

Araştırma Makalesi / Research Article

Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) Sisteminde Statik Karıştırıcı Kullanımının NO_x
Emisyonlarına Etkisinin Deneysel İncelenmesi

Şükrü Ayhan BAYDIR^{1*}, Emrah ERÇEK²

^{1*} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7136-7860>, abaydir@aku.edu.tr

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Sultandağı Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6441-4200>, eercek@aku.edu.tr

Geliş/ Received: 10.05.2024;

Revize/Revised: 26.05.2024

Kabul / Accepted: 28.05.2024

ÖZET: NO_x emisyonlarının canlılar ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı dizel motorlardan kaynaklanan NO_x emisyonlarını azaltmak için çeşitli emisyon kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Euro-6 standartlarının karşılanabilmesi için dizel motorlarında NO_x emisyonlarının Euro 5 standartlarına göre yaklaşık %60 oranında azaltılması gerekmektedir. Bu kuralları karşılamak için NO_x azaltma teknolojileri geliştirilmiştir ve Seçici Katalitik İndirgeme (SCR), bu düzenlemeleri karşılamak için en etkili yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada tek silindri bir dizel motora SCR sistemi kurularak statik karıştırıcının NO_x emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Ortalama egzoz gazı sıcaklığı 345-350 °C aralığında ve püskürtülen Dizel Egzoz Sıvısı (DEF) sıcaklığı oda şartlarında iken altı farklı (80, 160, 240, 320, 400 ve 480 mg/s) DEF debisinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu debi değerlerinde sistemde statik karıştırıcı olduğu ve olmadığı durumlarda NO_x dönüşüm değerleri arasındaki yüzdesel farklar 6 farklı DEF debisine göre sırasıyla %0,07, %3,01, %16,63, %15,97, %0,39 ve %0,1 olarak hesaplanmıştır. Sisteme statik karıştırıcı eklendiğinde özellikle 240 mg/s DEF debisinde NO_x dönüşüm oranında %17'lik belirgin bir iyileşme tespit edilmiştir. Sonuç olarak yapılan deneyler ile SCR sistemlerinde optimum şartların belirlenmesi ile en iyi NO_x dönüşümünün sağlandığı, minimum DEF tüketiminin elde edilebildiği ve sistemde tortu oluşması gibi olumsuz durumları azaltarak sistem verimliliğini artıran veriler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: SCR, NO_x, Statik karıştırıcı, Dizel egzoz sıvısı (DEF), Egzoz emisyon, Dizel motor.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: abaydir@aku.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Baydır, Ş. A., Erçek, E. (2024). Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) Sisteminde Statik Karıştırıcı Kullanımının NO_x Emisyonlarına Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 5(1), 143-153.

Experimental Investigation of the Effect of Static Mixer Usage on NO_x Emissions in Selective Catalytic Reduction (SCR) System

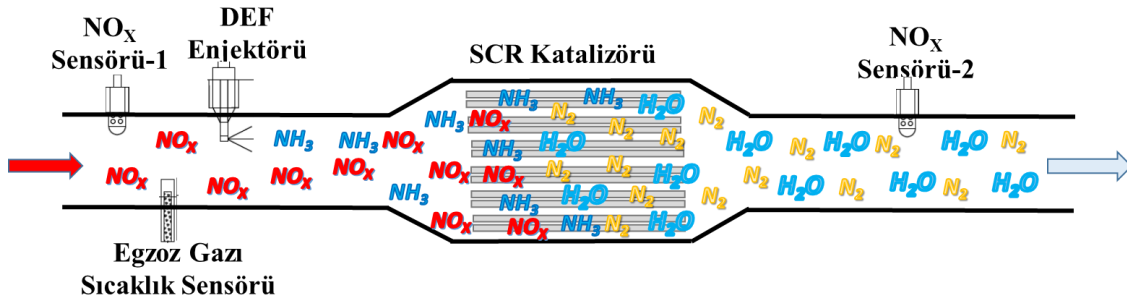
ABSTRACT: Various emission control systems are used to reduce NO_x emissions from diesel engines due to their adverse effects on living organisms and the environment. To meet Euro-6 standards, diesel engines need to reduce NO_x emissions by approximately 60% compared to Euro 5 standards. NO_x reduction technologies have been developed to meet these regulations, and Selective Catalytic Reduction (SCR) is one of the most effective methods. In this study, the effect of a static mixer on NO_x emissions was investigated by installing an SCR system on a single-cylinder diesel engine. Experiments were conducted at six different Diesel Exhaust Fluid (DEF) flow rates (80, 160, 240, 320, 400, and 480 mg/s) while the average exhaust gas temperature was in the range of 345-350°C and the injected DEF temperature was at ambient conditions. Percentage differences in NO_x conversion values between cases with and without a static mixer in the system for six different DEF flow rates were calculated as 0.07%, 3.01%, 16.63%, 15.97%, 0.39%, and 0.1%, respectively. A significant improvement of 17% in NO_x conversion rate was observed, especially at a DEF flow rate of 240 mg/s when a static mixer was added to the system. Consequently, experiments have determined the optimum conditions in SCR systems, achieving the best NO_x conversion, minimizing DEF consumption, and reducing adverse conditions such as sediment formation in the system, thereby enhancing system efficiency.

