
	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 28.06.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 25.07.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.323821	

## Duvar akışlı bir partikül filtresindeki basınç kaybının deneysel ve nümerik incelenmesi

Yunus Özkan<sup>1</sup>, İbrahim Özsert<sup>2</sup>, İdris Cesur<sup>3</sup>, Vezir Ayhan<sup>\*4</sup>

### ÖZ

Dizel motorlarda yanmanın tam verimle gerçekleşmemesi sonucunda zararlı gazlar ve partikül madde çevreye atılmaktadır. Dizel motorlar fakir karışımda çalıştıklarından dolayı azot oksit ve partikül madde emisyonları fazladır. Dizel motorlarda, partikül madde emisyonlarını kontrol altına almak için partikül filtreleri kullanılmaktadır. Partikül filtresi, içerisinde egzoz gazlarının çapraz akış yapmasını sağlayarak katı ve sıvı partikül madde emisyonlarını biriktirmek için tasarlanmıştır. Bu çalışmada, dizel partikül filtresinin basınç kaybı kurulan deney düzeneği üzerinde ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda partikül filtresine ait geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısı hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak basınç kaybı analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** partikül filtresi, basınç kaybı, partikül madde

### Experimental and numerical investigation of pressure loss in a wall flow particulate filter

### ABSTRACT

In diesel engines, harmful gases and particulate matter are released to environment, since combustion does not occur with full efficiency. Nitrogen oxide and particulate matter emissions are too high because of operation on a lean mixture in diesel engines. Particulate filters are used to control particulate matter emission in diesel engines. Particulate filters are designed to collect solid and liquid particulate matter emissions while exhaust gases to do cross flow. In this article, pressure through particulate filter measured on the set up test arrangement. Permeability and inertial loss coefficient are calculated after the measurement. Pressure drop analysis is carried out with a finite element program. Experimental and numerical results are compared in the study at last.

**Keywords:** particulate filter, pressure drop, particulate matter

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Yunus Özkan, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği, Sakarya

<sup>2</sup> İbrahim Özsert, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya

<sup>3</sup> İdris Cesur, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya

<sup>4</sup> Vezir Ayhan, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya

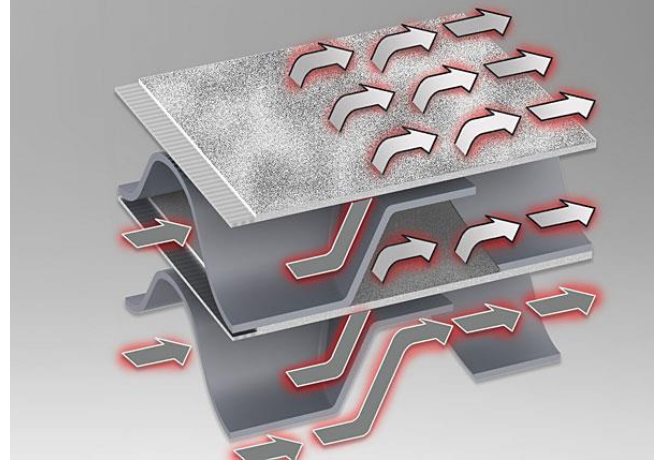
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dizel motorlar, verimlerinin yüksek ve yakıt sarfiyatlarının düşük olmasından dolayı günümüzde taşımacılıkta ve tarımda tercih edilmektedir [1]. Ancak, çalışma prensibinden dolayı, Otto motorlarına göre daha fazla çevre ve insan sağlığı açısından tehdit oluşturan NOx (azot oksit) ve PM (partikül madde) emisyonu yaymaktadırlar [2]. İdeal şartlarda yanmanın meydana gelmesi durumunda bu zararlı emisyonlar oluşmamaktadır. Fakat içten yanmalı motorlar hiçbir zaman ideal şartlarda çalışmadıkları için bu zararlı emisyonlar meydana gelmektedir.

Azot oksitler, yüksek sıcaklıklarda özellikle silindir içerisindeki sıcaklığın 1800 °C' yi geçtiği durumlarda, havanın içerisindeki azotun (N<sub>2</sub>) ve oksijenin (O<sub>2</sub>) birleşmesinden meydana gelmektedir. Partikül madde emisyonları ise, silindir içerisindeki yakıtın hava ile tam karışmaması veya yanma için yeterli zamanının olmaması durumunda, yanmanın tam olarak gerçekleşmemesinden oluşmaktadır [3]. Partikül madde emisyonlarının büyük çoğunluğu katı ve sıvı karbon (C) tanecikleridir.

