7 YB-SCR sistemi boyunca NO_x emisyonlarının değişimi

YB-SCR sistemi boyunca her bir RBV açıklık oranı için NO_x değişim oranı Şekil 5.8'de verilmiştir. Başlangıçta 1500 ppm olarak sisteme verilen NO_x emisyonlarının %0 RBV açıklık oranında yaklaşık 428 ppm seviyelerine kadar azaltılmasına karşılık, %40 RBV açıklık oranında bu değer sifıra yaklaşmıştır.



Şekil 5.8 SCR sistemi boyunca RBV açıklık oranları için NO_x değişimi

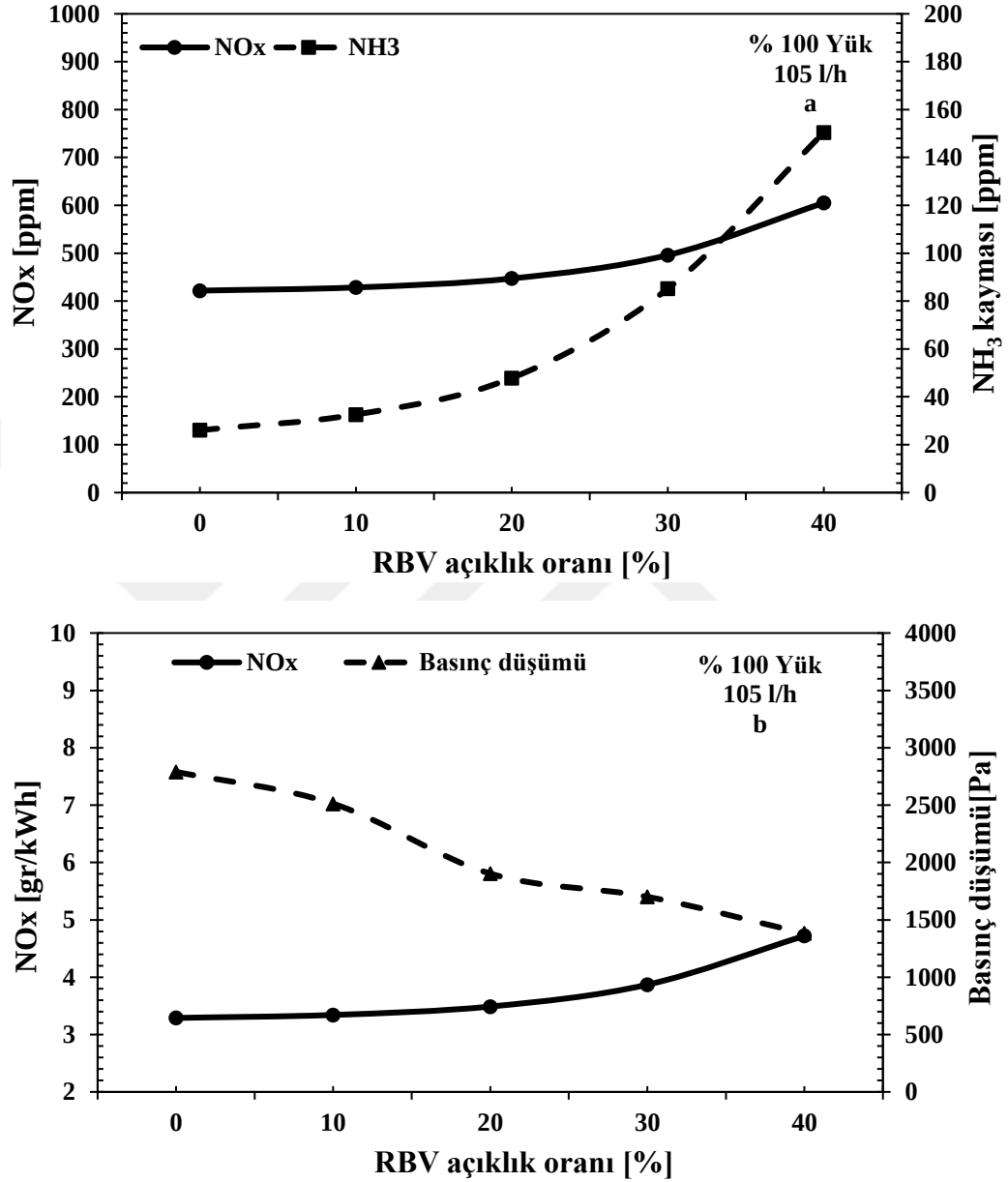
RBV açıklık oranının artması ile SCR sistem çıkışında NO_x emisyonları azalmaktadır. Tüm RBV açıklık oranlarında kütleli olarak aynı miktarda NH_3 oluşmasına rağmen, egzoz debisine bağlı NO_x emisyonları değişmektedir. NH_3/NO_x oranının değişmesi SCR çıkışında NH_3 kaymasına neden olmaktadır. Şekil 5.9, %85 yük koşulları için SCR sistemi boyunca farklı RBV açıklık oranlarında $HNCO$ ve NH_3 değişimini göstermektedir. Elde edilen bulgular, aynı miktar UWS püskürtülmesinin azalan RBV açıklık oranlarında, SCR çıkışındaki NH_3 miktarını arttırdığını göstermektedir.



Şekil 5.9 SCR sistemi boyunca RBV açıklık oranları a) HNCO ve b) NH₃ değişimi

Her bir yük koşulu için YB-SCR sisteminde RBV açıklık oranının, NO_x, NH₃ ve basınç düşümüne etkisi parametrik olarak bu kısımda incelenmiştir. Şekil 5.10, %100 yük koşulunda RBV valf açıklığının sistem performansına etkisini göstermektedir. RBV açıklığının sistem performansına etkisi incelenirken, SCR sisteminden geçen egzoz bileşenleri ile doğrudan SCR sistemini baypas ederek türbine aktarılan egzoz gazları oranları dikkate alınarak, NO_x ve NH₃ bileşenlerinin miktarları belirlenmiştir. Şekil 5.10a’da artan RBV açıklık oranı ile egzoz çıkışındaki NO_x emisyon miktarı 422 ppm’den 605 ppm’e çıkmıştır. RBV açıklık oranı, NH₃ kayma değerini 26 ppm’den

150 ppm'e çıkarmıştır. Tier III standartları göz önünde bulundurulduğunda, %20 valf açıklık oranı ile standartların sağlandığı belirlenmiştir.

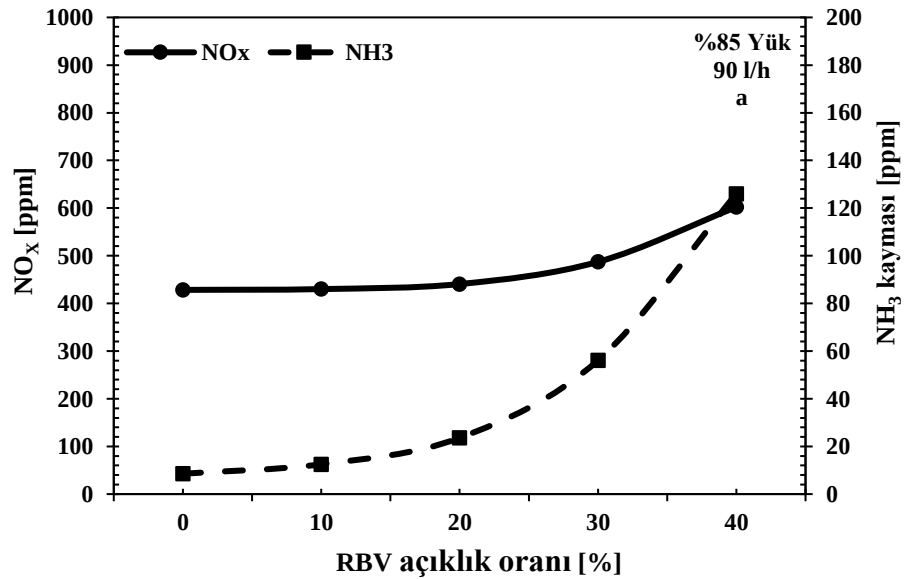


Şekil 5.10 %100 yük için RBV açıklık oranları için NO_x, NH₃ ve basınç düşümü

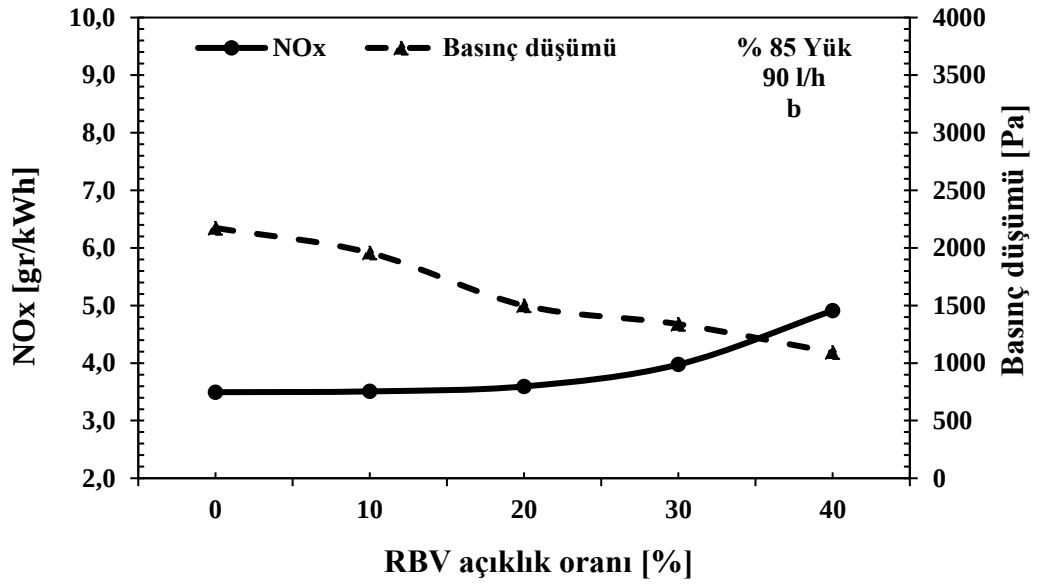
Şekil 5.10b'de ise RBV açıklık oranı ile NO_x emisyonları ve basınç düşümü arasındaki ilişki verilmiştir. İçten yanmalı motorlarda egzoz çıkışında oluşan basınç düşümü, motor performansını etkileyen parametrelerdendir. Dolayısıyla %40 RBV açıklık oranı, SCR sisteminin sebep olduğu basınç düşüm miktarını 2790 Pa'dan 1380 Pa'a

kadar düşürmüştür. Aynı şekilde %0 RBV açıklık oranında NO_x emisyonları 3,29 gr/kWh iken, %40 RBV açıklık oranında 4,72 gr/kWh olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.11, %85 yük koşulu için RBV açıklık oranı ile NO_x, NH₃ ve basınç düşümünü göstermektedir. Şekil 5.11a'da 90 l/h UWS püskürtme miktarı için %0 RBV valf açıklığında NO_x emisyonları 428 ppm iken, %40 valf açıklık oranında bu değer 602 ppm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde artan RBV açıklık oranı ile NH₃ kayma miktarı üstel bir şekilde artmaktadır. %40 RBV açıklık oranında, NH₃ kayma miktarı 126 ppm olarak belirlenmiştir. Şekil 5.11b'de ise NO_x emisyonlarının 3,49 gr/kWh'den 4,91 gr/kWh'e kadar yükselişi gösterilmiştir. Elde edilen bulgular, NO_x emisyonlarının %30 RBV açıklık oranından sonra arttığını göstermektedir. %0 RBV açıklık oranı ile %30 RBV açıklık oranları arasında NO_x emisyon miktarlarının benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Aynı şekilde artan RBV oranı ile SCR sistemindeki toplam basınç düşümü de azalmıştır. Belirlenen koşullar altında %0 RBV açıklık oranında SCR sistemi boyunca toplam basınç düşümü 2170 Pa iken, %40 RBV açıklık oranında bu oran 1090 Pa seviyelerine kadar düşmüştür. IMO Tier III düzenlemesi dikkate alındığında, %85 yük koşulu için emisyon sınırlamasının %20-%30 arasındaki RBV açıklık oranlarında sağlandığı görülmektedir.

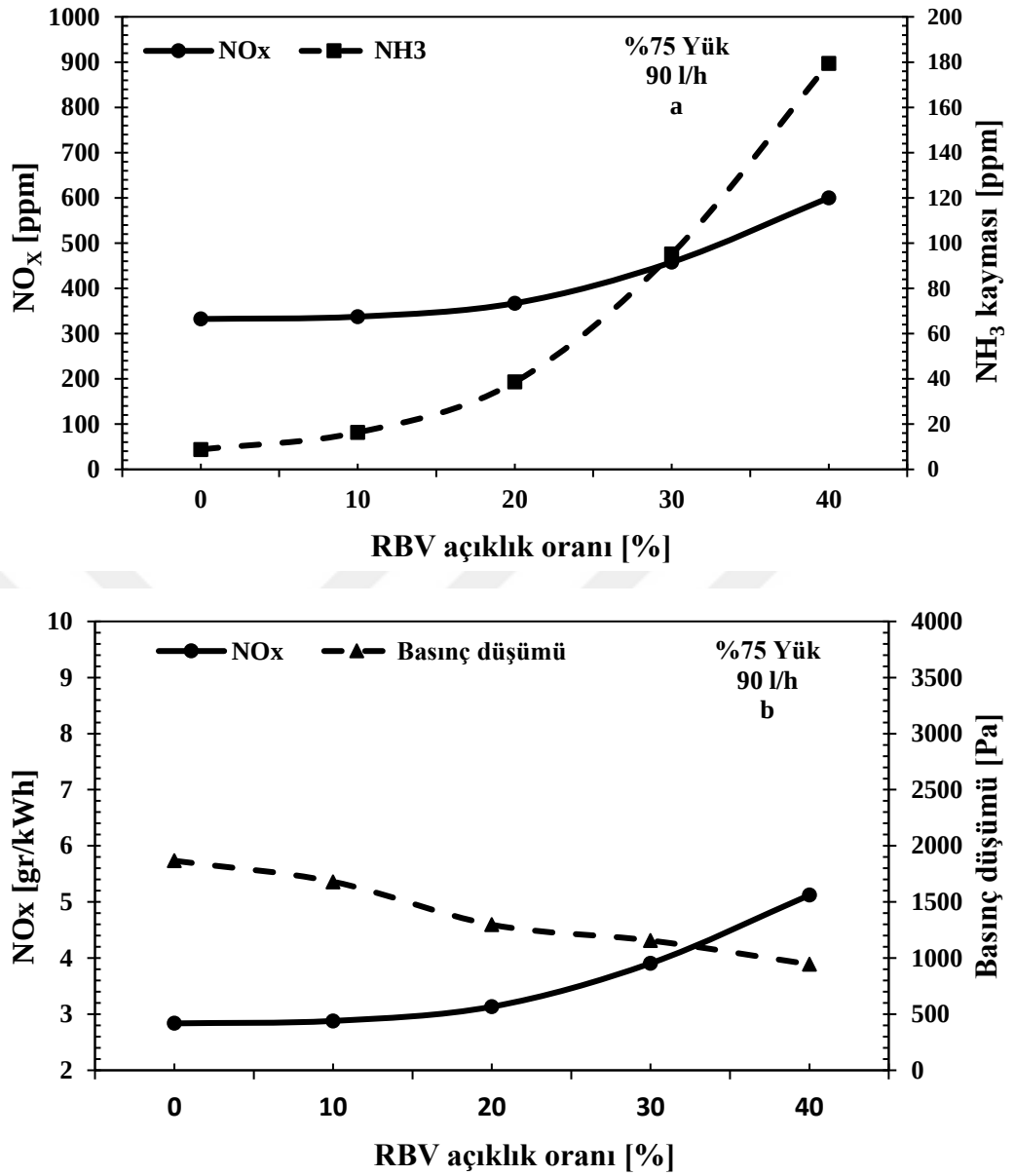


Şekil 5.11 %85 yük için RBV açıklık oranı ile NO_x, NH₃ ve basınç düşümü



Şekil 5.11 devamı

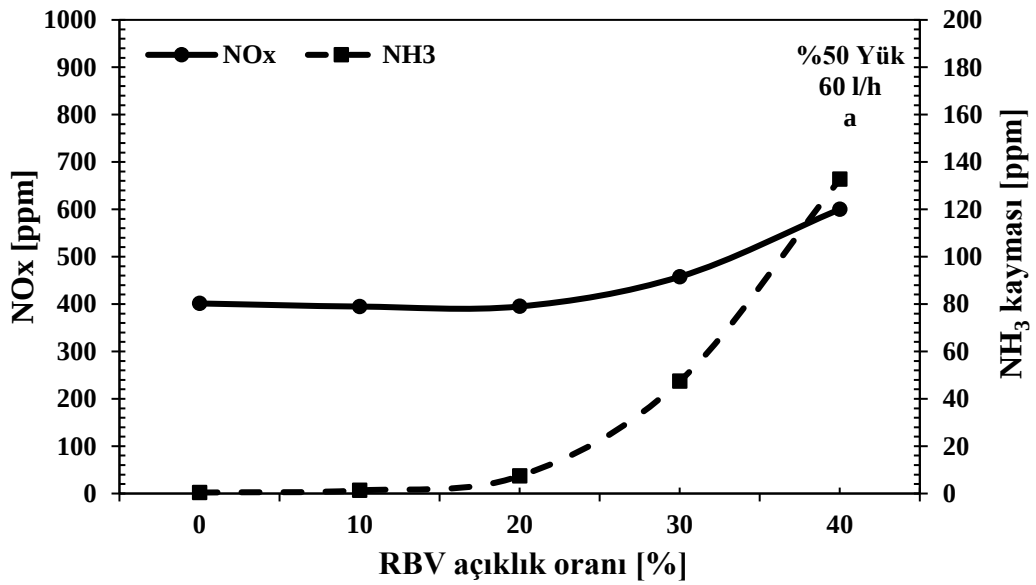
Şekil 5.12, %75 yük oranı için RBV açıklık oranının NO_x, NH₃ kayması ve basınç düşümüne etkisini göstermektedir. Şekil 5.12a, başlangıçta 1500 ppm olarak belirlenen NO_x emisyonlarının %0 RBV açıklık oranı ile 332 ppm seviyelerinde, %40 RBV açıklık oranı ile de 600 ppm seviyelerinde olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde RBV açıklığının artması, NH₃ kayma miktarının 8 ppm'den 180 ppm mertebelerine kadar yükselmesine neden olmuştur. Şekil 5.12b'de ise NO_x emisyonlarının değişimi ve basınç düşümü gösterilmiştir. Diğer yük koşullarında olduğu gibi %30 RBV valf açıklığına kadar NO_x emisyonlarındaki değişim oranlarının benzerlik gösterdiği, %30'dan sonra bu oranın arttığı gözlemlenmiştir. %0 RBV açıklık oranında 2,84 gr/kWh olarak belirlenen NO_x emisyonları, %40 açıklık oranında 5,12 gr/kWh olarak belirlenmiştir. SCR sistemi boyunca basınç düşümü incelendiğinde, %0 açıklık oranında 1870 Pa olarak belirlenen basınç düşümü, %40 açıklık oranında 945 Pa olarak belirlenmiştir. %75 yük koşulu için Tier III gereklilikleri, yaklaşık %20-%25 valf açıklıkları ile karşılanmakta olup, bu değerlerden sonra NO_x emisyonları üstel olarak artmaktadır.