Keywords: SCR, NO_x, Static mixer, Diesel exhaust fluid (DEF), Exhaust emission, Diesel engine.

1. GİRİŞ

Azot oksit (NO_x) emisyonları ulaşım, sanayi ve ısınma kaynaklı olup çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkisi olan hava kirleticilerdir. Taşıtlarda kullanılan içten yanmalı motorlar da yüksek yanma sıcaklıkları sonucu oluşan NO_x emisyonları özellikle dizel motorlarda büyük bir çevre sorunu haline gelmiştir. NO_x emisyonlarını azaltmak için Egzoz Gazları Resikülasyonu (EGR) gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Yanma esnasında alınan bu yöntemler hala kullanılmakta olup emisyon standartlarını karşılayamadığı için yanma sonrası birtakım önlemler alınmıştır. NO_x emisyonlarının düşürülmesi amacıyla yanma sonrası uygulanan en etkin yöntem Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) sistemidir. Seçici katalitik indirgeme, günümüz dizel motorlarında NO_x emisyonlarını azaltmak için kullanılan yanma sonrası egzoz emisyon kontrol sistemlerinden en etkili ve yaygın teknolojilerdendir (Braun ve ark., 2019).

SCR işleminde otomotiv uygulamalarında kullanılan Dizel Egzoz Sıvısı (DEF) olarak adlandırılan sulu üre çözeltilisi enjektör ile SCR katalizörünün önüne egzoz gazı üzerine püskürtülür. Yüksek sıcaklığın etkisiyle ilk olarak termoliz reaksiyonu ile üre ayrışarak amonyaka (NH₃) ve izosiyamik aside (HNCO) dönüşür. Daha sonra izosiyamik asit hidrolize uğrayarak amonyak (NH₃) ve karbondioksit (CO₂) ürünleri meydana getirir. Termoliz ve hidroliz reaksiyonları sonrası elde edilen amonyak (NH₃) bileşikleri katalizör içerisinde azot oksit (NO_x) emisyonları ile reaksiyona girerler. NO_x emisyonları zararsız olan azot (N₂), su (H₂O) ve daha az zararlı olan N₂O'ya indirgenirler. Şekil 1'de SCR sisteminde gerçekleşen kimyasal olaylar şematik olarak gösterilmektedir (Erçek ve Baydır, 2023a).



Şekil 1. SCR sistemi gerçekleşen kimyasal olaylar (Erçek ve Baydır, 2023a)

SCR performansı değerlendirilmesinde iki önemli tasarım değişkeni dikkate alınır. Bunlar NO_x'u düşürmek ve katalizörde "NH₃ slip" olarak adlandırılan amonyak birikimini engellemektir. Ürenin eksik ayrışması tortu türü yan ürünleri meydana getirebilir (Braun ve ark., 2019). Bu tortular, SCR katalizörünün uzun vadeli katalitik performansına zarar verebilir. Aynı zamanda NH₃ birikimi, büyük miktarlarda amonyağın atmosfere yayılımına sebep olur. Yönetmelik gereği NH₃ kayması (slip) maksimum 10 ppm'i geçmemelidir. Amonyak zehirli olduğu kadar tehlikelidir. Ayrıca son derece uçucudur ve amonyum sülfat ve amonyum nitrat tuzları gibi zararlı maddeler oluştururlar (Stelzer, 2014).

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

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

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

Kurzydym ve arkadaşları SCR karıştırıcısı önünde enjektör borusunun iki çeşidini (S tipi ve düz boru tasarımı) kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır. S-tipi boru tasarımında ürenin egzoz gazlarının akışı yönünde eş merkezli olarak enjekte edilmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak S tipi borunun, düz boru tasarımına kıyasla ürenin daha iyi ayrıştığını, üre birikimi tortularının azaldığını ve ayrıca optimum NO_x azalma verimliliğini elde etmişlerdir (Kurzydym ve ark., 2022).

Cho ve ark., 2014 tarafından gerçekleştirilen sayısal ve deneysel analiz, üre-SCR sisteminde amonyak dağılımının homojenliği ve NO_x dönüşüm verimliliğini araştırmak için çoklu karıştırıcıların ve ayrıştırıcıların uygulanmasının amonyak dağılımını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve oluşan türbülanslı girdabın sulu üre çözeltisinin daha iyi ayrışmasını desteklediğini göstermiştir (Zhu ve ark., 2022).

