

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÖZELLİKTEKİ DUVAR AKIŞLI DİZEL  
PARTİKÜL FİLTRELERİNİN BASINÇ KAYBINA  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Yunus ÖZKAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT**

**Haziran 2016**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

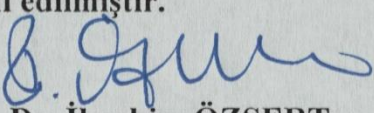
FARKLI ÖZELLİKTEKİ DUVAR AKIŞLI DİZEL  
PARTİKÜL FİLTRELERİNİN BASINÇ KAYBINA  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus ÖZKAN

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ  
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT

Bu tez 03.06.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT Doç. Dr. Vezir AYHAN Doç. Dr. Cenk ÇELİK  
Jüri Başkanı Üye Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Yunus ÖZKAN

03.06.2015

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli katkıları, fikirleri ve yardımlarından dolayı Prof. Dr. İbrahim Özsert'e ve Doc. Dr. Vezir Ayhan'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için vermiş oldukları katkılardan dolayı Bilen Egzost San. ve Tic. A.Ő. ve Prof. Dr. Haluk Erol'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca vermiş oldukları destekten ötürü sevgili aileme teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ .....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
DİZEL MOTORLARINDA EMİSYON OLUŞUMU VE KONTROL YÖNTEMLERİ.....	9
2.1. Dizel Motorlarında Emisyon Oluşumu .....	9
2.1.1. Hidrokarbonlar .....	9
2.1.2. Karbon monoksitler .....	10
2.1.3. Azot oksitler.....	10
2.1.4. Partikül madde .....	11
2.2. Dizel Motorlarında Emisyon Kontrol Yöntemleri .....	12
2.2.1. Üç yollu katalitik konvertörler.....	12
2.2.2. Dizel partikül filtresi .....	15
2.2.2.1. Pasif rejenerasyon .....	16
2.2.2.2. Aktif rejenerasyon.....	18
2.2.3. Seçici Katalitik İndirgeme .....	20

### BÖLÜM 3.

MATEMATİK MODEL .....	23
3.1. Partikül Filtre Geometrisi ve Tanımlar .....	23
3.1.1. Duvar kalınlığı .....	23
3.1.2. Kanal genişliği .....	23
3.1.2. Birim alandaki kanal sayısı .....	24
3.2. Dizel Partikül Filtresindeki Basınç Kayıpları .....	24
3.2.1. Ani daralma basınç kaybı .....	24
3.2.2. Ani genişleme basınç kaybı .....	27
3.2.3. Gözenekli malzemedeki basınç kaybı .....	29
3.2.4. Sürtünme basınç kaybı .....	31
3.2.5. Partikül madde birikmesinden kaynaklı basınç kaybı .....	33
3.3. Dizel Partikül Filtresindeki Toplam Basınç Kaybı .....	34

### BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	36
4.1. Materyal .....	36
4.2. Yöntem .....	37
4.2.1. Ölçüm düzeneği .....	38
4.2.2. Ekipmanlar .....	39
4.2.2. Ventürimetre debi hesabı .....	39
4.3. Geçirgenlik ve İçsel Kayıp Katsayılarının Hesaplanması .....	42

### BÖLÜM 5.

DİZEL PARTİKÜL FİLTRESİNİN NÜMERİK ANALİZLERİ .....	45
5.1. Akış Analizi İçin Modelleme .....	46
5.2. Ağ Örgüsü (Mesh) Yapısı .....	47
5.3. CFD Modeli .....	48
5.4. Akış Analizleri .....	49
5.4.1. A partikül filtresi .....	49
5.4.2. B partikül filtresi .....	52
5.4.3. C partikül filtresi .....	55

BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	58
6.1. Sonuçlar .....	58
6.2. Genel Değerlendirme ve Öneriler .....	60
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	68



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\rho$	: Yoğunluk
$\vartheta_B$	: B noktasındaki hız
$\vartheta_C$	: C noktasındaki hız
$\vartheta_x$	: Gözenekli malzeme içerisindeki hız
$\Delta P$	: Ventürimetrede meydana gelen basınç farkı
$\Delta P_T$	: Toplam basınç kaybı
$\Delta P_d$	: Ani daralma basınç kaybı
$\Delta P_g$	: Ani genişleme basınç kaybı
$\Delta P_i$	: Partikül madde birikmesinden kaynaklı basınç kaybı
$\Delta P_p$	: Gözenekli malzeme basınç kaybı
$\Delta P_s$	: Sürtünme basınç kaybı
$\zeta$	: İçsel kayıp katsayısı
$\zeta_g$	: Ani genişleme basınç kaybı katsayısı
$\zeta_d$	: Ani daralma basınç kaybı katsayısı
$\mu$	: Dinamik viskozite, Pa/s
$\beta$	: Forchheimer katsayısı (içsel kayıp katsayısı)
$\varepsilon$	: Genleşebilirlik faktörü
$\gamma$	: Daralan ve giriş çap oranları
$\sigma$	: Birim alandaki kanal sayısı
$a$	: Kanal genişliği
$A_A$	: AA kesit alanı
$A_B$	: BB kesit alanı
$A_C$	: CC kesit alanı
AB	: Avrupa Birliği
$A_{\text{kanal}}$	: Kanal yüzey alanı
C	: Karbon



CFD	: Computational fluid dynamics
CO	: Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbon dioksit
D	: Partikül filtresi çapı
DEF	: Diesel exhaust fluid
DG	: Duvar genişliği
DOK	: Dizel oksidasyon katalizörü
DPF	: Dizel partikül filtresi
ECE-15	: Şehir test çevrimi
EGR	: Egzoz gaz resirkülasyon
EKM	: Elektronik kontrol modülü
EPA	: Amerika Birleşik Devletleri çevre koruma ajansı
F	: Kuvvet
g	: Yer çekimi ivmesi, m/s <sup>2</sup>
H	: Boşaltım katsayısı
HC	: Hidrokarbon
HFK	: Hava fazlalık katsayısı
h <sub>L</sub>	: Yük kaybı
JIS	: Japon endüstriyel standardı
k	: Geçirgenlik, m <sup>2</sup>
K	: Kelvin
k <sub>P</sub>	: Biriken partikül maddenin geçirgenliği, m <sup>2</sup>
KG	: Kanal genişliği
KM	: Kaplama miktarı
KV	: Katalitik konvertör hacmi
L	: Partikül filtresinin uzunluğu
N <sub>2</sub>	: Azot
NO	: Azot monoksit
NO <sub>2</sub>	: Azot dioksit
NO <sub>x</sub>	: Azotoksitler
O <sub>2</sub>	: Oksijen
P <sub>B</sub>	: B noktasındaki basınç
P <sub>C</sub>	: C noktasındaki basınç

Pd	: Paladyum
PM	: Partikül madde
PN	: Partikül sayısı
Pt	: Platinyum
P <sub>1</sub>	: Ventürimetredeki giriş basıncı
P <sub>2</sub>	: Ventürimetrede daralan kısımdaki basınç
q <sub>m</sub>	: Kütleli debi
Q	: Debi, m <sup>3</sup> /h
Q <sub>0</sub>	: Kanal içerisindeki debi
R	: Evrensel gaz sabiti, (8.3145 J/(mol K))
Rd	: Rodyum
SCR	: Seçici katalitik indirgeme
TPM	: Pahalı metal toplam kütlesi, g
U <sub>0</sub>	: Kanal içerisindeki hız
u <sub>mak</sub>	: Kanal içerisindeki maksimum hız
u <sub>ort</sub>	: Kanal içerisindeki ortalama hız
ÜYK	: Üç yollu katalitik konvertör
w	: Kanal içerisinde biriken is kalınlığı
W	: Malzeme özelliği
z	: İzentropik sıkıştırma oranı
Z <sub>B</sub>	: B noktasının konumu
Z <sub>C</sub>	: C noktasının konumu

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Partikül maddenin içeriği.....	11
Şekil 2.2. Üç yollu katalitik konvertör yapısı. ....	14
Şekil 2.3. Kısmi akışlı partikül filtresi. ....	16
Şekil 2.4. Duvar akışlı partikül filtresi.....	16
Şekil 2.5. Johnson Matthey sürekli rejenerasyon sistemi. ....	17
Şekil 2.6. Johnson Matthey kaplamalı dizel partikül filtresi.....	18
Şekil 2.7. HC püskürtmeli aktif rejenerasyon sistemi.....	19
Şekil 2.8. Isıtıcı ve yakıcı aktif rejenerasyon sistemi. ....	19
Şekil 2.9. AdBlue tankı. ....	20
Şekil 2.10. SCR sistemi.....	21
Şekil 3.1. Partikül fitresi duvar kalınlığı ve kanal genişliği.....	24
Şekil 3.2. Ani daralma etkisi.....	25
Şekil 3.3. Ani genişleme etkisi.....	27
Şekil 3.4. Partikül filtre kanalı. ....	31
Şekil 4.1. 150 CPSI partikül filtresi . ....	36
Şekil 4.2. 90 CPSI partikül filtresi . ....	37
Şekil 4.3. Deney düzeneği .....	38
Şekil 4.4. Deney düzeneği şeması.....	38
Şekil 4.5. Fark basınç sensörünün bağlantısı. ....	42
Şekil 4.6. Basınç farkı ve venturimetre değerlerini okuma ekranları. ....	43
Şekil 4.7. Partikül filtrelerinin deneysel basınç kayıplarına ait grafik.....	43
Şekil 4.8. Geçirgenlik ve içsel kayıp katsayılarının excel ile hesaplanması.....	44
Şekil 5.1. 3B dizel partikül filtresi. ....	45
Şekil 5.2. Partikül filtresi CFD domain.....	46
Şekil 5.3. Partikül filtresi 3B CFD domain.....	47
Şekil 5.4. 150 CPSI mesh yapısı. ....	48
Şekil 5.5. 90 CPSI mesh yapısı. ....	48

Şekil 5.6. Gözenekli malzeme ve akışkan temas bölgeleri. ....	49
Şekil 5.7. A Filtresi basınç değişimleri. ....	50
Şekil 5.8. A filtresi hız değişimleri. ....	51
Şekil 5.9. A filtresi hız çizgileri. ....	51
Şekil 5.10. A filtresi CFD basınç kaybı sonuçları. ....	52
Şekil 5.11. B Filtresi basınç değişimleri. ....	53
Şekil 5.12. B filtresi hız değişimleri. ....	53
Şekil 5.13. B filtresi hız çizgileri. ....	54
Şekil 5.14. B filtresi CFD basınç kaybı sonuçları. ....	54
Şekil 5.15. C Filtresi basınç değişimleri. ....	55
Şekil 5.16. C filtresi hız değişimleri. ....	56
Şekil 5.17. C filtresi hız çizgileri. ....	56
Şekil 5.18. C filtresi CFD basınç kaybı sonuçları. ....	57
Şekil 6.1. A partikül filtresine ait nümerik ve deneysel basınç kaybı. ....	58
Şekil 6.2. B partikül filtresine ait nümerik ve deneysel basınç kaybı. ....	59
Şekil 6.3. C partikül filtresine ait nümerik ve deneysel basınç kaybı. ....	59

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Ağır vasıta araçlar için emisyon normları.....	2
Tablo 1.2. Yol dışı araçlar için Faz IIIB normu. ....	3
Tablo 3.1. Ani daralma katsayısı.....	26
Tablo 4.1. Partikül filtrelerinin geometrik özellikleri. ....	36
Tablo 4.2. Boşaltım katsayısı. ....	39
Tablo 4.3. Partikül filtrelerinin geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları. ....	44
Tablo 5.1. A partikül filtresi hız değerleri. ....	50
Tablo 5.2. B partikül filtresi hız değerleri.....	52
Tablo 5.3. C partikül filtresi hız değerleri.....	55

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Partikül Filtresi, Basınç Kaybı, Akış Analizi

Günümüzde dizel partikül filtreleri, içten yanmalı dizel motorlardan atmosfere salınan partikül maddelerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Partikül madde is, kısmi veya yanmamış yakıt, yağ, metaller, nitrat ve sülfattan oluşmaktadır. Egzoz gazları partikül filtresi içerisinde çapraz akış yaparak atmosfere atılmaktadırlar. Egzoz gazları çapraz akış yaparken, partikül filtresinin malzemesi olan gözenekli yapı içerisinde geçmektedir. Partikül madde, gözenekli yapı içerisinde geçememekte ve partikül filtresi içerisinde birikmektedir.