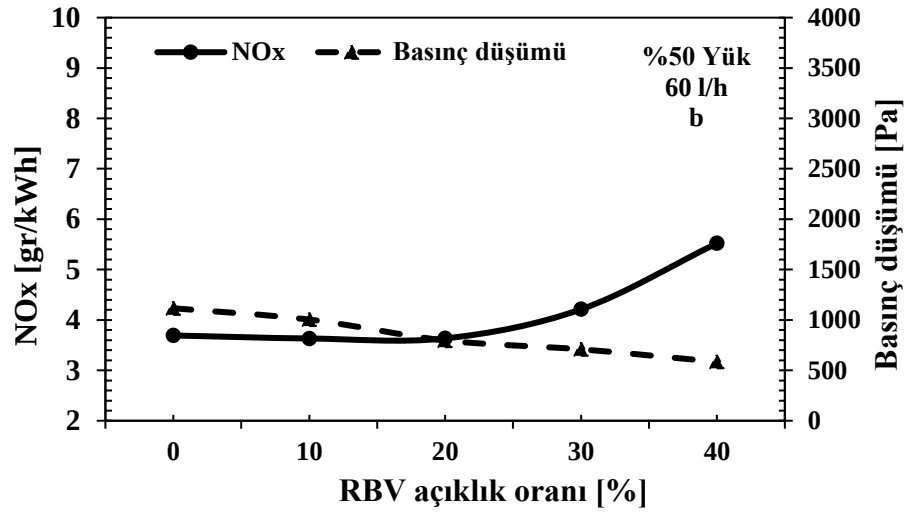
Şekil 5.12 %75 yük için RBV açıklık oranı ile NO_x, NH₃ ve basınç düşümü

%50 yük koşulunda 60 l/h UWS püskürtülmesi sonucu NO_x, NH₃ kayması ve basınç düşümü değişim grafiği Şekil 5.13'te verilmiştir. Başlangıçta 1500 ppm olarak kabul edilen NO_x emisyonlarının RBV açıklığı ile değişimi Şekil 5.13a'da verilmiştir. %0 valf açıklık oranında 400 ppm olarak belirlenen NO_x emisyonları, %40 valf açıklık oranında 600 ppm seviyelerine kadar çıkmaktadır. NH₃ kayma değeri ise başlangıçta SCR sistemi çıkışında gözlemlenmezken, %40 açıklık oranında 140 ppm'e kadar yükselmiştir. %20 RBV açıklık oranından daha fazla valf açıklık oranlarında, NH₃ emisyonları üstel bir şekilde artmıştır. Şekil 5.13b, valf açıklık oranları ile NO_x

emisyonları ve basınç düşümü değişimini göstermektedir. %0 valf açıklık oranında 3,5 gr/kWh olan NO_x emisyonları, %40 valf açıklık oranında 5,52 gr/kWh olarak belirlenmiştir. Özellikle %20 valf açıklık oranından daha yüksek açıklık oranlarında NO_x emisyonlarının üstel bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Aynı şekilde SCR sisteminin basınç düşümüne etkisi incelendiğinde, başlangıçtaki basınç düşüm oranının RBV açıklığı ile azaldığı belirlenmiştir. Aynı sınır koşullarına sahip SCR sisteminde egzoz debisinin azalması bu durumun oluşmasına neden olmuştur. %100 yük koşulunda SCR sisteminde meydana gelen basınç düşümü 2790 Pa iken, %50 yük koşulunda bu oran 1120 Pa'a kadar düşmüştür. RBV açıklığının %0 olduğu durum için basınç düşümü 1120 Pa olarak belirlenirken, valf açıklığının %40 olduğu durumda basınç düşümü 585 Pa'a kadar düşmüştür.

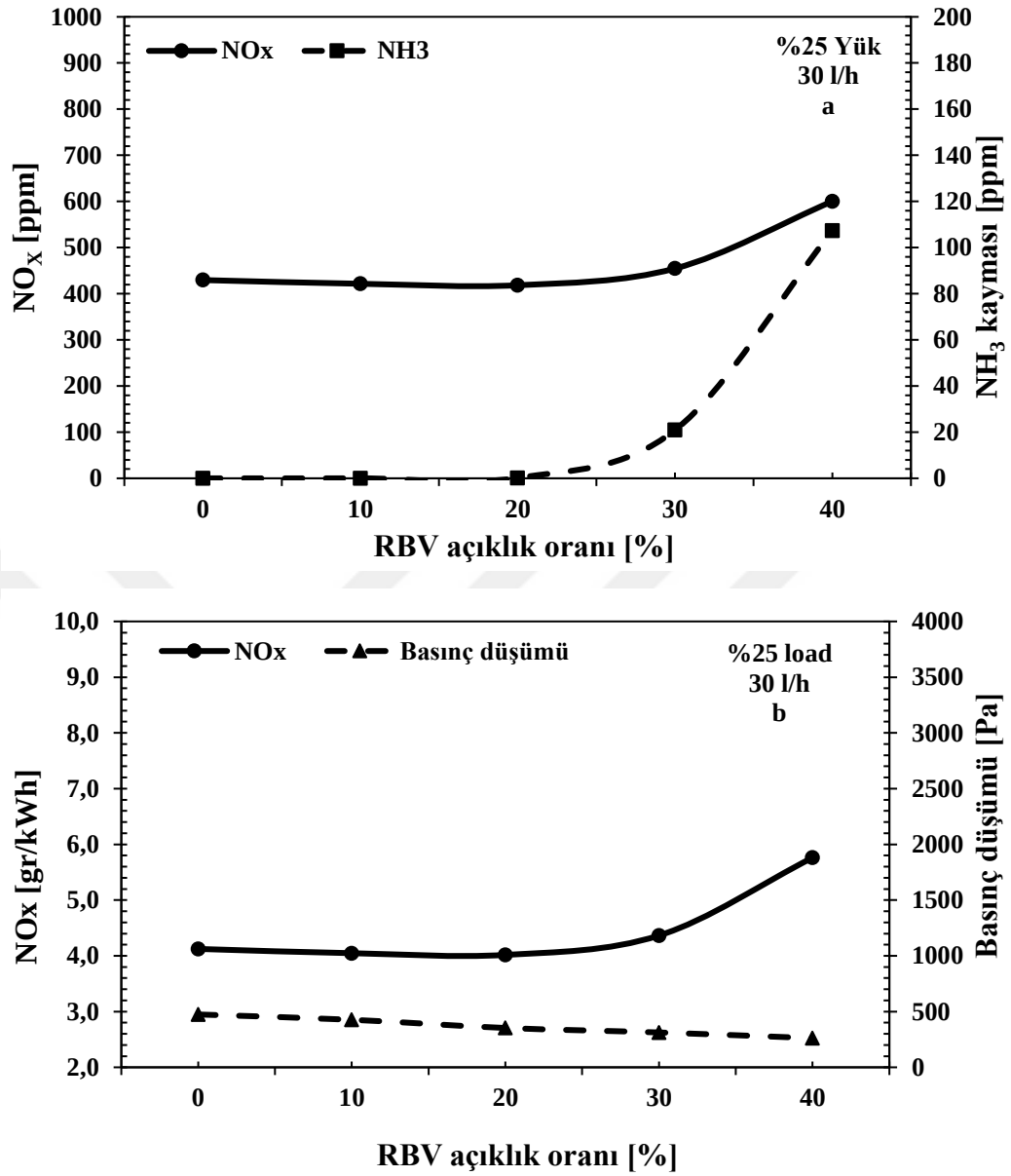


Şekil 5.13 %50 yük için RBV açıklık oranı ile NO_x, NH₃ ve basınç düşümü



Şekil 5.13 devamı

%25 yük koşulunda çalışan gemi dizel motoru için, SCR sistem performans parametreleri Şekil 5.14'te verilmiştir. 30 l/h UWS püskürtme koşulları altında NO_x ve NH₃ kaymasına etkisi Şekil 5.14a'da verilmiştir. Başlangıçta 1500 ppm olan NO_x emisyonları, RBV açıklık oranının %0 olduğu durumda 430 ppm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde NH₃ kayma miktarı, %40 açıklık oranında 107 ppm seviyesine kadar yükselmiştir. Özellikle NH₃ bileşenlerinin miktarı, %20 valf açıklık oranından daha yüksek açıklık oranlarında oluşmuş ve artan açıklık oranı ile üstel bir şekilde artmıştır. Şekil 5.14b, NO_x ve basınç düşümü değişimini göstermektedir. Başlangıçta basınç düşümü, diğer tüm motor yüklerinden daha düşük olarak 474 Pa olarak belirlenmiştir. %40 valf açıklık oranında basınç düşüm miktarı 262 Pa seviyelerindedir. NO_x emisyonları ise 4,12 gr/kWh seviyesinden, 5,76 gr/kWh seviyesine kadar yükselmiştir. Özellikle %20 valf açıklık oranlarına kadar sabit kalan NO_x emisyonları, %20 valf açıklık oranından daha yüksek açıklık oranlarında üstel olarak artmıştır.



Şekil 5.14 %25 yük için RBV açıklık oranı ile NO_x, NH₃ ve basınç düşümü

5.3 YB-SCR ve AB-SCR Sistem Performans Parametrelerinin Karşılaştırılması

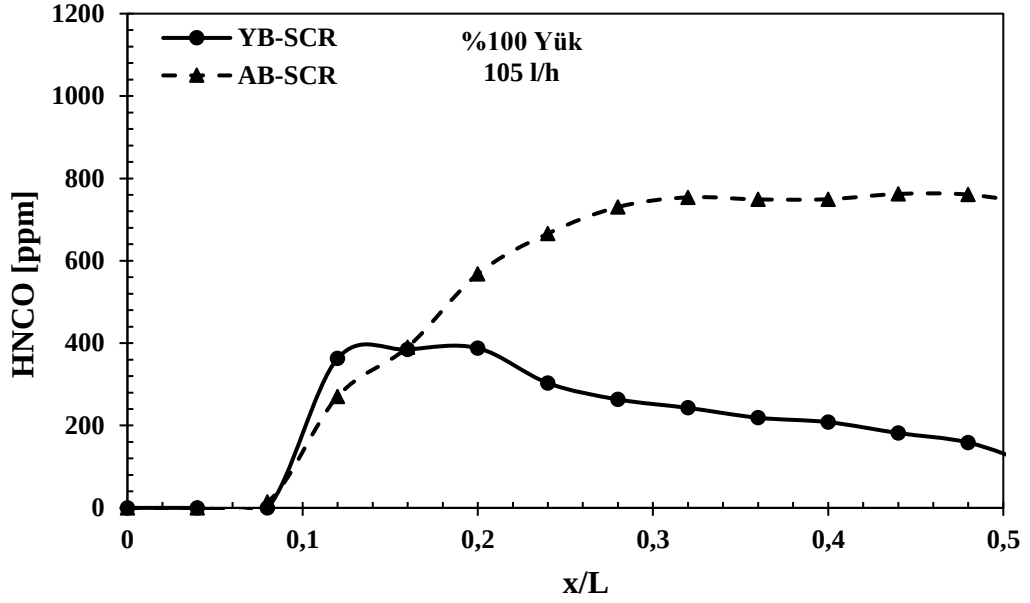
İki zamanlı ağır devirli gemi dizel motorlarında, SCR sistem performansının belirlenmesi amacıyla parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İki zamanlı ağır dizel motorlarında SCR yerleşimi, türbin öncesinde ve sonrasında olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Ancak bu yerleşim farklılığı, SCR performansında da değişikliklere yol açmaktadır. SCR sistem performansını etkileyen en önemli parametre egzoz gazı sıcaklığıdır. Egzoz gazı sıcaklığı, UWS çözeltilisinin

ayrıştırılmasında önemli rol oynamaktadır. UWS bileşenlerinin, egzoz sıcaklığı ile önce buharlaşma sonrasında termoliz ve hidroliz reaksiyonları ile NH_3 kimyasallarına dönüşümü sağlanmaktadır. Çalışmada, yüksek basınç koşullarında çalışan YB-SCR ve alçak basınç koşullarında çalışan AB-SCR sistemlerinin karşılaştırılması sunulmuştur.

5.3.1 İsosiyamik Asit (HNCO) Değişiminin İncelenmesi

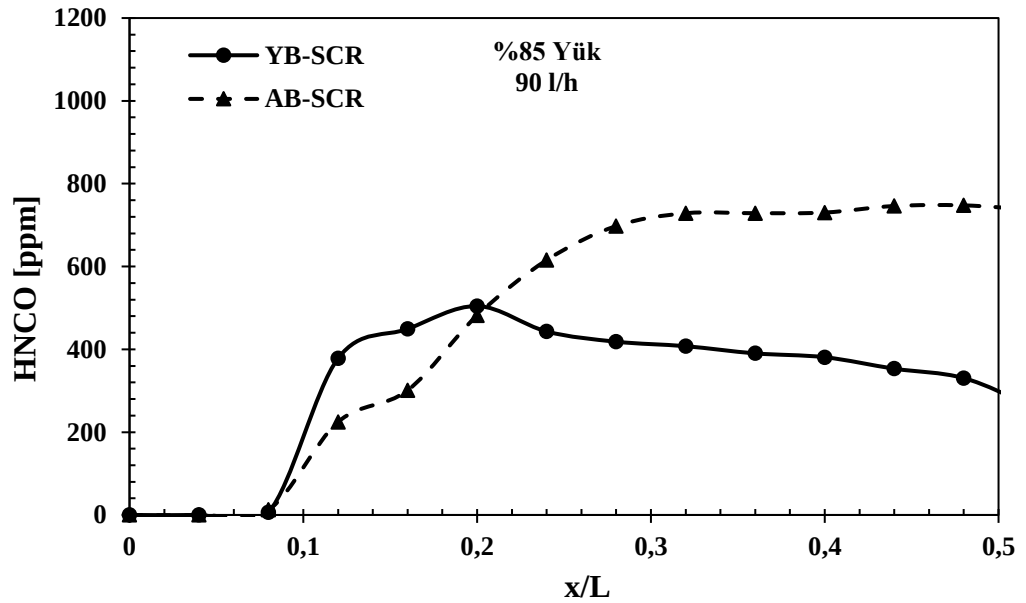
HNCO bileşeni UWS bileşenlerinin parçalanması sonucu oluşan ara ürünlerden biridir. HNCO bileşeni termoliz reaksiyonu sonucu oluşup sonrasında hidroliz reaksiyonu ile NH_3 bileşenine dönüşmektedir.

Şekil 5.15’de, %100 yük koşullarında HNCO bileşenlerinin YB-SCR ve AB-SCR sistemi için SCR girişine kadar olan SCR sistem bölümündeki değişimi verilmiştir. Bu değerlerin SCR sistemin bu bölümünde incelenmesi, katalizör öncesinde indirgenme bileşenlerinin bu bölümde oluşmasından kaynaklanmaktadır. HNCO çözeltilisinin YB-SCR sisteminde x/L oranının 0,15 olduğu noktaya kadar arttığı sonrasında azaldığı belirlenmiştir. AB-SCR sisteminde ise, HNCO bileşenlerin arttığı sonrasında sabit kaldığı belirlenmiştir. İdeal SCR sistemlerinde HNCO bileşenlerinin termoliz reaksiyonları ile oluşması, sonrasında hidroliz reaksiyonları ile azalması beklenmektedir. YB-SCR ve AB-SCR sistemlerinde bu farklılığın oluşmasının en önemli nedeni egzoz gazı sıcaklığıdır. YB-SCR sisteminde operasyon sıcaklığı 717 K iken, AB-SCR sisteminde bu sıcaklık 523 K’dir. Her iki sistem için de sayısal analizler, 105 l/h UWS püskürtme koşulları altında gerçekleştirilmiştir.



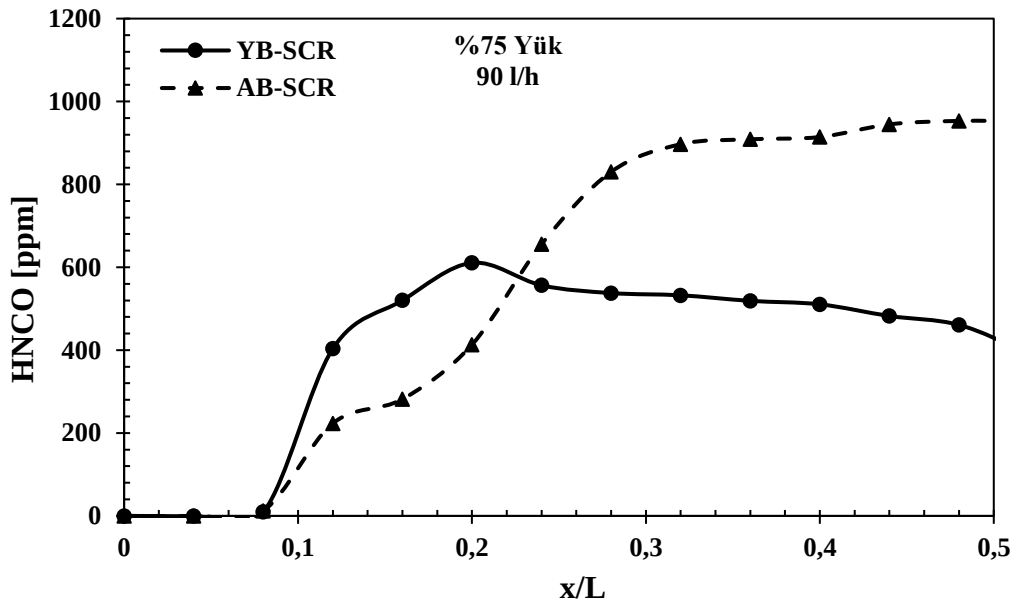
Şekil 5.15 %100 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi

%85 yük koşulu için HNCO değişimi her iki sistem içinde Şekil 5.16’da verilmiştir. %100 yük koşulunda olduğu gibi %85 yük koşulunda da YB-SCR sistemi için HNCO bileşenleri x/L oranı 0,2’den sonra azalmakta iken, AB-SCR sisteminde bu durum ters yönde gerçekleşmektedir. %85 yük koşulu için YB-SCR ve AB-SCR sistem çalışma sıcaklıkları sırasıyla 660 K ve 494 K’dir. Her iki sistem içinde UWS püskürtme miktarı, 90 l/h olarak sayısal modele tanımlanmıştır.



Şekil 5.16 %85 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi

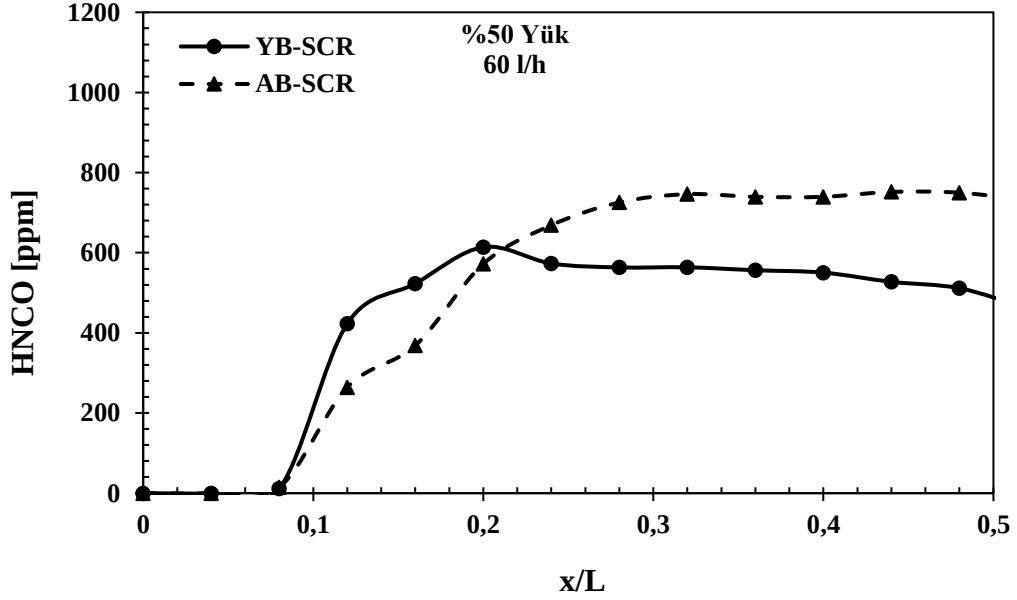
%75 yük koşulu için, YB-SCR ve AB-SCR sistemlerinin 90 l/h UWS püskürtme koşulları altında HNCO bileşenlerinin değişimi şekil 5.17’de verilmiştir. Bu yük koşulu için HNCO bileşenlerinin YB-SCR sistemindeki azalma oranı %100 ve %85 yük koşullarına göre daha azdır. Ayrıca her iki sistem içinde HNCO bileşenlerinin oluşumu, SCR sisteminin ilerleyen kısımlarında gerçekleşmiştir. YB-SCR sisteminde HNCO bileşenlerinin en yüksek olduğu x/L oranı 0,16 iken, bu değer %75 yük koşulunda 0,2 olarak belirlenmiştir. Ayrıca AB-SCR sisteminde HNCO bileşenlerinin katalizör girişine kadar arttığı da elde edilen bulgulardandır.