SCR tasarımlarında karıştırma oranının iyileştirilmesi için yapılabilecek işlemler şunlardır (Sorrels ve ark., 2019);

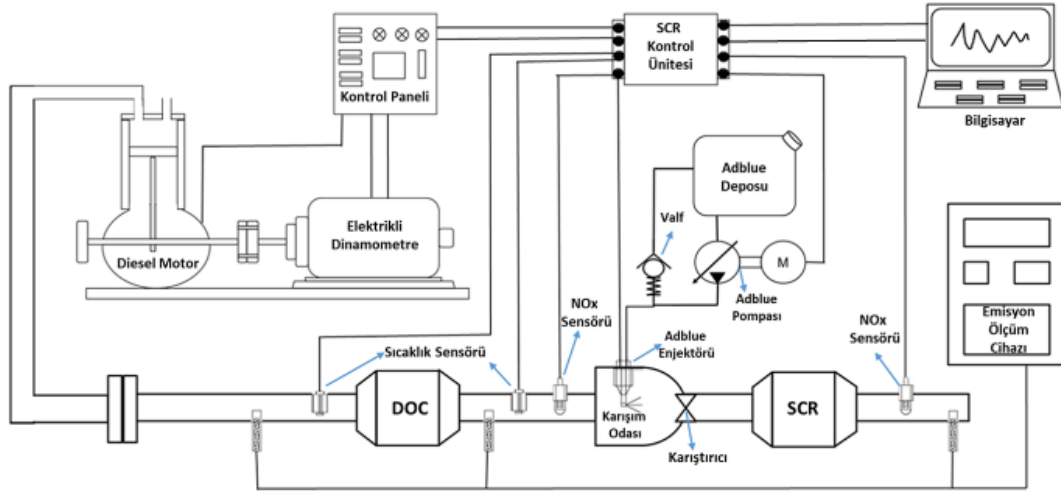
- Egzoz gazı ve amonyağın yeterince karışımını sağlamak için amonyak enjeksiyonu ve katalizör arasında yeterli kanal uzunluğu,
- Enjekte edilen sıvının akış yönüne statik karıştırıcı montajı,
- Enjekte edilen sıvının basıncını artırma,

- Enjektörlerin ve/veya enjeksiyon bölgelerinin sayısını artırma ve reaktif dağılımını, püskürtme açısını ve yönünü iyileştirmek için enjeksiyon meme tasarımını değiştirmektedir.

Bu çalışmada SCR verimini ve çalışmasını etkileyen statik karıştırıcının NO_x emisyonlarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada tek silindirli dizel motora SCR sistemi düzeneği kurulmuştur (Erçek ve Baydır, 2023a). Deneysel düzeneği Şekil 2’de görülmektedir. Deneysel düzeneğinde sensörlerden gelen analog sinyaller National Instruments USB-4716 veri toplama kartı ile dijital sinyallere dönüştürülerek veriler bilgisayarda LabVIEW programı aracılığıyla işlenmekte ve excel formatında saklanmaktadır.



Şekil 2. Deneysel düzeneğin şematik görünümü

Deneysel düzeneğinde Antor 3LD 510 marka ve modellenli doğal emişli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu, tek silindirli dizel motor kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan dizel motorunun teknik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Deneysel motorunun teknik özellikleri (Anonymous, 2023a)

Özellik	Değer
Model	Antor 3LD 510
Silindir Sayısı	1
Silindir Hacmi	510 cm ³
Sıkıştırma Oranı	17,5:1
Motor Devri	3000 rpm
Motor Gücü	12 hp (8,84 kW)
Maksimum Tork	3,35 kg-m @1800 rpm
Özgül Yakıt Sarfıyatı	190 g/HP-h
Soğutma Tipi	Hava soğutmalı

Egzoz gazı sıcaklık ölçümlerinde NiCr-Ni, K tipi termokupl kullanılmıştır. Deneysel düzeneğinde yoğunluğu 400 cpsi olan vanadyum bazlı V₂O₅-WO₃/TiO₂ SCR katalizörü kullanılmıştır. Dizel oksidasyon katalizörü (DOC), seramik malzemeden yapılmış evrensel tip standart katalizördür. DEF olarak ISO 22241 standardına uygun üretilmiş doğayla uyumlu su bazlı üre çözeltilisi kullanılmıştır. SCR katalizör öncesi ve sonrası iki adet Continental marka UniNO_x

sensörü kullanılmaktadır. Ancak bu sensörler anlık olarak SCR sistemi katalizör verimlerini takip etmekte olup NO_x emisyonları egzoz gaz analizöründen ölçülmektedir. Egzoz çıkışındaki NO_x ölçümleri Bosch BEA060 egzoz gaz analizörü ile yapılmıştır. Egzoz emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri Çizelge 2’de görülmektedir.