İçten yanmalı motorlarda, üretici tarafından belirtilen geri basınç limitleri vardır. Geri basınç değerinin limitlerin üstüne çıkması durumunda, artık gaz kesri artmakta ve bu da motor performansını düşürmektedir. Bu nedenden dolayı, araç üzerinde motor sonrasında bulunan susturucu, partikül filtresi, katalitik konvertör gibi sistemlerin oluşturmuş olduğu geri basıncın bilinmesi gerekmektedir.

Partikül filtresinin, diğer emisyon iyileştirici sistemlere göre farklı yapısından ve içerisinde biriken partikül maddenin zamanla artmasından kaynaklı olarak geri basıncının bilinmesi gerekmektedir.

Bu tez kapsamında partikül filtresinin basınç kaybının matematik modeli oluşturulmuştur. Üç adet partikül filtresinin basınç kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Partikül filtrelerinin katı modelleri oluşturularak akış analizleri yapılmıştır. Matematik model oluşturulurken kanalların simetrisinden yararlanılmıştır. Partikül filtresi bölgelere ayrılmış ve her bölgedeki basınç kaybı kendi içerisinde incelenmiştir. Geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları, gözenekli malzemeler için deneysel yollarla hesaplanabilen ve akış özelliklerine göre değişebilen sabitlerdir. Basınç kaybı ölçümleri için deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğinde, partikül filtresi içerisine ortam sıcaklığında hava gönderilmiş ve basınç kayıpları ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda matematik modelden partikül filtresine ait geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yazılımı ile modellenen partikül filtrelerinin akış analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

# **INVESTIGATION OF DIFFERENT TYPES OF WALL FLOW DIESEL PARTICULATE FILTERS' EFFECTS ON PRESSURE DROP**

## **SUMMARY**

Keywords: Particulate Filter, Pressure Drop, Flow Analysis

Nowadays, diesel particulate filters are commonly used control of particulate matter emitted into the atmosphere from internal combustion diesel engines. Particulate matter is consists of soot, partial or unburned fuel, oil, metal, nitrate and sulfate. Exhaust gases thrown into the atmosphere making cross flow in the particulate filter. Exhaust gases while making cross flow passes through the porous structure that is the material of the particle filter. Particulate matter is not passed from the porous structure and is accumulated in the particulate filter.

There are back pressure limits for internal combustion engines that are specified by the manufacturer. In the event of back pressure is over the limits, residual gas fraction increases and reduces the engine's performance. For this reason, the back pressures of muffler, particulate filter and catalytic convertor that are located after the engine are should be known.

It is necessary know back pressure of diesel particulate filter because of having different structure according to the the other systems and accumulation of particulate matter with time.

In this study, mathematical model of the pressure drop of the particulate filter has been developed. Pressure drop testing of three particulate filters was performed. Flow analysis of particle filters are made by creating solid models. The symmetry of the channel were used while creating mathematical model. Particulate filter is divided into regions and each region were examined in itself. Permeability and internal loss coefficient, which can be calculated experimentally are constants for porous materials depending on the flow properties. The experimental setup for measuring the pressure drop has been established. In the experimental setup, air that is ambient temperature sent into the particulate filter and pressure drop of filters were measured. As a result of measurements of particulate filters' pressure drop, permeability and inertial loss coefficient is calculated from mathematical model. Particulate filtere are modeled with a finite element program and performed flow analyses. At the end of the study, experimental and numerical results are compared.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada her geçen gün motorlu taşıt sayısı artmaktadır. Motorlu taşıtların artmasıyla birlikte taşıt kaynaklı hava kirliliği sorun haline gelmeye başlamıştır. Taşıt kaynaklı kirliliklerin başında egzoz emisyonları gelmektedir. Egzoz emisyonları motorda yanma sonrası meydana gelen gazların ve partiküllerin atmosfere atılmasıyla oluşmaktadır. Bu gazların ve partiküllerin atmosfere atılmasıyla hava kirliliği oluşmakta, çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilenmektedir [1].

Motorlu taşıtların kullanmış oldukları hidrokarbon (HC) kökenli yakıtların yanmasıyla birlikte başlıca karbonmonoksit (CO), azotoksit ( $\text{NO}_x$ ), yanmamış hidrokarbon (HC) ve partikül madde emisyonları (PM) oluşmaktadır. İdeal şartlarda yanma meydana gelmesi durumunda bu emisyonlar oluşmamaktadır. Fakat içten yanmalı motorlar ideal şartlarda çalışmadıkları için yanma sonrası oluşan zararlı gazların oluşumu önlenememektedir. Benzinli motorlar zengin karışımla çalıştıkları için HC ve CO emisyonları daha fazladır. Dizel motorlarda ise bunun tam tersi olarak fakir karışımda yanma meydana geldiği için PM ve  $\text{NO}_x$  emisyonları fazladır [2].

Günümüzde yakıt tasarrufu sağlanması, yakıtın ucuz olması ve yüksek performans sağlanması gibi başlıca nedenlerden dolayı dizel motorlu taşıtlar tercih edilmektedir. Dizel motorlardaki kirleticilerin başlıcaları karbon monoksit (CO), azot oksitler ( $\text{NO}_x$ ), kükürtlü bileşenler, hidrokarbonlar (HC), aldehitler ve partikül maddelerdir [3].

Karbon monoksitler; yanma sırasında karbonun (C) yeterli hava ile tepkimeye girememesinden oluşurlar. Dizel motorlar fakir karışımda çalıştıkları için karbon monoksit oranları düşüktür. Azot oksitler, yanma odasında sıcaklığın  $1800\text{ }^\circ\text{K}$ 'in



üzerine çıktığı zaman havanın içerisindeki azot ve oksijenin kimyasal olarak birleşmesinden oluşurlar. Hidrokarbonlar, yakıtın tam yanmaması veya yakıtın buharlaşması sonucunda ortaya çıkarlar. Aldehitler, yakıt olarak kullanılan hidrokarbonların eksik yanmasının sonucudur. Partikül madde, is, yanmamış yakıt, yağ, metal, nitrat ve sülfattır. Hem karışım hem de yakıt cinsi partikül maddelerin oluşumuna sebep olmaktadır [4].

Motorlu taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını kontrol altına almak amacıyla ilk düzenleme 1968 yılında Kaliforniya’da gerçekleştirilmiştir. İlk sınırlama ise 1972 yılında Avrupa Birliği ülkelerinde ECE R 15 Regülasyonu ve EEC 72/220 yönetmeliği ile başlamıştır. Günümüzde tüm gelişmiş ve gelişme yolundaki dünya ülkeleri, çeşitli regülasyonlarla (EEC/ECE, EPA, JIS) egzoz emisyonlarına denetimler uygulamaktadır [5].

Avrupa Birliği ülkeleri tarafından binek ve ağır vasıta araçlardan salınan egzoz gazlarındaki kirleticileri kontrol altına almak amacıyla Euro normu oluşturulmuştur. AB’de Euro normu, Euro 1 ile 1992 yılında yürürlüğe girmiştir. Uygulanan bu norma geçiş tarihleri araç yakıtına ve sınıfına göre değişiklik göstermektedir. Euro normunun uygulanmaya başladığı tarih ve emisyon limitleri, ağır vasıta araçlar için Tablo 1.1.’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Ağır vasıta araçlar için emisyon normları [6]

Norm	Tarih	Test	CO	HC	HC+NO <sub>x</sub>	PM	PN	İs
			g/kWh			1/kWh	1/m	
EURO 1	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,612		
	1992, > 85 kW		4,5	1,1	8,0	0,36		
EURO 2	10.1996		4,0	1,1	7,0	0,25		
	10.1998		4,0	1,1	7,0	0,15		
EURO 3	10.1999	ESC& ELR	1,5	0,25	2,0	0,02		0,15
	10.2010		2,1	0,66	5,0	0,1		0,8
EURO 4	10.2005		1,5	0,46	3,5	0,02		0,5
EURO 5	10.2008		1,5	0,46	2,0	0,02		0,5
EURO 6	01.2013	WHSC	1,5	0,13	0,4	0,01	8x10 <sup>11</sup>	

Yoldışı araçlar (iş makinaları, traktörler vb.) için AB’de faz (stage) normu kullanılmaktadır. Faz normunda, yürürlüğe giriş tarihi araç gücüne göre değişmektedir [7].

Ülkemiz emisyon normlarına uyum amacıyla ilk çalışmayı, 1993 yılında Otomotiv Sanayi Çevre Deklerasyonu yayınlarak yapmıştır. 1995 yılında üretilen otomobillerin büyük bir çoğunluğunu bu deklarasyona uygun üretilmeye çalışmıştır. 1996 yılında AB Gümrük Birliği Antlaşması sonucunda AB Tip Onay çalışmaları başlatılmıştır. Üretilen araçların 5 yıl içerisinde AB normlarına uygun olacağı bildirilmiştir. Aynı yıl ticari araçlar için emisyon uyum programı yayınlanmıştır. 2001 yılında tüm dizel araçlar için Euro 1 seviyesi uygulanmaya başlanmıştır. 2008 yılında AB’den geri kalmamak amacıyla Euro 2 ve 3 seviyeleri atlanarak Euro 4 emisyon normuna geçilmiştir. 2009 yılı Ekim ayında tüm araçlar için Euro 5 normu zorunlu tutulmuştur. Ülkemizde 2016 yılında Euro 6 normu uygulanmaya başlanmıştır [8]. Yol dışı araçlar için güncel norm Faz IIIA’dır. 2017 yılında Faz IIIB normuna geçilecektir. Faz IIIB için emisyon değerleri Tablo 1.2.’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Yol dışı araçlar için Faz IIIB normu [9]

Araç Gücü (kW)	Tarih	CO	HC	THC+NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM
130≤P<560	01.2011	3,5	0,19	-	2,0	0,025
75≤P<130	01.2012	5,0	0,19	-	3,3	0,025
56≤P<75	01.2012	5,0	0,19	-	3,3	0,025
37≤P<56	01.2013	5,0	-	4,7	-	0,025

Motor üreticileri emisyon normlarında belirtilen sınırları yakalayabilmek için motorda bazı değişikliklere gitmişlerdir. Yakıt enjeksiyon sistemini değiştirerek emisyon seviyelerini düşürmeyi başarmışlardır. Bu yeni yakıt enjeksiyon sistemi ortak hatlı (common rail) olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemin, diğer sistemlere göre yakıt sarfiyatı konusunda bazı avantajları olmakla birlikte yanmayı iyileştirmesi ve gürültü oluşumunu azaltması bakımından üstünlükleri vardır. Klasik tip dizel yakıt enjeksiyon sistemlerinden farklı olarak common railde basınç oluşumu ve püskürtme işlemleri birbirinden ayrılmaktadır.

