



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## SCR Sistemlerinde Kullanılan Üre Mikserlerinin Akış Davranışlarının İncelenmesi

 Buğra BAŞIHOŞ<sup>a,\*</sup>,  Suat SARIDEMİR<sup>b</sup>

<sup>a</sup> İmalat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: bugrabasihos89@gmail.com

DOI:10.29130/dubited.1291841

### Öz

Günümüzde artan dünya nüfusu ile birlikte içten yanmalı motora sahip taşıtların sayıda artmaktadır. Bu nedenle taşıt egzoz emisyonu kaynaklı kirleticilerin oranı da artmaktadır. Bu zararlı emisyonların oluşturduğu çevre ve hava kirliliğinin azaltılması ve emisyon sınırlandırılması kapsamındaki normlara uyulması için, yanma sonrası emisyon kontrol sistemlerinin geliştirilmesi konularında çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda dizel motorlu araçlarda NOx emisyonlarını azaltmak için, ADblue katkı maddesi (amonyak) ve Seçici Katalitik Redüksiyon (SCR) sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. ADblue katkı maddesinin SCR sistemlerinde daha iyi karışması ve iyi sonuç alınması için üre mikseri kullanılmaktadır. Egzoz sistemlerinde geri basıncın yüksek olması, performansı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle SCR sistemlerinde kullanılan mikserlerin oluşturacağı geri basıncın düşük olması ve SCR sisteminin efektif çalışabilmesi için amonyak (NH<sub>3</sub>) homojenlik indeksi (UI NH<sub>3</sub>) değerinin yüksek olması gerekmektedir. Üre mikserlerinin kanat sayısı, kanat açısı ve kanat uzunluğu karışım oranına etki eden parametrelerdir. Bu çalışmada, öncelikle 27 farklı mikserin, geri basınca ve UI NH<sub>3</sub>' e olan etkileri sayısal analiz yöntemiyle incelenmiştir. Parametrik çalışma için kanat uzunlukları, kanat açıları ve kanat sayıları değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Optimum mikser tasarımı için, geri basıncın 1 kPa'dan düşük olması ve UI NH<sub>3</sub> değerinin 0,85'ten yüksek olması hedeflenmiştir. 27 farklı mikser içinden, bu değerleri sağlayan 6 mikser prototip olarak imal edilmiş ve deneysel olarak geri basınç testleri ve UI NH<sub>3</sub> ölçümleri yapılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Kanat sayısı ve uzunluğunun geri basıncı arttırdığı, ancak UI NH<sub>3</sub> değerine etkisinin olmadığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** SCR, ADblue, Homojenlik indeksi, Geri basınç

## Investigation of Flow Behavior of Urea Mixers Used in SCR Systems

### ABSTRACT

Today, with the increasing world population, the number of vehicles with internal combustion engines is also increasing. Therefore, the proportion of pollutants caused by vehicle exhaust emissions is also increasing. Studies on the creation of post-combustion emission control systems are conducted in an effort to lessen the environmental and air pollution brought on by these harmful emissions and to conform to regulations regarding emission limitation. In this context, to reduce NOx emissions in cars with diesel engines, ADblue additive (ammonia) and Selective Catalytic Reduction (SCR) systems have been applied. To achieve superior results and improve ADblue additive mixing in SCR systems, a urea mixer is used. High back pressure in exhaust systems has a detrimental impact on performance. In order for the mixers used in SCR systems to have minimal back pressure and for the SCR system to function successfully, the ammonia (NH<sub>3</sub>) homogeneity index (UI NH<sub>3</sub>) value must be high. The

variables impacting the mixing ratio in urea mixers include; the quantity, angle, and length of the wings. First, using a numerical analysis method, the effects of 27 different mixers on back pressure and UI NH<sub>3</sub> were examined in this study. For the parametric study, the results were examined by changing the wing lengths, wing angles and wing numbers. The back pressure is aimed to be less than 1 kPa and the UI NH<sub>3</sub> value is intended to be greater than 0,85 for the optimal mixer design. Six of the 27 different mixers that provided these values were produced as prototypes, and the results of experimental back pressure tests and UI NH<sub>3</sub> measurements were confirmed. The number and length of the wings were found to increase back pressure but had no effect on the UI NH<sub>3</sub> value.

**Keywords:** SCR, ADblue, Homogeneity index, Back pressure

Geliş: 03/05/2023, Düzeltme: 19/06/2023, Kabul: 03/07/2023

## **I. GİRİŞ**

Günümüzde ülkemiz ve dünya nüfusunun artması ile birlikte içten yanmalı motorlu taşıt sayısı da artmaktadır. Taşıt sayısındaki bu artış, içten yanmalı motorlu taşıt egzoz emisyonları kaynaklı çevre ve hava kirliliğinin artışına büyük oranda katkı sağlamaktadır. Motorlu taşıt kaynaklı hava kirliliği, motorda yanma sonrası oluşan egzoz emisyonlarının atmosfere atılmasıyla oluşmakta olup, canlı sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir [1]. İçten yanmalı motorlarda petrol kökenli yakıtların yanmasıyla başlıca hidrokarbon (HC), karbonmonoksit (CO), azotoksit (NO<sub>x</sub>) ve partikül madde emisyonları (PM) oluşmaktadır [2]. Benzinli motorlarda emilen hava miktarı gaz kelebeği konumuna bağlı olduğundan dolayı, HC ve CO emisyon oranları, dizel motorlara göre daha fazladır. Dizel motorlar hava fazlalığı ile çalıştıklarından dolayı, PM ve NO<sub>x</sub> emisyonları benzinli motora göre daha fazladır [3]. Dizel motor veriminin, tork değerlerinin yüksek olması ve yakıt tüketim değerlerinin düşük olması, dizel motorları binek ve ticari taşıtlarda yaygın olarak kullanımını sağlamaktadır. Dizel motorlardaki kirleticilerin başlıcaları azot oksitler (NO<sub>x</sub>), karbon monoksit (CO), kükürtlü bileşenler, hidrokarbonlar (HC), aldehytler ve partikül maddelerdir [4]. CO emisyonları, yakıt içindeki karbon tamamen yanmamasından oluşurlar. Dizel motorlar hava fazlalığı ile çalıştıkları için, CO emisyon oranları düşüktür. Azot oksitler, yanma odasında sıcaklığın 1800 °K'in üzerine çıktığı zaman havanın içerisindeki azot ve oksijenin kimyasal olarak birleşmesinden oluşurlar. Hidrokarbonlar, yakıtın tam yanmaması veya yakıtın buharlaşması sonucunda ortaya çıkarlar. Aldehytler, yakıt olarak kullanılan hidrokarbonların eksik yanmasının sonucudur. Partikül madde, is, yanmamış yakıt, yağ, metal, nitrat ve sülfattır. Karışım oranı ve yakıt cinsi partikül maddelerin oluşumuna sebep olmaktadır [5].