Çizelge 2. Egzoz emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri (Anonymous, 2023b)

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

SCR sisteminde DEF’in egzoz gazı içerisine püskürtülmesinde kullanılan Bosch marka 2. nesil (deNOX 2.2) DEF enjektörü Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dizel Egzoz Sıvısı (DEF) enjektörü

Elektronik olarak anlık kumanda edilebilen, çok hızlı açılıp kapanabilme özelliği olan kademeli olarak püskürtme yapılabilen selenoid (elektrovalf) tip enjektördür. Pompa tarafından basınçlandırılan DEF enjektörde basınçlı halde bulunur ve sinyal gönderildiği an püskürtme gerçekleştirilir. 12 volt gerilimle çalışan 9 bar’a kadar basınçla üç delikten püskürtme yapabilmektedir. Çizelge 3’de enjektöre ait teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 3. DEF enjektörü teknik özellikleri (Anonymous, 2023c; Anonymous, 2023d)

Özellik	Değer
Hizmet Ömrü	35.000 saate kadar
Maksimum Ortam Sıcaklığı	180 °C
Çalışma Basıncı	9 bar
DEF Giriş Sıcaklığı	90 °C

SCR sistemlerinde NO_x dönüşüm oranlarına büyük etkisi olan egzoz gazı ile dizel egzoz sıvısı karışımının daha iyi olması için enjektör önüne konumlandırılan portatif (gerektiğinde çıkartılabilen) statik karıştırıcı ve montajı Şekil 4. e görülmektedir. Statik karıştırıcı bağlandığı noktada sabit durmaktadır. Herhangi bir dönme hareketi yapmamaktadır. Statik karıştırıcı çapı 49 mm, uzunluğu 40 mm olup içerisinde girdap oluşturabilmesi için kıvrımlar bulunmaktadır. Enjektör püskürtme noktasından statik karıştırıcı girişine kadar olan uzaklık 60 mm’dir. Statik karıştırıcı çıkışından SCR katalizör girişine kadar olan uzaklık 143 mm’dir.



Şekil 4. SCR statik karıştırıcı ve montajı

Egzoz gazı sıcaklığının motor sonrası emisyon kontrol sistemleri (DOC, DPF ve SCR) üzerinde önemi oldukça büyüktür. DOC ve SCR katalizörlerindeki kimyasal reaksiyonların etkin bir şekilde gerçekleşebilmesi için belirli bir sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sıcaklık değeri katalizörün niteliğine ve katalist maddesine göre değişim gösterebilmektedir. Sıcaklık değerindeki aşırı artışlar (600 °C ve üzeri) katalizörler için tehlike arz etmektedir. Yüksek sıcaklıklar katalizörün yapısının bozulmasına ve katalizörün zarar görmesine yol açmaktadır (Reşitoğlu, 2020).

SCR sistemlerinde NO_x 'in dönüşüm verimliliği yüksek oranda egzoz gazı sıcaklığına bağlıdır. Sistemde kullanılan statik karıştırıcının NO_x dönüşüm oranına etkisini test edebilmesi için ilk aşamada sistemde statik karıştırıcı varken deneylerin sabit bir egzoz gaz sıcaklığında yapılması gerekmektedir. Bu nedenle optimum egzoz gaz sıcaklığı belirlenmelidir.

- Deney öncesinde dizel motoru yarım gaz kolu açıklığında 10 dakika boшта çalıştırılarak çalışma sıcaklığına getirilmiştir.
- Daha sonra gaz kolu tam açık konuma getirilerek yüksüz durumda iken motor devri 3200 rpm olarak ölçülmüştür.
- Gaz kolu tam açık konumda ve motor yüksüz iken maksimum egzoz gaz sıcaklığının 180-190 °C seviyelerine ulaştığı tespit edilmiştir.
- Egzoz gaz sıcaklığını artırmak için motor elektrikli dinamometre ile yüke bindirilmiş ve egzoz gazı sıcaklık sensörünün ölçmüş olduğu sıcaklık istenilen değere geldiğinde gaz kolu sabitlenmiştir.
- Birinci aşamada 5 farklı (210, 258, 308, 350, 385 °C) egzoz gazı sıcaklığında ve iki farklı (240-320 mg/s) DEF püskürtme debisinde NO_x değerleri kayda alınmıştır ve NO_x dönüşüm oranları hesaplanmıştır.
- Püskürtülen DEF sıcaklığı oda şartlarındadır.
- Optimum egzoz gazı sıcaklığı 300-360 °C aralığında iken maksimum NO_x dönüşüm oranı elde edilmiştir.

İkinci aşamada statik karıştırıcının NO_x dönüşüm oranına etkisini belirleyebilmek için sistemde statik karıştırıcı varken altı farklı (80, 160, 240, 320, 400 ve 480 mg/s) DEF püskürtme debisinde ilk aşamada belirlenmiş olan optimum egzoz gaz sıcaklığı değerlerine göre daha dar 345-350 °C'lik sıcaklık aralığı kullanılmıştır.

Üçüncü aşamada sistemde statik karıştırıcı yokken ikinci aşamadaki şartlar altında deneyler tekrarlanmıştır.

İkinci ve üçüncü aşama deneyleri en az üçer defa tekrarlanarak yapılmış ve yüzdesel NO_x dönüşüm oranlarının ortalamaları alınarak değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

Gaz kolu tam açık konumda, motor yüküne bindirildiğinde yaklaşık 2800 rpm devirde çalışırken ikinci ve üçüncü aşamalarda egzoz gaz sıcaklığı elde edilebilmektedir.