Dizel motorlarından salınan partikül madde emisyonlarını kontrol altına almak için partikül filtreleri kullanılmaktadır. Partikül filtresi, yapısı gereği egzoz gazlarının geçişine izine verirken partikül madde emisyonlarını biriktirmektedir [4]. Yapısal olarak kısmi akışlı ve duvar akışlı olmak üzere iki şekilde üretilmektedirler [5].

Kısmi akışlı partikül filtreleri metalden imal edilmektedirler. Malzeme olarak alüminyum titanyum alaşımı kullanılmaktadır. Kısmi akışlı sistemlerde PM emisyonları mesh yapı içerisinde tutularak dışarı atılması engellenmektedir. Kanal sonları kapalı olmadığı için PM emisyonlarını % 60 oranında filtre edebilmektedirler [6]. Kısmi akışlı partikül filtresinin yapısı Şekil 1' de görülmektedir.

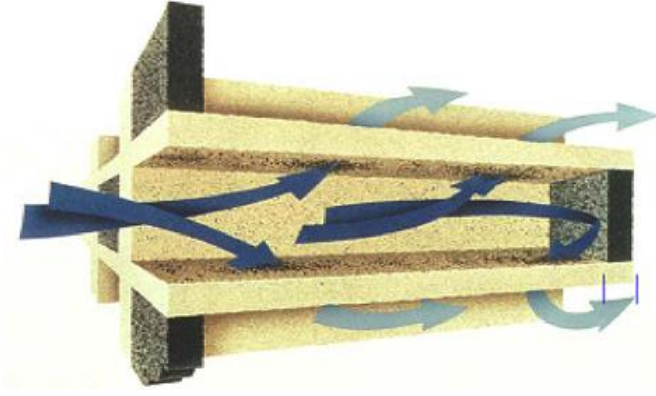


Şekil 1. Kısmi akışlı partikül filtresi (Partial flow particulate filter)

Duvar akışlı partikül filtrelerinin malzemesi ise, seramiktir. Silisyum karbid veya kordierit malzeme kullanılmaktadır. Silisyum karbid partikül filtreleri parçaları olarak imal edilebilmesi ve sıcaklığa dayanımının yüksek olmasından kordierit filtrelerden daha çok tercih edilmektedir [7]. Duvar akışlı sistemlerde, kanal sonları kapalı olduğu için PM emisyonları %90' ın üzerinde filtre edilebilmektedir [8]. Duvar akışlı partikül filtresi Şekil 2' de görülmektedir. Günümüzde devreye giren emisyon regülasyonlarının sağlanabilmesi için duvar akışlı partikül filtreleri tercih edilmektedir.

Partikül filtreleri PM emisyonlarının kontrol altına alınmasında çok etkili bir yöntem olmakla birlikte filtrenin yapısı ve içerisinde zamanla biriken partikül maddelerden dolayı egzoz gazlarının geri basıncını arttırmaktadır. Geri basıncın artması egzoz zamanı pompalama kayıplarını, silindir içi artık gaz kesrini ve volümetrik verimi olumsuz yönde etkilediğinden dolayı, motor performansını kötüleştirir. Bu nedenden dolayı, motor sonrasında bulunan partikül filtresi, oksidasyon katalizörü ve egzoz gibi sistemlerin oluşturmuş olduğu geri basıncın bilinmesi gerekmektedir.

Konstandopoulos ve arkadaşları, [9] yapmış olduğu çalışmada duvar akışlı partikül filtresinden kaynaklı basınç kaybının matematik modelini oluşturmuştur. Partikül filtresine ait yapısal, geometrik ve akış özelliklerine göre basınç kaybı hesaplanabilmektedir.