Şekil 5.17 %75 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi

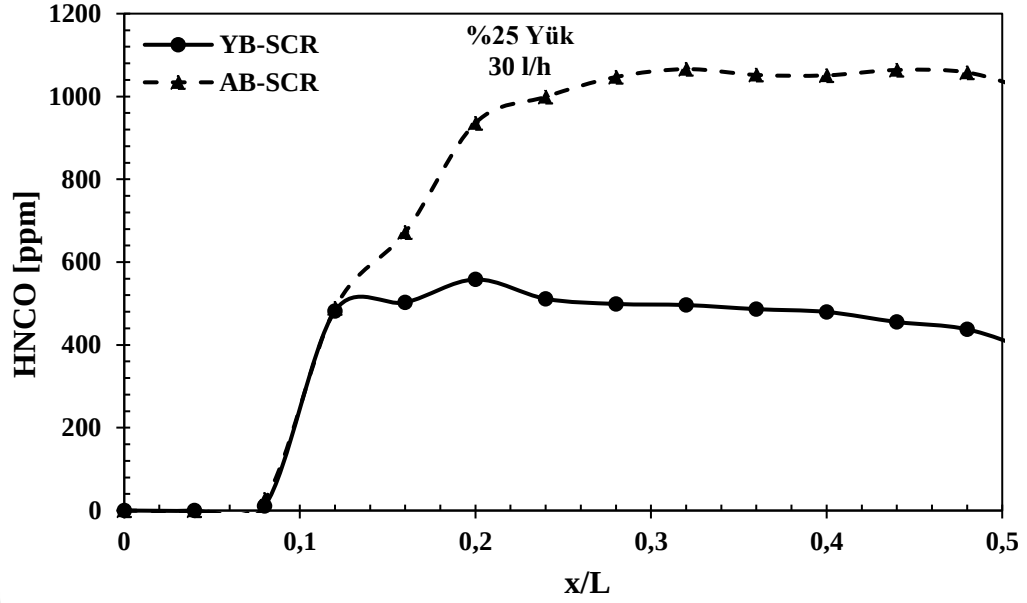
%50 yük koşulunda SCR sistemi için HNCO bileşenlerinin değişimi, Şekil 5.18’de verilmiştir. Bu yük koşulu için HNCO bileşenlerinin en yüksek olduğu değer, x/L oranının 0,2 olduğu bölgelere denk gelmektedir. Bu bölgeden sonra her iki sistem içinde HNCO miktarındaki azalma hızı, yüksek yük koşullarına oranla daha yavaş gerçekleşmektedir. AB-SCR ve YB-SCR sistemlerindeki HNCO değişimi birbirine benzerlik göstermektedir. Bu durumun en önemli nedeni, türbin çıkışındaki egzoz gazı sıcaklıklarının düşük yük koşullarında artmasından kaynaklanmaktadır. AB-SCR sisteminde %75 yük koşulunda HNCO miktarı sürekli artarken, %50 yük koşulunda artış eğilimi daha düşüktür. %50 ve %75 yük koşulları için türbin çıkış sıcaklıkları sırasıyla 492 K ve 477 K’dir. YB-SCR sistemlerinde ise egzoz sıcaklıkları %50 ve

%75 yük için sırasıyla 632,6 ve 593,4 K'dir. Yapılan parametrik çalışmalar 60 l/h UWS oranlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18 %50 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde H₂CO değişimi

%25 yük koşulu için H₂CO bileşeninin YB-SCR ve AB-SCR sistemi için değişimi Şekil 5.19'da verilmiştir. YB-SCR sisteminde sıcaklığın yaklaşık 574 K olması, H₂CO hidroliz reaksiyonlarını olumsuz etkilemiştir. Dolayısıyla %50 yük koşulunda olduğu gibi YB-SCR sistem performansı yüksek yük koşullarına oranla azalırken, AB-SCR sisteminde türbin çıkış sıcaklığının %100 yük koşulunda olduğu gibi 423 K olması, H₂CO bileşenlerinin katalizör giriş bölümüne kadar sürekli olarak arttığını göstermektedir.

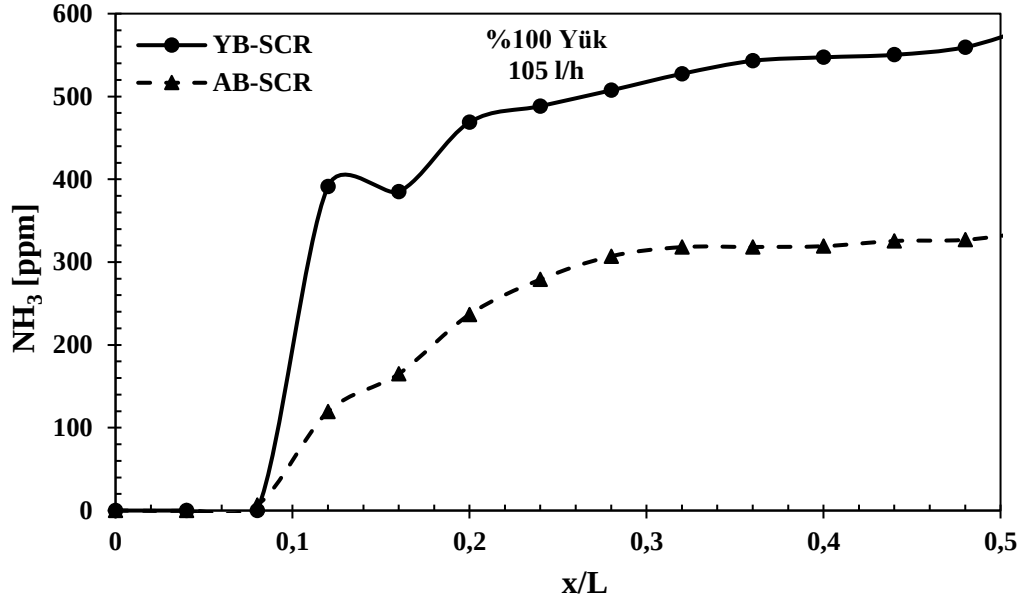


Şekil 5.19 %25 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde HNCO değişimi

5.3.2 Amonyak (NH_3) Değişiminin İncelenmesi

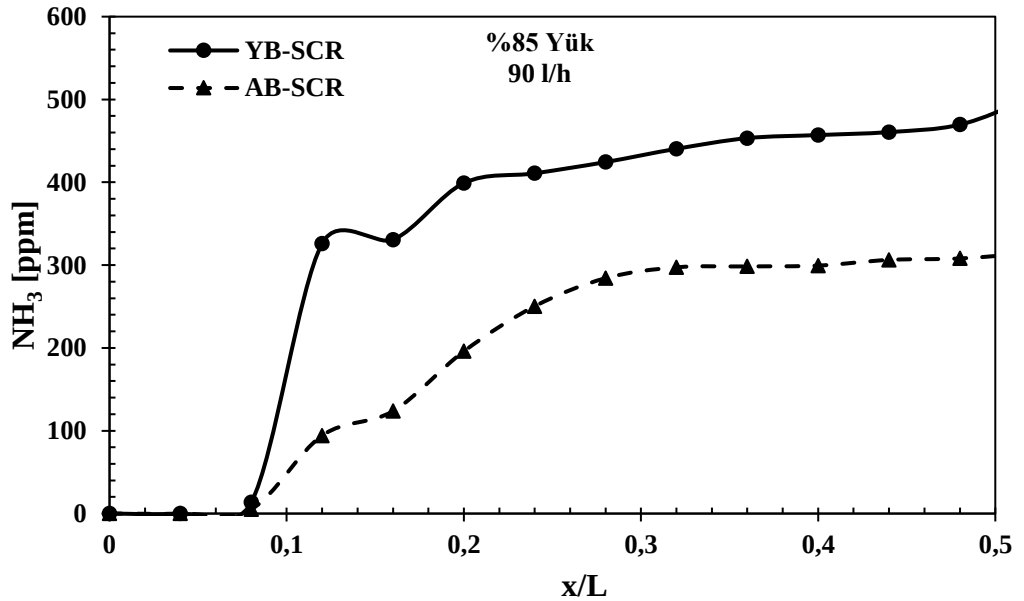
SCR sistemlerinde NO_x indirgenmesini sağlayan temel bileşen NH_3 bileşenleridir. Katalizör girişinde NH_3 dönüşüm performansının yüksek olması, SCR reaksiyonlarının oluşum etkinliğine bağlı olarak NO_x emisyon azaltma performansının artmasını da beraberinde getirmektedir.

%100 yük koşulunda katalizör girişine kadar olan SCR sisteminde, NH_3 değişimi Şekil 5.20’de verilmiştir. YB-SCR ve AB-SCR sistemlerinde oluşan NH_3 miktarları sırasıyla 585 ve 337 ppm olarak belirlenmiştir.



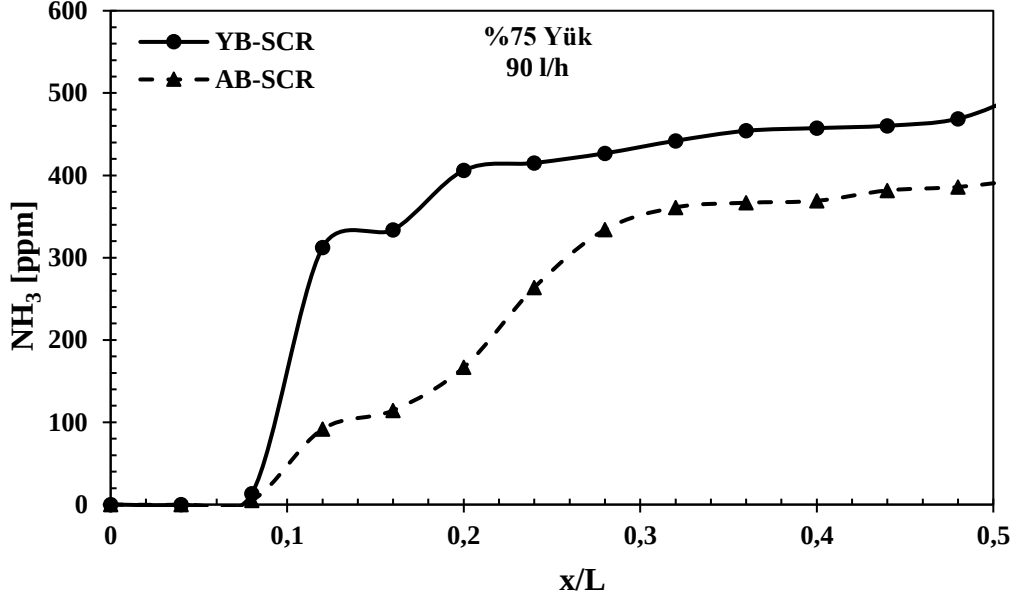
Şekil 5.20 %100 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH₃ değişimi

%85 yük koşulunda gerçekleştirilen AB-SCR ve YB-SCR sistemleri için, NH₃ bileşenlerinin karşılaştırılması Şekil 5.21’de sunulmuştur. %100 yük koşulu ile karşılaştırıldığında, her iki sistem içinde NH₃ bileşenlerinin miktarının azaldığı belirlenmiştir. %85 yük koşulundaki bu azalma, püskürtülen UWS miktarı ve egzoz debisinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca NH₃ oluşum hızı, %100 yük koşulunda oluşan NH₃ oluşum hızından daha düşük olarak belirlenmiştir.



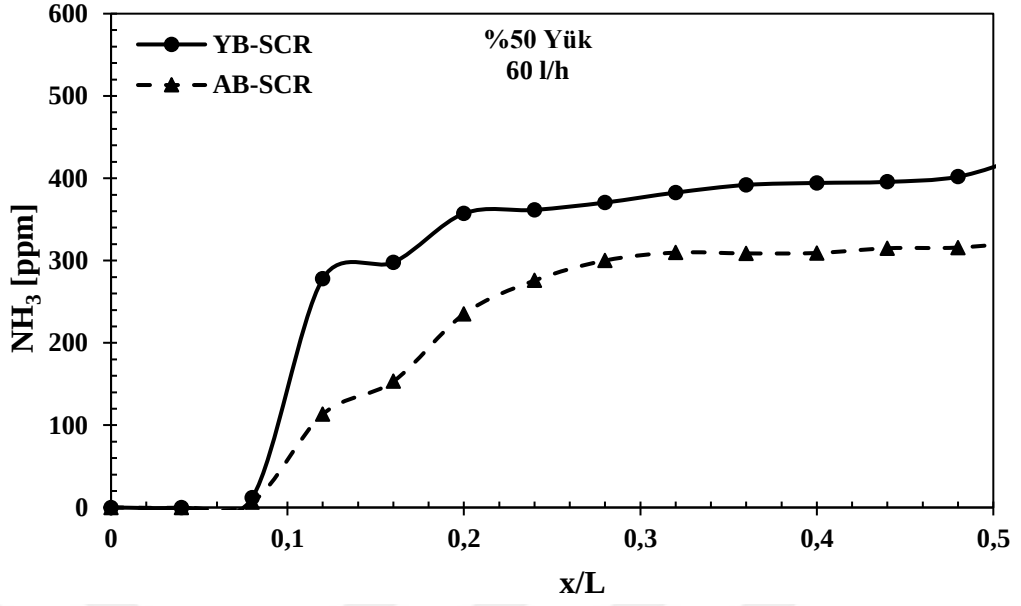
Şekil 5.21 %85 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH₃ değişimi

%75 yük koşulu için NH_3 değişimi grafiği Şekil 5.22’de verilmiştir. Verilen grafik incelendiğinde, AB-SCR ve YB-SCR sistemleri arasındaki NH_3 oluşum miktarları arasındaki farkın azaldığı görülmüştür. Bu durum her iki sistem arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır.



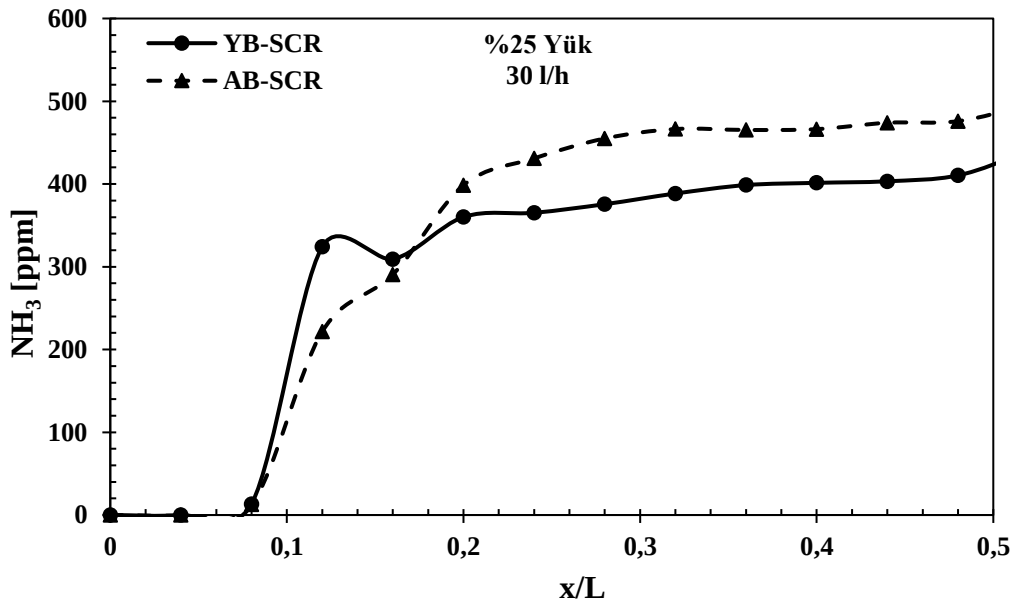
Şekil 5.22 %75 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH_3 değişimi

Şekil 5.23’te ise %50 yük koşulu için AB-SCR ve YB-SCR sistem karşılaştırılması verilmiştir. AB-SCR sisteminde türbin çıkış sıcaklığının %50 yük koşulundan sonra artması her iki sistem arasındaki sıcaklık farkını azaltmıştır. Sıcaklık farkının azalması da her iki sistem için NH_3 bileşenleri arasındaki farkın azalmasına neden olmuştur.