Deneyler tekrarlanırken istenilen egzoz sıcaklığına ulaşıldıktan sonra DEF püskürtmesi gerçekleştirildiği için motor yükünün önemi bulunmamaktadır. Motor yüküne göre deney yapılması halinde egzoz gaz sıcaklıkları değişiklik göstereceği için sıcaklıktan bağımsız sadece statik karıştırıcının etkisi doğru belirlenemeyecektir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. SCR Sisteminde Farklı Egzoz Gazı Sıcaklıklarının NO_x Dönüşümüne Etkisi

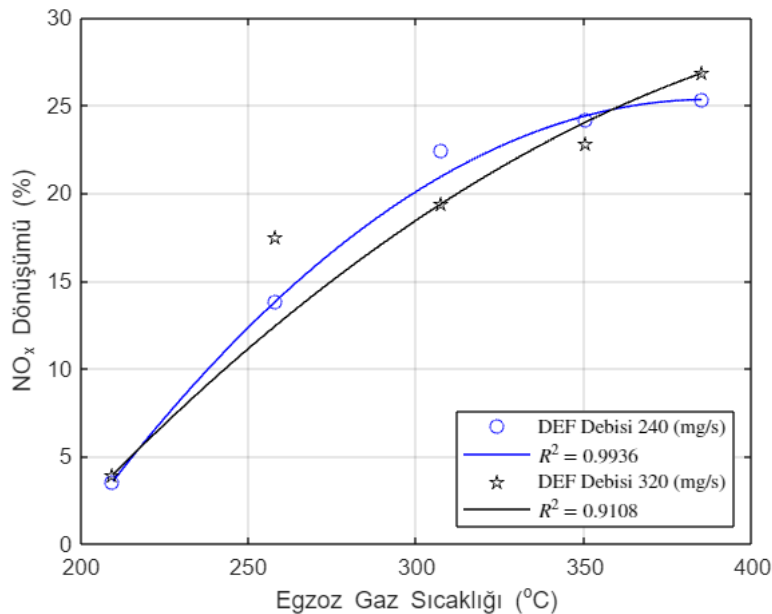
SCR sistemlerinde yapılan çalışmalar NO_x'in dönüşüm verimliliğinin yüksek oranda egzoz gazı sıcaklığına bağlı olduğunu göstermektedir. NO_x dönüşüm oranı egzoz gazı sıcaklığının artmasıyla önce artar, sonra düşer. Reaksiyon genellikle 200 °C'de başlar ve 350 °C'de maksimum dönüşüm oranına ulaşır. 200 °C'nin altındaki egzoz gazı sıcaklıklarında üre ayrışma reaksiyonu SCR sisteminin iç çeperlerinde kaldırması oldukça zor olan tortular oluşturabilir. Bu sorunu önlemek için üre enjeksiyonu genellikle egzoz gazı sıcaklığı 200 °C'nin üzerine çıktığında başlamaktadır (Wang ve ark., 2019).

Sıcaklık aralıkları kullanılan SCR katalizör tipine göre değişmektedir. Deney düzeneğinde vanadyum bazlı SCR katalizörü kullanılmıştır. Vanadyum bazlı V₂O₅ gibi katalizörler 260 °C ile 450 °C arasında en verimli çalışan malzemelerdir (Braun, 2019).

Materyal ve yöntem bölümünde birinci aşamada belirtilen farklı egzoz gaz sıcaklıklarına ve farklı DEF püskürtme debilerine göre DEF püskürtüldükten sonraki ölçüm verilerinden hesaplanan NO_x emisyonlarındaki yüzdesel dönüşüm oranları Çizelge 4 ve Şekil 5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. Farklı egzoz gazı sıcaklıklarına ve DEF debilerine bağlı NO_x dönüşüm değerleri

Sıcaklık (°C)	209,5	258	307,5	350,4	385
NO _x Dönüşümü (%)					
240 (mg/s) DEF Debisinde	3,57	13,83	22,4	24,17	25,32
NO _x Dönüşümü (%)					
320 (mg/s) DEF Debisinde	3,95	17,48	19,4	22,83	26,83