Şekil 2. Duvar akışlı partikül filtresi (Wall flow particulate filter)

Duvar akışlı partikül filtrelerinde, basınç kaybına ani daralma ve genişleme, kanal içerisindeki sürtünme, partikül madde birikmesi ve gözenekli malzeme içerisindeki akışın neden olduğunu belirtmiştir. Matematik model sonucunda, duvar akışlı partikül filtresindeki basınç kaybını aşağıda görülen Denklem 1 ile hesaplamıştır. Denklemde  $\mu$ ; akışkanın dinamik viskozitesini,  $Q$ ; hacimsel debiyi,  $V_{DPF}$ ; partikül filtresinin hacmini,  $a$ ; kanal genişliğini,  $w$ ; duvar genişliğini,  $L$ ; partikül filtre uzunluğunu,  $F$ ; sabiti (28,45),  $\beta$ ; Forchheimer katsayısını,  $\zeta$  ani daralma ve genişleme katsayısını ifade etmektedir.

$$\Delta P = \frac{\mu Q}{2V_{DPF}} (a + w)^2 \left( \frac{w}{ka} + \frac{8FL^2}{3a^4} \right) + \frac{\rho Q^2 (a+w)^4}{V_{DPF}^2 a^2} \left[ \frac{\beta w}{4} + 2\zeta \left( \frac{L}{a} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Reddy, [10] yapmış oldukları çalışmada dizel partikül filtrelerinin, partikül madde emisyonlarını biriktirebilme kapasiteleri üzerinde çalışmışlardır. Temiz ve içerisinde partikül madde emisyonları biriken dizel partikül filtresinin akış analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Akış analizlerini sonlu elemanlar yazılımı olan Fluent ile yapmışlardır. Partikül filtresinin kanal geometrik özelliklerinin değiştirilerek en düşük basınç kaybı olan tasarımı bulmuşlardır. Kanal geometrisi olarak kare, üçgen ve dairesel kesitler seçilmişlerdir. Her bir kanal geometrisi için ayrı modelleme yapılarak analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda dairesel kanala sahip partikül filtresinin PM biriktirebilme ve basınç kaybı olarak en iyi sonucu verdiğini tespit etmişlerdir.

Di Huang [11] yapmış olduğu çalışmada, dizel partikül filtreleme özelliklerini ve kararsız çevrimde rejenerasyonu incelemiştir. Partikül

filtresi içerisinde biriken PM emisyonlarını iki şekilde modellemiştir. Bunlar dağınık ve toplu halde bulunan PM emisyonlarıdır. PM'lerin dağılmış olarak birikmesinin filtreleme açısından daha olumlu sonuç verdiğini bildirmiştir. Partikül filtresindeki basınç kaybına sebep olan beş önemli etkenin kanal boyunca değişen sıcaklık, biriken PM kalınlığı, PM'nin geçirgenliği, duvar kalınlığı ve duvar geçirgenliği olduğunu belirtmiştir. Toplanmış halde biriken PM'lerin rejenerasyonu için dışarıdan enerji gereksinimine ihtiyaç duyduğunu açıklamıştır. Rejenerasyon işleminin, en verimli şekilde gerçekleşebilmesi için araç yüksek hızda iken sıcaklığın 710 K'ne gelmesi ve 120 saniye boyunca bu koşullarda kalması gerektiğini bildirmiştir.

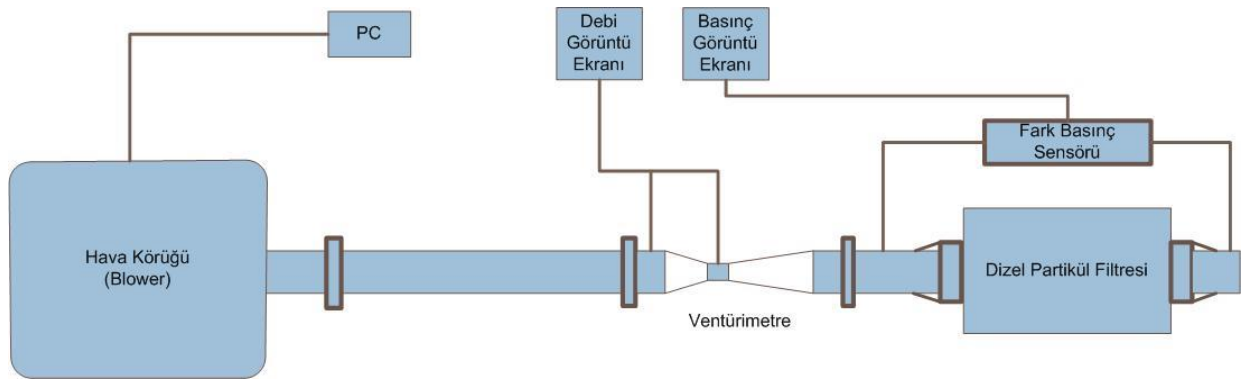
Masoudi, [12] parçalardan oluşan partikül filtresinin basınç kaybının matematik modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Dizel partikül filtrelerinin tek parça halinde imal edilmesinin zor olduğunu ve bu sebeplerden dolayı belirli kesitte parçaların üretilmesinin daha uygun olduğunu söylemişlerdir. Bu parçaları kullanarak istenilen çapta partikül filtresinin üretiminin daha kolay ve maliyeti azaltacağını belirtmişlerdir. Bu sebepten dolayı, parçalardan oluşan partikül filtresine ait basınç düşümünün matematik modelini geliştirmişlerdir.