Geleneksel dizel direkt püskürtücüleri yaklaşık 200 barlık basınç ile çalışırken, common rail sistemi, yakıtı 2100 bara kadar yükselterek ortak bir boru üzerinden enjektörlere dağıtır. Bu yüksek basınç değerleri, motor devir sayısına ve yüküne göre elektronik kontrol ünitesi tarafından ayarlanmaktadır. Püskürtmeyi, enjektörler üzerinde bulunan piezo-elektronik enjektörler sağlamaktadır [10].

Common rail enjeksiyon sistemi ile pilot (ön) püskürtme imkanı oluşmaktadır. Pilot püskürtme, ana püskürtmeden önce gerçekleştirilerek yakıtın yanmasını iyileştirmektedir. Ön veya çoklu püskürtme, piezo-elektronik enjektörlerin çok kere kontrol edilmesi ile oluşturulur. Böylece hem zararlı madde ve gürültü emisyonu hem de dizel motorlarının yakıt sarfiyat değerleri daha da azaltılmaktadır [11].

Emisyon seviyesini düşürmek amacıyla geliştirilen bir diğer sistem egzoz gazlarının resirkülasyonudur (EGR, Exhaust Gas Recirculation). EGR sisteminde,  $NO_x$  emisyonların azaltılması sağlanmaktadır. Egzoz gazlarının bir kısmı emme havasıyla birlikte tekrardan motora gönderilir. Böylece, yanma sonu sıcaklığı düşeceği için  $NO_x$  emisyonları azalacaktır. Ancak EGR motorun maksimum gücünde azalmaya sebep olmaktadır. Bu olumsuzluk ise, kısmi yüklerde devreye alınması ve maksimum güç istenildiğinde devre dışı bırakılmasıyla giderilmektedir. Motorun daha uzun süre çalışması gereken yüklerde  $NO_x$  emisyonunun azaltılması sağlanabilmektedir [12].

Motorda yapılan bu iyileştirmeler, yürürlüğe giren yeni düzenlemelerin getirdiği sınırlamalar nedeniyle yetersiz kalmaya başlamıştır. Bu sebeple motor firmaları egzoz devresi emisyon (aftertreatment) sistemlerini de kullanmaya başlamışlardır. Egzoz devresi emisyon sistemleri, egzoz gazları motordan çıktından sonra belirli yöntemlerle egzoz gazındaki zararlı gazların azaltılmasını sağlamaktadır. Bu sistemler genel olarak üç yollu katalitik konvertör, dizel oksidasyon katalizörü, dizel partikül filtresi ve seçici katalitik indirgemenin (SCR) tek veya birlikte kullanılmasıyla oluşmaktadır [13].

Üç yollu katalitik konvertörler, en eski emisyon kontrol yöntemlerinden biridir. Pahalı metaller olarak adlandırılan Platinyum (Pt), Paladyum (Pd) ve Rodyum (Rd) elementleri ile kaplanarak emisyonların indirgenmesi sağlanmaktadır. Konvertörler

iki parça katalizörden oluşmaktadır. İlki indirgeme, diğeri ise oksidasyon katalizörü olarak adlandırılmaktadırlar. Genel olarak benzinli araçlarda kullanılmaktadırlar [14].

Dizel oksidasyon katalizörü (DOK) egzoz gazındaki zararlı birleşikler olan hidrokarbonların (HC), karbonmonoksitin (CO) ve partikül maddedeki çözülebilir organik bileşenleri indirgemektedir. Dizel oksidasyon katalizörü, HC'ların %40-70, CO'in %40-60 ve partikül maddenin (PM) ise %20-40 oranında azaltılmasını sağlamaktadır [15]. DOK, reaksiyonların düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi için pahalı metaller olarak adlandırılan Pilatinyum (Pt), Palladyum (Pd), Rodyum (Rd) elementleriyle kaplanmaktadır. DOK, kordierit ve metalik malzemenen üretilmektedir [16].

Dizel partikül filtresi (DPF) egzoz gazlarının sistem boyunca geçişine izin verirken katı ve sıvı partikül emisyonlarının biriktirmek için tasarlanmıştır. Dizel partikül filtresi, partikül maddelerin %90 oranında azaltılmasını sağlamaktadır [17]. Dizel partikül filtrelerin, kısmi akış (partial flow) veya duvar akış (wall flow) olarak iki farklı tasarımı vardır. Duvar akışlı filtreler, kısmi akışlı filtrelere göre partikül madde tutabilme özellikleri daha fazladır.

Partikül filtresinin ilk tasarım aşamasında basınç kaybının bilinmesi, motor üzerinde oluşturmuş olduğu geri basınç ve filtreme özelliklerinin tespiti için önemlidir. Dizel partikül filtresinin basınç kaybına ait matematik modelinin oluşturulması ve akış analizi (CFD) ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Reddy [18] yapmış olduğu çalışmada dizel partikül filtrelerinin partikül madde emisyonlarını biriktirebilme kapasiteleri üzerinde çalışmıştır. Temiz ve içerisinde partikül madde emisyonları biriken dizel partikül filtresinin akış analizlerini gerçekleştirmiştir. Akış analizleri sonlu elemanlar yazılımı olan Fluent ile yapılmıştır. Partikül filtresinin kanal geometrik özelliklerini değiştirerek en düşük basınç kaybını sahip olanı bulmuştur. Kanal geometrisi olarak kare, üçgen ve dairesel kesitler seçilmiştir. Her biri için ayrı modelleme yapılarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda dairesel kanala sahip partikül

filtresinin, partikülleri biriktirebilme ve basınç kaybı olarak en iyi sonucu verdiğini tespit etmiştir.

Haralampous ve arkadaşı [19] çalışmalarında bölgesel kırılmalara maruz kalmış partikül filtresinin, partikül emisyonlarını filtre edebilme özelliklerindeki değişiklikleri incelemişlerdir. Partikül filtresinin matematik modelini bir boyutlu olarak oluşturmuşlardır. Bu model üzerinden akış analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda partikül filtresindeki bölgesel hasarların filtre edebilme özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini, basınç kaybını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Huang [20] yapmış olduğu çalışmada, DPF'in filtreleme özelliklerini ve kararsız çevrimde rejenerasyonu incelemiştir. Partikül filtresinin içerisinde biriken isleri iki şekilde modellemiştir. Bunlar dağınık ve toplu halde bulunan is emisyonlarıdır. İslerin dağınık olarak birikmesi filtreleme açısından daha olumlu sonuç verdiğini bildirmiştir. Partikül filtresindeki basınç kaybına sebep olan beş önemli etkenin kanal boyunca değişen sıcaklık, biriken is kalınlığı, isin geçirgenliği, duvar kalınlığı ve duvar geçirgenliği olduğunu belirtmiştir. Toplanmış halde biriken islerin rejenerasyonu için dışarıdan enerji gereksinimine ihtiyaç duyduğunu açıklamıştır. Rejenerasyon işlemi, en verimli şekilde gerçekleşebilmesi için araç yüksek hızda iken sıcaklığın 710 °K'ne gelmesi ve 120 saniye boyunca bu koşullarda sürülmesi gerektiğini tespit etmiştir.

Masoudi ve ark., [21] belirli kesitteki parçaların birleşiminden oluşan partikül filtresinin basınç kaybının matematik modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Dizel partikül filtrelerinin tek parça halinde imal edilmesinin zor olduğunu ve bu sebepten dolayı belirli kesitte parçaların üretilmesinin daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Bu parçaları kullanarak istenilen çapta partikül filtresinin üretiminin daha kolay ve maliyeti azaltacağını belirtmişlerdir. Çalışmada, parçalardan oluşan partikül filtresine ait basınç kaybının matematik modelini geliştirmişlerdir.

Konstandopoulos [22] ve ark., sürekli rejenere olan emisyon sistemleri için akış analizleri gerçekleştirmişlerdir. Sürekli rejenere olan sistemler oksidasyon katalizörü ve partikül filtresinden oluşmaktadır. Oksidasyon katalizöründe, egzoz gazlarında

bulunan azot oksitler, azot dioksit gazına dönüşürler. Azot dioksit gazı, partikül filtre içerisinde biriken is ile reaksiyona girerek yanmaları sağlanmaktadır. Reaksiyonlar, egzoz gazlarının oksidasyon katalizörü ve partikül filtresi içerisinde geçtiği için sürekli devam etmektedir. Bunun sonucunda partikül filtre içerisinde is birikmesi olmayacak ve geri basınç artmayacaktır. Sistemin verimli çalışması için düşük sülfür oranlı yakıtın kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Sürekli rejenere sisteminin efektif çalışabilmesi için partikül filtresi tasarımının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Daha önce geliştirmiş oldukları matematik model üzerine partikül filtresinin kanal sonlarında bulunan gözenekli malzemenin etkisini de eklemiştirler. Yaptıkları çalışmalarda filtrelerdeki basınç kaybının nümerik ve CFD sonuçları arasında %3 hata payı olduğunu tespit etmişlerdir. Partikül filtresinin akış testlerini kurmuş oldukları deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilmişlerdir. Çalışma sonucunda, partikül filtresinin biriktirebileceği is miktarı ve basınç düşümünü ilişkilendiren matematiksel formülü geliştirmişlerdir.

Lavicka ve arkadaşları [23] dizel partikül filtresinde düzensiz is birikmesinden kaynaklı olan basınç kayıplarının oluşumunu incelemiştirler. Bunun için temiz, merkez bölgesinde is biriken ve birikmeyen, bazı bölgelerde daha yoğun is biriktiği varsayımı yaparak nümerik çözümler gerçekleştirmişlerdir. Bunun için sonlu elemanlar yazılımı olan Fluent'ten yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda isin birikmesi, egzoz gazının hızını düşürmekte olduğunu ve filtrelemeyi olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Stratakis ve ark., [24] dizel partikül filtrelerindeki basınç kaybını deneysel olarak incelemiştirler. Partikül filtre içerisinde biriken isin geçirgenliğini ve yoğunluğunu hesaplamışlardır. Partikül filtre içerisinde biriken islerin ve yarı rejenere olmuş islerin basınç kaybına olan etkilerini araştırmışlardır. Geçirgenlik ve yoğunluk çarpımının, biriken is miktarı ile doğrudan ilişkisi olduğunu bulmuşlardır. Geçirgenlik ve yoğunluk değerlerinin çarpımının  $3,5 \cdot 10^{-12}$ ,  $1,15 \cdot 10^{-11}$  arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, dizel partikül filtresinde basınç kaybına neden olan etkilerin incelenmesidir. Partikül filtresinin uzunluk ve birim alandaki kanal sayıları değiştirilerek basınç kaybına neden olan temel etken bulunmuştur.