İçten yanmalı motor kaynaklı egzoz emisyonlarının belirli oranlarda tutulması amacı ile ilk düzenlemeler 1968 yılında Kaliforniya'da yapılmıştır. Bu konudaki ilk sınırlama ECE R 15 Regülasyonu ve EEC 72/220 yönetmeliği ile 1972 yılında Avrupa Birliği ülkelerinde başlamıştır ve günümüzde Avrupa Birliği ülkeleri tarafından Euro normları oluşturulmuştur. Günümüzde tüm gelişmiş ve gelişme yolundaki dünya ülkelerinde, çeşitli regülasyonlarla (EEC/ECE, EPA, JIS) egzoz emisyonlarına denetimler uygulamaktadır [6]. Euro normları ile, içten yanmalı motor kaynaklı emisyonlara sınırlamalar getirilmiş olup, daha çok dizel motor kaynaklı olan NO<sub>x</sub> emisyonlarının ve partikül madde emisyonlarının azaltılması gibi şartları da beraberinde getirmiştir. 2016 yılında AB tarafından yürürlüğe giren Euro 6 standartlarına göre, egzoz emisyonlarının sınırlandırılması gerekmektedir. Euro 6 standartlarına göre, dizel motorlarda yanma verimini düşürmeden özellikle Azotoksit (NO<sub>x</sub>) emisyonlarının sınırlandırılması gerekmektedir. Bu standart, egzoz sistemine bir seçici katalitik indirgeme (SCR) sistemi ile egzoz gazı akışına özel bir üre-su çözeltilisi (UWS) veya Adblue çözeltilisinin enjekte edilmesi ile sağlanmıştır. Seçici katalitik indirgeme sistemleri, NO<sub>x</sub> emisyon oranlarını azaltmak için teknik olarak geliştirilmiş, motor performansını ve verimini düşürmeden yanma sonrası uygulanabilen bir sistemdir [7]. Bu üre suyu çözeltilisinin NO<sub>x</sub> emisyon oranlarını azaltmak için, egzoz gazı ile uygun bir şekilde karışması gerekmektedir [8]. Üre ayrışması üç aşamada gerçekleşir: ilk olarak üre su çözeltilisinden buharlaştırılır, ikinci olarak üre piroliz

reaksiyonu meydana gelir ve üçüncü olarak üre izosiyonik asit (HNCO) ve amonyağa (NH<sub>3</sub>) ayrışır [9]. Amonyak indirgeyici bileşen olarak kullanılabilir fakat zehirli yapısı ve depolanamaz oluşu kullanım zorluğu oluşturmaktadır [10].

SCR sistemlerinde mikser, SCR katalizörünün girişinde püskürtülen ürenin homojen bir dağılım sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Mikserler genellikle susturucu giriş borusunda ya da SCR katalizörünün belli bir mesafe önünde bulunurlar ve püskürtülen ürenin SCR katalizörünün tüm kanallarına ulaşmasını sağlamaktadırlar. SCR sisteminde, püskürtülen ürenin akış hacmi içerisinde homojen yayılmasını sağlayacak şekilde mikser tasarımı önem arz etmektedir. Literatürde, mikser tasarımının homojenlik indeksine (UI NH<sub>3</sub>) ve geri basınca olan etkilerinin incelendiği farklı çalışmalar bulunmaktadır.

Padula ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, altı kanatlı kılıç tip mikser ve 53 delikli mikserin UI NH<sub>3</sub> ve geri basıncına olan etkilerini incelenmiştir. Altı kanatlı kılıç tip mikserin, delikli yapıli mikserlere göre daha iyi UI NH<sub>3</sub> verdiği ve yüzey alanları birbirine yakın oldukları için geri basınç değerlerinin de birbirine çok yakın olduğu belirtilmiştir. Ayrıca enjekte edilen amonyağın kütleli büyüklüğünün, UI NH<sub>3</sub>'e etkisinin çok az olduğunu gözlemlemişlerdir [11]. Taewha ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, SCR sistemlerinde mikser kullanımının, amonyak homojenlik indeksine (UI NH<sub>3</sub>) etkisini mikserli ve miksersiz modelleri ile kıyaslamıştır. Mikser kullanılan SCR sistemlerinde UI NH<sub>3</sub> dağılımını, miksersiz modele göre büyük ölçüde iyileştirdiğini sayısal analiz yöntemleri ile tespit etmişlerdir [12]. Jeong ve arkadaşları SCR katalizörü ile üre enjektörü arasında kısa bir mesafe olmasından dolayı enjeksiyon açısı, enjektörün konumu ve enjeksiyon deliklerinin sayısının SCR katalizörü girişindeki amonyak dönüşüm oranı ve amonyak homojenlik dağılımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada; 60° ile 120° arasında üre enjeksiyonunun hem NH<sub>3</sub> dönüşüm oranının hem de maksimum NH<sub>3</sub> homojenlik indeksi verdiğini, 75° üre enjeksiyonu homojenlik endeksi için en yüksek sonucu ve 90° üre enjeksiyonu en yüksek NH<sub>3</sub> dönüşüm oranını verdiğini belirtmişlerdir. Püskürtülen ürenin konumunun SCR katalizörüne girmeden önce, kullanılan boru çapının en az 3 katı olması en yüksek %90 NH<sub>3</sub> homojenlik indeksini vermiştir [13]. Choi ve arkadaşları mikserin UI NH<sub>3</sub>'e olan etkilerini incelemek için up-down tip mikser, girdap tip mikser, kısmi girdap tip mikser ve miksersiz olarak CFD analizleri çalışmaları yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada mikser kullanımının NH<sub>3</sub> homojenlik indeksini ciddi anlamda iyileştirdiğini ve en yüksek sonuçları girdap tipi mikser verdiğini görmüştür [14]. Mehdi ve arkadaşları girdap tip mikser, çizgi tip mikser ve ikisini arka arkaya kullanarak (hem girdap hem çizgi tip) sayısal analiz çalışması yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada çizgi tip mikserin UI Hız değerinin girdap tip mikserlere göre daha iyi sonuç verdiğini, girdap tip mikserin UI NH<sub>3</sub> değerinin çizgi tip mikserlere göre daha iyi sonuç verdiğini ve iki mikserinde arka arkaya kullanılması durumunda hem UI Hız değerinin hem de UI NH<sub>3</sub> değerinin tek mikser kullanıma göre daha iyi sonuç verdiğini yaptıkları sayısal ve deneysel çalışmalarda görmüşlerdir [15]. Tan ve arkadaşları 45° açılı ve 8 kanata sahip mikserin üre dönüşüm oranına etkisini, üre karışım oranı ve UI NH<sub>3</sub> performansına etkilerini; miksersiz, tek mikser ve çift mikser kullanarak analiz yöntemi ile incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada çift mikser kullanmanın en iyi performans verdiğini ve karışım oranının mikser konumundan uzaklaştıkça arttığını belirtmişlerdir [16]. Zhu ve arkadaşları dört farklı tip mikserin egzoz gazı akışına ve SCR performansına etkilerini analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada merkezi kavisli mikser, konik yelpazeli mikser, düzenli yukarı aşağı tip mikser ve düzensiz yukarı aşağı tip mikseri incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda mikserlerin geri basınca, UI NH<sub>3</sub>'e ve UI Hız 'a olan etkilerini değerlendirmiş ve mikser kullanımının UI NH<sub>3</sub>'e faydalı olduğunu ancak geri basınç oluşturduğunu ve mikserlerin akış girdaplarının SCR sistemlerinde performansı değiştirdiğini belirtmişlerdir [17]. Sung ve arkadaşları miksersiz, karışım çemberi, mikser ve karışım çemberi ile beraber mikser kullanımının SCR sistemlerindeki performansını deneysel ve analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada karışım çemberi ve mikseri bir arada kullanınca en iyi performans aldıklarını görmüşlerdir. Ancak bunun geri basınca etkisi olumsuz olduğundan dolayı, geri basınç açısından da değerlendirmesi gerektiğini belirtmişlerdir [18]. Hakkı ve arkadaşı, mikser kullanımının SCR sistemleri kullanılan egzoz sisteminde akışa etkilerini deneysel ve analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada vana tipi mikser kullanmışlardır. Bir egzoz hattına mikserden belirli bir uzaklıkta iki pencere açıp, üre enjektöründen püskürtülen ürenin mikserden sonraki hareketlerini