Lavicka ve arkadaşı [13] dizel partikül filtresinde düzensiz PM birikmesinden kaynaklı olan basınç kayıplarını incelemişlerdir. Bunun için temiz, merkez bölgesi PM biriken ve birikmeyen, bazı bölgelerde daha yoğun PM biriktiği varsayımı yaparak nümerik çözümler gerçekleştirmişlerdir. Bunun için sonlu elemanlar yazılımı olan Fluent'ten yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda partikül madde birikmesinin, egzoz gazının hızını düşürmekte olduğunu ve filtrelemeyi olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, duvar akışlı partikül filtresinin kurulan deney düzeneği üzerinde basınç kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda ilgili debi değerine karşılık gelen basınç kayıpları saptanmıştır. Denklem 1'de debi ve basınç kaybı değerleri yerine yazılarak, geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısı hesaplanmıştır. Denklem çözülebilmesi için denklem lineer hale getirilmiştir. Daha sonra duvar akışlı partikül filtresinin 3B modelleri oluşturulmuştur. Sonlu

elemanlar yazılımı olan ANSYS-CFX kullanılarak partikül filtresinin akış analizi gerçekleştirilmiştir. Akış analizi sonucunda nümerik olarak basınç kaybı hesaplanmış ve deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Düzy düzeneğinde hava körüğü yardımıyla akış üretilmektedir. Üretilen akışın debisi venturi metre, basınç kaybı ise fark basınç sensörü ile ölçülmüştür. Ölçümde kullanılan ekipmanlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. Deneysel düzeneği (Test arrangement)

a. Statik basınç ölçülmesinde 0- 1 bar arası %1 hassasiyetle ölçüm yapabilen Techis Marka 3296.069.001 model basınç transmitteri kullanılmıştır. Transmitter den alınan 4-20 mA sinyal işlenerek dijital ekrana yansıtılmıştır.

b. Sistemde hava temini için motora bağlı bir hava körüğü bulunmakta ve bu hava körüğü bir AC frekans dönüştürücü yardımıyla kontrol edilmektedir. Maksimum 2000 m<sup>3</sup>/h debi sağlayabilmektedir.

c. Partikül filtresindeki basınç kaybını ölçebilmek için Senseta marka, 1MPP2-2 model fark basınç sensörü kullanılmıştır.

Venturimetreden geçen hava debisi TS EN ISO 5167-4 standartından yararlanılarak hesaplanmıştır. İlgili standartta hava debisinin hesaplanması Denklem 2 ile yapılmaktadır.

$$q_m = \frac{H}{\sqrt{1-\gamma^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (2)$$

Denklem 2' de H; boşaltım katsayısını,  $\gamma$ ; venturi metrenin daralan kısım ve girişteki çapın oranını, d; daralan kısımdaki çapı,  $\Delta P$ ; venturi metredeki basınç farkını,  $\rho$ ; venturi metreden geçen

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Partikül filtresinin yapısal özellikleri olan geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısının hesaplanabilmesi için deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneği Şekil 3' de verilmiştir. Partikül filtresi uygun adaptör yardımıyla deney düzeneğine bağlanmıştır. İçerisine ortam sıcaklığında (25<sup>0</sup>C) hava gönderilerek basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilmiştir.