Şekil 5.23 %50 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH_3 değişimi

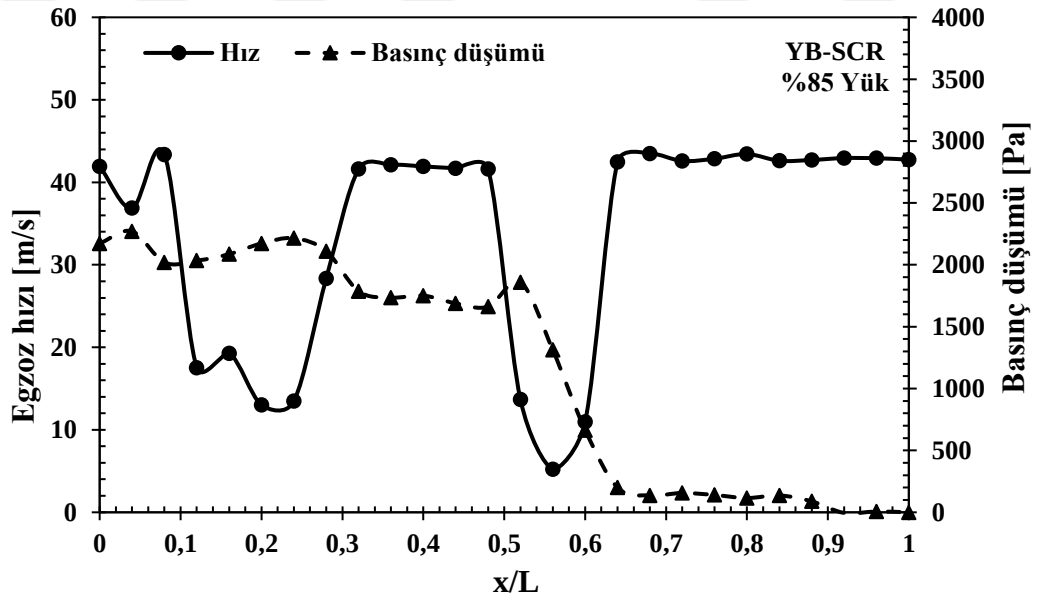
%25 yük koşulunda YB-SCR ve AB-SCR sistemlerinin çalışma sıcaklıklarının birbirine en yakın olduğu yük koşuludur. Şekil 5.24, NH_3 bileşenlerinin %25 yük koşulunda değişimini göstermektedir. Diğer yük koşulları ile karşılaştırıldığında, %25 yük koşulunda YB-SCR ve AB-SCR sistem performanslarının birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.24 %25 yük için YB-SCR ve AB-SCR sisteminde NH_3 değişimi

5.3.3 Basınç Düşümü ve Hız Değişiminin İncelenmesi

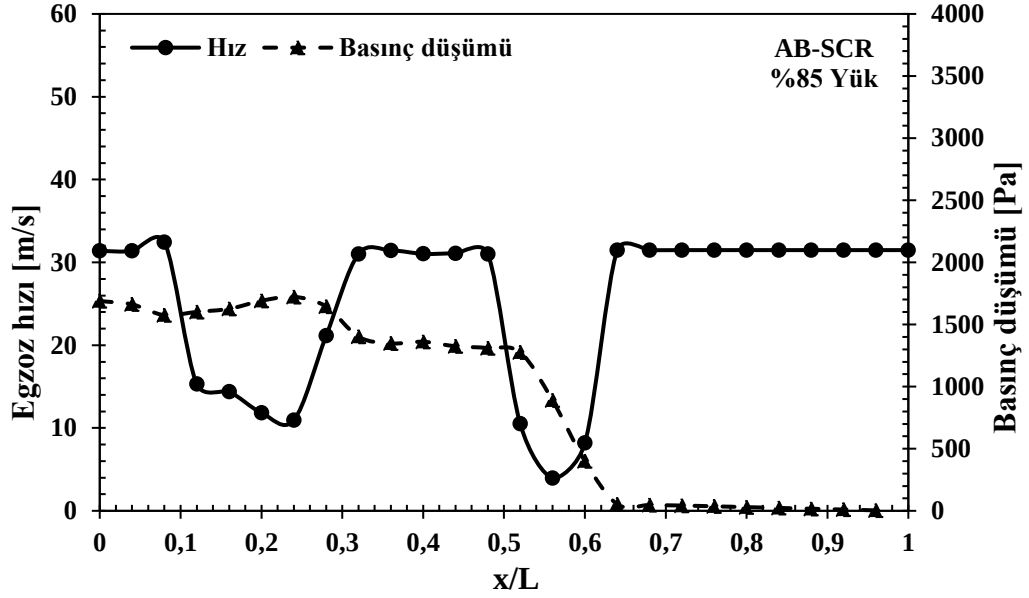
SCR sistemlerinin içten yanmalı motorlarda kullanılmasının, egzoz sisteminde oluşturduğu karşı basınç nedeni ile motor performansında azalmalara neden olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla bu sistemlerde NO_x azaltma performansının en yüksek, buna karşılık basınç düşümünün en az seviyede olması istenmektedir. Bu bölümde, YB-SCR ve AB-SCR sistemleri için hız ve basınç düşümü incelenmiştir. Şekil 5.25'te YB-SCR sistemi boyunca hız ve basınç düşümü değişimi verilmiştir. %85 yük koşullarında gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sonucunda, YB-SCR sistemi girişinde basıncın 2170 Pa ve hızın 41,9 m/s olduğu belirlenmiştir. YB-SCR sistemi boyunca hızın karışım odası ve SCR'de azaldığı görülmektedir. Aynı şekilde sistem boyunca en fazla basınç düşümünün olduğu bölge ise SCR bölgesidir. Katalizör yapısının gözenekli ortam modeli şeklinde olması bu durumun en önemli nedenlerindendir. Gözenekli ortam modeli, NO_x emisyonları ile NH_3 bileşenleri arasındaki reaksiyonların en etkin şekilde gerçekleşmesi amacıyla laminar akış olacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 5.25 %85 yük için YB-SCR sisteminde hız ve basınç dağılımı

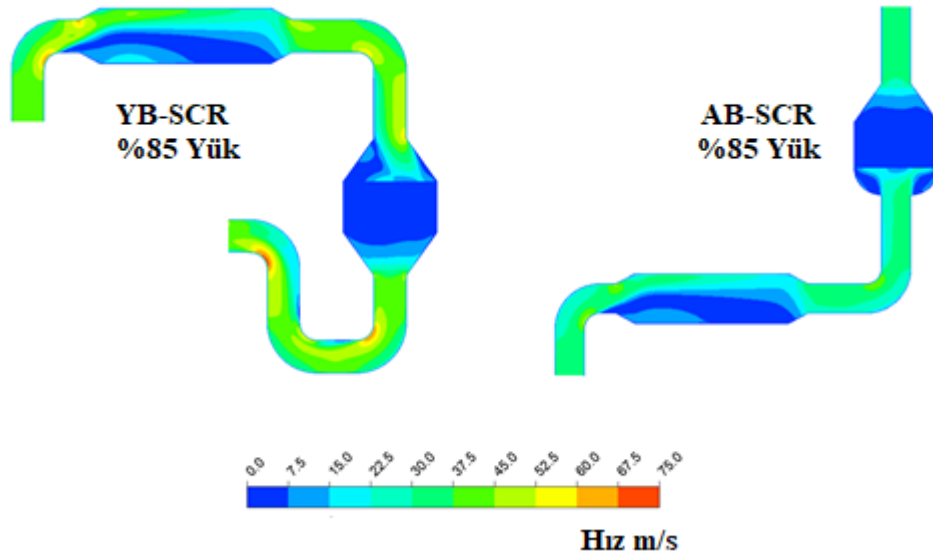
AB-SCR sisteminde hız ve basınç değişimi Şekil 5.26'te verilmiştir. YB-SCR ve AB-SCR sistemleri karşılaştırıldığında, AB-SCR sisteminde giriş hızı 31,4 m/s ve

basınç 1690 Pa olarak belirlenmiştir. Aynı debi ve püskürtme miktarında, akış hızındaki değişimin en önemli sebebi egzoz gazı sıcaklığıdır. Egzoz gazı yoğunluğunun sıcaklık ile azalması hızın azalmasına neden olmaktadır. Basınç düşüm değerleri ise hem akışın hızı hem de AB-SCR sisteminde daha az dirsek elemanından kaynaklı olarak YB-SCR sistemine göre azalmıştır.



Şekil 5.26 %85 yük için AB-SCR sisteminde hız ve basınç dağılımı

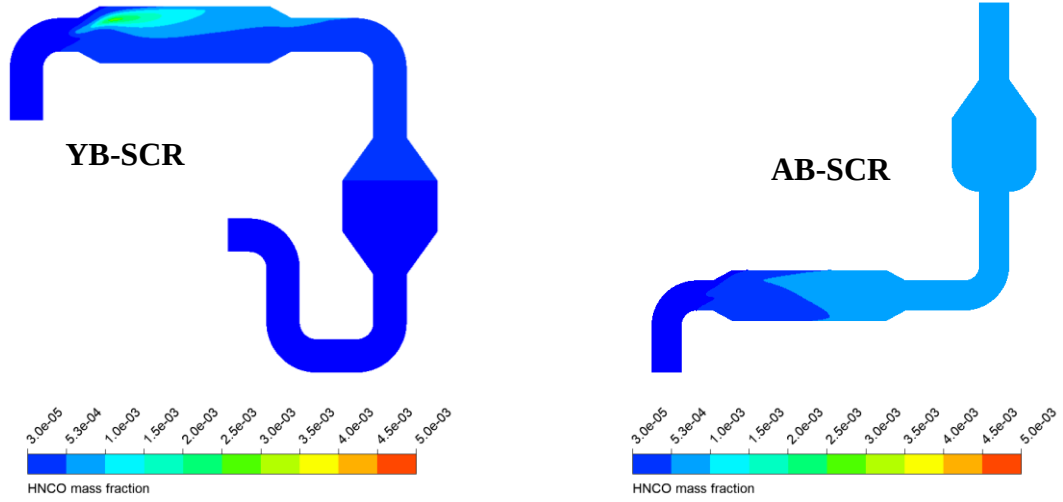
YB-SCR ve AB-SCR sistemi boyunca egzoz gazı hızının değişimi Şekil 5.27’de verilmiştir. Her iki sistem de incelendiğinde, karışım odasında hızın homojen olarak dağılmadığı belirlenmiştir. Karışım odasında hızın dirsek etkisi nedeniyle belirli bölgelerde sıfıra yakın iken, diğer bölümlerde daha yüksek hızlara ulaştığı gözlemlenmiştir. Hızın gözenekli ortam modeli nedeniyle SCR’de yavaşlaması ve laminar akış karakteristiği gösterdiği de elde edilen bulgulardandır. Ayrıca akış hızının AB-SCR sisteminde düşük olması, daha önce de belirtildiği gibi sıcaklık-yoğunluk ilişkisinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.27 %85 yk için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde hız dağılımı

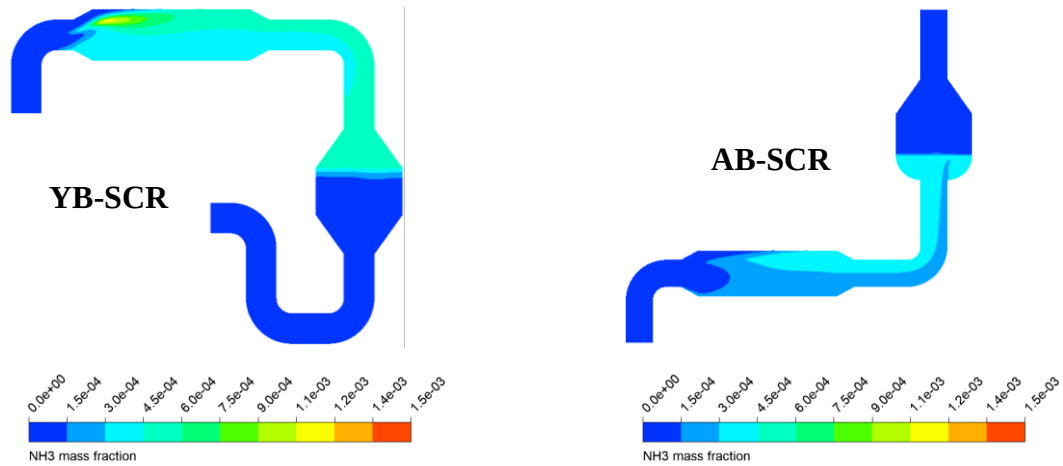
5.3.4 YB-SCR ve AB-SCR Sistemlerinde Kimyasal Bileşenlerin Dağılımı

SCR sistemlerinde kimyasal bileşenlerin sistem içinde dağılımları sistem performansının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Sistemlerde HNCO ve NH₃ dönüşüm performansının yanında sistem içerisindeki dağılımlarının belirlenmesi de önemlidir. Şekil 5.28, YB-SCR ve AB-SCR sistemleri için HNCO dağılımını göstermektedir. HNCO dönüşümünü sağlayan termoliz reaksiyonları ve sonrasında HNCO bileşenlerinin NH₃'e dönüşmesini sağlayan hidroliz reaksiyonlarının YB-SCR sisteminde daha verimli gerçekleştiği görülmektedir. UWS'nin parçalanmasında oluşan ilk ürünlerden biri HNCO bileşenidir. HNCO bileşenlerinin hız dağılımı ile paralellik gösterdiği ve karışım odasında kısmi olarak yoğunlaştığı görülmektedir. AB-SCR sisteminde ise HNCO bileşenlerinin sistem boyunca tamamen yok olmadığı belirlenen diğer bulgulardandır.



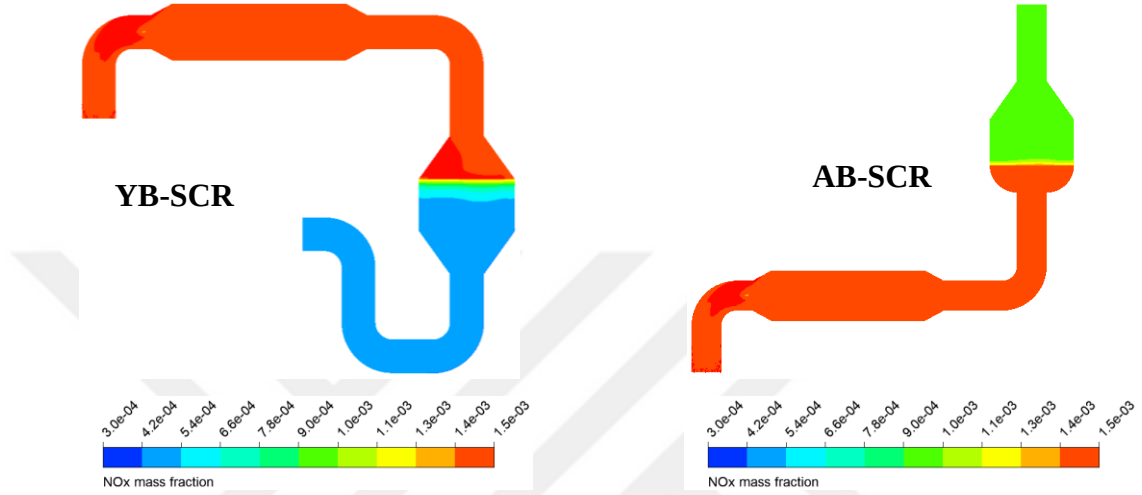
Şekil 5.28 %85 yük için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde H2CO dağılımı

H2CO bileşenlerinin SCR sisteminde azalarak yok olması hidroliz reaksiyonları ile sağlanmaktadır. Termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan NH_3 bileşenlerinin homojen olarak dağılması ve katalizörde reaksiyona girmesi NO_x bileşenlerinin azalmasında önemli bir etkidir. Şekil 5.29, YB-SCR ve AB-SCR sistemlerinde NH_3 dağılımını göstermektedir. Elde edilen bulgular, %85 motor yükünde 90 l/h UWS püskürtülmesi koşulları altında YB-SCR sisteminde oluşan NH_3 bileşeninin, AB-SCR sisteminde oluşan NH_3 bileşeninden daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca NH_3 bileşenlerinin dağılımı H2CO bileşenlerinin dağılımında olduğu gibi hız dağılımı ile paralellik göstermektedir.



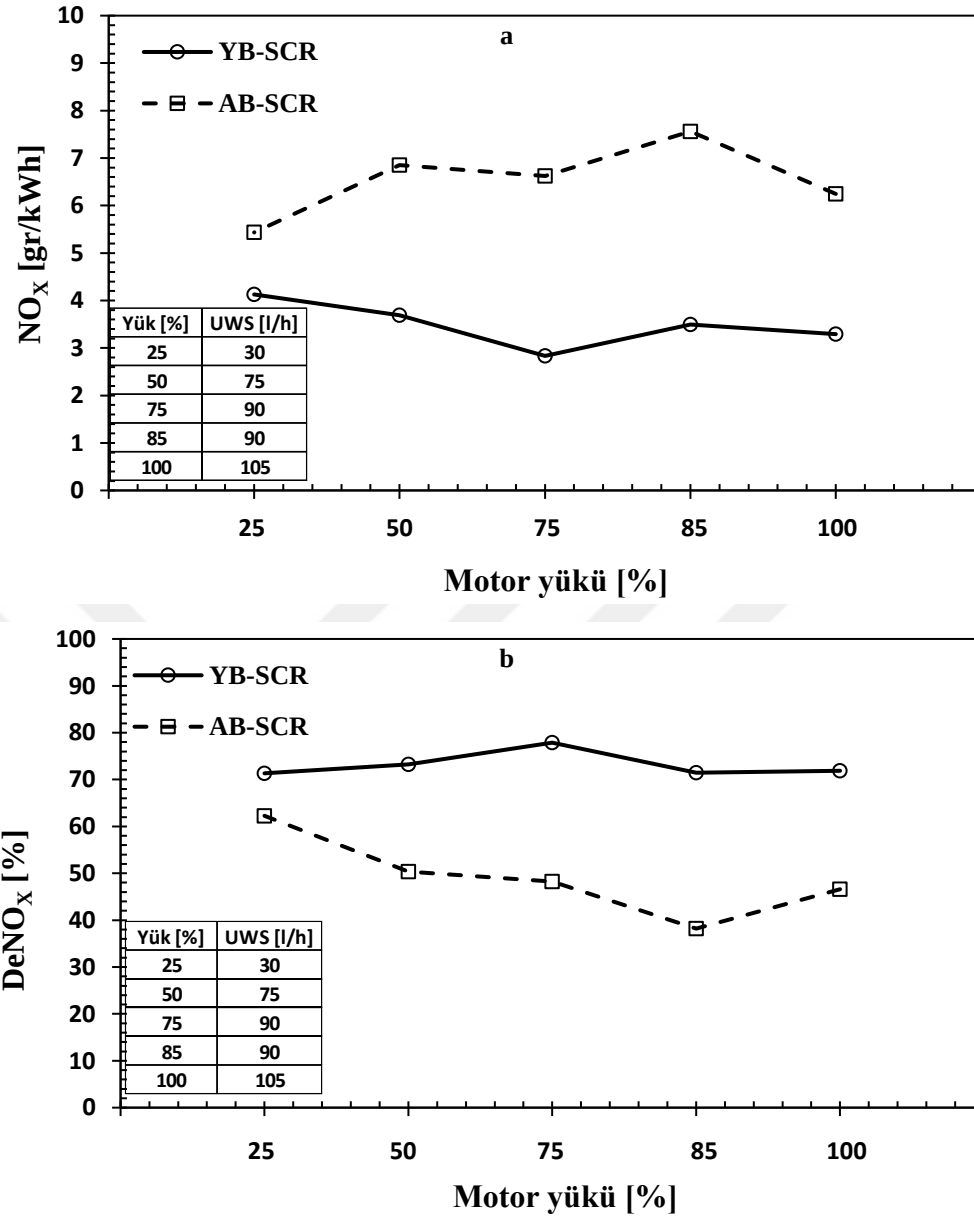
Şekil 5.29 %85 yük için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde NH_3 dağılımı

NO_x emisyonlarının SCR sisteminde dağılımı Şekil 5.30'da verilmiştir. NO_x emisyonları her iki sistem için de başlangıçta 1500 ppm olarak verilmiş ve SCR çıkışında YB-SCR sisteminin NO_x azaltma performansının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Her iki sistem içinde NO_x emisyonlarının azaltımının büyük bir bölümü SCR'de gerçekleşmiştir.



Şekil 5.30 %85 yük için AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde NO_x dağılımı

YB-SCR ve AB-SCR sistemlerinde farklı yük koşullarında gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları Şekil 5.31'de verilmiştir. Her bir yük koşulu için yapılan çalışmalarda, YB-SCR sistemi için NO_x emisyonları 3-4 gr/kWh aralığında değişirken, AB-SCR sisteminde bu oran 5-8 gr/kWh seviyelerindedir. Her iki sistem performansının birbirine en yakın olduğu yük koşulu %25 yük koşulu olarak belirlenmiştir. Bu yük koşulu için YB-SCR ve AB-SCR sistemleri arasındaki sıcaklık farkının diğer yük koşulları arasındaki sıcaklık farkından az olması, bu durumun en önemli sebebidir. Ayrıca YB-SCR sistemi NO_x azaltma performansı %80 seviyelerinde iken, AB-SCR sisteminde bu oran en fazla %60 seviyelerindedir.



Şekil 5.31 AB-SCR ve YB-SCR sistemlerinde NO_x performans parametreleri

5.4 Dört Zamanlı Gemi Dizel Motorlarında NO_x İndirgeme performansının İncelenmesi

Dört zamanlı gemi dizel motorlarında da iki zamanlı motorlarda olduğu gibi SCR sistem performans parametreleri bu bölümde belirlenmiştir. Tablo 5.4'te dört zamanlı gemi dizel motoru özelliklerini göstermektedir.