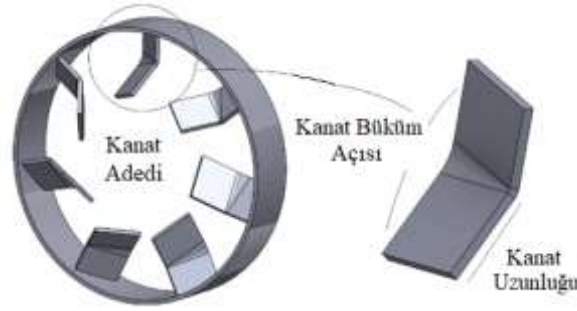
incelemişlerdir. Analiz çalışmalarında ise tetra ve holy mesh tiplerinin farklarını inceleyip, k-ε akış modelinde holy mesh tipinin daha doğru sonuç verdiğini ifade etmişlerdir [19]. Schiffmann ve arkadaşları, dört farklı tasarımlı mikserin deneysel yöntem ile oluşturdukları geri basınca ve UI NH<sub>3</sub> değerlerine bakmışlardır. Deneylerinde kılıç mikser, difüzör tip mikser, iki elemanlı mikser ve ters iki elemanlı mikser tipini kullanmışlardır. Bir hassas kamera ve optik düzenleyici ile görüntüleri yakalayan Philipp Schiffmann ve arkadaşları hesapları bu yöntem ile gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda debi değeri yükseldikçe mikserlerin oluşturduğu geri basınç değeri artmış ve en az geri basıncı kılıç tipi mikserde elde etmişlerdir. UI NH<sub>3</sub> değeri debiye bağlı fazla değişime uğramamış ve en iyi sonucu difüzör tip mikserde elde etmişlerdir [20].

Bu çalışmada, öncelikle 27 farklı mikserin, geri basınca ve UI NH<sub>3</sub>'e olan etkileri sayısal analiz yöntemiyle incelenmiştir. Parametrik çalışma için kanat uzunlukları, kanat açıları ve kanat sayıları değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Optimum mikser tasarımı için, geri basıncın 1 kPa'dan düşük olması ve UI NH<sub>3</sub> değerinin 0,85'ten yüksek olması hedeflenmiştir. 27 farklı mikser içinden, bu değerleri sağlayan 6 mikser prototip olarak imal edilmiş ve deneysel olarak geri basınç testleri ve UI NH<sub>3</sub> ölçümleri yapılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Kanat sayısı ve uzunluğunun geri basıncı arttırdığı, ancak UI NH<sub>3</sub> değerine etkisinin olmadığı görülmüştür.

## **II. MATERYAL VE METOD**

### **A. AKIŞ ANALİZLERİ MODELİ**

SCR sistemlerinde kullanılan mikserlere ait akış özellikleri kanat sayısı, kanat uzunlukları ve kanat açılarına göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada kanat sayıları, kanat açıları ve kanat uzunlukları değiştirilerek mikserlerin akış özelliklerinin değişimi analiz yöntemiyle incelenmiştir. Akış analizleri tek fazlı akış analizleri ve çift fazlı akış analizleri olarak iki kısımda incelenmiştir. Mikser analiz parametreleri Şekil 1'de verilmiştir.

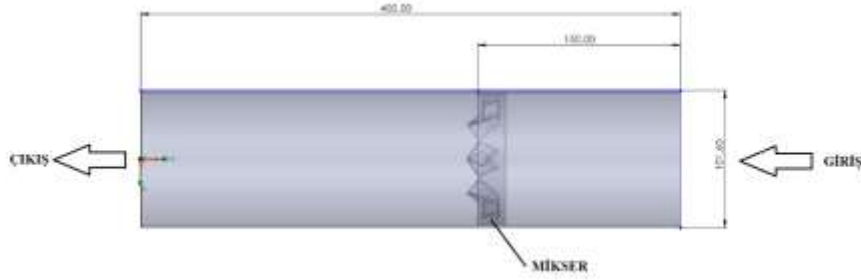


*Şekil 1. Mikser analiz modeli.*

Mikser tasarımı esnasında, deneysel çalışmalar yapılmadan önce mikserlerin oluşturacağı geri basınca ve UI NH<sub>3</sub> değerlerinin görülmesinde sayısal çalışmalar büyük önem teşkil etmektedir. Tek fazlı akış analizlerinde mikserlerin oluşturduğu geri basınca değeri bakılacak, çift fazlı akış analizlerinde ise püskürtülen ürenin boru kesitinde homojen dağılımı incelenecektir. Püskürtülen ürenin geri basınca etkisinin ihmal edilebilecek kadar az olduğundan dolayı tek fazlı akış analizi modellerine üre deliği modellenmemiştir ve çift fazlı akış analizlerinde ürenin dağılımına bakılacağı için çift fazlı akış analizi modeline dahil edilmiştir. Mikserlerin kanat uzunlukları 14, 18 ve 22 mm, kanat sayıları 6, 7 ve 8, kanat açıları 30°, 45° ve 60° olarak belirlenmiştir.

#### **A. 1. Tek Fazlı Akış Analizleri**

Tek fazlı akış analizleri kapsamında, mikserlerin geri basınca olan etkileri, Solidworks Flow Simulation programı ile analiz edilmiştir. Akış modelini oluşturmak için model Solidworks programı ile, CFD analizine uygun bir şekilde çizilmiştir. Tek fazlı akış analizi için mikserlerin kullanıldığı boru çapı ölçüleri Şekil 2’de verilmiştir. Mikserli borunun toplam uzunluğu, 400 mm olacak şekilde modellenmiştir. Mikser borunun girişinden 150 mm uzaklığa konumlandırılmıştır. Tek fazlı akış modelinde, üre püskürtülmesi dikkate alınmamış olup sadece giriş tarafından egzoz gazı akışı dikkate alınmıştır. Üre enjektörü için açılan delik çapının küçük olması, akış sonuçlarını etkilemeyeceği için, üre enjektörü deliği tek fazlı akış modeline eklenmemiştir.



Şekil 2. Mikser tek fazlı akış analiz modeli.

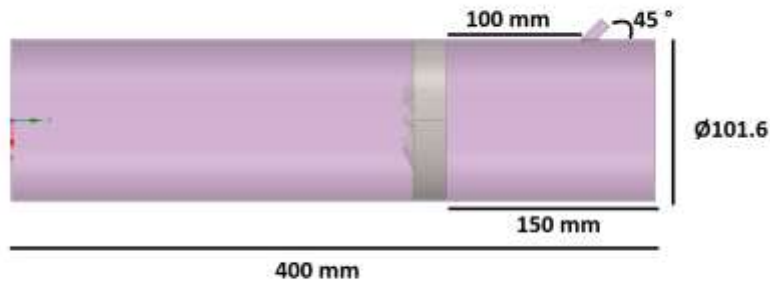
Tablo 1. Tek fazlı akış analizi sınır koşulları.

Akışkan	Giriş Kütleli Debi (kg/h)	Sıcaklık (°C)	Akış Modeli	Çıkış Açık Hava Basıncı (Pa)
Hava	380	650	Türbülanslı	101325

Tablo 1’de tek fazlı akış analizi için sınır koşulları verilmiştir. Giriş tarafına 380 kg/h kütleli debi tanımlanmış, akışkan malzeme hava olarak tanımlanmış ve sıcaklığı 650 °C olarak belirlenmiştir. Akış modeli olarak türbülanslı akış seçilmiş ve çıkış tarafına açık hava basıncı tanımlanmıştır.