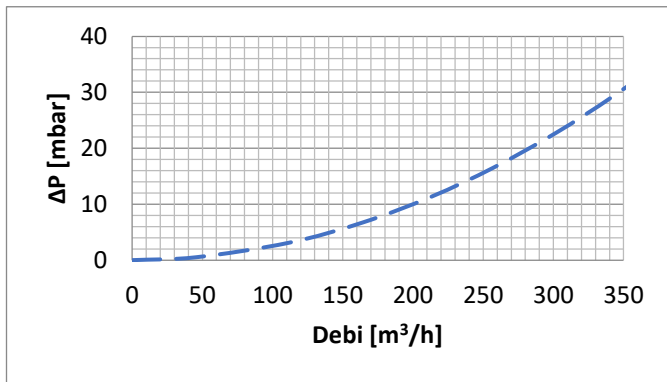
akışkanın yoğunluğunu,  $\varepsilon$ ; genişletirlik faktörünü ifade etmektedir. Ölçüm düzeneğinde elde edilen kütleli debi, hacimsel debiye çevrilmiştir.

Ölçümlerde fark basınç sensörü konumlandırılırken, ölçüm uçları partikül filtresinin giriş ve çıkışında kanal genişliğinin en az 100 katı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bunun sebebi akışkandaki düzensizliklerin ölçüm değerine etkisini azaltmak içindir. Şekil 4' de deney düzeneği üzerinde ölçümü gerçekleştirilen partikül filtresi gösterilmiştir.

Basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilirken, havanın debisi hava körüğünden kademeli olarak artırılmış ve debi değerlerine gelen basınç kayıpları not edilmiştir. Şekil 5' de partikül filtresinin basınç kaybına ait grafik verilmiştir.



Şekil 4. Partikül filtresinin test edilmesi (Testing of the particulate filter)



Şekil 5. A partikül filtresi basınç kaybı ölçüm sonucu (Testing result of the A particulate filter)

Basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilen partikül filtresinin özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Basınç kaybı denkleminde ilgili değerler yerine konularak geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısı hesaplanabilir.

Tablo 1 Partikül filtresi özellikleri

Çap (mm)	Uzunluk (mm)	CPSI	Kanal genişliği (mm)	Duvar genişliği (mm)	Porozite
Ø118	205	150	0,5	1,6	0,43

Fakat Denklem 1' in çözümü için Denklem 2 ve 3 teki gibi lineer hale getirilmesi gerekmektedir. Debi ve basınç kaybı değerleri bilindiğinden lineer hale getirmek için bu değerler yalnız bırakılır. Deney düzeneği üzerinde alınan noktalar için çözüm gerçekleştirilirse katsayılar hesaplanacaktır.

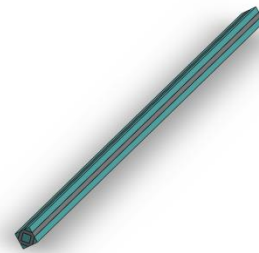
$$\Delta P = A Q + B Q^2 \quad (3)$$

$$\frac{\Delta P}{Q} = A + B Q \quad (4)$$

Çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda partikül filtresinin geçirgenlik değeri  $2,72 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ , içsel kayıp katsayısı ise 3,11 olarak bulunmuştur.

### 3. PARTİKÜL FİLTRENİN MODELLENMESİ (MODELLING OF THE PARTICULATE FILTER)

Akış analizi için partikül filtresinin tamamının modellenmesi çözüm için oldukça uzun bir süre gerektirmektedir. Çalışmada partikül filtresinin simetrisinden yararlanılarak tamamı değil, bir alan seçilerek modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu alanın belirlenmesinde, partikül filtresinde basınç kaybına sebep olacak olan tüm etkilerin meydana geleceği kısım dikkate alınmıştır. Şekil 6' da bu alanın 3B görseli verilmiştir. Egzoz gazları partikül filtresi içerisinden atmosfere atılırken, kendisine komşu kanalları kullanmaktadır. CFD analizleri gerçekleştirilirken, çıkış kanalı için kendisine komşu tüm kanallar seçilmiştir. Partikül filtresinin akış analizleri 3B olarak gerçekleştirilmiştir.