Dizel partikül filtresinin basınç kaybının matematik modeli oluşturulmuş ve deney düzeneği üzerinde basınç kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra partikül filtrelerinin akış analizleri gerçekleştirilerek deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Partikül filtresindeki basınç kaybının iki yöntem ile doğruluğu kontrol edilmiştir.

Matematik model oluşturulurken, basınç kaybına neden olan etkiler incelenmiştir. Partikül filtresi basınç kaybına neden olan bölgelere ayrılmış ve her bölge kendi içerisinde incelenmiştir. Matematik modelinin oluşturulmasında akışkanlar mekaniğindeki süreklilik, momentum ve Bernoulli denklemlerinden faydalanılmıştır.

Matematik model oluşturulduktan sonra, 3 adet partikül filtresinin kurulan deney düzeneği üzerinde basınç kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Basınç kaybı ölçümünde, partikül filtresi içerisine ortam sıcaklığında hava gönderilerek ilgili debi değerinde oluşan basınç kayıpları incelenmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen veriler, matematik modelde yerine konularak her bir partikül filtresinin geçirgenlik (permeability) ve içsel kayıp katsayısı hesaplanmıştır.

Partikül filtrelerinin katı modelleri oluşturularak, akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Akış analizlerinde, matematik modelde olduğu gibi yine kanalların simetrisinden yararlanılmıştır. Akış analizleri için sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS-CFX kullanılmıştır. Akış analizlerinde, akışkana ait özellikler ve partikül filtresinin yapısı olan gözenekli malzemeye ait özellikler tanımlanmıştır. Analizler sonucunda, partikül filtresinin giriş ve çıkışındaki basınç farkından basınç kayıpları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda deney ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

## **BÖLÜM 2. DİZEL MOTORLARINDA EMİSYON OLUŞUMU VE KONTROL YÖNTEMLERİ**

### **2.1. Dizel Motorlarında Emisyon Oluşumu**

Dizel motorlarda, fosil kökenli yakıtların kullanılması sonucunda zararlı gazlar atmosfere atılmaktadır. İdeal şartlarda yanmanın gerçekleşmesi durumunda bu zararlı gazlar oluşmayacaktır. Fakat dizel motorları hiç bir zaman ideal şartlarda çalışmadıkları için kirletici emisyonlar oluşmaktadır.

Dizel motorlarda yanma sonucunda, hidrokarbon, karbon monoksit, azot oksitler, kükürt dioksit, partikül madde ve kurşun bileşikler oluşmaktadır. Dizel motorları, fakir karışımda çalıştıklarından dolayı ana kirletici emisyonlar, azot oksitler ve partikül maddedir.

#### **2.1.1. Hidrokarbonlar**

Hidrokarbonların oluşmasının temel nedeni, hava fazlalık katsayısı (HFK) 1'den az olduğu için oksijenin ve sıcaklığın yetersiz olmasıdır. Yakıt, tam yanma gerçekleştirilmeden atılmaktadır [25]. Dizel motorları, fakir karışımda çalıştıklarından dolayı hidrokarbon (HC) emisyonları benzinli motorlara göre düşüktür.

Yanma odasının soğuk cidarlarında meydana gelen ısı kayıpları, oksidasyon reaksiyonlarının yavaş olmasını ve alevin sönmeye neden olmaktadır. Bunun sonucunda hidrokarbon emisyonları oluşmaktadır [26].



Motor ilk çalışma şartlarında daha fazla hidrokarbon emisyonu üretmektedir. Yükün artmasıyla birlikte silindire giren yakıt artmakta ve sıcaklığın artmasıyla birlikte hidrokarbon miktarı azalmaktadır.

### 2.1.2. Karbon monoksitler

Karbon monoksit (CO) emisyonlarının oluşumunun ana nedeni oksijenin (O<sub>2</sub>) yetersiz oluşudur. Dizel motorlar fakir karışımda çalıştıkları için karbon monoksit emisyonları düşüktür.

Karbon monoksit oluşumu hava fazlalık katsayısından etkilenmektedir. Düşük yüklerde sıcaklığın düşük olmasından dolayı CO'lerin CO<sub>2</sub>'e oksidasyonu yavaş gerçekleşmektedir. Yükün artmasıyla birlikte sıcaklığın artması sonucu oksidasyon reaksiyonu hızlanmaktadır. Fakat hava fazlalık katsayısının belirli bir oranın üzerine çıkması, O<sub>2</sub>'in yetersiz olmasına ve CO emisyonun tekrar artmasına neden olmaktadır [27].

### 2.1.3. Azot oksitler

Yanma sonucunda, havanın içerisindeki azot ve oksijenin birleşmesinden azot oksitler meydana gelmektedirler. Azot oksitlerin hacimsel olarak %90'nını azot monoksit (NO) oluşturmaktadır. Azot oksitlerin atmosfere atıldıktan sonra hava ile temasında azot monoksitlerin (NO) bir kısmı azot dioksite (NO<sub>2</sub>) dönüşmektedir [28]. Hava fazlalık katsayısı, sıcaklık ve kimyasal reaksiyon hızları azot oksit emisyonlarının oluşumunu etkilemektedir.

Azot oksitlerin oluşumunu oksijen oranı etkilemektedir. Fakir karışımlarda azot oksit oranları fazladır. Maksimum miktara %10 fakir karışımlarda ulaşılmaktadır. Hava fazlalık katsayısının daha artması yanma sıcaklığını düşereceği için azot oksitler azalacaktır [29]. Azot oksitlerin oluşumu Zeldovich reaksiyonları ile tanımlanmaktadır. Zeldovich reaksiyonları Denklem 2.1. ve 2.2.'de verilmiştir.

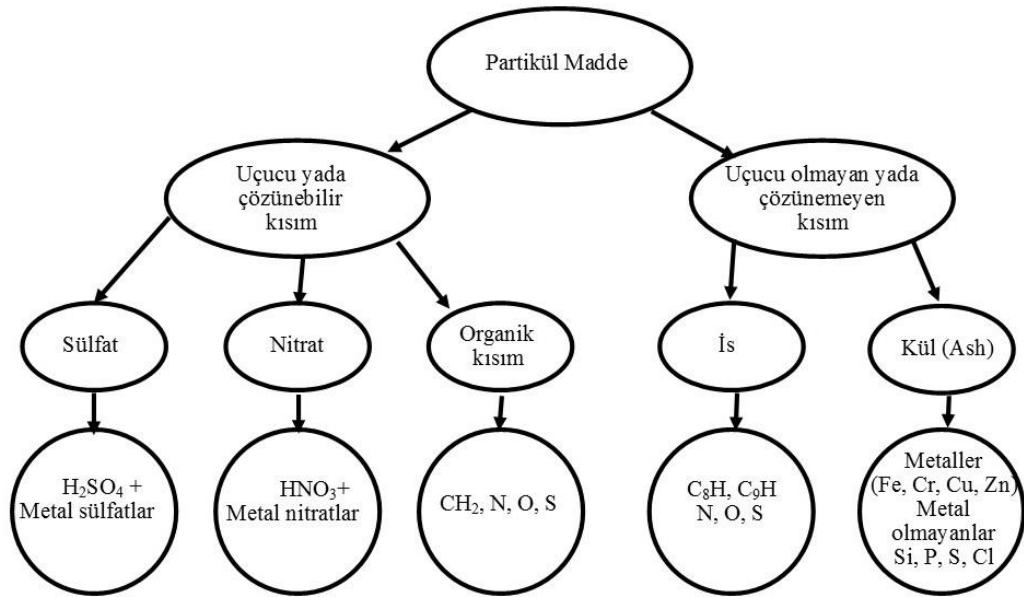




Azot oksitlerin oluşumu reaksiyon hızlarına bağlıdır. Reaksiyon hızlarını ise sıcaklık etkilemektedir. Yanma sırasında ulaşılan en yüksek sıcaklıkta, azot oksitler için kimyasal denge sağlanmadan sıcaklık düşüş gösterir. Sıcaklığın düşmesi ile azot oksitlerin azot ve oksijene dönüşmesi beklenirken sıcaklığın çok düşük olması ile reaksiyon oldukça yavaşlamaktadır. Bunun sonucunda azot oksitler, dönüşümü gerçekleştiremeden donmuş olurlar [30].

#### 2.1.4. Partikül madde

Partikül madde; is, kısmi veya yanmamış hidrokarbon, sülfat, nitratlar ve metalden oluşmaktadır. Partikül madde çözünebilir ve çözünemez yada katı kısım olarak ayrılmaktadır [31]. Partikül maddenin içeriği Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Partikül maddenin içeriği [32]

Partikül madde içerisindeki is, yanma odasındaki yüksek sıcaklıktan dolayı yanmamış yakıtın buhar ve sıvı fazından katı hale gelmesiyle oluşmaktadır. İs, 8 birim karbon ve 1 birim hidrokarbondan oluşmaktadır. Partikül maddenin %50'si

isten meydana gelmektedir [33]. Sıvı ve gaz fazındaki hidrokarbonlardan, is oluşumu 6 aşamada meydana gelmektedir. Bunlar ısıl dönüşüm, çekirdekleşme, birleşme, yüzey genişlemesi, kümeleşme ve oksidasyondur. Oksidasyon işleminde hidrokarbonlar karbon monoksit, karbondioksit ve su buharına dönüşmektedir.

Nitratlar, azot dioksit ve su buharının birleşmesinde oluşmaktadır. Partikül madde içerisindeki hacimsel yüzdeleri çok düşüktür [34].

Metaller, temel olarak demir, magnezyum, alüminyum, bakır ve kurşundan oluşmaktadır. Yağlama yağı içerisindeki metaller ve çalışma sırasında piston, segmanların aşımından meydana gelmektedir [35]. Organik kısım, oksidasyon reaksiyonundan kaçan yakıt ve buharlaşmış yağlardır.

## **2.2. Dizel Motorlarında Emisyon Kontrol Yöntemleri**

İçten yanmalı motorlarda, yanma sonrası açığa çıkan zararlı egzoz gazlarını azaltabilmek amacıyla genel adıyla egzoz devresi emisyon sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin amacı egzoz gazlarını indirgeme ve oksidasyon reaksiyonlarına maruz bırakarak zararsız gazlara çevirmektir. Emisyon normlarında, çevreye atılan zararlı gazların limitleri her geçen gün düşürülerek taşıt kaynaklı kirliliklerin azaltılması amaçlanmaktadır. Normların uygulandığı ilk yıllarda basit çözümlerle emisyon seviyeleri istenilen limitlere çekilirken, günümüzde birden fazla elemanın kullanıldığı, karmaşık sistemler ile zararlı gazlar kontrol altına alınmaktadır.