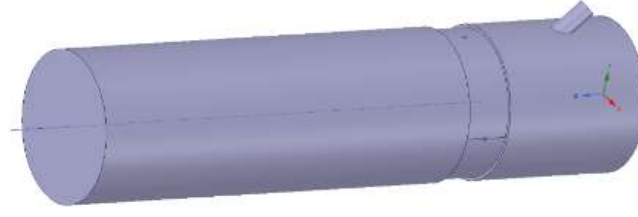
## A. 2. Çift Fazlı Akış Analizleri

Çift fazlı akış analizleri kapsamında, mikserlerin kanat sayıları, kanat açıları ve kanat uzunlukları UI NH<sub>3</sub>’e olan etkileri, Ansys Workbench programı kullanılarak incelenmiştir. Çift fazlı akış modelini oluşturmak için, model Solidworks programı ile CFD analizine uygun bir şekilde çizilmiştir. Çift fazlı akış analizi için mikserlerin kullanıldığı boru çapı ölçüleri Şekil 3’te verilmiştir. Mikser, borunun girişinden 150 mm uzaklığa konumlandırılmıştır. Çift fazlı akış modelinde ikinci faz akış için ürenin püskürtüleceği bölge modele eklenmiştir. UI NH<sub>3</sub> dağılımına ve değerine mikserden en uzak olan düzlemde bakılmıştır. Ürenin püskürtüleceği bölge, mikserden 100 mm öteye konumlandırılmıştır (Şekil 3).



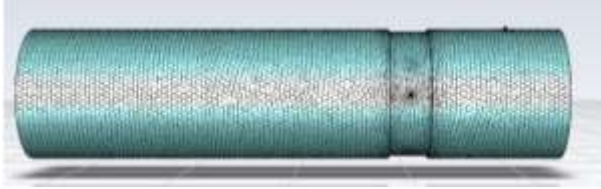
Şekil 3. Mikser çift fazlı akış analiz modeli.

Şekil 4’te model hazırlandıktan sonra çıkarılan çift fazlı akış hacmi (cavity) modeli verilmiştir. Ansys akış analizlerinde, cavity ile çözümlene yapılabilmektedir.

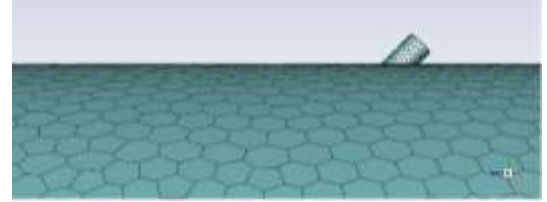


Şekil 4. Çift fazlı akış cavity modeli.

Bu çalışmada daha hassas mesh atabilmek ve daha hassas sonuçlar alabilmek için fluent with fluent meshin modülü ile çalışma yapılmıştır. Meshleme metodu olarak poly-hexcore mesh metodu kullanılmıştır. Çıkarılan cavity için yaklaşık 12 milyon adet mesh kullanılmıştır. Şekil 5’te Poly-hexcore mesh görünümü verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5. (a) Poly-hexcore mesh görünümü genel. (b) Poly-hexcore mesh görünümü detayı.

Tablo 2. Çift fazlı akış analizi sınır koşulları.

Faz 1	Giriş Debi (kg/h)	Sıcaklık (°C)	Multi Phase	Mechanism	Çıkış Açık Hava Basıncı (Pa)
Hava	380	650	Volume of Fluid (Serbest Yüzey Modelleme)	Vof to Dpm	101325
Faz 2	Üre Püskürtme Hızı (m/sn)	Üre Sıcaklığı (°C)	Injection Type	Discrete Phase	
Üre	60	23	Cone	On	

Tablo 2’de çift fazlı akış sınır koşulları verilmiştir. Faz 1 akışkan malzemesi olarak egzoz gazına en yakın özellikleri taşıyan hava, faz 2 akışkan malzemesi olarak üre, egzoz gazı debisi 380 kg/h, sıcaklık 650 °C, üre sıcaklığı 23 °C olarak girilmiştir. Mikserli SCR sistemleri Stage-V ve Euro 5 normları ve daha yüksek seviye emisyon normlarını elde etmek için kullanılmaktadırlar. Seçilen sınır koşul değerleri, Stage-V ve Euro 5 normlarını sağlamakla birlikte, ülkemizde traktör üreticilerinin sıkça kullandığı bir motorun egzoz gazı çıkış değerleri ile aynıdır.

## B. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tek fazlı ve çift fazlı akış analizlerinin doğrulanması amacıyla yapılan geri basınç ve UI NH<sub>3</sub> değerleri deneysel olarak da elde edilmiştir.

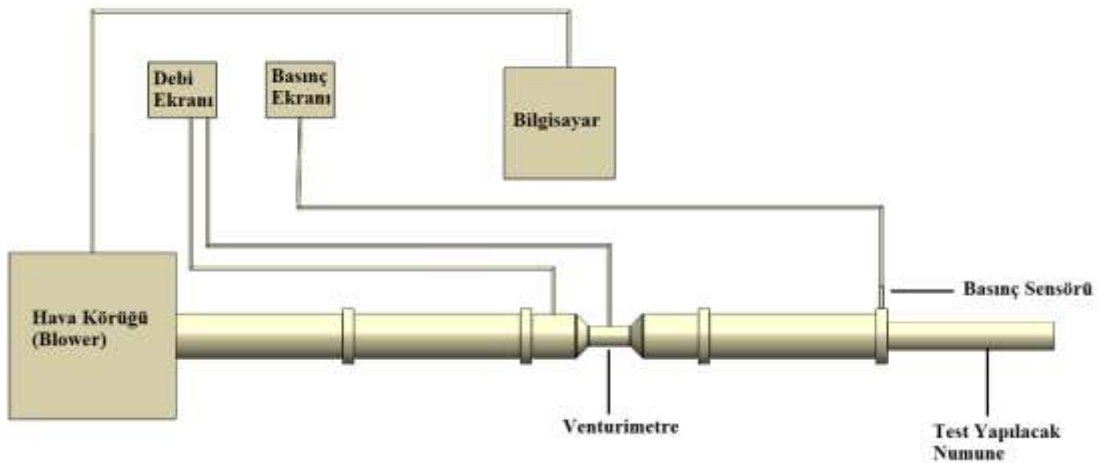


Şekil 6. Deneyselerde kullanılan mikserlerin resimleri.

Şekil 6'da geri basınç ve UI NH<sub>3</sub> testlerinde kullanılacak mikserlerin görselleri verilmiştir. Mikserler lazer tezgahında kanatları açınım olarak kesilmiş, borularının çentikleri lazer tezgahında açılmış ve abkant tezgahında kanat açıları verilmiştir. Kanatlar boru yüzeylerindeki çentiklere kaynatılarak imal edilmiştir. Kanatların ölçüsel olarak kontrolleri yapılmış ve analiz modeli ile bire bir uyduğu görülmüştür.

### B.1. Geri Basınç Deneyleri

Egzoz sistemleri egzoz gazının akışı sırasında belirli bir direnç yaratırlar, bu direnç geri basınç olarak adlandırılmaktadır ve motor üreticileri, ürettikleri motorun maksimum debi ve egzoz gazı sıcaklığında aşılmaması gereken bir geri basınç limiti belirlerler. Bu değeri egzoz sistemi tasarlarken geçmemek gerekmektedir. Geri basınç ölçümü yaparken istenilen hava debisini elde etmek için hava körüğü (blower) kullanılmıştır. Kullanılan hava kaynağı frekans değiştiricisi ve bilgisayar yardımı ile devir sayısı ayarlanarak akış hızları ayarlanmıştır. Bilgisayar ile devir sayıları birer kademe arttırılarak her kademe için kayıtlar alınmıştır. Alınan kayıtlar doğrultusunda debi-geri basınç grafiği elde edilmiştir. Şekil 7'de geri basınç test düzeneği verilmiştir.



Şekil 7. Geri basınç test düzeneği şeması.