Tablo 5.4 Dört zamanlı dizel motor özellikleri

Motor özelliği	Birim	Değer
Motor tipi	-	MAN 9L32/44CR B5
Güç	kW	5400
Devir sayısı	rpm	750

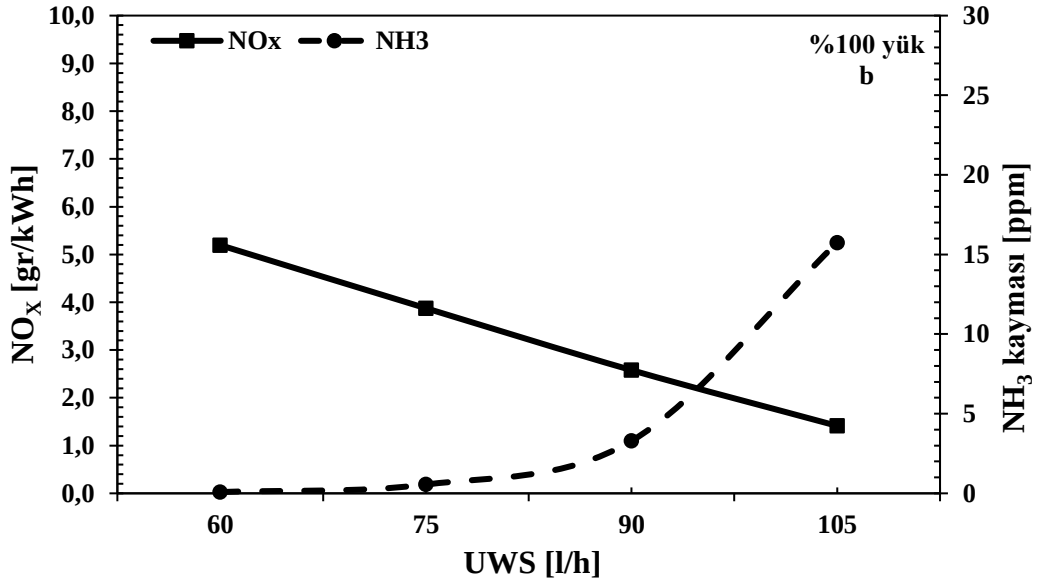
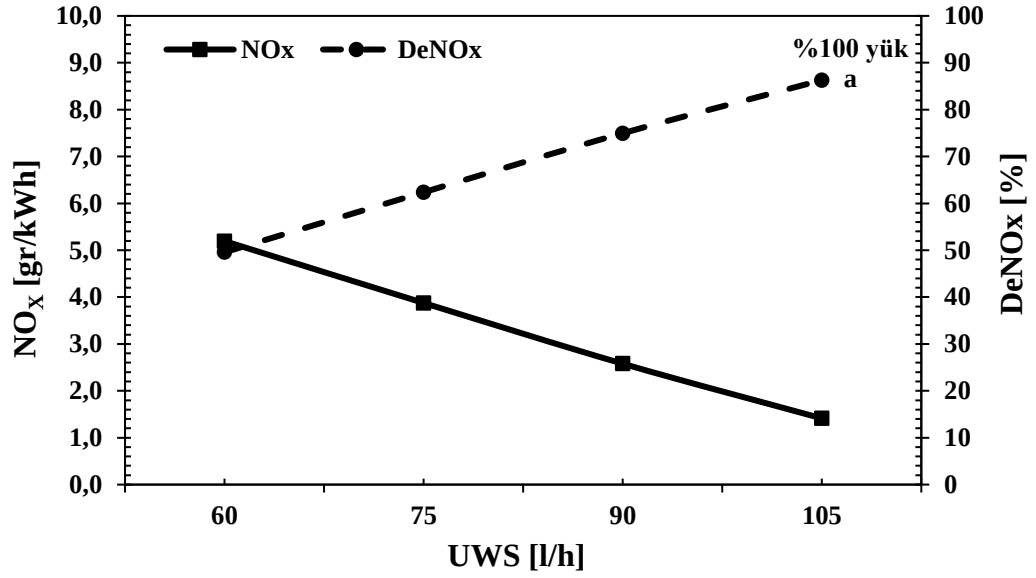
Tablo 5.4'te özellikleri belirtilen dört zamanlı dizel motor için SCR sistem analizlerinde kullanılan egzoz gazı özellikleri Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.5 Dört zamanlı dizel motor egzoz özellikleri

Motor Yüğü	Egzoz debisi (kg/s)	Egzoz Sıcaklığı (K)
100	10,03	582
85	8,55	586
75	7,53	597
50	5,88	594
25	2,8	645

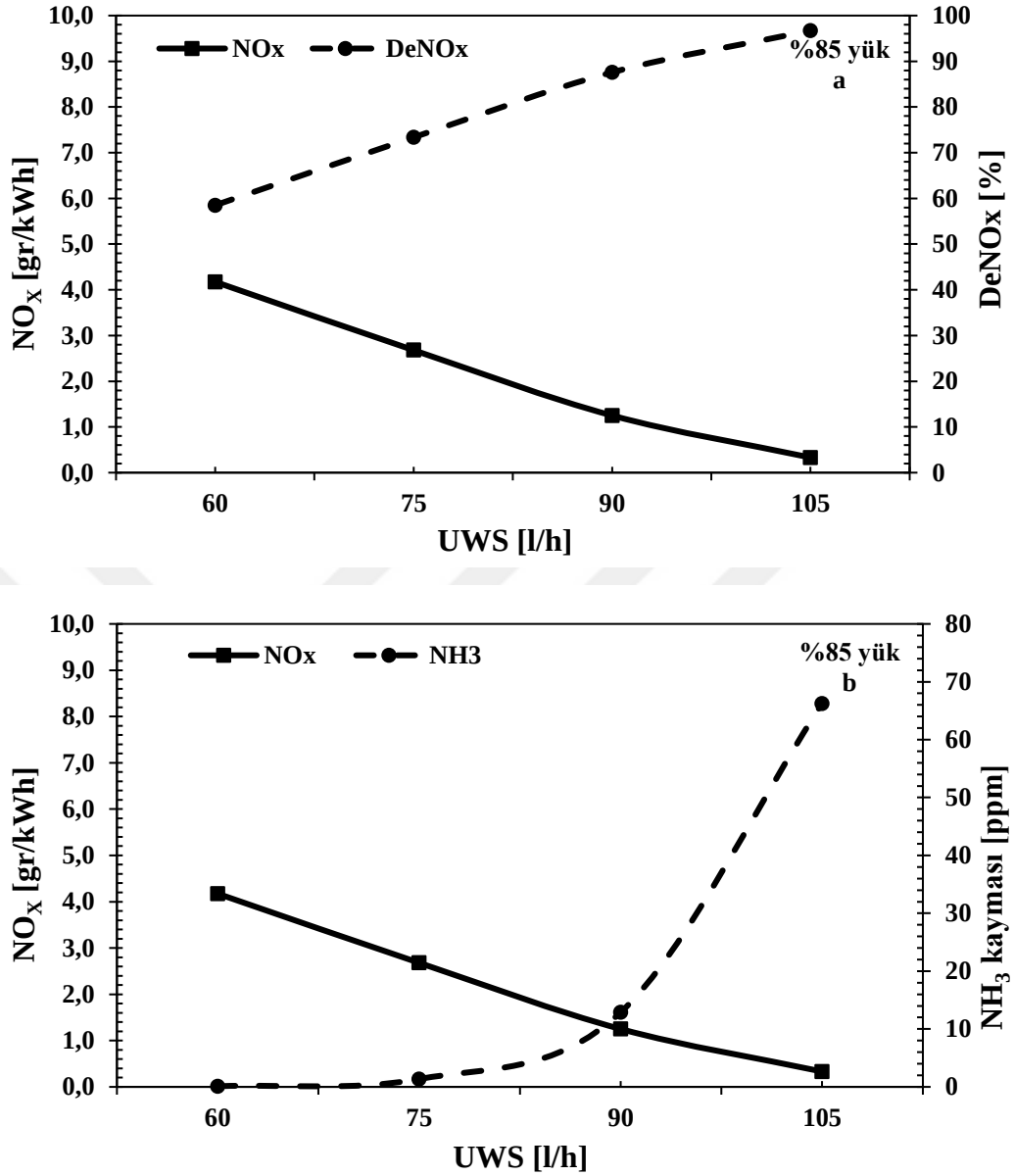
Dört zamanlı gemi dizel motoru AB-SCR sistemi ile aynı geometrik özelliklere sahip olup, Tablo 5.5'te verilen teknik özelliklere göre her bir yük durumu için püskürtülmesi gereken UWS miktarı gerçekleştirilen sayısal analizler ile belirlenmiştir.

Şekil 5.32, %100 yük koşulu için dört farklı UWS püskürtme miktarında NO_x emisyonlarını, DeNO_x oranını ve SCR sistem çıkışında oluşan NH₃ kayma miktarını göstermektedir. Belirtilen yük koşulu için, Şekil 5.32a'da 105 l/h UWS püskürtme miktarında NO_x emisyonu 1,41 gr/kWh iken, 60 l/h UWS püskürtme için bu değer 5,19 gr/kWh seviyelerindedir. 80,5 l/h UWS püskürtme miktarı, %100 yük koşulu için IMO Tier III gerekliliklerini sağlamaktadır. Bu değer içinde ortalama DeNO_x oranı %72 seviyelerindedir. Şekil 5.32b ise NH₃ kayma miktarını göstermektedir. NH₃ kayma miktarı, UWS miktarı 75 l/h'den sonra üstel olarak artmaktadır. 105 l/h UWS püskürtme miktarında NH₃ kayma değeri 15,7 ppm iken bu değer UWS püskürtme miktarının en az olduğu 60 l/h seviyelerinde yaklaşık sıfırdır.



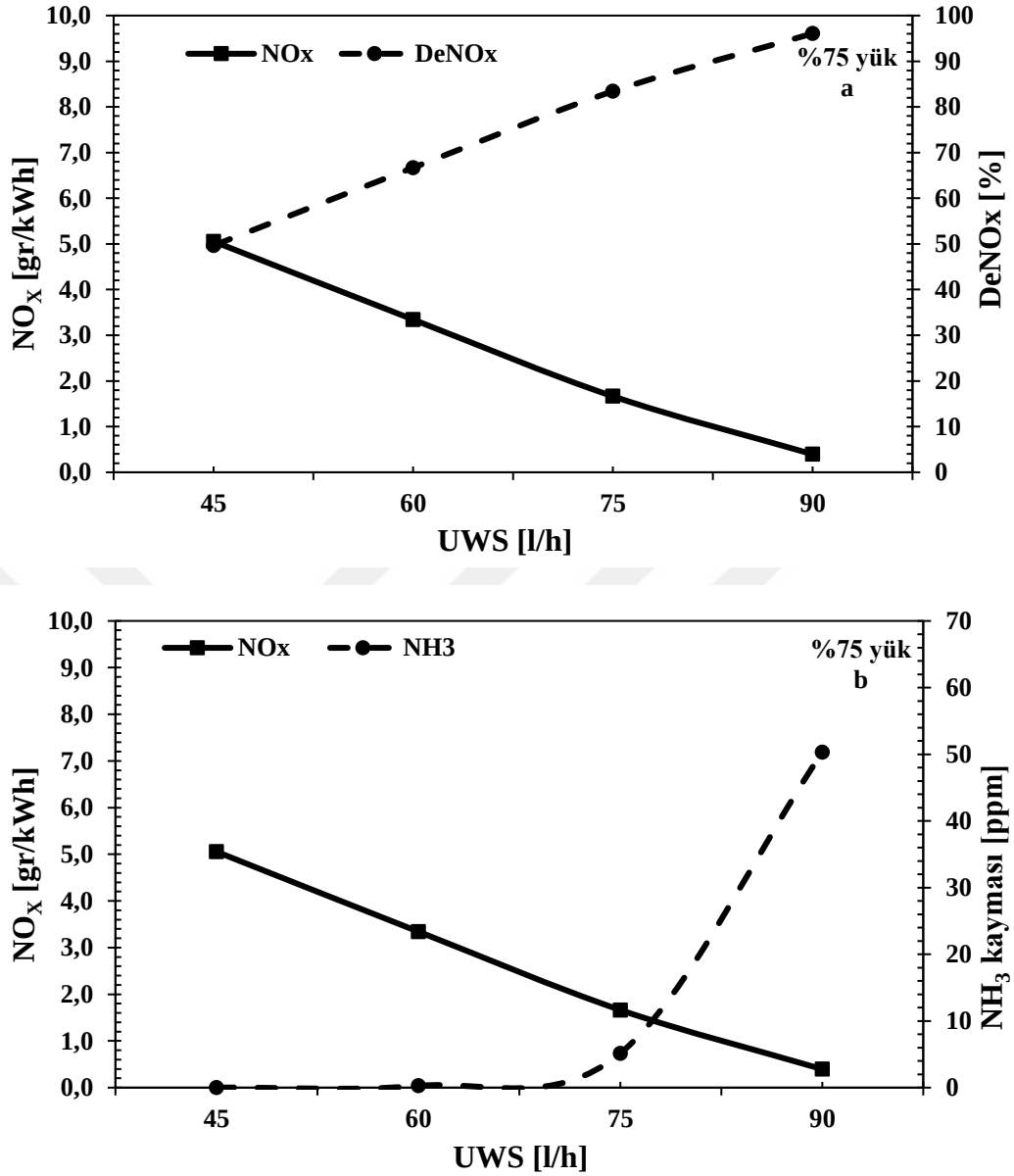
Şekil 5.32 %100 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO_x ve NH₃ bileşenlerinin değişimi

Şekil 5.33 dört zamanlı gemi dizel motorunda %85 yük koşulu için, UWS püskürtme miktarının NO_x ve NH₃ değişimine etkisini göstermektedir. Şekil 5.33a ise, dört farklı UWS püskürtme miktarı için NO_x değişimi ve DeNO_x oranını göstermektedir. IMO Tier III düzenlemesini 67,75 l/h UWS oranı ile karşılamaktadır. Şekil 5.33b ise NH₃ kayma değerini göstermektedir. 105 l/h UWS püskürtme miktarında NH₃ kayması 66 ppm olarak belirlenmiştir.



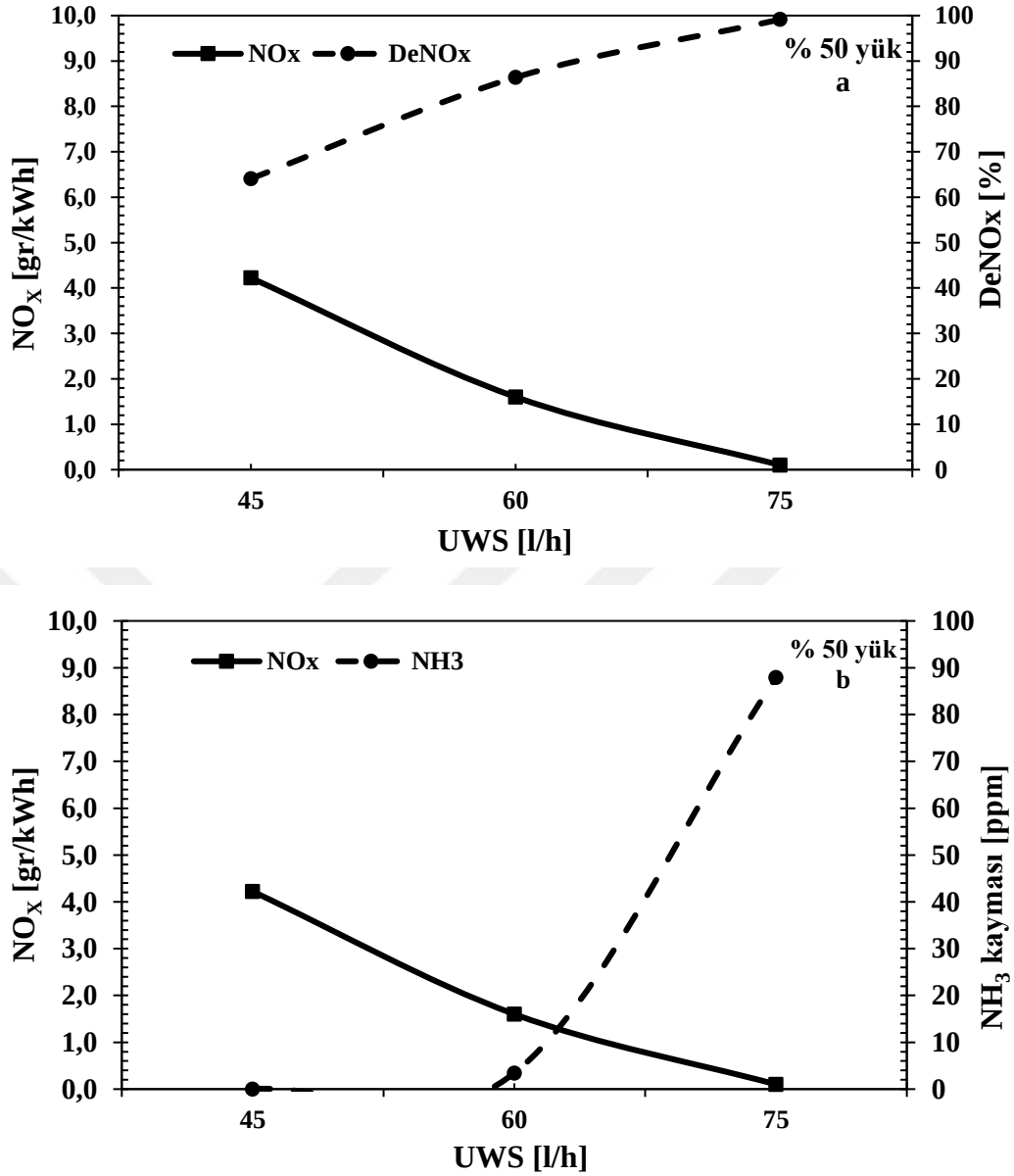
Şekil 5.33 %85 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO_x ve NH₃ bileşenlerinin değişimi

Şekil 5.34, %75 yük koşulu için UWS püskürtme miktarı ile NO_x, DeNO_x ve NH₃ kayma miktarını göstermektedir. %75 yük koşulları için UWS püskürtme miktarı 45, 60, 75 ve 90 l/h olarak belirlenmiş ve 60 l/h püskürtme miktarı için Tier III gerekliliklerini sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca şekil 5.34a’da belirtildiği üzere 90 l/h püskürtme miktarında DeNO_x oranı %100 değerine yaklaşmaktadır. Şekil 5.34b’de NH₃ kayma miktarı ise 75 l/h püskürtme miktarından sonra üstel bir şekilde artış göstermektedir.