### **2.2.1. Üç yollu katalitik konvertörler**

Üç yollu katalitik konvertörler (ÜYK), en fazla bilinen ve emisyon kontrolünde kullanılan ilk yöntemdir. Yapı olarak seramik veya metalik malzemeden imal edilmektedirler. Seramik malzeme olarak kordierit, metalik malzeme olarak ise demir-krom-alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. Seramik konvertörler yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olması sebebiyle tercih edilmektedir. Fakat araç üzeri

mukavemet açısından daha dayanıklı olduklarından metal katalizörler de tercih edilmektedir [36].

ÜYK, genel olarak benzinli araçlarda hidrokarbon, karbonmonoksit ve azot oksit emisyonlarının azaltılması için kullanılmaktadırlar.

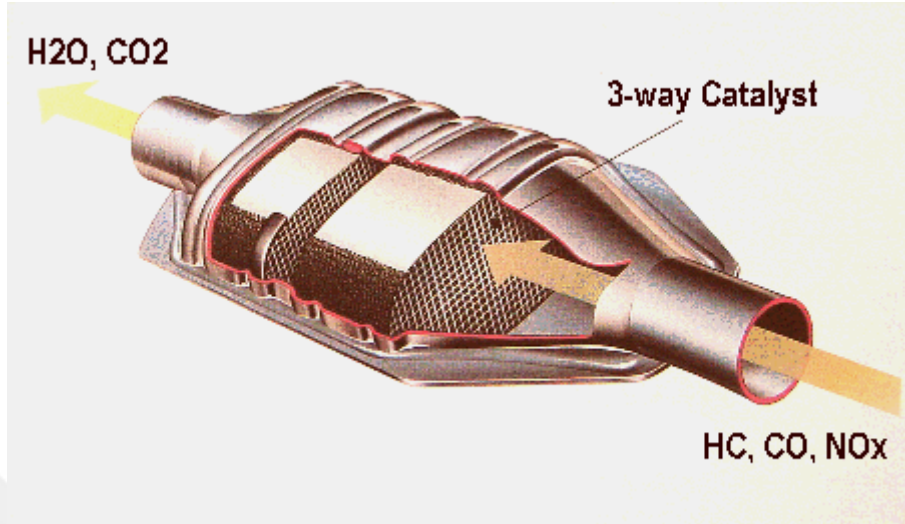
ÜYK, azaltımı pahalı metaller olarak adlandırılan Platinyum (Pt), Paladyum (Pd) ve Rodyum (Rd) elementleri ile kaplanmasıyla sağlanmaktadır. Kaplama işlemi, belirlenen oranlarda elementlerin sıvı hale getirilerek katalitik konvertör içerisine nüfuz ettirilmesi ile sağlanmaktadır. Pd ve Pt, karbon monoksit ve hidrokarbon emisyonlarını azaltırken, Rd azot oksit emisyonlarını azaltmaktadır. Kaplama işlemi sırasında, karışımın kanallar içerisine homojen olarak yayılması gerekmektedir. Kaplama yapılmamış ve nüfuz etmemiş bölgeler, egzoz gazlarının reaksiyona girmeden atılmasına sebep olacaktır. Üç yollu katalitik konvertörlerde kaplama miktarı, toplam pahalı metallerin kütlelerinin, katalitik konvertör hacmine oranı ile ifade edilmektedir. Denklem 2.3.'de TPM; pahalı metallerin toplam kütlelerini, KV; katalitik konvertör hacmini, KM ise kaplama miktarını ifade etmektedir. Katalitik konvertör etkinliğini kaplama miktarı belirlemektedir. Kaplama miktarının az olması katalitik konvertör etkinliğini düşürecektir, fazla olması ise maliyeti arttıracaktır. Bu nedenlerden dolayı kaplama miktarının optimize edilerek uygulanması gerekmektedir.

$$KM = \frac{TPM}{KV} \quad (2.3)$$

Üç yollu katalitik konvertörler, arka arkaya iki katalizörün kullanılması ile meydana gelmektedirler. İlk katalizör, indirgeme katalizörü, ikincisi ise oksidasyon katalizörü olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.2.'de üç yollu katalitik konvertörün yapısı gösterilmiştir.

İndirgeme katalizöründe, egzoz gazlarında bulunan zararlı azot oksit gazlarının ( $NO_x$ ) azot ( $N_2$ ) ve oksijene ( $O_2$ ) ayrılmasını sağlamaktadır. Katalizör, rodyum ve

platinyum elementleri ile kaplanmaktadır. Ayrışım reaksiyonlarına ait tepkime denklemleri 2.4. ve 2.5.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Üç yollu katalitik konvertör yapısı [37]



İndirgeme katalizöründen sonra gelen ise oksidasyon katalizörüdür. Oksidasyon katalizöründe ise egzoz gazlarındaki hidrokarbon ve karbon monoksit gazları azaltılmaktadır. Oksidasyon katalizöründe gerçekleşen reaksiyonlar Denklem 2.6. ve 2.7.'de verilmiştir. Katalizör Pt ve Pd elementleri ile kaplanmaktadır.



İndirgeme ve oksidasyon reaksiyonlarında da görüldüğü üzere, egzoz gazlarındaki zararlı gazlar daha zararsız olan karbondioksit, su buharı ve azota dönüşmektedirler.

Benzinli araçlar, zengin karışımlarda çalıştıkları için karbon monoksit ve hidrokarbon emisyonları dizel araçlara göre daha fazladır. Benzinli araçlarda üç yollu

katalitik konvertörler tercih edilmektedir. Fakat dizel araçlar fakir karışımda çalıştıkları ve azot oksit emisyonları benzinli araçlara göre düşük oldukları için sadece oksidasyon katalizörünün bulunduğu sistemler kullanılmaktadır. Günümüzde üç yollu ve oksidasyon katalizörlü sistemlerin uygulanması daha çok binek araçlara yöneliktir.

### 2.2.2. Dizel partikül filtresi

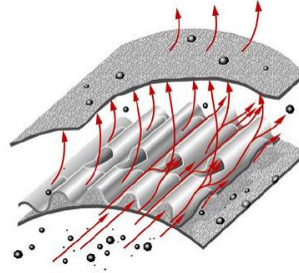
Emisyon kontrolü için kullanılan diğer bir yöntem dizel partikül filtresi (DPF) dir. Bu sistem oksidasyon işleminden sonra bir kısmı indirgenen partikül maddelerin büyük çoğunluğunun yok edildiği kısımdır [38]. Dizel araçların fakir karışımda çalışmalarının sonucunda partikül madde emisyonları, benzinli araçlara göre daha fazladır. Partikül madde, yanma sonucu açığa çıkan katı ve sıvı parçacıklardır. 10 mikrometrenin altında bulunan partikül madde emisyonları insan sağlığını tehdit etmektedir [39]. Partikül madde emisyonlarını kontrol altında tutmak amacıyla partikül filtresi geliştirilmiştir. Dizel partikül filtresi egzoz gazlarının sistem boyunca geçişine izin verirken katı ve sıvı partikül madde emisyonlarını biriktirmek için tasarlanmıştır.

Dizel partikül filtresi diğer emisyon azaltıcı sistemlere göre daha farklı tasarımının olmasından dolayı araç üstü kullanımında problemlere sebep olmaktadır. Partikül maddelerin içerisinde zamanla birikmesi geri basıncın artmasına ve buna bağlı olarak motor performansının azalmasına sebep olmaktadır. Partikül filtresinin araç üzerinde verimli çalışabilmesi için uygun sıcaklığın sağlanması gerekmektedir.

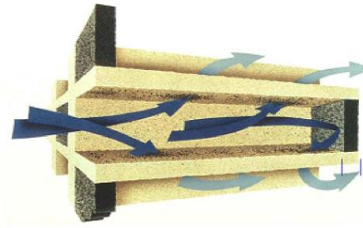
Dizel partikül filtreleri yapısı gereği kısmi akışlı ve duvar akışlı olarak iki farklı çeşidi vardır. Duvar akışlı DPF'ler seramik malzemedен, kısmi akışlı DPF'ler ise metalik malzemedен imal edilmektedirler. Seramik DPF'ler kordierit veya silisyum karbid malzemedен, metal DPF'ler ise alüminyum-titan ( $Al_2TiO_5$ ) alaşımından imal edilmektedirler.

Kısmi akışlı DPF'lerde yapısı gereği egzoz gazlarının ortalama %60 kadarını filtre edilebilmektedir. Kısmi akışlı partikül filtresi Şekil 2.3.'de gösterilmiştir. Duvar

akışlı sistemlerde ise egzoz gazlarının %99'a kadar filtre edilebilmesi sağlanabilmektedir [40]. Duvar akışlı partikül filtresi Şekil 2.4.'de gösterilmiştir. Günümüzde partikül madde emisyonlarında büyük oranda azaltma gereksinimi duyulduğu için duvar akışlı DPF'ler tercih edilmektedirler.



Şekil 2.3. Kısmi akışlı partikül filtresi [41]



Şekil 2.4. Duvar akışlı partikül filtresi [42]

Dizel partikül filtresi içerisinde zamanla biriken partikül madde, filtrenin tıkanmasına ve bu da motor performansının düşmesine neden olmaktadır. Partikül filtresindeki tıkanıklığın giderilmesi ve bunun sonucunda motor geri basıncına olan etkisinin düşürülmesi için temizlenmesi gerekmektedir. Bu temizlenme işlemine rejenerasyon adı verilmektedir. Pasif ve aktif rejenerasyon olmak üzere iki türlü rejenerasyon çeşidi bulunmaktadır [43].

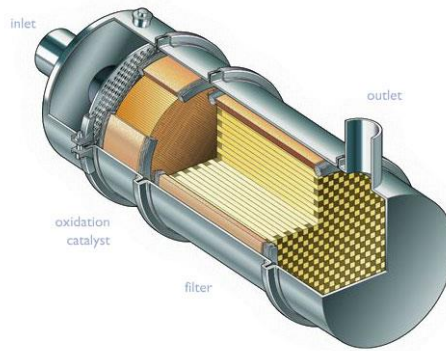
#### 2.2.2.1. Pasif rejenerasyon

Pasif rejenerasyonlu sistemlerde, dışarıdan ilave enerji ihtiyacı duyulmadan partikül maddeler yakılmaktadır. DPF önüne oksidasyon katalizörünün yerleştirilmesi veya yakıtta katkı maddesi (fuel borne catalyst) eklenmesi ile sağlanmaktadır. Partikül maddelerin büyük çoğunluğu is olarak adlandırılan karbon tanecikleri ve hidrokarbon

atıklarıdır. Bunların temizlenmesi oksijen bazlı yanma ile gerçekleştirilmektedir. Oksijen bazlı yanmada, dizel partikül filtresinin önüne oksidasyon katalizörü yerleştirilir. Bölüm 2.2.1.'de oksidasyon katalizörünün görevi anlatılmıştı. Oksidasyon katalizörü, hidrokarbon ve karbon monoksitleri zararsız gazlara dönüştürülürken, azot oksit emisyonları üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Tepkimeye girmeden çıkan azot oksit gazları DPF içerisinde biriken is ile tepkimeye girmektedir. DPF içerisinde gerçekleşen tepkime Denklem 2.8.'de verilmiştir.