Akış sırasında kütleli debinin hesaplanması için sisteme uygun venturimetre tasarlanmıştır. Ventürimetreler çalışma prensibi olarak gelen akış geniş kesit alanından, dar kesit alanına geçer ve

kesit alanı farklılarından dolayı basınç değişimi oluşur. Kütleli debi; oluşan basınç farkı değerlerine bağlı olarak Eşit.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d_b^2 \sqrt{2\Delta P_V} \rho_1 \quad (1)$$

Bu eşitlikte geçen  $q$ ,  $m$ ,  $C$ ,  $\beta$ ,  $\epsilon$ ,  $d_b$ ,  $\Delta P_V$ ,  $\rho_1$  terimleri sırası ile kütleli debiyi, boşaltım katsayısını, küçük çapın büyük çapa oranını, genişleme faktörünü, boğaz çapını, ventürimetrede ölçülen basınç farkını ve girişteki yoğunluğu ifade etmektedir.

Borunun giriş çapı ve girişteki yoğunluk değeri kullanılarak, kütleli debi yardımı ile akış hızında hesaplanabilmektedir.  $C$  ile ifade edilen boşaltım katsayısı ventürimetrede ki basınç kayıpları,  $\epsilon$  ile ifade edilen genişleme faktörü ise havanın özelliklerinin değişmesine bağlı olan katsayıdır. Bu değerler ventürimetrenin geometrisine, akışkanın özelliklerine bağlıdır ve standartlara göre deneysel yollarla elde edilen ifadeler esas alınarak belirlenmiştir. Şekil 8’de geri basınç test düzeneği resmi verilmiştir.



Şekil 8. Geri basınç test düzeneği resmi.

## B.2. UI NH<sub>3</sub> Ölçüm Deneyleri

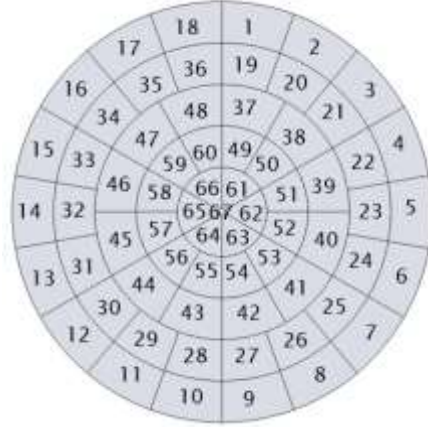
Şekil 9’da UI NH<sub>3</sub> ölçümü için kurulan test düzeneği verilmiştir. UI NH<sub>3</sub> ölçüm düzeneği bir dizel motor yardımı ile çalışmaktadır. Bu motor ile, akış analizlerinde kullanılan egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazı debisi karşılanmaktadır. Motorun egzoz manifoldu çıkışına ölçümü yapılacak olan mikserli egzoz hattı yerleştirilmiştir. Üre enjektörü çift fazlı akış analizleri ile aynı olması için mikserden 100 mm öncesine 45° açı ile konumlandırılmıştır.





**Şekil 9.** UI NH<sub>3</sub> ölçüm test düzeneği resmi.

SCR sistemlerinde mikser SCR katalizöründen önce kullanıldığı ve püskürtülen ürenin akış içerisinde her yere eşit dağılması gerektiği için ölçümü tek bir noktadan yapmak sonuçlarda hataya neden olur. Bu çalışmada egzoz borusu içerisine püskürtülen ürenin mikserden sonra boru kesiti üzerinde her yere ulaşip ulaşmadığını görmek için NH<sub>3</sub> sensörü ile, pitot tüpü yardımıyla toplamda 67 noktadan ölçüm yapılmıştır. Bu noktalar Şekil 10'da gösterildiği gibi, pitot tüpünün borunun en dış yüzeyinden merkezine doğru 10' ar mm hareket ettirilerek, 20° farka sahip 18 farklı noktanın seçimi ile elde edilmiştir.



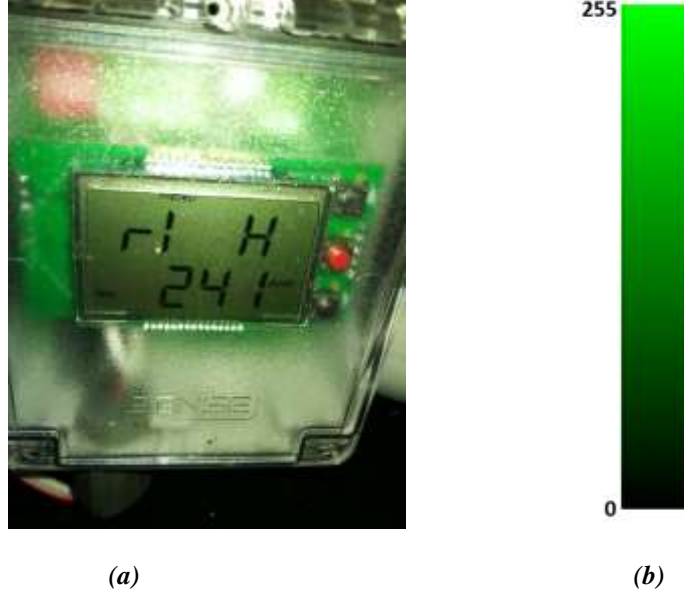
(a)



(b)

**Şekil 10.** (a) NH<sub>3</sub> ölçüm noktaları ve (b) Pitot tüpü ve cetveli.

Numaralandırılan 67 noktadan pitot tüpünün cetveli ve dijital açı ölçer ve Sense marka yüksek hassasiyetli NH<sub>3</sub> ölçüm sensörü yardımı ile ölçüm yapılmıştır. NH<sub>3</sub> ölçüm sensörü, NH<sub>3</sub> miktarına göre 0 ile 255 arasında değer vermektedir. Bunun için 0 ile 255 arası renk skala cetveli oluşturulmuştur. Şekil 11'de örnek ölçüm fotosu ve renk skalası verilmiştir.



Şekil 11. (a) Örnek ölçüm fotosu ve (b) Renk skalası.

Ölçülen 6 mikserin ölçüm kayıtları Solidworks çizim programı yardımıyla renk kodları olarak girilerek modelde noktaların yüzeyleri boyanmıştır.

UI NH<sub>3</sub> değerini hesaplamak için 0 değeri 0 ve 255 değeri 100 kabul edilmiştir. Noktaların yüzey alanları farklı olduğu için ağırlıklı ortalama alınarak UI NH<sub>3</sub> değeri Eş. 2 kullanılarak yüzdesel olarak hesaplanmıştır.

$$UI NH_3 = \frac{\sum(YA \times \ddot{O}D)}{TYA} \times \frac{100}{255} \quad (2)$$

Eş. 2’de YA, ÖD, TYA sırasıyla ölçüm alınan noktanın bulunduğu yüzeyin alanı, ölçüm değeri ve toplam yüzey alanını ifade etmektedir.