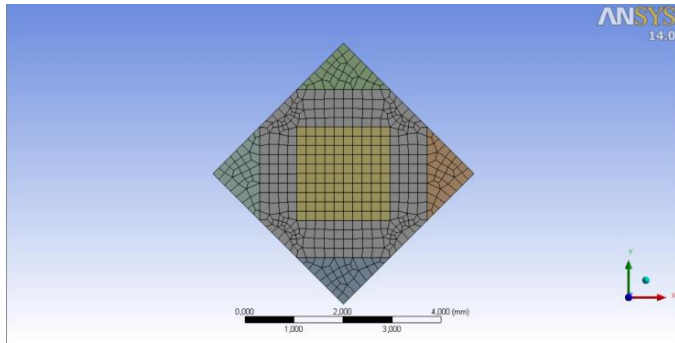


Şekil 6. A partikül filtresi (CFD domain)

Literatürde yapılan çalışmada [14] partikül filtresinde basınç kaybına sebep olan ani genişleme ve daralma etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Bu sebeple ani daralma ve genişlemeden kaynaklı basınç kaybı ihmal edilmiştir. Deney düzeneği üzerinde ölçümü gerçekleştirilen partikül filtresinin içerisinde partikül madde birikmemiştir. Akış analizleri gerçekleştirilirken de içerisinde partikül madde birikmediği varsayımı yapılmıştır.

### 3.1. Mesh (Mesh Structure)

Ağ örgüsü oluşturulurken hexamesh eleman yapısı kullanılmıştır. Hexamesh eleman kullanılmasının sebebi, katı modeli oluşturulan partikül filtresinin akış analiz sonuçlarını değiştirmeyecek şekilde parçalara ayırmasıdır. Deneysel olarak basınç kayıpları gerçekleştirilen partikül filtresinin birim alandaki kanal sayısı 150' dir. Kanal genişliği ise 1.6 mm dir. Parçanın ağ örgüsü yapısı oluşturulurken en küçük eleman olarak 0.16 mm tanımlanmıştır. Şekil 7' de analizde gerçekleştirilen mesh yapısı gösterilmiştir.



Şekil 7. Partikül filtresi mesh yapısı (Mesh structure of particulate filter)

### 4. AKIŞ ANALİZİ (FLOW ANALYSIS)

Partikül filtresi ağ örgüsü oluşturulduktan sonra sınır şartları ve yapısal özelliklerinin atanması gerekmektedir. Partikül filtresinden giriş ve çıkış kanallarına akışkana ait özellikler atanmıştır. Gözenekli malzeme (partikül filtresi malzemesi) içinse geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları tanımlanmıştır. Akışkan, partikül filtresi içerisinde laminar akış gerçekleştirdiği için çözüm modeli olarak laminar akış seçilmiştir. Gözenekli malzeme ve giriş ve çıkış kanallarının birleştiği noktalar birleşme noktaları olarak tanımlanmıştır [15].

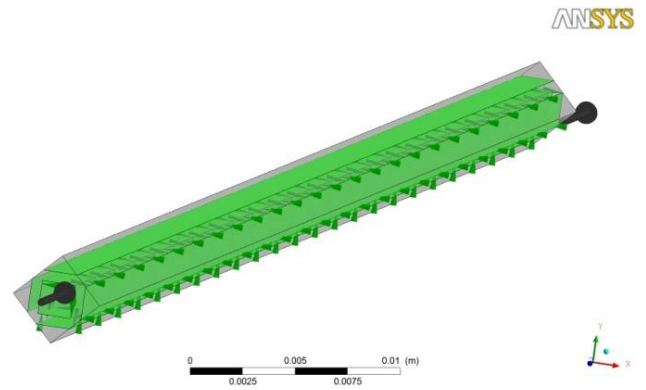
Partikül filtresinin deneysel olarak elde edilen basınç kaybı ölçüm sonucu Şekil 5' de görülmektedir. Bu grafikten partikül filtreden geçen debi değerine karşılık kanal içerisinden geçen akışkanın hız hesaplaması yapılmıştır.