Egzoz gazında bulunan azot dioksit gazı, is ile reaksiyona girerek zararsız olan karbondioksit gazına çevrilmesini sağlarlar. Reaksiyon için gerekli olan azot dioksit gazları, azot oksitlerden sağlanmaktadır. Tepkimenin verimli gerçekleşebilmesi için 250 °C egzoz sıcaklığı gerekmektedir [44]. Düşük sıcaklıkta verimli çalışmaktadır. Şekil 2.5.'de Johnson Matthey firmasına ait oksidasyon katalizörü ve partikül filtesinden oluşan pasif rejenerasyon sistemi görülmektedir.

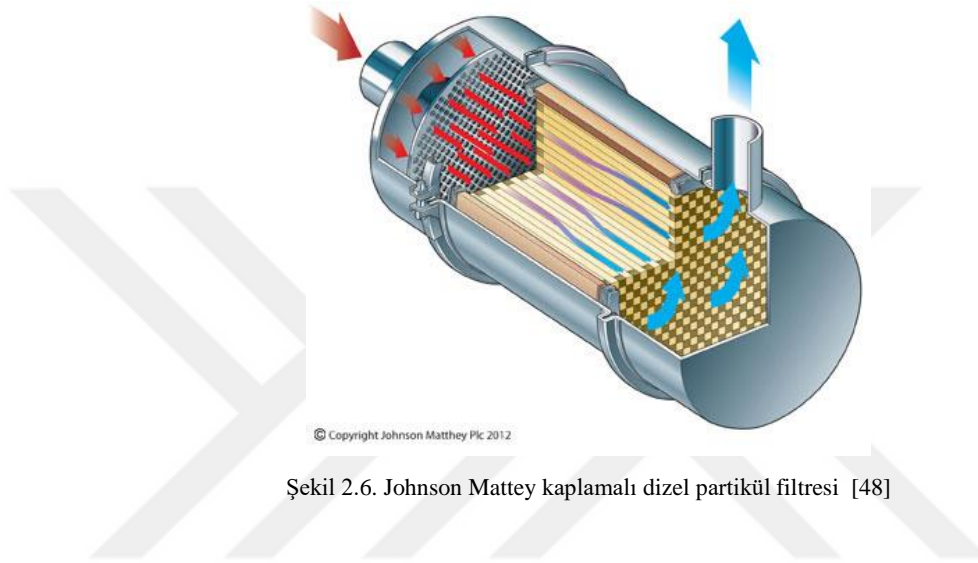


Şekil 2.5. Johnson Matthey sürekli rejenerasyon sistemi [45]

Pasif rejenerasyon sistemlerinin bir çeşidi ise dizel partikül filtresini pahalı metallerle kaplanarak (Pt, Pd) partiküllerin yanması sağlanmaktadır. Böylelikle dışarıdan bir etki olmadan partikül filtresi temizlenmiş olur. Oksidasyon katalizörünün bulunduğu sistemlere göre daha yüksek sıcaklık gerekmektedir. Sistemin çalışma zamanının yarısında, sıcaklığın yaklaşık 280 °C üzerinde olması gerekmektedir [46]. Şekil 2.6.'da Johnson Matthey firmasına ait kaplamalı dizel partikül filtresinin şekli verilmiştir. Bu sistem diğerlerinde olduğu gibi ekstra DOK ihtiyaç duymamaktadır.



Pasif rejenerasyonun başka bir yolu ise, yakıt kimyasal katkı (fuel borne catalyst) eklenmesidir. DPF içerisinde partikül maddelerin biriktiği ve geri basınç limit değerine yaklaştığı zaman elektronik kontrol modülü (EKM) sinyal göndererek kimyasal katkının yakıtı karışması sağlanır. Bu katkı maddesinin kullanılması egzoz gazları ile DPF içerisinde biriken islerin temas nokta sayısını artırmaktadır. Sistemin çalışma zamanının yarısında sıcaklığın 380 °C üzerinde olması gerekmektedir [47].



Şekil 2.6. Johnson Matthey kaplamalı dizel partikül filtresi [48]

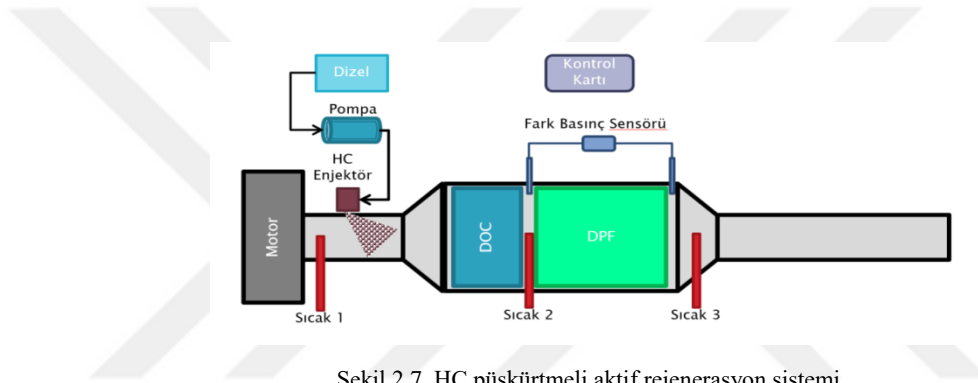
#### 2.2.2.2. Aktif rejenerasyon

Aktif rejenerasyon, pasif rejenerasyon şartlarının (egzoz sıcaklığı) sağlanamadığı yerlerde kullanılmaktadır. Egzoz gazı sıcaklığı partikül maddelerin yanma sıcaklığı olan 550-600 °C'ye çıkartılarak, islerin yakıldığı ve DPF'in temizlendiği sistemlerdir. Avantajları, egzoz gazı sıcaklığından ve yakıt kalitesinden (düşük sülfür oranı) bağımsız olarak verimli çalışabilmektedirler [49].

Aktif rejenerasyon sistemlerinde sıcaklığın artırılması için ekstra enerji gereksinimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu enerji birkaç farklı yolla sağlanabilmektedir.

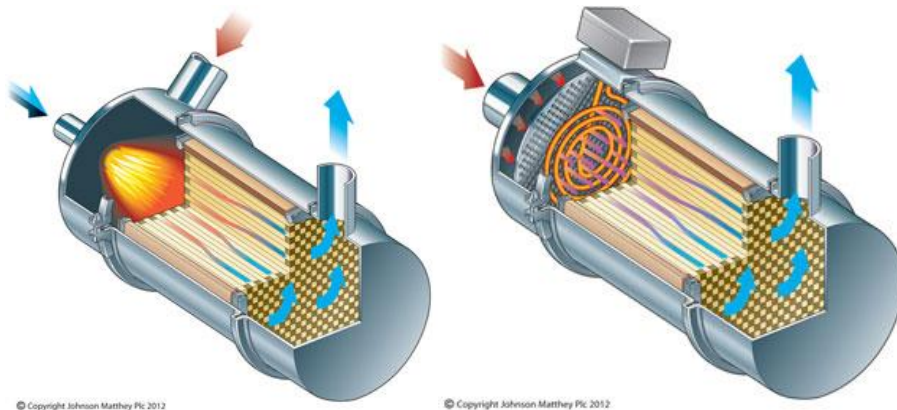
DPF'lerde aktif rejenerasyon işlemi egzoz gazına yakıt püskürtülerek, egzoz gaz sıcaklığını isin yanma sıcaklığı olan 550 °C'ye çıkması sağlanmaktadır. Yakıt deposundan hat çekilerek, turbo sonrasında DPF öncesinde enjektör yardımıyla yakıt

püskürtülür. Püskürtülen yakıtın egzoz gazıyla birlikte buharlaşarak alev alması ve sistemin sıcaklığının  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkması sağlanır. Sıcaklığın, isin yanma sıcaklığına çıkmasıyla, yanma işlemi gerçekleştirilir. Rejenerasyon süresi ortalama 20-25 dakika arasında değişmektedir [50]. Temizlenme işlemi sonrasında enjektör devre dışı bırakılarak sistem normal çalışma koşullarına döner. Sıcaklığın çok artması, sistem ekipmanlarına zarar verebileceğinden, püskürtülen yakıt miktarı önemlidir. Bu sebeple sistemin çalışması için bir kontrol modülüne ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.7.'de yakıt püskürtmeli aktif rejenerasyon sistemine ait şekil verilmiştir. Yakıt püskürtmeli aktif rejenerasyon işleminde sistem pompa, enjektör gibi ilave ekipmanlar barındırdığı için pasif rejenerasyon yapan sistemlere göre daha pahalıdır.



Şekil 2.7. HC püskürtmeli aktif rejenerasyon sistemi

Aktif rejenerasyon işlemi DPF öncesinde ısıtıcı ve yakıcı elemanların kullanılmasıyla da yapılabilmektedir [51]. DPF öncesinde bulunan ısıtıcı ve yakıcı elemanlar ile egzoz gazı sıcaklığı  $550\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye arttırılmaktadır. Şekil 2.8.'de Johnson Matthey firmasına ait ısıtıcı ve yakıcı sistemlere ait örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Isıtıcı ve yakıcı aktif rejenerasyon sistemi [52]

### 2.2.3. Seçici katalitik indirgeme

Emisyon kontrol yöntemlerinden biri de seçici katalitik indirgemedir. Bu sistemde egzoz gazları, egzoz sıvısı ile reaksiyon girerek azot oksit emisyonları azaltılmaktadır. Dizel egzoz sıvısı %32.5 su ve %67.5 üreden (amonyak) oluşmaktadır [53].

Genel olarak bu sıvı Adblue olarak adlandırılmaktadır. Adblue toksit madde olmadığı için çevreye ve canlılara karşı herhangi bir zararı bulunmamaktadır. Adblue -11 °C'de donmaya başlamaktadır [54]. Uzun süre soğukta bekleyen araçlarda ilk çalıştırmada SCR sistemi etkin çalışmayabilir. Sistemin ısınmasıyla birlikte Adblue eriyerek işlevini yerine getirmeye başlayacaktır. Adblue ayrı bir tankta depolanmakta ve donma durumuna karşın üzerinde ısıtıcı sistemler bulunmaktadır. Şekil 2.9.'da Adblue tankı gösterilmektedir.