Şekil 5.34 %75 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO_x ve NH₃ bileşenlerinin değişimi

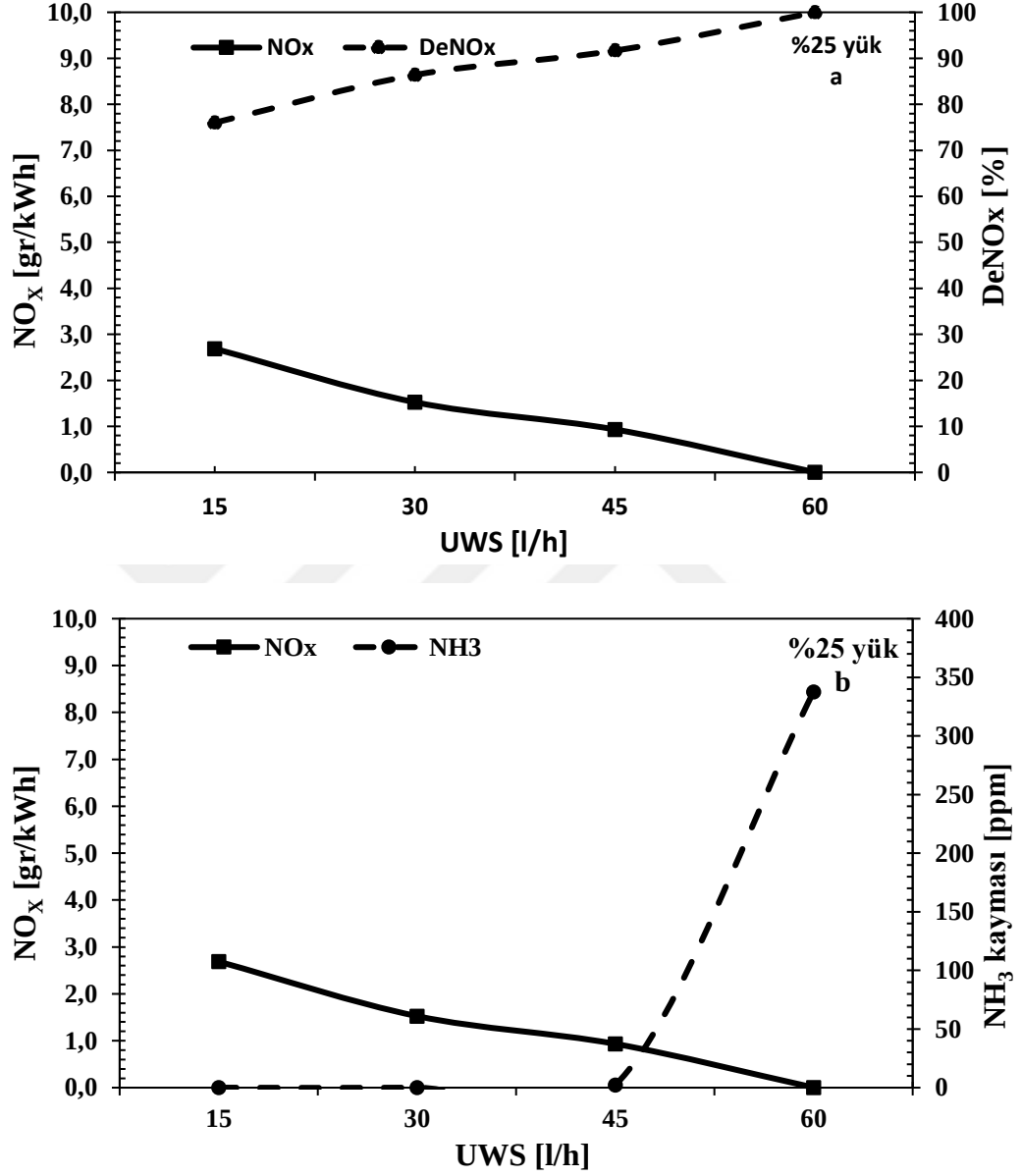
Şekil 5.35 %50 yük koşulu için dört zamanlı gemi dizel motorunda farklı UWS püskürtme miktarları için, NO_x emisyonları, NO_x azaltma performansı DeNO_x ve NH₃ kayma değerlerini ifade etmektedir. Şekil 5.35a NO_x emisyonları ve azaltma performansını ifade etmektedir. 50 l/h püskürtme miktarının Tier III gerekliliklerini karşıladığı görülmüştür. 75 l/h püskürtme miktarında, NO_x azaltma performansının %100 oranına yaklaştığı da belirlenen diğer bulgulardandır. Şekil 5.35b NH₃ kaymasını ifade etmektedir. 60 l/h UWS miktarından sonra NH₃ kayması üstel olarak artmaktadır.



Şekil 5.35 %50 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO_x ve NH₃ bileşenlerinin değişimi

Şekil 5.36 %25 yük koşulunda dört zamanlı gemi dizel motoru NO_x, DeNO_x ve NH₃ kayması miktarını göstermektedir. Şekil 5.36a, 15, 30, 45 ve 60 l/h UWS püskürtme miktarları için NO_x emisyonlarını ve NO_x emisyon azaltma performansını ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlar, Tier III düzenlemesinin karşılanması amacıyla %25 yük koşulu için yaklaşık 7 l/h UWS püskürtülmesi gerektiğini ortaya koymuştur. 60 l/h UWS miktarında NO_x emisyon değerlerinin de sifıra yaklaştığı belirlenmiştir. Şekil 5.36b ise, NH₃ kayma miktarını göstermektedir. Sistemde NH₃ kayması 45 l/h

UWS miktarından sonra başlamaktadır. 60 l/h püskürtme miktarlarında bu değer yaklaşık 350 ppm seviyelerindedir.



Şekil 5.36 %25 yük koşulu için dört zamanlı motorlarda UWS ile NO_x ve NH₃ bileşenlerinin değişimi

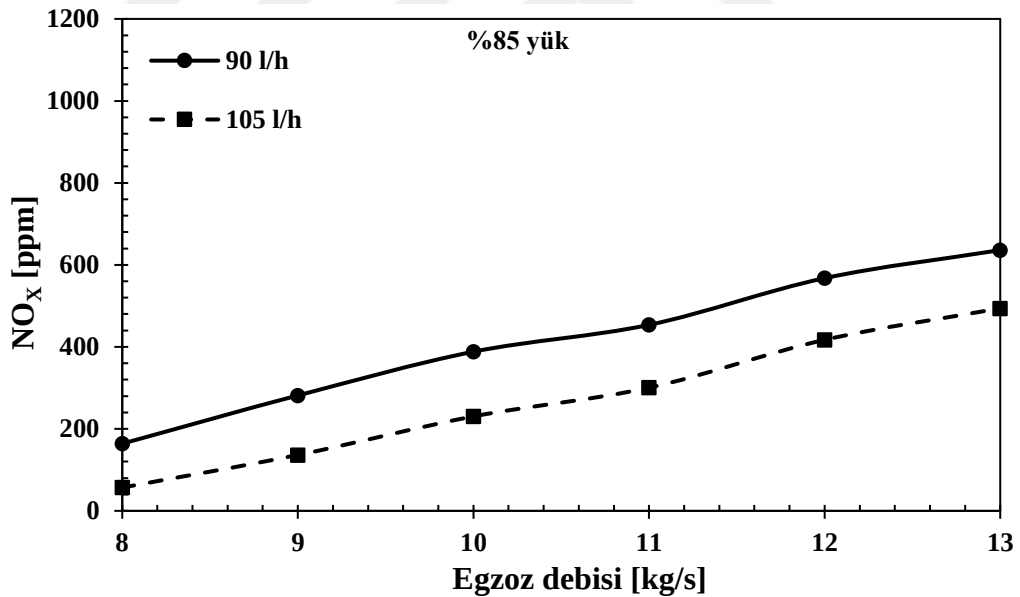
Dört zamanlı gemi dizel motorlarında, Tier III düzenlemesini sağlayan UWS püskürtme, SCR giriş ve çıkış NO_x emisyon miktarları da Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6 Dört zamanlı motor UWS oranları

Motor yükü [%]	UWS [l/h]	SCR giriş NO _x [gr/kWh]	SCR Çıkış NO _x [gr/kWh]
25	7	11,2	3,4
50	50	11,8	3,4
75	60	10	3,4
85	67,5	10,1	3,4
100	80,3	10,3	3,4

5.5 Egzoz Debisinin NO_x İndirgeme Performansına Etkisinin İncelenmesi

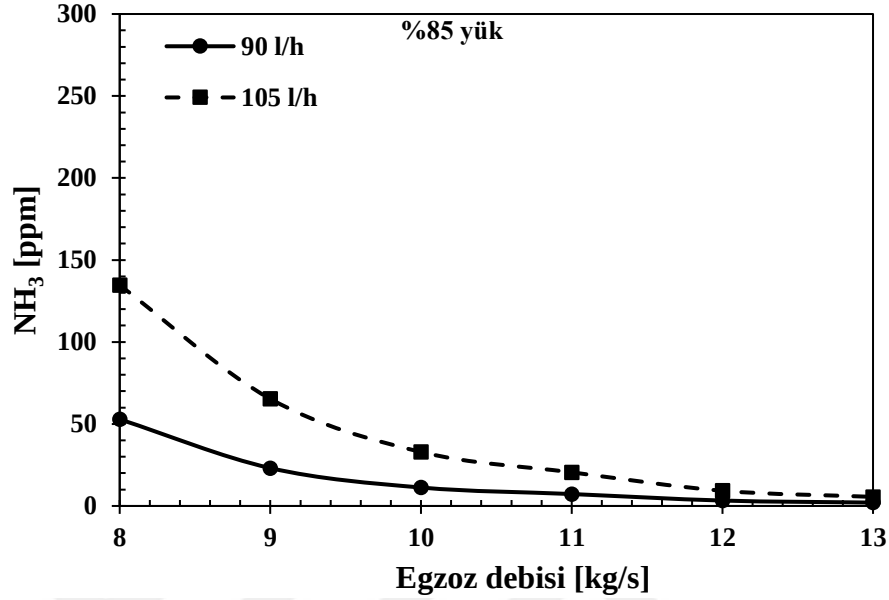
Birçok ticari gemide iki zamanlı gemi dizel motoru kullanılmaktadır. Dizel motorun gücüne bağlı egzoz miktarlarının değişiminin, NO_x emisyonlarına etkisi bu bölümde incelenmiştir. Yapılan parametrik çalışmalarda, egzoz akış hızı her bir koşul için sabit alınmıştır. Parametrik çalışmalar %85 yük koşulunda, 90 l/h ve 105 l/h UWS püskürtme miktarlarında yapılmıştır. Şekil 5.37 farklı egzoz debisi koşullarında, NO_x emisyon değişimini ifade etmektedir.



Şekil 5.37 %85 yük için YB-SCR egzoz debisi ile NO_x emisyonlarının değişimi

Artan püskürtme miktarı ile NO_x emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir. Ancak azalma oranı her iki püskürtme miktarı için de neredeyse aynı karakteristikte gerçekleşmiştir. Dolayısıyla farklı egzoz oranları için UWS miktarının belirlenmesi amacıyla bir matematiksel model geliştirilebilir. Artan egzoz debisi ile artan NO_x

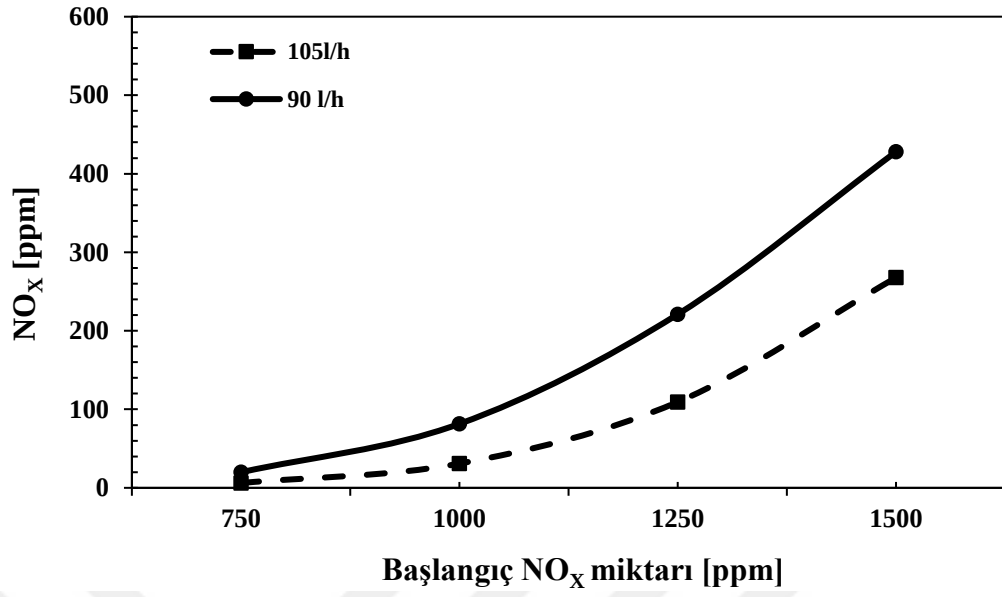
emisyonlarına rağmen, NH_3 kaymasını azaltmaktadır. Şekil 5.38, %85 YB-SCR egzoz debisi ile NH_3 emisyonlarının değişimini ifade etmektedir.



Şekil 5.38 %85 yük için YB-SCR egzoz debisi ile NO_x emisyonlarının değişimi

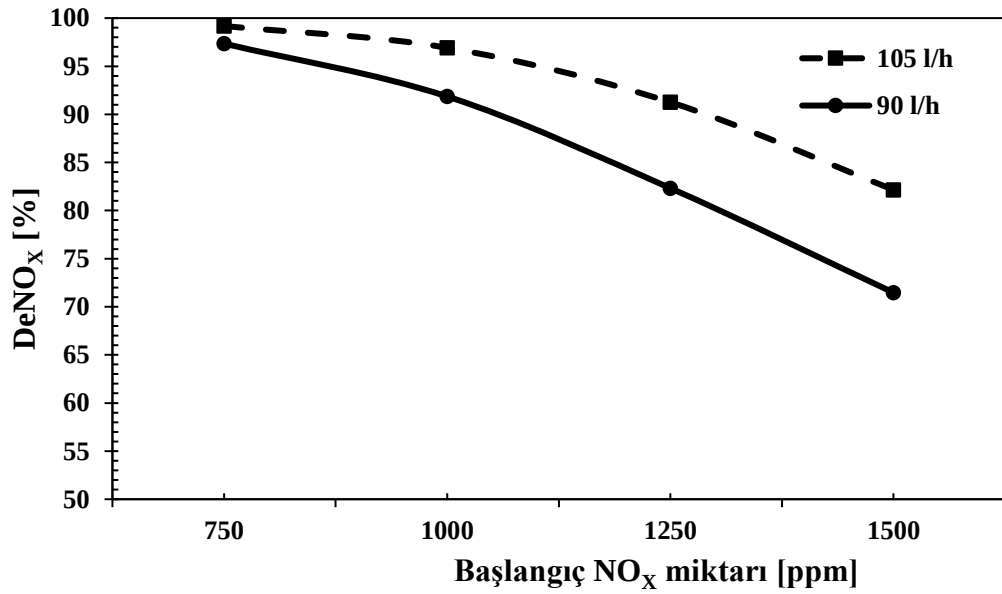
5.6 SCR Giriş NO_x Miktarının DeNO_x İndirgeme Performansına Etkisinin İncelenmesi

SCR giriş NO_x miktarının DeNO_x değerine etkisini incelemek amacıyla, motor egzoz bileşeninden başlangıçta 750, 1000, 1250 ve 1500 ppm olmak üzere dört farklı miktarda emisyon oluşturduğu kabul edilmiştir. Hesaplamalar 90 l/h ve 105 l/h olmak üzere iki farklı UWS püskürtme miktarı için yapılmıştır. Şekil 5.39 farklı SCR sistem giriş NO_x miktarları için SCR sistem çıkış NO_x emisyon miktarını göstermektedir. 750 ppm giriş NO_x emisyonu için 105 l/h UWS püskürtmede, çıkış NO_x miktarı yaklaşık 6,17 l/h ve 90 l/h UWS püskürtme için ise çıkış NO_x miktarı 19,86 ppm olarak bulunmuştur. Bu oran 1500 ppm giriş NO_x değeri için 90 l/h ve 105 l/h UWS püskürtme miktarları için sırasıyla 268 ve 428 ppm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.39 %85 yük için YB-SCR giriş NO_x değeri ile SCR çıkış NO_x emisyonlarının değişimi

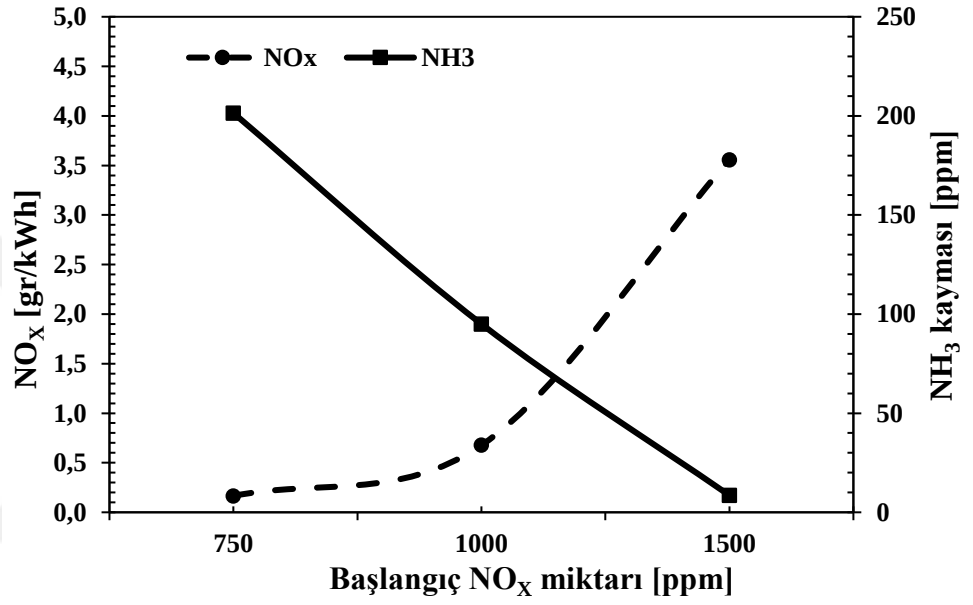
Şekil 5.40 SCR giriş NO_x emisyon değerleri ile azaltma performansının değişimini ifade etmektedir. Artan NO_x giriş değerinin DeNO_x değerini azalttığı da elde edilen bulgulardandır.



Şekil 5.40 %85 yük için YB-SCR giriş NO_x değeri ile DeNO_x değişimi

SCR sistemlerinde NO_x emisyonlarının azaltılması sırasında gereğinden fazla UWS püskürtülmesi ya da katalizörde yeterli indirgenmenin sağlanamaması NH₃

kayma miktarını arttırmaktadır. Şekil 5.41, SCR girişinde farklı NO_x oranları için NO_x emisyonları ve SCR çıkışında oluşan NH₃ kayma miktarını göstermektedir. Artan SCR sistem giriş NO_x emisyonları ile SCR sistem çıkış NO_x emisyonlarının gr/kWh cinsinden artışı gösterilmiştir. Ayrıca NH₃ kayma miktarı ise artan NO_x emisyonları ile azalmıştır. Bu durum sabit UWS püskürtme miktarının sabit olması ve düşük NO_x giriş koşullarında fazla olmasından kaynaklı olarak NH₃ kaymasını arttırmaktadır.



Şekil 5.41 %85 YB-SCR giriş NO_x değeri ile NO_x ve NH₃ kayması değişimi

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Uluslararası denizcilik örgütü IMO tarafından MARPOL Ek VI kapsamında, gemilerden kaynaklı NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla sınırlamalar getirilmiştir. Getirilen sınırlamaların karşılanması amacıyla gemilerde çeşitli emisyon azaltma teknikleri uygulanmaktadır. Bu tekniklerden NO_x azaltma performansı açısından en yüksek verim alınan sistemlerden biri de seçici katalitik indirgemedir. SCR sistemleri, egzoz gazına üre su çözeltisi püskürtülmesi ile egzoz gazındaki NO_x emisyonları azaltmaktadır. %40 üre ve %60 sudan oluşan UWS'den ilk olarak su, egzoz gazı ile karşılaşarak yüksek sıcaklık nedeniyle buharlaşmaktadır. Daha sonra termoliz ve hidroliz reaksiyonları ile oluşan NH_3 , katalizörlerde NO_x emisyonları ile reaksiyona girerek su buharı ve serbest azota dönüşmektedir. Bu çalışmada, SCR sistem parametrelerinin NO_x emisyonları azaltma performansı üzerindeki etkisi, iki ve dört zamanlı gemi dizel motorları için beş farklı motor yükünde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile parametrik olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan sınır koşulları, deneysel literatür verileri ile doğrulanmış ve bu sınır koşullarında SCR sistem geometrik modeli için en uygun tasarım boyutları belirlenmiştir. NO_x azaltma performansı, belirlenen en uygun SCR tasarım boyutlarında incelenmiştir.

Sayısal model sınır koşulları, literatürden alınan deney sonuçları ile tezin üçüncü bölümünde karşılaştırılmıştır. Deney verileri, altı farklı UWS püskürtme miktarında 592 K egzoz sıcaklığı ve 28 m/s egzoz hızı için yapılmıştır. Sayısal ile deneysel çalışma sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu ve en yüksek hata oranının %3,4 olduğu belirlenmiştir.