Hız hesaplaması yapılırken deney düzeneği üzerinde venturi metre ile ölçülen basınç fark değerleri değerler alınmıştır. Akış analizleri

deneysel ölçümler sonucunda elde edilen 6 noktadaki hız değerleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilere bağlı olarak tespit edilen hız değerleri Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2 Partikül filtresi hız değerleri (Velocity values of particulate filter)

Debi [m <sup>3</sup> /h]	Hız [m/s]
95,89	8,39
141,14	12,35
183,61	16,06
221,44	19,38
259,66	22,72
295,54	25,86

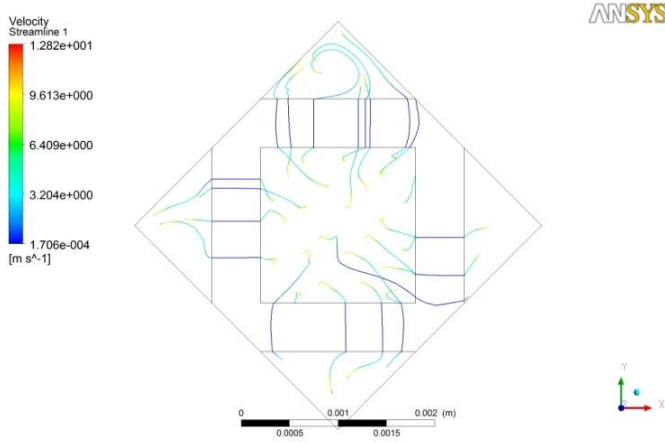


Şekil 8. Akışkan ve gözenekli malzeme birleşim yüzeyleri (Contact surfaces between porous and fluid)

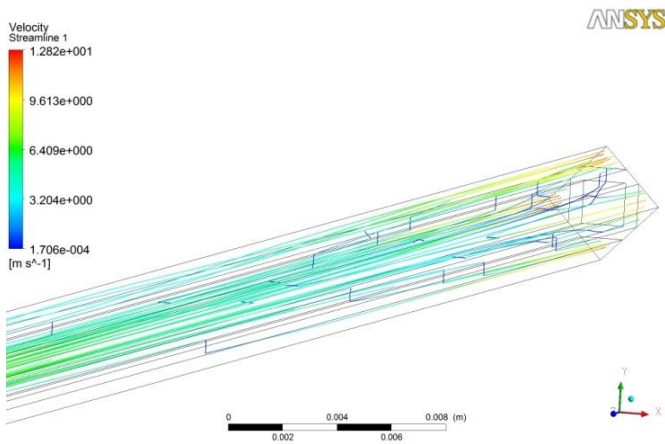
Akış analizleri sonucunda partikül filtresine ait basınç kaybı hesabı yapılırken giriş ve çıkış arasındaki basınç farkı alınmıştır. CFX modülünde basınç farkı denklem 5 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{massFlowAve(TotalPressure)}@In - \text{massFlowAve(Total Pressure)}@Out \quad (5)$$

Partikül filtresine ait gerçekleştirilen akış analizi sonucunda elde edilen hız çizgileri Şekil 9 ve 10' da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi partikül filtresi içerisinde akış giriş kanalı içerisinde hareket etmekte ve kanal sonunda bulunan duvara çarpmaktadır. Bu durumda hız kanal sonunda 0 m/s olmaktadır. Akış gözenekli malzeme içerisinden hareket ederken hızı düşmekte ve laminar akış oluşmaktadır. Bu da modelin doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 9. Hız çizgileri, ön görünüş (Velocity streamlines, front view)

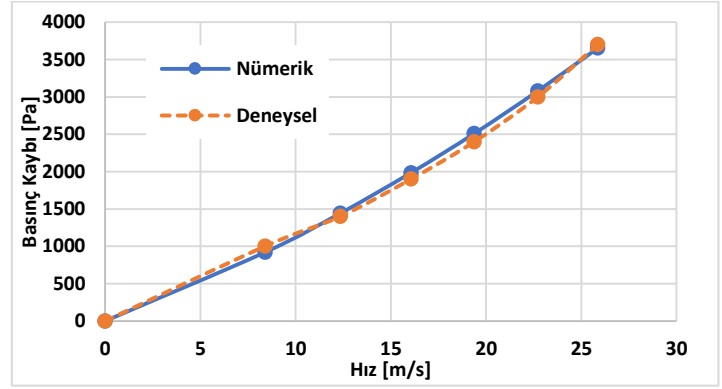


Şekil 10. Hız çizgileri, izometrik görünüş (Velocity streamlines, isometric view)

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Partikül filtresine ait nümerik ve deneysel olarak elde edilen basınç kayıpları Şekil 11’ de verilmiştir.