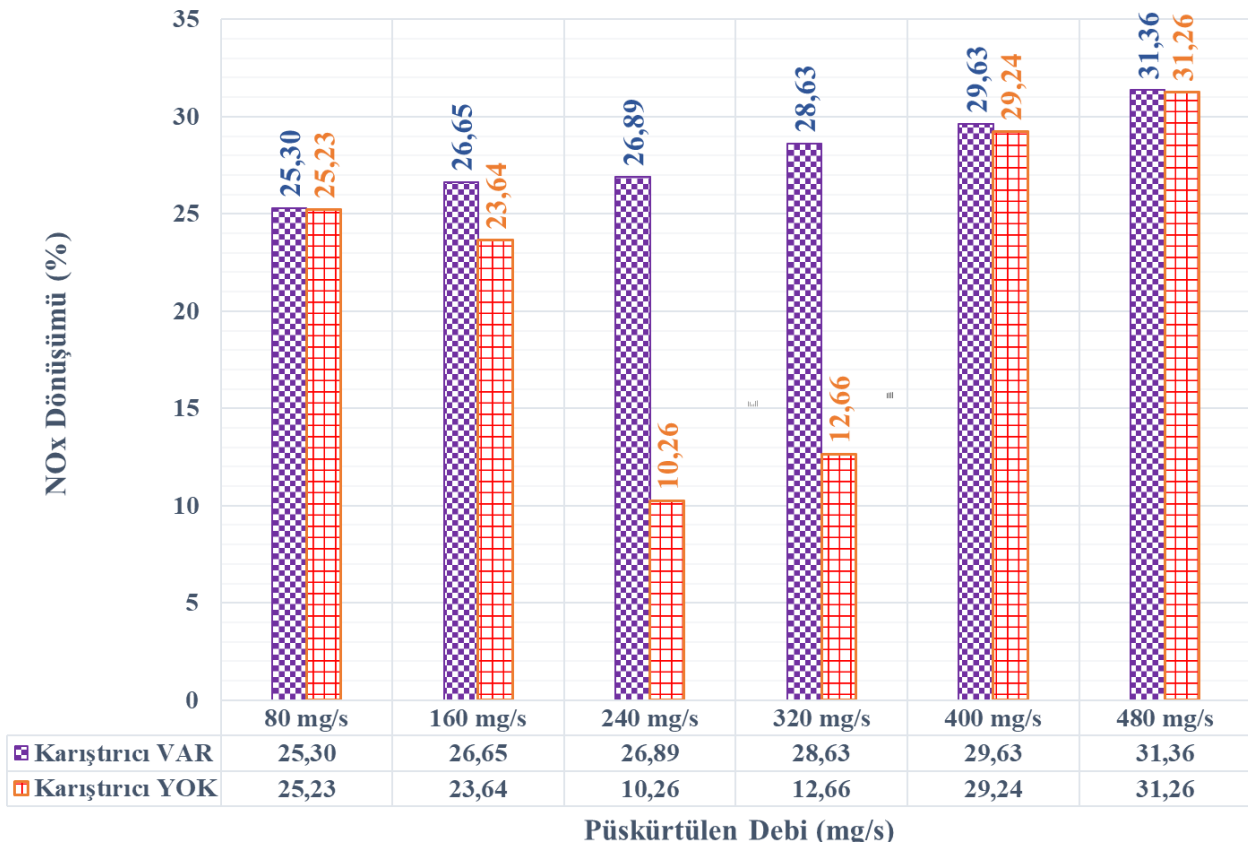
Şekil 5. Farklı egzoz gazı sıcaklıklarına bağlı NO_x dönüşüm oranı

3.2. SCR Statik Karıştırıcısının NO_x Emisyonlarına Etkisi

SCR sistemlerinde katalizör önüne sıcak egzoz gazına püskürtülen DEF, termoliz ve hidroliz reaksiyonlarının gerçekleşmesi ile NH₃ gazı üretimi sağlar. SCR katalizör girişinde NH₃ gazı ile NO_x emisyonları reaksiyona girerek azot ve oksijene ayrışır. Üre-SCR reaktörleri yüksek NO_x dönüşüm performansı, düşük NH₃ kayması ve düşük üre tüketimini sağlayacak şekilde kontrol edilir. NO_x dönüşüm verimini en üst düzeye çıkarmak ve NH₃ kaymasını en aza indirmek için püskürtülen DEF ile egzoz gazı akışının türbülanslı karıştırılması ve SCR katalizörü önünde homojen bir akış elde edilmesi önemlidir. Özellikle, ürenin NH₃'e ayrışma hızını iyileştirmek, amonyak (NH₃) ve izosiyanik asidin (HNCO) homojen dağılımını sağlamak için sisteme karıştırıcılar eklenmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda motor tipi ve büyüklüğüne bağlı olarak karıştırıcıların %20 oranında NO_x dönüşümüne olumlu etki ettiği görülmüştür. SCR deney sistemi tasarımında bu durumu göz önüne tutarak sisteme portatif takılıp çıkarılabilir statik karıştırıcı eklenmiştir. Statik karıştırıcı sisteme dahil edildiğinde veya çıkarıldığında SCR sisteminin verimi tespit edilmiştir.

Sistemde öncelikle statik karıştırıcı var iken ikinci aşama ve statik karıştırıcı çıkartılıp üçüncü aşama deneyleri yapılmış, NO_x dönüşüm oranları hesaplanmıştır. Şekil 6'da SCR sisteminde statik karıştırıcı durumuna ve 6 farklı DEF püskürtme debisine göre elde edilen verilerden hesaplanan NO_x dönüşümü yüzdelerinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 6. SCR statik karıştırıcısının farklı DEF püskürtme debilerinde NO_x emisyon dönüşümüne etkisi

Şekil 80 mg/s'lik DEF debisinde statik karıştırıcı olduğunda %25,30, olmadığında %25,23'lük bir NO_x dönüşüm oranı elde edilmektedir. Arada büyük bir fark olmadığı neredeyse aynı performansın olduğu söylenebilir. Bunun nedeni püskürtülen DEF miktarı çok düşük olduğundan egzoz gaz basıncı ve hızı ile yeterince türbülansın meydana geldiği ve karışımın katalizöre girmeden yeterince homojen hale geldiği söylenebilir.