Doğrulanmış SCR sayısal model sınır koşullarında, SCR sistem boyu, sistem çapı, SCR çıkış geometrisi, katalizör aktivasyon enerjisi ve karışım odası konumu ve boyu için parametrik çalışmalar dördüncü bölümde yapılmıştır. SCR, gözenekli ortam modeli nedeniyle basınç düşümünün en yüksek olduğu kısımdır. Dolayısıyla en uygun SCR boyunun belirlenmesi, basınç düşümünün azaltılması için önemli bir tasarım

parametresidir. En yüksek NO_x indirgeme performansı ve en düşük NH_3 kaymasını sağlayan SCR boyu, 1200 mm olarak belirlenmiştir. SCR sistem çapı, hız değişimine bağlı olarak, sistemde gerçekleşen reaksiyonların verimliliğini etkilemektedir. Beş farklı sistem çapı için gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda NO_x azaltma performansı, sistem basınç düşümü ve NH_3 kayması dikkate alındığında en uygun sistem çapının 780 mm, karışım odası çapının 1320 mm ve SCR çapının 2200 mm olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 780 mm sistem çapı için belirlenen 30-45 m/s egzoz akış hızı aralığında hidroliz, termoliz ve SCR reaksiyonlarının en verimli şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

SCR sistemlerinde basınç düşümü, sistem geometrisi ile doğrudan ilişkilidir. SCR çıkış formunun sistem performansına etkisini araştırmak amacıyla konik ve küresel olmak üzere iki farklı geometri üzerinde yapılan sayısal çalışmalarda, konik geometrili SCR çıkış formunun, küresel forma oranla yaklaşık 200 Pa daha az basınç düşümüne neden olduğu görülmüştür. Uygun katalizör seçimi, NO_x emisyonlarının istenilen seviyelere indirilmesini sağlayan temel unsurdur. Çalışmada, farklı katalizör aktivasyon enerji değerleri için, NO_x azaltma performansı ve NH_3 kayma değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, $2 \cdot 10^6$ kJ/kmol aktivasyon enerjisinden daha yüksek aktivasyon enerjisine sahip katalizörler için, SCR sistem performansının azaldığını göstermiştir.

SCR sistemlerinde püskürtülen UWS'nin buharlaşma, termoliz ve hidroliz reaksiyonlarının etkin şekilde gerçekleşmesi amacıyla en uygun karışım odası konumu ve uzunluğu yapılan sayısal çalışmalar ile belirlenmiştir. Karışım odası konumu ve uzunluğunun belirlenmesinde beş farklı boyut için sayısal çalışmalar yapılmış, H₂CO ve NH_3 'ün sistem boyunca değişimi parametrik olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, H₂CO bileşenlerinin SCR girişinde NH_3 bileşenlerine dönüşmesini sağlayan en uygun karışım odası uzunluğunu ve konumunu ifade eden, M_o , L_o ve M_s ölçüleri sırasıyla 1800 mm, 2800 mm ve 2900 mm olarak belirlenmiştir.

En uygun SCR sistem tasarım boyutlarında, SCR sistem performans parametreleri beşinci bölümde incelenmiştir. SCR sisteminde NO_x azaltılmasında kullanılan temel

değişken püskürtülen UWS miktarıdır. Farklı oranlarda püskürtülen UWS miktarının, beş farklı motor yükü için NO_x emisyon azaltma performansına ve NH₃ kaymasına etkisi araştırılmış, her bir yük koşulu için IMO Tier III NO_x emisyon sınırlandırmasını sağlayabilecek UWS miktarı belirlenmiştir. Artan UWS miktarının NO_x emisyonlarını azalttığı, buna karşılık NH₃ kayma miktarını arttırdığı belirlenmiştir. YB-SCR sistemlerinde NO_x emisyonlarının istenilen seviyelere kadar azaltılması amacıyla motor çıkışındaki egzoz gazlarının bir kısmı doğrudan türbinde genişlemekte, bir kısmı ise SCR sisteminden sonra türbine aktarılmaktadır. SCR sistemlerinde bu işlem RBV açıklık oranı ile ayarlanmaktadır. Çalışmada, %0, %10, %20, %30 ve %40 RBV açıklık oranlarında NO_x emisyonu, NH₃ kayması ve basınç düşümü parametrik olarak belirlenmiştir. Artan RBV açıklık oranı ile NO_x emisyon azaltma oranı ve basınç düşüm miktarı azalırken, NH₃ kayma miktarı artmaktadır. IMO Tier III gerekliliklerini sağlayan RBV açıklık oranları, her bir yük durumu için ayrı ayrı belirlenmiştir.

Beşinci bölümde iki zamanlı gemi dizel motoru YB-SCR ve AB-SCR sistem performans karşılaştırmasında, SCR sistemi boyunca HNCO, NH₃, NO_x, DeNO_x, hız ve basınç düşümü değişimi ile bu parametrelerin sistem içerisindeki değişimleri incelenmiştir. YB-SCR sisteminde egzoz gazı sıcaklığı etkisi ile HNCO miktarı, SCR girişinde azalırken, NH₃ miktarı artmaktadır. YB-SCR sisteminde, NO_x azaltma performansı, yüksek egzoz gazı sıcaklığından dolayı AB-SCR sisteminden daha yüksektir. YB-SCR ve AB-SCR sistem performansları karşılaştırıldığında ise düşük yük durumlarında YB-SCR ve AB-SCR sistemleri NO_x azaltma performansları birbirine yakın iken, yüksek yük durumlarında AB-SCR sistemlerinin iki zamanlı gemi dizel motorları için yeterli derecede NO_x azaltma performansına sahip olmadığı ve IMO Tier III gerekliliklerini karşılayamadığı belirlenmiştir.

Gemi dizel motorlarında termoliz, hidroliz ve SCR reaksiyonlarının en etkili şekilde gerçekleşmesi, egzoz gazlarının sistem boyunca geçirdiği zaman ile doğrudan ilişkilidir. Uygun hız seçimi, belirtilen reaksiyonların en etkili şekilde gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, aynı hız koşulları için farklı egzoz akış oranlarında, SCR sistem NO_x azaltma performansı değerlendirilmiştir. Artan egzoz akış oranlarında, aynı miktar UWS miktarı için NO_x azaltma miktarı doğrusal olarak

azalmıştır. Çalışmada ayrıca, farklı giriş egzoz NO_x miktarları için NO_x azaltma miktarı da belirlenmiştir. %85 yük koşulu için 90 l/h ve 105 l/h UWS püskürtme miktarlarında, 750 ppm, 1000 ppm, 1250 ppm ve 1500 ppm NO_x giriş koşulları için SCR sisteminin NO_x azaltma performansı ve NH₃ kayma miktarı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda artan giriş NO_x miktarına karşılık, çıkış NO_x miktarı üstel bir şekilde artmaktadır. Ayrıca NH₃ kayması artan giriş NO_x miktarı ile üstel olarak azalmıştır. Böylece gemi dizel motorlarında kullanılan diğer NO_x azaltma teknikleri ile SCR sisteminin birlikte kullanılması durumunda gerekli NO_x miktarı, giriş NO_x koşullarına göre belirlenecektir. Böylece Tez çalışmasının herhangi bir dizel motorda uygulanacak SCR sistemleri için en uygun sistem parametrelerinin belirlenmesi açısından mühendisliğe katkı sunacağı beklenmektedir.

Gelecek çalışmalarda, gemi dizel motorlarından kaynaklı NO_x emisyonlarının istenilen seviyelere getirilmesi amacıyla, egzoz hattı üzerinde farklı kontrol teknikleri ile sistem tasarımı yapılabilir. Sistem üzerinde eş zamanlı olarak farklı noktalardan alınacak ölçümler ile, SCR sisteminin operasyonu kontrol edilebilir, geliştirilecek yapay zekaya sahip akıllı sistemler ile SCR sistem performansı artırılabilir.

SCR sistemlerinde indirgeme reaksiyonları tanımlanırken, SO_x bileşenlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. SO_x bileşenleri, termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan NH₃ bileşenleri ile tepkimeye girerek istenmeyen zararlı gazlar oluşturmaktadır. Gelecekte, egzoz sıcaklığı ve uygun UWS miktarları ile, istenmeyen gazların azaltılması ya da yok edilmesi amacıyla yeni çalışmalar yapılabilir. Ayrıca Daha çevreci yakıtların kullanım durumuna göre SCR sistem maliyetinin karşılaştırması da yapılarak en uygun emisyon azaltma tekniği belirlenebilir.

IMO, NO_x emisyonlarında olduğu gibi, SO_x ve CO₂ emisyonlarının azaltılması amacıyla da düzenlemeler getirmiştir. Gemilerde bu emisyonların azaltılması amacıyla kullanılacak olan scrubber ve karbon yakalama sistemlerinin SCR sistemleri ile uyumlu olarak işletilmesi önemlidir. SCR sisteminin, SO_x emisyon kısıtlarını karşılayan scrubber sistemleri ve karbon yakalama sistemleri ile kullanıldığı durumlar için, en uygun sistem yerleşimi ve performans parametreleri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Abu-Ramadan, E., Saha, K. ve Li, X. (2011). Modeling the depleting mechanism of urea-water-solution droplet for automotive selective catalytic reduction systems. *AIChE Journal*, 57(11), 3210–3225. doi:10.1002/aic.12523
- Aditya Wardana, M. K., Hyun, J. ve Lim, O. (2019). A study of urea injection timing to predict the NO_x conversion in SCR systems. *Energy Procedia*, 158(2018), 1942–1948. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.449
- Ağbulut, Ü., Sarıdemir, S. ve Albayrak, S. (2019). Experimental investigation of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel–biodiesel–alcohol blends. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(9). doi:10.1007/s40430-019-1891-8
- Ansys. (2015). *Ansys Fluent Theory Guide*. Ansys 16.2 Documentation, (July).
- Ayhan, V. (2009). *Bir dizel motoruna buhar enjeksiyonunun NO_x ve is emisyonlarına etkisinin araştırılması* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Aytav, E. ve Kocar, G. (2013). Biodiesel from the perspective of Turkey: Past, present and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 335–350. doi:10.1016/j.rser.2013.04.018
- Baik, J. H., Yim, S. D., Nam, I. S., Mok, Y. S., Lee, J. H., Cho, B. K. ve Oh, S. H. (2006). Modeling of monolith reactor washcoated with CuZSM5 catalyst for removing NO from diesel engine by urea. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(15), 5258–5267. doi:10.1021/ie060199+

- Baleta, J., Martinjak, M., Vujanović, M., Pachler, K., Wang, J. ve Duić, N. (2017). Numerical analysis of ammonia homogenization for selective catalytic reduction application. *Journal of Environmental Management*, 203, 1047–1061. doi:10.1016/J.JENVMAN.2017.04.103
- Bayramoğlu, K. (2018). *HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemiyle gemi dizel motorlarında yanma analizi* [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Bayramoğlu, K. ve Nuran, M. (2020). Analyzing the effect of fuel injection timing and injection duration on performance and emissions in diesel engines. *Journal of ETA Maritime Science*, 8(1), 38–52. doi:10.5505/jems.2020.99705
- Bayramoğlu, K., Yılmaz, S. ve Kaya, K. D. (2019). Numerical and theoretical thermal analysis of ship provision refrigeration system. *Journal of ETA Maritime Science*, 7(2), 137–149. doi:10.5505/jems.2019.30922
- Bayramoğlu, K., Yılmaz, S. ve Kaya, K. D. (2019). Numerical investigation of valve lifts effects on performance and emissions in diesel engine. *International Journal of Global Warming*, 18(3–4), 287–303. doi:10.1504/IJGW.2019.101088
- Bennett, S. (2009). *Modern Diesel Technology: Diesel Engines*. Modern diesel technology series. Cengage Learning. <https://books.google.com.tr/books?id=iJ6P4Q6UCPIC> adresinden erişildi.
- Birkhold, F., Meingast, U., Wassermann, P. ve Deutschmann, O. (2006). Analysis of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNOx-systems: modeling of two-phase flow and spray/wall-interaction. *SAE International*. doi:10.4271/2006-01-0643
- Böckmann, E. ve Steen, S. (2016). Calculation of EEDI weather for a general cargo vessel. *Ocean Engineering*, 122, 68–73. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.06.007

- Bulushev, D. A., Kiwi-minsker, L. ve Renken, A. (2002). N₂O decomposition over Fe/ZSM-5: effect of high-temperature calcination and steaming. *Catalysis Letters*, 81(3–4), 205–212.
- Cao, E. ve Jiang, K. (2016). Adaptive unscented kalman filter for input estimations in diesel-engine selective catalytic reduction systems. *Neurocomputing*, 205, 329–335. doi:10.1016/j.neucom.2016.03.065
- Caton, J. A. (2015). *An introduction to thermodynamic cycle simulations for internal combustion engines*. Wiley.
- Cengel, A. Y. ve Boles, M. A. (2012). *Thermodynamics: An engineering approach*. 8. Baskı (C. 53). McGraw-Hill
- Chen, L., Yip, T. L. ve Mou, J. (2018). Provision of emission control area and the impact on shipping route choice and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 280–291. doi:10.1016/j.trd.2017.07.003
- Chen, Y. ve Lv, L. (2015). Design and evaluation of an Integrated SCR and exhaust Muffler from marine diesels. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), 505–519. doi:10.1007/s00773-014-0302-1
- Chiang, C. H., Raju, M. S. ve Sirignano, W. A. (1992). Numerical analysis of convecting, vaporizing fuel droplet with variable properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35(5), 1307–1324. doi:10.1016/0017-9310(92)90186-V
- Choi, C., Sung, Y., Choi, G. M. ve Kim, D. J. (2015). Numerical analysis of NO_x reduction for compact design in marine urea-SCR system. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(6), 1020–1034. doi:10.1515/IJNAOE-2015-0071

COMSOL Multiphysics. (15 Ocak 2022). *Porous media flow module*.
<https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.porous/IntroductionToPorousMediaFlowModule.pdf>

Corbett, J. J. ve Fischbeck, P. S. (2002). Commercial marine emissions and life-cycle analysis of retrofit controls in a changing science and policy environment. *Naval Engineers Journal*, 114(1), 93–106. doi:10.1111/j.1559-3584.2002.tb00113.x

Coskun, C., Oktay, Z. ve Ilten, N. (2009). A new approach for simplifying the calculation of flue gas specific heat and specific exergy value depending on fuel composition. *Energy*, 34(11), 1898–1902. doi:10.1016/j.energy.2009.07.040

D’Agosto, M. de A. (2019). Air pollutant and greenhouse gas emissions (GHG). *Transportation, Energy Use and Environmental Impacts*. doi:10.1016/b978-0-12-813454-2.00006-4

Das, M. K., Mukherjee, P. P. ve Muralidhar, K. (2018). *Mechanical engineering series modeling transport phenomena in porous media with applications*. Springer

Doğrul, A. (2015). *Gemi direnci ve serbest yüzey deformasyonlarının deneysel ve sayisal olarak incelenmesi* [Doktora Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Eichelbaum, M., Farrauto, R. J. ve Castaldi, M. J. (2010). The impact of urea on the performance of metal exchanged zeolites for the selective catalytic reduction of NO_x. Part I. Pyrolysis and hydrolysis of urea over zeolite catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 97(1–2), 90–97. doi:10.1016/j.apcatb.2010.03.027

Fenimore, C. P. (1976). Reactions of fuel-nitrogen in rich flame gases. *Combustion and Flame*, 26(C), 249–256. doi:10.1016/0010-2180(76)90075-4

Ferguson, C. R. (1985). *International combustion engines; Applied thermosciences*. Wiley

- Foteinos, M. I., Christofilis, G. I. ve Kyrtatos, N. P. (2020). Response of a direct-drive large marine two-stroke engine coupled to a selective catalytic reduction exhaust aftertreatment system when operating in waves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 234(3), 651–667. doi:10.1177/1475090219899543
- Foteinos, M. I., Konstantinidis, S. K., Kyrtatos, N. P. ve Busk, K. V. (2019). Simulation of the transient thermal response of a high pressure selective catalytic reduction aftertreatment system for a Tier III two-stroke marine diesel engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 141(7). doi:10.1115/1.4042131
- Gieshoff, J., Pfeifer, M., Schäfer-Sindlinger, A., Spurk, P. C., Garr, G., Leprince, T. ve Crocker, M. (2001). Advanced urea SCR catalysts for automotive applications. *SAE Technical Papers*, 110, 430–437. doi:10.4271/2001-01-0514
- Gülmez, Y. ve Özmen, G. (2021). Effects of exhaust backpressure increment on the performance and exhaust emissions of a single cylinder diesel engine. *Journal of ETA Maritime Science*, 9(3), 177–191. doi:10.4274/jems.2021.25582
- Guo, F., Duan, S. ve Huang, H. (2019). SCR System design of Wartsila 4L20 diesel engine. 2019 Chinese Automation Congress (CAC2019) içinde, Chinese Automation Congress (ss. 4057–4061).
- Guo, Y., Deng, Y., Zhang, J., Shen, Y. ve Wilson, C. (2017). *Experimental and numerical analysis of NOx reduction in marine urea-SCR system*. 2017 4th International Conference On Information, Cybernetics And Computational Social Systems (ICCSS) içinde (ss. 450–455).
- Hao, J., Yu, W., Lu, P., Zhang, Y. ve Zhu, X. (2015). The effects of Na/K additives and flyash on NO reduction in a SNCR process. *Chemosphere*, 122(x), 213–218. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.11.055

- He, Y., Bayly, A. E. ve Hassanpour, A. (2018). Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows. *Powder Technology*, 325, 620–631. doi:10.1016/j.powtec.2017.11.045
- IMO. (2020a). *Emission control areas (ECAs) designated under MARPOL Annex VI*. [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx).
- IMO. (2020b). *International convention for the prevention of pollution from Ships*. [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx#:~:text=The%20International%20Convention%20for%20the,2%20November%201973%20at%20IMO](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx#:~:text=The%20International%20Convention%20for%20the,2%20November%201973%20at%20IMO).
- IMO. (2020c). *Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13*. [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx).
- Jabłońska, M., Góra-marek, K., Grilc, M., Bruzzese, P. C., Poppitz, D., Pyra, K. ve Gläser, R. (2021). Effect of textural properties and presence of co-cation on nh₃-scr activity of cu-exchanged zsm-5. *Catalysts*, 11(7), 1–27. doi:10.3390/catal11070843
- Jang, J., Na, S., Roh, H., Ahn, S. ve Choi, G. (2021). Spraying and mixing characteristics of urea in a static mixer applied marine SCR system. *Energies*, 14(18). doi:10.3390/en14185788
- Jang, J. ve Park, H. (2016). Numerical study on urea spraying and mixing characteristics with application of static mixer in marine scr system. *Transactions of The Korean Society of Mechanical Engineers B*, 40(7), 429–434. doi:10.3795/KSME-B.2016.40.7.429