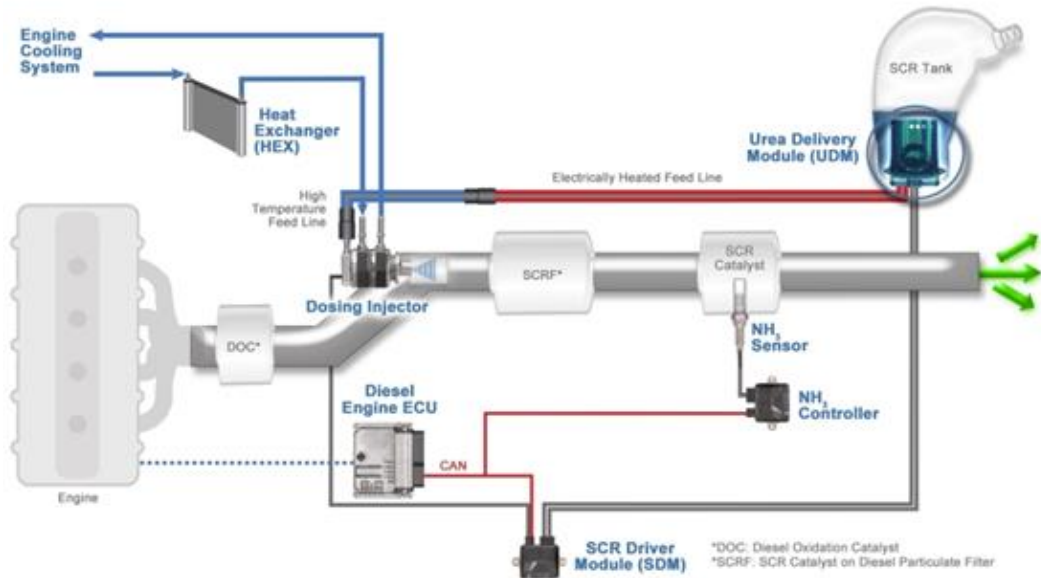
Şekil 2.9. AdBlue tankı [55]

SCR sistemlerinde iki çeşit amonyak kullanılmaktadır. Bunlar susuz amonyak ve su bazlı amonyaktır [56]. Susuz amonyak toksit, zararlı ve yüksek buhar basıncından dolayı basınca dayanıklı kaplarda depolanması gerekmektedir. Sulu amonyak ise zararsız ve kolay saklanabilen amonyak çeşidir. 2.9. ve 2.13. arasındaki denklemlerde zararlı azot oksit gazlarını, azot gazına çevirebilmek için gerekli olan reaksiyonları gösterilmektedir.





SCR sistemi egzoz gazındaki  $NO_x$ 'lerin %95 oranında, PM ise %30-60 oranında azaltılmasını sağlamaktadır [57]. SCR sistemin çalışması egzoz gazındaki  $NO_x$ 'in, Adblue'deki üre ile tepkimeye girerek  $NO_x$  lerin azot gazına dönüşmesi sağlamaktadır. Denklem 2.14.'de tepkime reaksiyonu verilmiştir. SCR sistemi Şekil 2.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. SCR sistemi [58]

SCR sistemlerinde amonyak miktarının hassas olarak ayarlanması gerekmektedir. Yetersiz miktarda amonyak püskürtülmesi daha az azotoksitlerin çevrimini

sağlamaktadır. Fazla püskürtülmesi ise zararlı amonyağın çevreye salınımına sebep olmaktadır. Teorik olarak egzoz gazlarından bulunan azotoksit gazları kadar sisteme amonyak püskürtülmesi gerekmektedir. Fakat pratikte bu oran 0.9-1 arasında değişmektedir [59]. Oranın 1'den fazla olması durumunda ise zararlı amonyak doğaya salınmış olunacaktır.

Günümüzde emisyon kontrol yöntemlerinde amonyak katalizörleri de kullanılmaya başlanmıştır. SCR sistemine püskürtülen Adblue egzoz gazındaki  $\text{NO}_x$  oranıyla aynı olduğu zaman etkili çalışma göstermektedir. Fakat SCR'nin düşük sıcaklıkta veya yüksek egzoz debilerinde çalışması gerektiği durumlarda Adblue ve SCR tam etkileşime giremediği için Adblue'da bulunan üre tepkimeye girmeden atmosfere atılacaktır. Bunu önlemek amacıyla amonyak katalizörleri kullanılmaktadır. Amonyak katalizörleri SCR'den tepkimeye girmeden çıkan ürenin  $\text{N}_2$ 'a dönüşmesini sağlamaktadır. Amonyak katalizörleri %95 oranına kadar ürenin azaltılmasının sağlayabilmektedir [60].

## **BÖLÜM 3. MATEMATİK MODEL**

Dizel partikül filtreleri, egzoz akışına engel oluşturdukları ve partikül maddeler zamanla içerisinde biriktiği için motorda bir geri basınç oluşturmaktadır. Oluşan bu geri basınç, partikül filtresinin geometrik özelliklerine, egzoz gazı debisine ve içerisinde biriken partikül madde emisyonlarına bağlı olarak değişmektedir.

Bu bölümde, partikül filtresinde basınç kaybına neden olan etkiler ayrı olarak incelenmiş ve matematik model oluşturulmuştur. Dizel partikül filtresinde oluşan bu geri basıncın hesaplanabilmesi için belirli bölgelere ayrılmış ve her bir bölge kendi içerisinde incelenmiştir. Partikül filtresinde geri basınca sebep olan etkiler; ani daralma ve genişleme, kanal içerisindeki sürtünme kaybı, gözenekli malzeme içerisindeki akış ve biriken partikül maddedir. Her bir bölge için ayrı olarak matematik model oluşturulmuş ve daha sonra partikül filtresinin tamamı için basınç kaybı genelleştirilmiştir.

### **3.1. Partikül Filtre Geometrisi ve Tanımlar**

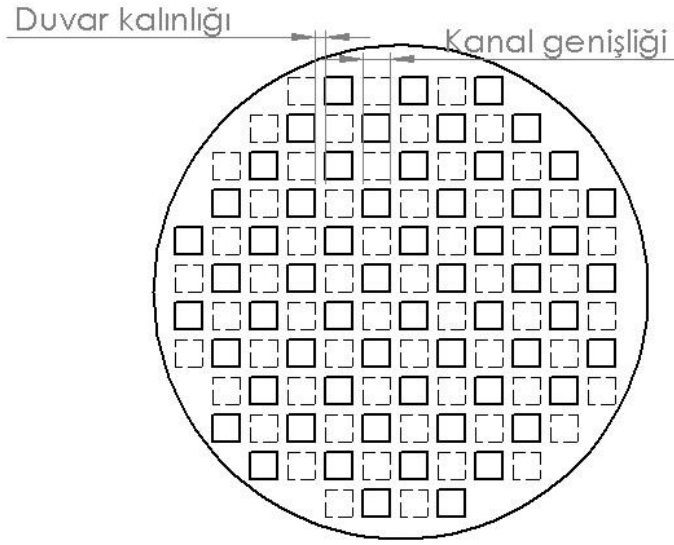
Partikül filtresindeki basınç kaybının hesaplarken ona ait bazı tanımlamalarında bilinmesi gerekmektedir.

#### **3.1.1. Duvar kalınlığı**

Duvar kalınlığı ile ifade edilmek istenilen iki komşu kanal arasındaki gözenekli malzeme kalınlığıdır. Şekil 3.1.'de DPF'in duvar kalınlığı gösterilmiştir.

#### **3.1.2. Kanal genişliği**

Egzoz gazlarının, DPF içerisindeki tahliye kanallarının genişliğidir.



Şekil 3.1. Partikül fitresi duvar kalınlığı ve kanal genişliği

### 3.1.3. Birim alandaki kanal sayısı

Dizel partikül filtresinin özellikleri tanımlayan bir diğer ifade ise birim alandaki kanal sayısıdır. Literatürde cpsi (cell per square inch) olarak tanımlanmaktadır [61]. Partikül filtresindeki basınç düşümünü etkileyen değişkenlerden bir tanesidir. Birim alandaki kanal hesabı Denklem 3.1.'de verilmiştir. Denklemde  $w$ ; duvar kalınlığını,  $a$ ; kanal genişliğini,  $\sigma$  ise birim alandaki kanal sayısını ifade etmektedir.

$$\sigma = \frac{1}{(a+w)^2} \quad (3.1)$$

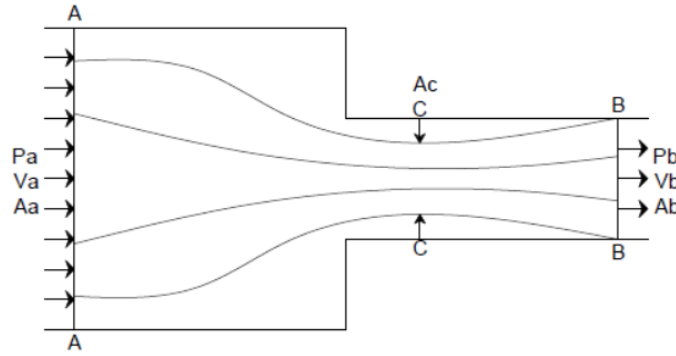
## 3.2. Dizel Partikül Filtresindeki Basınç Kayıpları

### 3.2.1. Ani daralma basınç kaybı

Dizel partikül filtresine doğru gelen egzoz gazları, küçük kesit alanına sahip kanallardan geçmeye zorlanmaktadır. Egzoz gazı bu ani daralmanın etkisiyle bir basınç kaybı yaşar. Bu basınç kaybının hesaplanabilmesi için süreklilik, Bernoulli ve momentum denklemlerinden yararlanılır [62].

Egzoz gazları kesit alanı daha küçük kanallardan geçmeye çalışırken, girişte kısa süreliğine akışkanın kesit alanı, kanalın kesit alanından daha küçük olur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda basınç kaybının büyük kısmının AA-CC kesitleri arasındaki ani daralmadan değil, CC-BB kesitleri arasındaki genişlemeden kaynaklandığı görülmüştür. CC-BB kesitleri arasında Bernoulli, süreklilik ve momentum denklemleri yazılarak basınç kaybı bulunabilir.

Şekil 3.2.'de gösterilen CC ve BB kesitleri için Bernoulli denklemi yazılır;



Şekil 3.2. Ani daralma etkisi

$$\frac{P_C}{\rho} + \frac{v_C^2}{2} + \rho Z_C = \frac{P_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2} + \rho Z_B + gh_L \quad (3.2)$$

Akışkanın sıkıştırılmaz ve aynı yatay ekseninde hareket ettiği kabul edilerek denklem düzenlenir;

$$\frac{P_C}{\rho} + \frac{v_C^2}{2} = \frac{P_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2} + gh_L \quad (3.3)$$

$$\frac{P_C - P_B}{\rho} + \frac{v_C^2 - v_B^2}{2} = gh_L \quad (3.4)$$

CC ve BB kesit alanları için süreklilik denklemleri yazılırsa aşağıdaki ifadeler bulunur.

$$Q = v_C A_C = v_B A_B \quad (3.5)$$



$$Q = \frac{\vartheta_B}{\vartheta_C} = \frac{A_C}{A_B} \quad (3.6)$$

Akışkanın momentum değişimi, üzerine etki eden tüm kuvvetlerin toplamına eşittir.

$$\sum F = \frac{d(\text{momentum})}{dt} \quad (3.7)$$

$$\rho \vartheta_B A_B (\vartheta_B - \vartheta_C) = P_C A_B - P_B A_B \quad (3.8)$$

Momentum denkleminde elde edilen basınç farkı Bernoulli denkleminde yerine konularak yük kaybı hesaplanır.

$$\frac{\rho(\vartheta_B^2 - \vartheta_C^2)}{2} + \frac{\rho(\vartheta_C^2 - \vartheta_B^2)}{2} = \rho g h_L \quad (3.9)$$

$$h_L = \frac{\vartheta_B^2}{2g} \left( \frac{A_B}{A_C} - 1 \right)^2 \quad (3.10)$$

$A_B/A_C$  oranı ani daralma katsayısı olarak ifade edilmektedir ve alanların oranına göre Tablo 3.1.'den bulunabilir. Ara değerler için enterpolasyon yapılması gerekmektedir. Denklem 3.10.'daki son çarpan ise ani daralma basınç kaybı katsayısı olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 3.1. Ani daralma katsayısı

$A_B/A_A$	0	0,04	0,16	0,36	0,64	1,0
$A_B/A_C$	0,5	0,45	0,38	0,28	0,14	0

$$\zeta_d = \left( \frac{A_B}{A_C} - 1 \right)^2 \quad (3.11)$$

Yük kaybı ve basınç kaybı arasındaki ifade de yazılarak ani daralmadan kaynaklı basınç kaybı bulunmuş olunur. Denklem 3.12.'de  $\vartheta_B$ , akışkanın partikül filtre kanalı içerisindeki hızı ifade etmektedir.