### **III. BULGULAR VE TARTIŞMA**

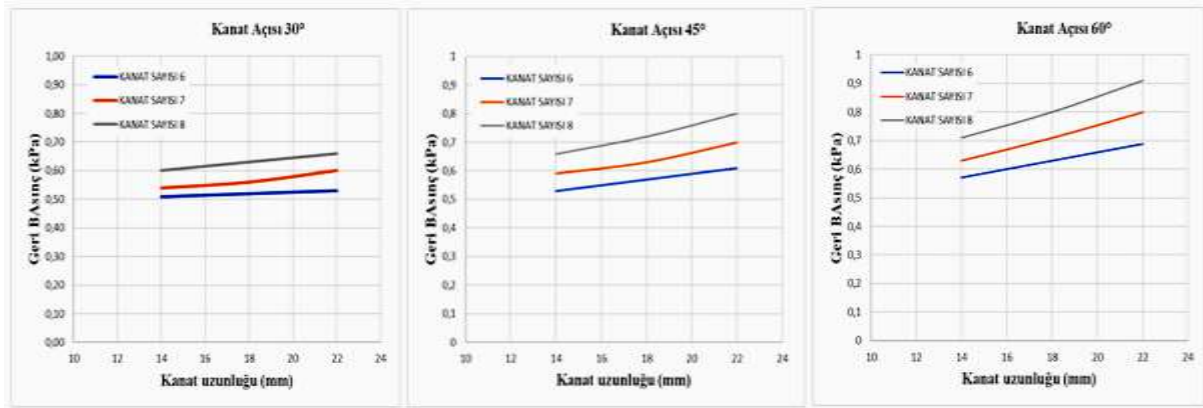
Kanat sayılarının, kanat açılarının ve kanat uzunluklarının mikser performansını belirleyen geri basınç ve UI NH<sub>3</sub>’e olan etkileri analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Tablo 3’te analiz sonuçlarına göre elde edilen tek fazlı ve çift fazlı akış değerleri verilmiştir. Geri basınç değerleri tek fazlı akış analizlerinden, UI NH<sub>3</sub> sonuçları çift fazlı akış analizlerinden elde edilmiştir.

Tablo 3. Tek fazlı ve çift fazlı akış analizleri sonuçları.

Mikser	Kanat Sayısı	Kanat Açısı (°)	Kanat Uzunluğu (mm)	Geri Basınç Sonuçları (kPa)	UI NH <sub>3</sub> Sonuçları
Mikser 1	6	30	14	0,51	0,919
Mikser 2	6	30	18	0,52	0,939
Mikser 3	6	30	22	0,53	0,908
Mikser 4	6	45	14	0,53	0,886
Mikser 5	6	45	18	0,57	0,910
Mikser 6	6	45	22	0,61	0,926

Mikser 7	6	60	14	0,57	0,941
Mikser 8	6	60	18	0,63	0,865
Mikser 9	6	60	22	0,69	0,902
Mikser 10	7	30	14	0,54	0,916
Mikser 11	7	30	18	0,56	0,927
Mikser 12	7	30	22	0,60	0,933
Mikser 13	7	45	14	0,59	0,897
Mikser 14	7	45	18	0,63	0,902
Mikser 15	7	45	22	0,70	0,948
Mikser 16	7	60	14	0,63	0,838
Mikser 17	7	60	18	0,71	0,846
Mikser 18	7	60	22	0,80	0,851
Mikser 19	8	30	14	0,60	0,914
Mikser 20	8	30	18	0,63	0,924
Mikser 21	8	30	22	0,66	0,929
Mikser 22	8	45	14	0,66	0,872
Mikser 23	8	45	18	0,72	0,890
Mikser 24	8	45	22	0,80	0,883
Mikser 25	8	60	14	0,71	0,859
Mikser 26	8	60	18	0,80	0,873
Mikser 27	8	60	22	0,91	0,915

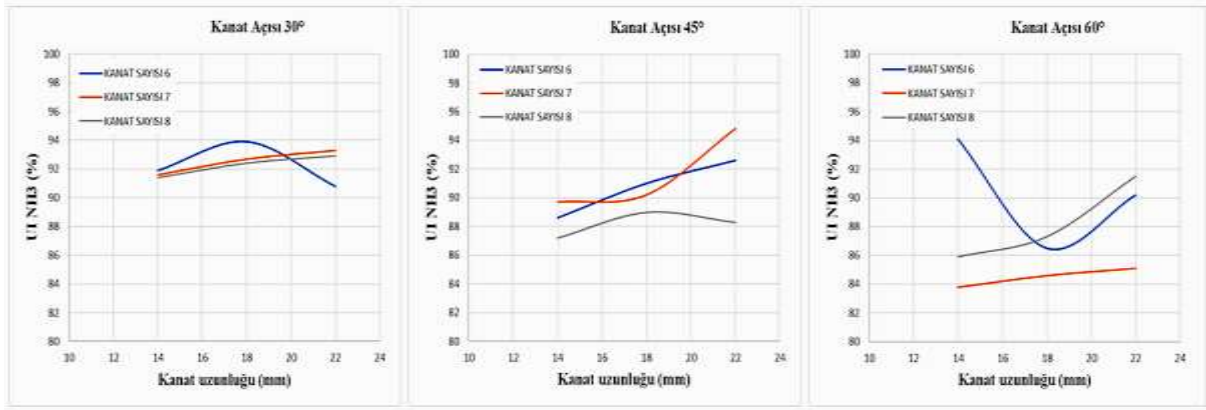
Analiz sonuçlarından elde edilen verilere göre, Şekil 12’de, mikserlerin 30°, 45° ve 60° kanat açıları için, kanat sayılarına ve kanat uzunluğuna bağlı olarak değişen geri basınç değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 12. Mikserlerin 30°, 45° ve 60° kanat açıları için, kanat sayılarına ve kanat uzunluğuna bağlı olarak değişen geri basınç değerleri.

Şekil 12’de görüldüğü gibi, tüm kanat açısı değerleri için geri basınç değerleri, kanat sayısı ve kanat uzunluğu ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu durum kanat sayısı, kanat açısı ve kanat uzunluğunu artırmanın, yüzey alanındaki kapalı alan oranını artırmasından kaynaklanmaktadır. Boru içerisindeki kapalı alan oranının artması, geri basınç değerini artırmaktadır. 30° kanat açısı ile en küçük geri basınç değerleri elde edilir iken, 60° kanat açısı ile en büyük geri basınç değerleri elde edilmiştir. Bu durum kanat açıları yükseltildikçe, mikserin borunun kesitinde oluşturduğu kapalılık oranı arttırdığından kaynaklanmaktadır.

Şekil 13’te analiz sonuçlarından elde edilen verilere göre mikserlerin 30°, 45° ve 60° kanat açıları için, kanat sayılarına ve kanat uzunluğuna bağlı olarak değişen UI NH<sub>3</sub> değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



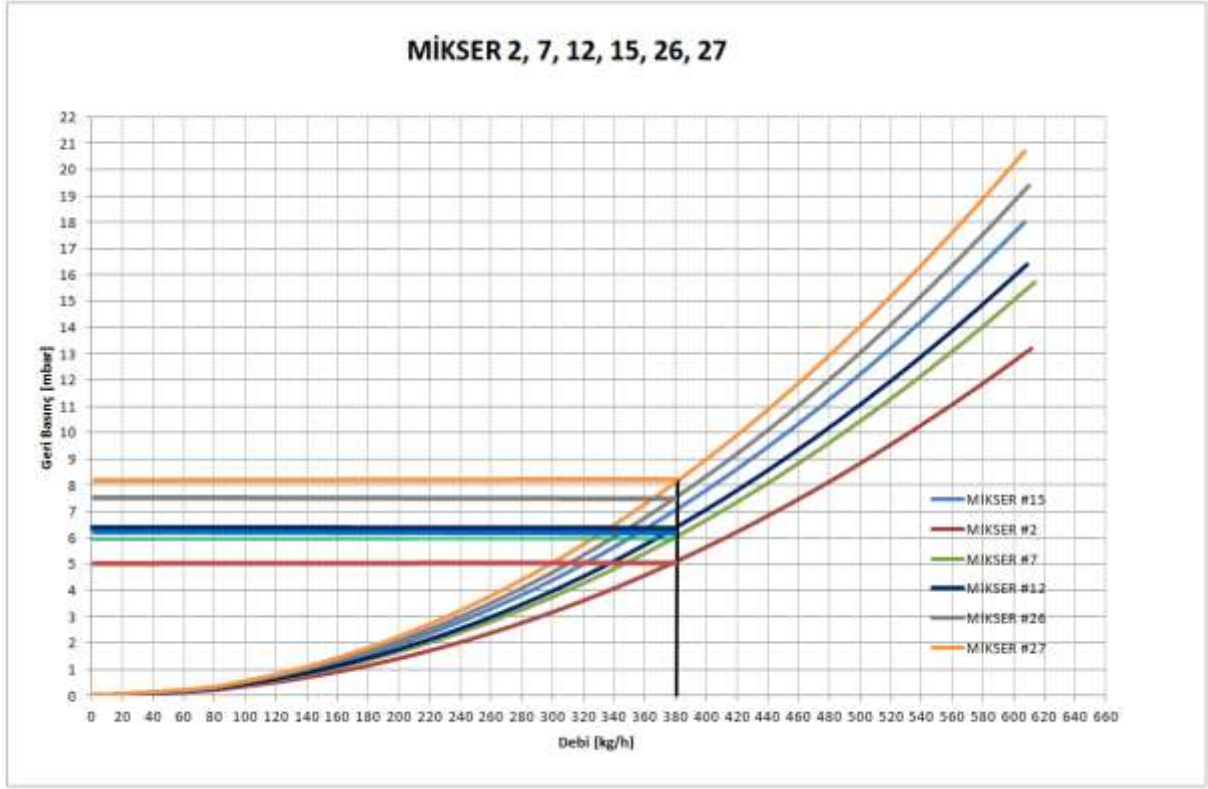
Şekil 13. Mikserlerin 30°, 45° ve 60° kanat açıları için, kanat sayılarına ve kanat uzunluğuna bağlı olarak değişen UI NH<sub>3</sub> değerleri.