- Jia, C., Gao, J., Huang, K. W., Jose, V., Thepsithar, P. ve Lee, J. M. (2021). Selective catalytic reduction of NO_x in marine engine exhaust gas over supported transition metal oxide catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 414(x), 128794. doi:10.1016/j.cej.2021.128794
- Jiang, K., Cao, E. ve Wei, L. (2016). NO_x sensor ammonia cross-sensitivity estimation with adaptive unscented Kalman filter for Diesel-engine selective catalytic reduction systems. *Fuel*, 165(x), 185–192. doi:10.1016/j.fuel.2015.10.019
- Jung, Y., Pyo, Y., Jang, J., Woo, Y., Ko, A., Kim, G., ... Cho, C. (2022). Nitrous oxide in diesel aftertreatment systems including DOC, DPF and urea-SCR. *Fuel*, 310(PC), 122453. doi:10.1016/j.fuel.2021.122453
- Kaario, O. T., Vuorinen, V., Zhu, L., Larmi, M. ve Liu, R. (2017). Mixing and evaporation analysis of a high-pressure SCR system using a hybrid LES-RANS approach. *Energy*, 120, 827–841. doi:10.1016/J.ENERGY.2016.11.138
- Kamasamudram, K., Currier, N. W., Chen, X. ve Yezerets, A. (2010). Overview of the practically important behaviors of zeolite-based urea-SCR catalysts, using compact experimental protocol. *Catalysis Today*, 151(3–4), 212–222. doi:10.1016/j.cattod.2010.03.055
- Kayadelen, H. K. ve Ust, Y. (2013). Prediction of equilibrium products and thermodynamic properties in H₂O injected combustion for CaH β O γ N δ type fuels. *Fuel*, 113(x), 389–401. doi:10.1016/j.fuel.2013.05.095
- Kharoua, N., AlShehhi, M. ve Khezzar, L. (2015). Prediction of black powder distribution in junctions using the discrete phase model. *Powder Technology*, 286, 202–211. doi:10.1016/j.powtec.2015.07.045

- Kim, D. ve Lee, C. (2019). SCR performance evaluations in relation to experimental parameters in a marine generator engine. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3). doi:10.3390/jmse7030067
- Kim, J. Y., Ryu, S. H. ve Ha, J. S. (2004). *Numerical prediction on the characteristics of spray-induced mixing and thermal decomposition of urea solution in scr system*. Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division, 165–170. doi:10.1115/icef2004-0889
- Kınacı, Ö. K. (2013). *Gemi formu, dümen ve pervane etkileşiminin sayısal incelenmesi* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kleinhenz, M., Fiedler, A., Lauer, P. ve Döring, A. (2019). SCR coated DPF for marine engine applications. *Topics in Catalysis*, 62(1–4), 282–287. doi:10.1007/s11244-018-1115-y
- Konstandopoulos, A. G., Zarvalis, D., Chasapidis, L., Deloglou, D., Vlachos, N., Kotrba, A. ve Anderson, G. (2017). Investigation of SCR catalysts for marine diesel applications. *SAE International Journal of Engines*, 10(4), 1653–1666. doi:https://doi.org/10.4271/2017-01-0947
- Krastev, V. K., Russo, S., Verdemare, D., Recine, G., Biferale, L. ve Falcucci, G. (2016). *CFD aided optimization of an innovative SCR catalyst design for heavy-duty marine diesel engines*. AIP Conference Proceedings, 1738. doi:10.1063/1.4952056
- Ku, K. W. ve Hong, J. G. (2015). Thermo fluid effect of the urea thermal decomposition in a lab-scaled reactor. *Chemical Engineering Journal*, 264(x), 625–632. doi:10.1016/j.cej.2014.11.103
- Ku, K. W., Hong, J. G. ve Park, C. W. (2015). Effect of assist-air of twin fluid atomizer on ürea thermal decomposition. *Atomization and Sprays*, 25(10), 895–915.

- Ku, K. W., Hong, J. G., Park, C. W., Chung, K. Y. ve Sohn, S. H. (2014). Effects of various factors on the conversion efficiency of urea solution in a urea selective catalytic reduction system. *Energy and Fuels*, 28(9), 5959–5967. doi:10.1021/ef501358j
- Kuhnke, D. (2004). *Spray/wall-interaction modelling by dimensionless data analysis*. Berichte aus der Strömungstechnik. Technische Universität Darmstadt. <https://books.google.com.tr/books?id=voyfAAAACAAJ> adresinden erişildi.
- Lee, C. (2017). Performance evaluation of a urea-selective catalytic reduction system in a marine diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(3), 801–808. doi:10.1177/1475090216667238
- Lee, C. (2018). Numerical and experimental investigation of evaporation and mixture uniformity of urea–water solution in selective catalytic reduction system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 60, 210–224. doi:10.1016/j.trd.2017.04.015
- Liang, X., Zhao, B., Zhang, F. ve Liu, Q. (2019). Compact research for maritime selective catalytic reduction reactor based on response surface methodology. *Applied Energy*, 254(February), 113702. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113702
- Lu, D., Theotokatos, G., Zhang, J., Tang, Y., Gan, H., Liu, Q. ve Ren, T. (2021). Numerical investigation of the high pressure selective catalytic reduction system impact on marine two-stroke diesel engines. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 659–673. doi:10.1016/j.ijnaoe.2021.09.003
- Ma, S. ve Meng, F. (2017). Modeling, analysis, and experimental testing of a Selective catalytic reduction dosing system. *IEEE Access*, 5, 1409–1415. doi:10.1109/ACCESS.2017.2654487

- Magnusson, M., Fridell, E. ve Hårelind, H. (2016). Improved low-temperature activity for marine selective catalytic reduction systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 126–135. doi:10.1177/1475090214536546
- Man, W., Hongpeng, Z., Dian, H. ve Zhenqiang, F. (2019). *Simulation analysis of marine diesel engine SCR system*. Proceedings of 2019 14th IEEE International Conference On Electronic Measurement \& Instruments (ICEMI) içinde (ss. 1143–1148).
- Martyr, A. J. ve Plint, M. A. (2012). *Engine exhaust emissions*. Elsevier.
- Masera, K. ve Hossain, A. K. (2021). Modified selective non-catalytic reduction system to reduce NO_x gas emission in biodiesel powered engines. *Fuel*, 298(March), 120826. doi:10.1016/j.fuel.2021.120826
- McAllister, S., Chen, J.-Y. ve Fernandez-Pello, A. C. (2011). *Fundamentals of combustion processes*. doi:10.1007/978-1-4419-7943-8
- McTaggart-Cowan, G. P., Bushe, W. K., Rogak, S. N., Hill, P. G. ve Munshi, S. R. (2003). Injection parameter effects on a direct injected, pilot ignited, heavy duty natural gas engine with EGR. *SAE Technical Papers*, 112(2003), 2103–2109. doi:10.4271/2003-01-3089
- Mehdi, G., Zhou, S., Zhu, Y., Shah, A. H. ve Chand, K. (2019). Numerical investigation of SCR mixer design optimization for improved performance. *Processes*, 7(3). doi:10.3390/PR7030168
- Merker, G. P., Schwarz, C., Stiesch, G. ve Otto, F. (2005). *Simulating combustion: Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development*. Springer

- Mutyal, J., Faltsi, R. ve Braun, M. (2014). *Analysis of the injection of urea-water-solution for automotive SCR systems : spray / exhaust-gas-interaction*. ILASS Europe, 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, (1), 8–10.
- Ni, P., Wang, X. ve Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel*, 279(June). doi:10.1016/j.fuel.2020.118477
- Nikolic, D., Marstijepovic, N., Cvrk, S., Gagic, R. ve Filipovic, I. (2016). Evaluation of pollutant emissions from two-stroke marine diesel engine fueled with biodiesel produced from various waste oils and diesel blends. *Brodogradnja*, 67(4), 81–90. doi:10.21278/brod67406
- Oh, J. ve Lee, K. (2014). Spray characteristics of a urea solution injector and optimal mixer location to improve droplet uniformity and NO_x conversion efficiency for selective catalytic reduction. *Fuel*, 119, 90–97. doi:10.1016/J.FUEL.2013.11.032
- Okubo, M. ve Kuwahara, T. (2020a). *Emission regulations. New technologies for emission control in marine diesel engines*. Elseiver doi:10.1016/B978-0-12-812307-2.00002-X
- Okubo, M. ve Kuwahara, T. (2020b). *Principle and design of emission control systems. New technologies for emission control in marine diesel engines*. Elseiver doi:10.1016/b978-0-12-812307-2.00003-1
- Olsson, L., Sjövall, H. ve Blint, R. J. (2008). A kinetic model for ammonia selective catalytic reduction over Cu-ZSM-5. *Applied Catalysis B: Environmental*, 81(3–4), 203–217. doi:10.1016/j.apcatb.2007.12.011

- Österman, C. ve Magnusson, M. (2013). A systemic review of shipboard SCR installations in practice. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 12(1), 63–85. doi:10.1007/s13437-012-0034-1
- Park, S. ve Oh, J. (2018). Uniformity index measurement technology using thermocouples to improve performance in urea-selective catalytic reduction systems. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 54(11), 3253–3264. doi:10.1007/s00231-018-2371-x
- Park, T., Sung, Y., Kim, T., Lee, I., Choi, G. ve Kim, D. (2014). Effect of static mixer geometry on flow mixing and pressure drop in marine SCR applications. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(1), 27–38. doi:10.2478/IJNAOE-2013-0161
- Pilusa, T. J., Mollagee, M. M. ve Muzenda, E. (2012). Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the whale concept filter. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5), 994–1006. doi:10.4209/aaqr.2012.04.0100
- Pirola, C., Galli, F., Rinaldini, C. A., Manenti, F., Milani, M. ve Montorsi, L. (2020). Effects of humidified enriched air on combustion and emissions of a diesel engine. *Renewable Energy*, 155, 569–577. doi:10.1016/j.renene.2020.03.155
- Raptotasios, S. I., Sakellaris, N. F., Papagiannakis, R. G. ve Hountalas, D. T. (2015). Application of a multi-zone combustion model to investigate the NO_x reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR. *Applied Energy*, 157, 814–823. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.041
- Raza, H., Woo, S. ve Kim, H. (2022). Investigation of an ammonium carbamate-based SCR system for NO_x reduction in diesel engines under transient conditions. *Energy*, 251(x), 123918. doi:10.1016/j.energy.2022.123918

- Resitoglu, I. A. (2021). The effect of biodiesel on activity of diesel oxidation catalyst and selective catalytic reduction catalysts in diesel engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148(x), 111286. doi:10.1016/j.rser.2021.111286
- Reynolds, O. (1894). *On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 186, 123–164.
- Rodriguez, S. (2019). Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling. *Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling*. doi:10.1007/978-3-030-28691-0
- Ryu, Y., Kim, H., Cho, W. ve Nam, J. (2017). Installation and characteristics of urea-selective catalytic reduction systems for nitrogen oxide reduction in marine diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(3), 760–767. doi:10.1177/1475090217699679
- Savcı, H. İ. (2015). *An integrated modeling approach to investigate performance of to investigate performance of selective reduction catalyst* [Doktora Tezi]. Marmara Üniversitesi
- Schiller, L. ve Naumann, Z. (1993). *A drag coefficient correlation*. VDI, 77, 318–320.
- Sher, E. (1998). *Environmental aspects of air pollution*. Handbook of air pollution from internal combustion engines. Woodhead Publishing Limited. doi:10.1016/b978-012639855-7/50041-7
- Som, S. K. (2008). *Introduction to heat transfer*. PHI Learning Private Limited.

- Sultana, A., Sasaki, M., Suzuki, K. ve Hamada, H. (2013). Tuning the NO_x conversion of Cu-Fe/ZSM-5 catalyst in NH₃-SCR. *Catalysis Communications*, 41, 21–25. doi:10.1016/j.catcom.2013.06.028
- Sung, Y., Choi, M., Park, T., Choi, C., Park, Y. ve Choi, G. (2020). Synergistic effect of mixer and mixing chamber on flow mixing and NO_x reduction in a marine urea-SCR system. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 150(x), 107888. doi:10.1016/j.cep.2020.107888
- Tian, X. (2016). *Study on mixing , modelling and control of an SCR system* [Doktora Tezi]. University of Strathclyde.
- Tian, X., Xiao, Y., Zhou, P. ve Zhang, W. (2015). Optimization of the location of injector in urea-selective catalytic reduction system. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(2), 238–248. doi:10.1007/s00773-014-0267-0
- Tian, X., Xiao, Y., Zhou, P., Zhang, W., Chu, Z. ve Zheng, W. (2015). Study on the mixing performance of static mixers in selective catalytic reduction (SCR) systems. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 14(2), 57–60. doi:10.1080/20464177.2015.1096615
- Tian, X., Zhang, W., Xiao, Y. ve Zhou, P. (2012). Investigation on the effect of ammonia distribution on selective catalytic reduction conversion efficiency. *Asian Journal of Chemistry*, 24(12), 5889–5893.
- Toof, J. L. (1986). A model for the prediction of thermal, prompt, and fuel NO_x emissions from combustion turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 108(2), 340–347. doi:10.1115/1.3239909

- Um, H. S., Kim, D. ve Kim, K. H. (2019). Numerical study on the design of urea decomposition chamber in LP SCR system. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 307–313. doi:10.1016/j.ijnaoe.2018.06.005
- UNCTAD (15 Mayıs 2022). *Review of maritime transport 2021*. <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2021>
- Versteeg and Malalasekera, H. K. and W. (2007). Introduction of computational fluid dynamics. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2(1), 1–6. doi:10.1111/j.1749-6632.1959.tb44882.x
- Wang, J., Fu, H., Hu, Y., Cai, Y. ve Chen, K. (2020). Experimental study and numerical simulation of impact factors on spray impingement of urea water solution. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 56(7), 2239–2254. doi:10.1007/s00231-020-02856-3
- Wang, M., Zhang, H. ve Gong, W. (2019). Research on airflow uniformity of marine selective catalytic reduction reverse blow system. *The Journal of Engineering*, 2019(23), 9083–9087. doi:10.1049/joe.2018.9190
- Wang, Z., Zhou, S., Feng, Y. ve Zhu, Y. (2017). Research of NO_x reduction on a low-speed two-stroke marine diesel engine by using EGR (exhaust gas recirculation)–CB (cylinder bypass) and EGB (exhaust gas bypass). *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 19337–19345. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.06.009
- Wang, Z., Zhu, Y., Zhou, S. ve Feng, Y. (2020). Reaction mechanism and chemical kinetics of NH₃-NO/NO₂-SCR system with vanadium-based catalyst under marine diesel exhaust conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 234(3), 342–352. doi:10.1177/0957650919857618

- Weathers, K. C., Strayer, D. L., Likens, G. E., Pickett, S. T. a. ve Cadenasso, M. L. (2013). Acid rain. *Fundamentals of Ecosystem Science*, 191–213. doi:10.1016/B978-0-08-091680-4.00015-9
- Weaver, M. E. (1988). Acid rain. *Construction Specifier*, 41(7), 54–62. doi:10.5949/liverpool/9780853239239.003.0008
- White, F. M. (2011). *Fluid mechanics*. McGraw Hill.
- Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence modeling for CFD*. D C W Industries
- Wu, Y., Zhang, X. ve Zhang, X. (2016). Simplified analysis of heat and mass transfer model in droplet evaporation process. *Applied Thermal Engineering*, 99, 938–943. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.01.020
- Xiao, Y. H., Chu, Z. H. ve Tian, X. N. (2014). Research on simulation of urea-scr injection system for marine diesel engine. Energy development, advanced materials research (C. 860, ss. 1807–1811). *Trans Tech Publications Ltd*. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.1807
- Xiao, Y., Tian, X., Zhou, P. ve Zhang, W. (2014). Study on evaporation and decomposition process of urea water solution in selective catalytic reduction system. *Materials Research Innovations*, 18(May), S2908–S2913. doi:10.1179/1432891714Z.0000000000533
- Xiao, Youhong, Zhao, H., Tian, X. ve Tan, W. (2018). Investigation on the control strategy for marine selective catalytic reduction system. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 141(1). doi:10.1115/1.4041011
- Xu, J., Testa, D. ve Mukherjee, P. K. (2015). The use of LNG as a marine fuel: The international regulatory framework. *Ocean Development and International Law*, 46(3), 225–240. doi:10.1080/00908320.2015.1054744

- Yim, S. D., Kim, S. J., Baik, J. H., Nam, I. S., Mok, Y. S., Lee, J. H., ... Oh, S. H. (2004). Decomposition of urea into NH_3 for the SCR process. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43(16), 4856–4863. doi:10.1021/ie034052j
- You, K., Wei, L. ve Jiang, K. (2018). A fuzzy logic urea dosage controller design for two-cell selective catalytic reduction systems. *ISA Transactions*, 78(X), 21–30. doi:10.1016/j.isatra.2017.12.016
- Yu, S. ve Zhang, J. (2021). Numerical investigation on the intraphase and interphase mass transfer limitations for nh_3 -scr over cu-zsm-5. *Processes*, 9(11). doi:10.3390/pr9111966
- Zahari, N. M., Zawawi, M. H., Sidek, L. M., Mohamad, D., Itam, Z., Ramli, M. Z., ... Rashid, M. (2018). Introduction of discrete phase model (DPM) in fluid flow: A review. *AIP Conference Proceedings*, 2030(November 2018). doi:10.1063/1.5066875
- Zeldovich, Y. B. (1946). The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *Acta Physicochimica USSR*, 4, 577–628. doi:doi:10.1515/9781400862979.364
- Zhang, G., Yan, H., Li, T., Zhu, Y., Zhou, S., Feng, Y. ve Zhou, W. (2021). Relation analysis on emission control and economic cost of SCR system for marine diesels. *Science of the Total Environment*, 788, 147856. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147856
- Zhang, H., Wang, J. ve Wang, Y. Y. (2015). Cycle-based ammonia-coverage-ratio reference generator design for Diesel engine two-cell selective catalytic reduction systems via a fuzzy approach. *Fuel*, 159, 76–83. doi:10.1016/j.fuel.2015.06.065
- Zhang, Y., Lou, D., Tan, P., Hu, Z. ve Fang, L. (2022). Effect of SCR downsizing and ammonia slip catalyst coating on the emissions from a heavy-duty diesel engine. *Energy Reports*, 8, 749–757. doi:10.1016/J.EGYR.2021.12.009

- Zhang, Zhiqing, Ye, J., Lv, J., Xu, W., Tan, D., Jiang, F. ve Huang, H. (2022). Investigation on the effects of non-uniform porosity catalyst on SCR characteristic based on the field synergy analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 107056. doi:10.1016/j.jece.2021.107056
- Zhang, Zhuo, Shi, M., Yin, Z., Wu, D. ve Dai, L. (2020). Prediction modelling of exhaust characteristics of a marine engine for SCR urea dosing calibration. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 62(2), 116–128. doi:10.1504/IJCAT.2020.104687
- Zhen, X. ve Wang, Y. (2015). An overview of methanol as an internal combustion engine fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 477–493. doi:10.1016/j.rser.2015.07.083
- Zheng, G. (2016). CFD Modeling of ürea spray and deposits for SCR systems. *SAE Technical Papers*, 2016(October). doi:10.4271/2016-01-8077
- Zhu, S., Ma, Z., Zhang, K. ve Deng, K. (2020). Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. *Energy*, 210, 118558. doi:10.1016/j.energy.2020.118558
- Zhu, Y., Hou, Q., Shreka, M., Yuan, L., Zhou, S. ve Feng, Y. (2019). Ammonium-salt formation and catalyst deactivation in the SCR system for a marine diesel engine. *Catalysts*, 9, 2–22. doi:10.3390/catal9010021
- Zhu, Y., Li, T., Xia, C., Feng, Y. ve Zhou, S. (2020). Simulation analysis on vaporizer/mixer performance of the high-pressure SCR system in a marine diesel. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 148, 107819. doi:10.1016/J.CEP.2020.107819

Zhu, Y., Zhang, R., Zhou, S., Huang, C., Feng, Y., Shreka, M. ve Zhang, C. (2019). Performance optimization of high-pressure SCR system in a marine diesel engine. *Part I: Flow Optimization and Analysis. Topics in Catalysis*, 62(1–4), 27–39. doi:10.1007/s11244-018-1124-x

Ziółek, M., Sobczak, I., Nowak, I., Daturi, M. ve Lavalley, J. C. (2000). Effect of sulfur dioxide on nitric oxide adsorption and decomposition on Cu-containing micro- and mesoporous molecular sieves. *Topics in Catalysis*, 11–12(1–4), 343–350. doi:10.1023/A:1027265528877