DEF debisi artırılıp 160 mg/s'ye çıkarıldığında statik karıştırıcı olduğunda %26,65'lik NO_x dönüşüm oranı gerçekleşirken statik karıştırıcı olmadığında bu oran %23,64'e düşmektedir.

Statik karıştırıcının etkisini görebilmek için DEF debisi 240 mg/s'ye çıkarıldığında statik karıştırıcının varlığında %26,89'luk bir değişim gerçekleşirken statik karıştırıcı kaldırıldığında bu oran %10,26'lara kadar düşmektedir.

Yapılan bu deneyler göz önüne alındığında DEF debisi artırılarak 320 mg/s'de statik karıştırıcı var ve yok iken sırasıyla %28,63 ve %12,66'lık bir değişim gerçekleştiği görülmüştür.

Özellikle 240 ve 320 mg/s'lik DEF debilerinde statik karıştırıcının SCR performansı üzerinde büyük rol oynadığı görülmektedir. Statik karıştırıcı olduğunda NO_x dönüşüm oranında yaklaşık %16'lık bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

DEF debisi artırılarak 400 ve 480 mg/s'de deneyler yapıldığında statik karıştırıcının NO_x dönüşüm oranına etkisinin düştüğü gözlemlenmiştir. SCR sistemlerinde olması gerekenden fazla DEF püskürtülmesi durumunda NH₃ kayması meydana gelmektedir. NH₃, NO_x emisyonları ile reaksiyona girmeden dışarı atılmaktadır. Bu istenmeyen bir durumdur. Yapılan deneylerde 400 ve 480 mg/s debilerde DEF püskürtüldüğünde ortamda fazladan NH₃ oluşmuştur. Katalizör girişinde karışım yoğun bir şekilde amonyak içerdiği için kendi içinde homojenlik sağlamıştır. SCR sistemine püskürtülecek DEF miktarı için optimum şartlar sağlandığında statik karıştırıcının büyük ölçüde önem taşıdığı yapılan deneylerde görülmektedir.

4. SONUÇ

SCR sistemlerinde püskürtülen DEF ile egzoz gazı akışının homojen karışımının sağlanması katalizör önünde düzgün dağılımlı bir akış elde edilmesi önemlidir. Yapılan deneysel çalışmalarda motor tipi ve büyüklüğüne bağlı olarak karıştırıcıların %20-30 oranlarında NO_x dönüşümüne etki ettiğini gösterilmiştir. Kurulan SCR deney sisteminde bu durumu dikkate alınarak sisteme portatif, takılıp çıkarılabilir statik karıştırıcı eklenmiştir.

Deneyler birinci aşamada belirlenen ortalama egzoz gazı sıcaklığı 345-350 °C aralığında iken altı farklı DEF debisinde gerçekleştirilmiştir. Bu DEF debi değerlerinde sistemde statik karıştırıcının olduğu ikinci aşama ve olmadığı üçüncü aşama deneylerinde NO_x dönüşüm değerleri arasındaki yüzdesel farklar 6 farklı DEF debisine göre sırasıyla %0,07, %3,01, %16,63, %15,97, %0,39 ve %0,1 olarak hesaplanmıştır.

Özellikle 240 ve 320 mg/s'lik DEF debilerinde statik karıştırıcının SCR sisteminde NO_x dönüşüm performansı üzerinde büyük etkisinin olduğu görülmektedir. 240 mg/s'lik DEF debisinde statik karıştırıcı olduğunda NO_x dönüşümünde yaklaşık %17'lik bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir.

Abdulhamid ve ark. SCR katalizör girişine bıçaklı karıştırıcı ve kanatlı karıştırıcı olmak üzere iki farklı tipte statik karıştırıcı yerleştirerek hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi gerçekleştirmişlerdir. Her iki statik karıştırıcının birlikte sistemde kullanıldığında %92,8'lik en iyi üre dönüşüm veriminin elde edildiği, tek başına kullanımlarda kanatlı karıştırıcının ise bıçaklı karıştırıcıya göre %10,86 daha yüksek üre dönüşüm verimliliği sağladığını ortaya koymuşlardır. Statik karıştırıcı tasarımları değiştirilerek verimin daha da artırılacağı anlaşılmaktadır (Abdulhamid ve ark., 2017).

Düşük ve yüksek DEF debilerinde SCR sisteminde statik karıştırıcının varlığı veya yokluğunda NO_x dönüşüm oranında büyük bir fark olmadığı, püskürtülen DEF'in egzoz gazı ile yeterince homojen karıştığı söylenebilir. Yüksek debilerde ise gereğinden fazla DEF püskürtüldüğü için ortamda yeterince NH₃ oluşmuş ve karışım yoğun bir şekilde kendi içinde homojenlik sağlamıştır. 3

kata varan DEF debisi artışına rağmen NOx dönüşüm oranları aynı oranda artmamış, bununla birlikte amonyak salınımı ve tortu oluşma riski artmıştır.