Şekil 13'te görüldüğü gibi, mikserin 30° kanat açısı için 7 ve 8 kanatlı mikserlerde, UI NH<sub>3</sub> değerinin kanat uzunluğuna bağlı olarak yükseldiği, 6 kanatlı mikserde ise, UI NH<sub>3</sub> değerinin 18 mm kanat uzunluğuna kadar yükseldiği ve 18 mm'den sonra düşüşe geçtiği görülmektedir. Mikserin 45° kanat açısı için, 6 kanatlı mikser için kanat uzunluğu arttıkça UI NH<sub>3</sub> değerinin yükseldiği, 7 kanatlı mikserin UI NH<sub>3</sub> değerinin 18 mm kanat uzunluğuna kadar yaklaşık aynı olduğu, 18 mm'den sonra ise yükseldiği, 8 kanatlı mikserde ise UI NH<sub>3</sub> değerinin 18 mm kanat uzunluğuna kadar yükseldiği ve 18 mm'den sonra düşüşe geçtiği görülmektedir. Mikserin 60° kanat açısı için, 7 ve 8 kanatlı mikserler için kanat uzunluğu arttıkça UI NH<sub>3</sub> değerinin yükseldiği, 6 kanatlı mikser için ise 18 mm kanat uzunluğuna kadar UI NH<sub>3</sub> değerinin düştüğünü ve 18 mm'den sonra yükselişe geçtiği görülmüştür. 30 ve 60 kanat açısı için 6 kanatlı mikserdeki görülen kanat uzunluğuna bağlı UI NH<sub>3</sub> değerlerindeki değişimlerin, dairesel hareketle kendi eksenini etrafında dönen egzoz gazı hareketlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Optimum mikser tasarımı için, geri basıncın 1 kPa'dan düşük olması ve UI NH<sub>3</sub> değerinin 0,85'ten yüksek olması hedeflenmiştir. 27 farklı mikser içinden, bu değerleri sağlayan 6 mikser prototip olarak imal edilmiş ve deneysel olarak geri basınç testleri ve UI NH<sub>3</sub> ölçümleri yapılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Tablo 4'te analizi yapılan 27 farklı mikser içinden seçilen 6 mikserin tek fazlı akış analizlerinden elde edilen geri basınç sonuçları ile deneysel yöntemle elde edilen geri basınç sonuçları verilmiştir.

Tablo 4. Tek fazlı analiz ve geri basınç test sonuçları.

Mikser	Kanat Sayısı	Kanat Açısı (°)	Kanat Uzunluğu (mm)	Geri Basınç Analizi (kPa)	Geri Basınç Deneyi (kPa)
Mikser 2	6	30	18	0,52	0,50
Mikser 7	6	60	14	0,57	0,60
Mikser 12	7	30	22	0,60	0,64
Mikser 15	7	45	22	0,70	0,72
Mikser 26	8	60	18	0,80	0,76
Mikser 27	8	60	22	0,91	0,82



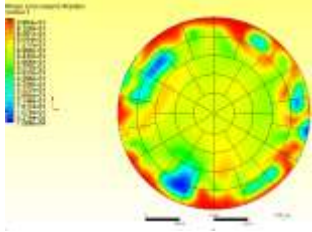

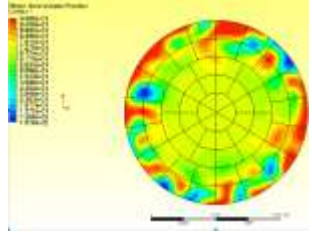
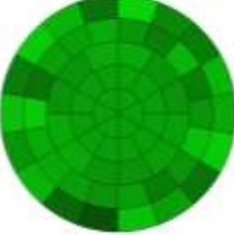
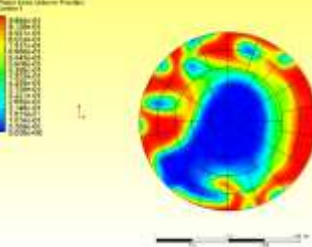

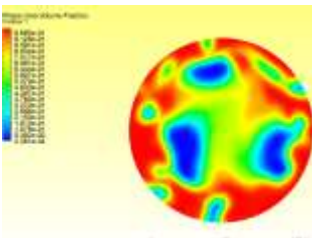

*Şekil 14. Geri basınç deney sonuçları*

Şekil 14’de geri basınç deneyleri yapılan 6 mikserin geri basınç grafikleri görülmektedir. Tablo 4’te, analiz ve test sonuçları çok yakın çıktığı görülmektedir. Geri basınç eğrisi ve analiz koşullarındaki girdilere denk gelen geri basınç değerlerine bakıldığında, en yüksek geri basıncı 27 numaralı mikser oluşturmaktadır. Kanat sayısı, kanat açısı ve kanat uzunluğu düşürüldükçe geri basınç değeri düşmektedir.

Tablo 5’te UI NH<sub>3</sub> deney ve analiz sonuçları verilmiştir.

*Tablo 5. UI NH<sub>3</sub> analiz ve deney sonuçları.*

Mikser	UI NH <sub>3</sub> Analiz Görseli	UI NH <sub>3</sub> Analiz Değeri	UI NH <sub>3</sub> Deney Görseli	UI NH <sub>3</sub> Deney Sonucu
Mikser 2		0,939		0,915
Mikser 7		0,941		0,920

Mikser 12		0,933		0,908
Mikser 15		0,948		0,924
Mikser 26		0,873		0,857
Mikser 27		0,915		0,898

Yapılan çalışmalarda analiz ve deney sonuçlarının birbiri ile uyum sağladığı görülmüştür. En düşük geri basınç değerini Mikser 1 vermesine karşılık, en yüksek UI NH<sub>3</sub> değerini Mikser 15 vermiştir. Bu sonuçlara göre en ideal olan mikserin, hem geri basınç olarak yüksek değer vermemesi hem de UI NH<sub>3</sub> değeri olarak yüksek performans sergilemesi nedeni ile Mikser 15 olduğu görülmüştür.