Şekil 11’den de görüldüğü gibi, nümerik ve deneysel olarak elde edilen sonuçların birbirine yakın değerler verildiği tespit edilmiştir. Deneysel ve analiz sonuçları arasında %4 hata payı olduğu görülmüştür. Akış analizinde, laminar akış seçilmesi düşük hızlarda daha yakın sonuç vermiştir. Hızın artmasıyla birlikte türbülanslı akışa geçildiğinden bozulmalar başlayacaktır. Bu nedenden dolayı analizler düşük hızlardaki akış için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. Deneysel ve nümerik basınç kaybı sonuçları (Experimental and numerical pressure drop results)

Matematik modelde ani daralma ve genişlemeden kaynaklı basınç kaybının etkisi vardı. Basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilirken hava, test düzeneğinde boru çapından kanal kesit alanına daralmakta ve çıkışta ise ani genişlemenin etkisi ile atmosfere atılmaktadır. Akış analizleri gerçekleştirilirken ani daralma ve genişlemeden basınç kaybının etkisi ihmal edilmişti. Deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında, ani daralma ve genişlemeden kaynaklı basınç kaybının çok düşük olduğu görülmüştür. Bu da ölçüm sonuçlarını değiştirmemektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] E.Özcan, “Faz III B Emisyon standartlarına cevap veren turbo dizel traktör motorunun 4 supaplı silindir kafasının tasarımı ile ilgili teorik incelemeler ve uygulamalar,” *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, PhD Thesis , 2009.
- [2] V. Ayhan, “Bir dizel motoruna buhar enjeksiyonunun NOx ve is emisyonlarına etkisinin araştırılması,” *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi*, Doktora Tezi, 2009.
- [3] C. Soruşbay, “Egzoz gazları emisyonu ders notları,” *İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği*, 2015.
- [4] A. Keskin, S. Sağıroğlu, “Dizel motorlarından partikül madde emisyon kontrolü ve gelişmeler,” *5. Uluslararası Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 2009.
- [5] G. Gaiser, P. Mucha, “Prediction of pressure drop in diesel particulate filters considering ash deposit and partial regenerations,” *SAE Technical Paper*, 2004.

- [6] R.L. Bloom, N.R. Brunner, S.C. Schroeer, “Fiber wound diesel particulate filter durability experience with metal based additives,” *SAE Technical Paper*, 1997.
- [7] A.Keskin, S.Sağiroğlu, “Dizel motorlarından kaynaklanan egzoz emisyonları ve kontrol yöntemleri,” *Mühendis ve Makina*, Cilt 51 (606), 2010.
- [8] A.G.Konstandopoulos, J.H.Johnson, “Wall-flow diesel particulate filters and their pressure drop and collection efficiency,” *SAE Technical Paper*, 1989.
- [9] A. Konstandopoulos, G. Athanasio, “Flow resistance descriptors for diesel particulate filters: Definitions, measurements and testing,” *SAE paper*, 2003-01: 0846, 2003.
- [10] Y.R.Reddy, “Design optimization of diesel particulate filter using CFD,” *International Journal of engineering Research and Applications*, 1.5: 119-128, 2015.
- [11] D.Huang, “Modeling of diesel particulate filter filtration and regeneration for transient driving schedules,” *Michigan Teknoloji Üniversitesi, Doktora Tezi*, 2011.
- [12] M.Masoudi, “Pressure drop of segmented diesel particulate filters,” *SAE Technical Paper*, 01-0971, 2005.
- [13] D.Lavicka, J.Knourek, “Numerical simulation with particle deposition on channel walls in the DPF filter,” *Experimental Fluid Mechanics*, 344-353, 2010.
- [14] A.G.Konstandopoulos, “Fundamental studies of diesel particulate filters: transient loading, regeneration and aging,” *SAE paper*, 2000-01: 1016, 2000.
- [15] Y.Özkan, İ.Özsert, V.Ayhan, İ.Cesur, “Reaktif tip susturucunun iç tasarımının akış ve akustik özelliklerine etkisinin incelenmesi,” *SAÜ Fen Bil Der* 20. Cilt, 1. Sayı, s. 65-74, 2016.