SCR sistemine püskürtülecek DEF miktarı için optimum şartlar sağlandığında statik karıştırıcının büyük ölçüde önem taşıdığı yapılan deneylerde görülmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 20.FEN.BİL.27 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı BAP birimine, proje kapsamında görev alan elektronik altyapının hazırlanmasında destek veren Manisa Celâl Bayar Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden Sayın Doç. Dr. İsmail YABANOVA'ya, motor test düzeneğinin hazırlanmasında destek veren Afyon Kocatepe Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünden Sayın Doç. Dr. Yaşar Önder ÖZGÖREN'e, Katalizör malzemesinin tedarikinde ve bilgisinde desteğini esirgemeyen Mersin Üniversitesi Otomotiv Teknolojisi Bölümünden Sayın Doç. Dr. İbrahim Aslan REŞİTOĞLU'na teşekkür eder.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. YAZAR KATKISI

Şükrü Ayhan BAYDIR: Kavramsallaştırma, Süpervizyon, Proje Yönetimi, Yazılım, Veri Toplama ve İşleme, Kaynaklar, İlk Analiz, Doğrulama, Veri Görselleştirme, Araştırma, Yazım - Gözden Geçirme ve Düzenleme ve Emrah ERÇEK: Kavramsallaştırma, Yazım - İlk Taslak, Kaynaklar, Veri Toplama ve İşleme, İlk Analiz, Doğrulama, Araştırma, Yazım - Gözden Geçirme ve Düzenleme ile çalışmaya katkı sağlamışlardır.

8. KAYNAKLAR

- Abdulhamid, J., Bhanuprakash, T. V. K., Rao, P. V. J. M., Numerical Analysis of the Effect of Static Mixer on SCR System Performance of Marine Diesel Engine. *International Journal of Engineering and Techniques* 3(5), 183–188, 2017.
- Anonymous, 2023a. ANTOR 3LD510 Use and Maintenance Manual, https://anadolumotor.com/docs/uploads/pdf/ANTOR_3LD510_Kullanim_Bakim_El_Kitapci_gi_TR_ENG_FR.pdf(Erişim Tarihi: 13.02.2023).
- Anonymous, 2023b. BEA 060-Bosch Emissions Analysis-Technical Data, http://mediathek.bosch-automotive.com/files/bosch_wa/989/182.pdf(Erişim Tarihi: 13.02.2023).
- Anonymous, 2023c. Diesel Systems Denoxtronic 2.2 – Urea Dosing System for SCR systems - Technical Features, <https://www.yumpu.com/en/document/read/7945158/diesel-systems-denoxtronic-22-bosch-automotive-technology>(Erişim Tarihi: 13.02.2023).
- Anonymous, 2023d. The dosing module is designed to inject AdBlue® into the exhaust system- Technical specifications, <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/exhaust-gas-treatment/dosing-module-cv/>(Erişim Tarihi: 13.02.2023).
- Braun, P., Rabl, H., Matysik, F., Investigations on the Liquid-Phase Decomposition of AdBlue Urea for the Selective Catalytic Reduction Process. *Chemie Ingenieur Technik*, 91(7), 961–968, 2019.

- Erçek, E., Baydır, Ş. A., A Study on the Effect of Injection Injection Amount on NO_x Emissions in the Selective Catalytic Reduction (SCR) System in a Single Cylinder Diesel Engine. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 7(1), 37–43, 2023a
- Erçek, E., Baydır, Ş. A., Tek Silindirli bir Dizel Motoru için Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) Sistemi Tasarımı ve İmalatı, The 3rd International Symposium on Automotive Science and Technology (ISASTECH 2023), Ankara, 7-8 Eylül, pp: 546–560, 2023.
- Kurzydym, D., Žmudka, Z., Perrone, D., Klimanek, A., Experimental and numerical investigation of nitrogen oxides reduction in diesel engine selective catalytic reduction system. *Fuel*, 313, 2022.
- Reşitoğlu, İ. A., Effect of Catalyst Used in Exhaust Line on Emission Characteristics of a Single-Cylinder Diesel Engine. *Journal of Current Research on Engineering, Science and Technology*, 6 (2), 95-102, 2020.
- Stelzer, D. M., Design and Evaluation of an Improved Mixer for a Selective Catalytic Reduction System, University of Toronto Graduate Department of Mechanical Engineering & Industrial Engineering, Master Thesis, 2014.
- Wang X., Song G., Wu .Y, Yu L., Zhai Z. A., NO_x emission model incorporating temperature for heavy-duty diesel vehicles with urea-SCR systems based on field operating modes. *Atmosphere (Basel)* 10(6), 2019.
- Zhu, Y., Zhou, W., Xia, C., Hou, Q., Application and Development of Selective Catalytic Reduction Technology for Marine Low-Speed Diesel Engine: Trade-Off among High Sulfur Fuel, High Thermal Efficiency, and Low Pollution Emission. *Atmosphere*, 13(5), 731, 2022.