#### **IV. SONUC**

Çalışmada farklı mikserlerin, geri basınca ve UI NH<sub>3</sub>'e olan etkileri sayısal analiz ve deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Parametrik çalışma için kanat uzunlukları, kanat açıları ve kanat sayıları değiştirilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Mikserler egzoz sistemlerinin toplam geri basınçlarına direkt etki ettiğinden dolayı, komple sistemin izin verdiği geri basınç limitini aşmamak ve aynı zamanda en yüksek UI NH<sub>3</sub> değerini yakalamak için mikser tasarımı yaparken motor üreticisinin vereceği limitleri göz önünde bulundurmamak gerekmektedir. Bu çalışmada, SCR sistemlerinde kullanılan mikserlerin kanat sayıları, kanat açıları ve kanat uzunlukları değiştirilerek mikser tasarımının geri basınca ve UI NH<sub>3</sub>'e olan etkileri akış analizleri ile ve deneysel olarak incelenmiştir. Kanat sayısı, kanat açısı ve kanat uzunlukları değiştirilerek farklı mikser tasarımları yapılmıştır. Bu kapsamda 6,7, 8 kanat sayılı, 30°, 45°, 60° kanat açılı ve kanat 14, 18, 22 mm kanat uzunluklu mikserler tasarlanmıştır.

Analiz ve deney sonuçlarına göre, kanat sayısının, kanat açısının ve kanat uzunluklarının artması mikser geri basınçını artırdığı görülmüştür. Kanat sayısı 6, kanat açısı 30° ve kanat uzunluğu 14 mm olan

Mikser 1 geri basınç değeri olarak 0,51 kPa, kanat sayısı 8, kanat açısı 60° ve kanat uzunluğu 22 mm olan Mikser 27 geri basınç değeri olarak 0,91 kPa vermiştir.

7 kanatlı mikserlerin genel olarak en iyi UI NH<sub>3</sub> performansı verdiği görülmüştür. Kanat sayısı 7, kanat açısı 45° ve kanat uzunluğu 22 mm olan Mikser 15'in en iyi UI NH<sub>3</sub> değerini (0,948) verdiği görülmüştür.

Oluşturdukları geri basınç ve UI NH<sub>3</sub> değeri açısından bakıldığında en optimum mikser, en yüksek UI NH<sub>3</sub> ve ortalama geri basınç oluşturmasından dolayı Mikser 15 olduğu görülmüştür. Geri basınç olarak düşük sonuç veren (0,52 kPa) ve UI NH<sub>3</sub> değeri olarak yüksek (0,939) bulunan Mikser 2'inde performans olarak iyi sonuç verildiği görülmektedir.

Bu çalışma farklı mikser tasarımlarının geri basınç ve UI NH<sub>3</sub> üzerindeki etkilerini incelemekte ve sonuçlarını sunmaktadır. Gelecekte bu çalışmayı ilerletmek ve daha kapsamlı hale getirmek için; farklı parametrelerin (kanat şekli, kanat aralıkları gibi.) etkisi incelenebilir, daha fazla mikser parametresi ile daha kapsamlı sonuçlar elde ederek, daha fazla deneysel veriler toplanarak çalışma kapsamı genişletilebilir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] Ayhan Vezir, "Bir dizel motoruna buhar enjeksiyonunun NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarına etkisinin araştırılması," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2009.
- [2] Yunus Özkan, "Farklı özellikteki duvar akışlı dizel partikül filtrelerinin basınç kaybına etkilerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2016.
- [3] Cem Soruşbay, Egzoz gazları emisyonu, *Ders Notları*, İstanbul, 2015.
- [4] A. Keskin, S. Sağıroğlu, "Dizel motorlarından kaynaklanan egzoz emisyonları ve kontrol yöntemleri," *Mühendis ve Makina*, c. 51, sayı 606, ss. 1-8, 2010.
- [5] A. Keskin, "Dizel motorlarından partikül madde emisyon kontrolü ve gelişmeler," 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, IATS 2009, Karabük, Türkiye, 2009, ss. 1-7.
- [6] T. V. Johnson, "Diesel emission control in review." *Journal Of Fuels and Lubricants*, c. 116, sayı 4, ss. 76-87, 2007.
- [7] P. Schiffmann, M. Lecompte, O. Laget, "Experimental Investigation of Novel Ammonia Mixer Designs for SCR Systems," *IFP Energies Nouvelles*, SAE Technical Paper, United States, ISSN 0148-7191, 2018.
- [8] G. Mehdi, S. Zhou, Y. Zhu, A. Shah, K. Chand, "Numerical Investigation of SCR Mixer Design Optimization for Improved Performance," *Processes*, c. 7, sayı 3, ss. 168-177, 2019.
- [9] C. Zhao, D. Lou, Y. Zhang, K. Lu, S. Liu, "Application Study on a New Hybrid Canning Structure of After-Treatment System for Diesel Engine," *Energies*, c. 12, sayı 6, ss. 733-746, 2020.
- [10] C. Zhang, C. Sun, M. Wu, K. Lu, "Optimisation design of SCR mixer for improving deposit performance at low temperatures," *Fuel*, c. 237, sayı 1, 465-474, 2019.
- [11] G. Padula, P. Schiffmann, M. Lecompte, Olivier Laget, "Computational Fluid Dynamics

Study of Gaseous Ammonia Mixing in an Exhaust Pipe Using Static Mixers," *SAE International Journal of Engines*, c. 10, sayı 4, ss. 1894-1902, 2017.

[12] T. Park, Y. Sung, T. Kim, I Lee, G. Choi, "Effect of static mixer geometry on flow mixing and pressure drop in marine SCR applications," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, c. 6, Sayı 1, ss. 27-38, 2014.

[13] S.J. Jeong, S.J. Lee, and W.S. Kim, " Numerical Study on the Optimum Injection of Urea–Water Solution for SCR DeNO<sub>x</sub> System of a Heavy-Duty Diesel Engine to Improve DeNO<sub>x</sub> Performance and Reduce NH<sub>3</sub> Slip," *Environmental Engineering Science*, c. 25, sayı 7, ss. 1017-1035, 2007.

[14] C. Choi, Y. Sung, G. Min Choi, and D. J. Kim, "Numerical Analysis of Urea Decomposition with Static Mixers in Marine SCR System," *Journal of Clean Energy Technologies*, c. 3, sayı 1, ss. 39-42, 2015.

[15] G. Mehdi, S. Zhou, Y. Zhu, A. Shah, K. Chand, "Numerical Investigation of SCR Mixer Design Optimization for Improved Performance," *Processes*, c. 7, sayı 3, ss. 168-177, 2019.

[16] L. Tan, P. Feng, S. Yang, Y. Guo, S. Liu, Z. Li, "CFD studies on effects of SCR mixers on the performance of urea conversion and mixing of the reducing agent," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, c. 123, sayı 1, ss. 82-88, 2018.

[17] Y. Zhu, T. Li, C. Xia, Y. Feng, S. Zhou, "Simulation analysis on vaporizer/mixer performance of the high-pressure SCR system in a marine diesel," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, c. 148, sayı 1, ss. 1-5, 2020.

[18] Y. Sung, M. Choi, T. Park, C. Choi, Y. Park, G. Choi, "Synergistic effect of mixer and mixing chamber on flow mixing and NO<sub>x</sub> reduction in a marine urea-SCR System," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, c. 150, sayı 3, ss. 1016-1020, 2020.

[19] İ. H. Savcı, M. Z. Gül, "A methodology to assess mixer performance for selective catalyst reduction application in hot air gas burner," *Alexandria Engineering Journal*, c. 61, sayı 9, ss. 6621-6633, 2022.

[20] P. Schiffmann, M. Lecompte, O. Laget, "Experimental investigation of Novel Ammonia Mixer Designs for SCR Systems," *SAE World Congress & Exhibition*, Detroit, United States, 2018, ss 343-356.