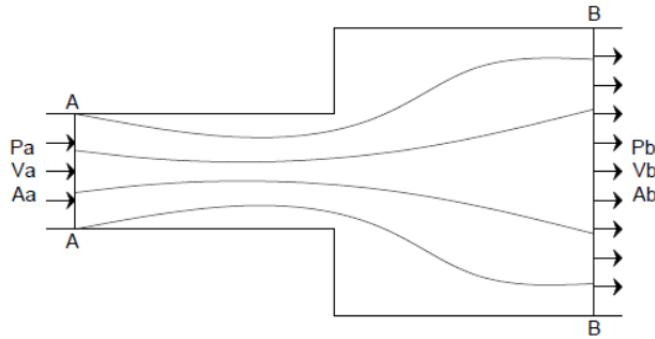
$$h_L = \zeta_d \frac{\rho v_B^2}{2g} \quad (3.12)$$

$$\Delta P_d = \zeta_d \frac{\rho v_B^2}{2} \quad (3.13)$$

### 3.2.2. Ani genişleme basınç kaybı

Egzoz gazı dizel partikül filtresindeki çıkış kanalından atmosfere atılırken kesit alanının değişmesinden dolayı ani genişleme etkisine maruz kalmaktadır. Bu ani genişleme etkisi bir basınç kaybı yaratmaktadır. Bu basınç kaybını hesaplayabilmek için ani daralmada olduğu gibi akışkanlar mekaniğindeki Bernoulli, momentum ve süreklilik denklemlerinden yararlanılır.

Şekil 3.3.'deki kontrol hacmi için akışkan sıkıştırılmaz ve aynı yatay ekseninde hareket ettiği varsayımı yapılarak Bernoulli denklemi yazılırsa denklem 3.14.'deki eşitlik bulunmuş olacaktır.



Şekil 3.3. Ani genişleme etkisi

$$\frac{P_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} = \frac{P_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2} + gh_L \quad (3.14)$$

$$\frac{P_A - P_B}{\rho} + \frac{v_A^2 - v_B^2}{2} = gh_L \quad (3.15)$$

Akışkanın momentum değişimi, üzerine etki eden tüm kuvvetlerin toplamına eşittir.

$$\sum F = \frac{d(\text{momentum})}{dt} \quad (3.16)$$

Ani genişlemeden dolayı oluşan basınç kaybı kesit alanının değişmesinden dolayı akışın doğrusallığının değişmesi ve bunun sonucunda köşelerde türbülanslı akışın meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Aynı kontrol hacmi için momentum denklemi yazılırsa Denklem 3.17. ifadesi elde edilir.

$$\rho \vartheta_B A_B (\vartheta_B - \vartheta_A) = P_A A_B - P_B A_B \quad (3.17)$$

Kontrol hacim için süreklilik denklemi yazılırsa denklem 3.18. eşitliği bulunmuş olunacaktır.

$$Q = \vartheta_A A_A = \vartheta_B A_B \quad (3.18)$$

$$gh_L = \frac{\rho(\vartheta_B^2 - \vartheta_A^2 \frac{A_A}{A_B})}{\rho} + \frac{\vartheta_A^2 - \vartheta_B^2}{2} \quad (3.19)$$

$$h_L = \frac{\vartheta_A^2}{2g} \left(1 - \frac{A_A}{A_B}\right)^2 \quad (3.20)$$

$$\zeta_g = \left(1 - \frac{A_A}{A_B}\right)^2 \quad (3.21)$$

$$h_L = \zeta_g \frac{\vartheta_A^2}{2g} \quad (3.22)$$

$$\Delta P_g = \zeta_g \frac{\rho \vartheta_A^2}{2} \quad (3.23)$$

Denklem 3.20.'deki son çarpan ani genişleme basınç kayıp katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Denklem 3.22.'deki  $\vartheta_A$ , akışkanın partikül filtre kanalının içerisindeki hızını ifade etmektedir.

Ani daralma ve genişleme etkisinden dolayı basınç kayıplarının toplamı içsel kayıp olarak adlandırılmaktadır. İçsel kaybı bulabilmek için ani genişleme ve daralma

basınç kayıpları genelleştirilmiş ve katsayıları tek bir katsayıda toplanarak içsel kayıp katsayısı olarak adlandırılmıştır. Ani genişleme ve daralma kaynaklı basınç kaybı partikül filtresi için düzenlenirse Denklem 3.24. elde edilir. Denklem 3.24.'de  $\zeta$ ; içsel kayıp katsayısını,  $u_0$ ; kanal içerisindeki hızı ifade etmektedir. İçsel kayıp katsayısı deneysel çalışmalar sonucunda bulunabilmektedir.

$$\Delta P_{d,g} = \zeta \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (3.24)$$

### 3.2.3. Gözenekli malzemedeki (porous media) basınç kaybı

Seramik dizel partikül filtreleri silisyum karbid (SiC) ve kordierit malzemelerinden üretilmektedir. Bu malzemelerden üretilen partikül filtreleri gözenekli (porous) yapıya sahip olmaktadır. Partikül filtrelerine egzoz gazı çapraz akış yaptığından dolayı gözenekli yapıdan (duvar) geçmesi gerekmektedir. Egzoz gazının duvardan geçmesiyle oluşan basınç kaybı, gözenekli malzemelerde akış özellikleri incelenerek bulunabilmektedir.

Dizel partikül filtresinin duvarı gözenekli malzeme (porous media) olarak adlandırılmaktadır. Buradaki basınç kaybının bulunabilmesi Henry Darcy'in bulmuş olduğu teoremden yararlanılmaktadır. Darcy yapmış olduğu deneyler sonucunda bu basınç düşümünü matematiksel olarak ifade etmiştir. Deneylerini kum içerisinde su göndererek gerçekleştirmiştir. Yaptığı deney sonucunda; gözenekli malzemedeki geçen suyun debisinin yüzey alanı ve kuma giren suyun giriş ve çıkıştaki yüksekliğiyle doğru orantılı, kumun kalınlığıyla ters orantılı olduğunu görmüştür [63]. Bunu denklem 3.25. ile ifade etmiştir;

$$Q = \frac{W A \Delta h}{w} \quad (3.25)$$

Denklemden belirtilen  $W$  malzeme özelliği olarak belirtilmiştir. Daha sonra bu malzeme özelliğinden akışkan özelliğini çıkarabilmek için  $W$  daha spesifik hale getirilmiştir.

$$W = \frac{k}{\mu} \quad (3.26)$$

Denklem 3.26.'de k malzeme özelliği olan geçirgenlik değerini,  $\mu$  ise akışkan özelliği olan dinamik vizikoteyi ifade etmektedir. Darcy kanunu tekrar düzenlenirse, gözenekli malzeme içerisindeki basınç kaybı bulunmuş olunur.

$$Q = \frac{kA\Delta P}{\mu dx} \quad (3.27)$$

$$\Delta P = \frac{\mu \vartheta x}{k} \quad (3.28)$$

Yüksek hızdaki akışlarda yukarıda verilen Darcy kanunu yetersiz kalıyordu. Alman Bilim adamı Philippe Forchheimer, gazın kömür yataklarındaki akışını incelerken, debi ile basınç arasında lineer olmayan bir ilişki olduğunu farketti ve bu debinin artmasıyla birlikte artmaktaydı. İlk başta bunun türbülanslı akıştan dolayı oluşan bir özellik olarak algıladı. Bunun hızın karesi ve bir sabitle doğru orantılı olarak arttığını varsaydı. Daha sonra Cornel and Katz A değeri yerine  $\beta\rho$  değerini verdiler. Burada  $\beta$  Forchheimer katsayısı,  $\rho$  yoğunluğu ifade etmektedir. Gözenekli malzeme içerisindeki meydana gelen bu ilave basınç değişimi türbülanslı akıştan meydana geldiğini tespit ettiler. Darcy denklemine ilave edilen bu kısım ile birlikte formül Darcy-Forchheimer, denklemi olarak adlandırılmaktadır. Fakat akışkan, partikül filtresinin malzemesi olan gözenekli yapı içerisinde geçerken laminar akış gösterdikleri ve Forchheimer katsayısının etkisinin çok düşük olduğu için ihmal edilmektedirler [64].

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{k} \vartheta + \beta\rho\vartheta^2 \quad (3.29)$$

Denklem, duvar kalınlığı  $w$  olan bir partikül filtresi için düzenlenirse, gözenekli yapıdan kaynaklı basınç kaybı bulunacaktır. Forchheimer katsayısının etkisi düşük olduğu için ihmal edilmiştir.

$$\Delta P_p = \left( \frac{\mu}{k} \vartheta_w w \right) \quad (3.30)$$

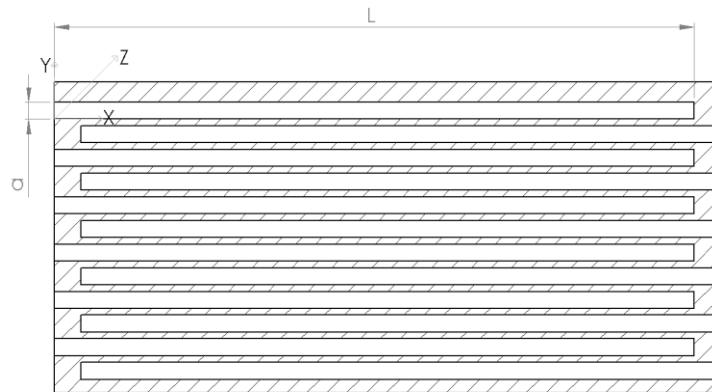
### 3.2.4. Sürtünme basınç kaybı

Egzoz gazları dizel partikül filtresindeki kanallar içerisinde hareket ederken sürtünmeden kaynaklı olarak basınç kaybına uğrarlar. Dizel partikül filtresinin kanallarının kesit alanı genel olarak kare şeklindedir. Partikül filtresindeki kanalın boyu, kanal genişliğinden en az 10 katı kadar büyük olduğundan sürtünme kaynaklı basınç kaybının hesaplanabilmesi için akışın sonsuz sabit iki plaka arasında hareket ettiği varsayımı yapılmaktadır.

Kanal içerisindeki akışın laminar ve sıkıştırılamaz kabulü yapılarak süreklilik ve momentum denklemleri yazılır.

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.31)$$



Şekil 3.4. Partikül filtre kanalı

Momentum denklemi;

Y yönünde;

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3.32)$$

Z yönünde;

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (3.33)$$

X yönünde;

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx} = 0 \quad (3.34)$$

Kanal içerisinde 0 ve a noktalarında, yani sınır noktalarında hız sıfır ve a/2 noktasında ise maksimum değerine ulaşacaktır. Hız değerini yalnız bırakabilmek için x yönündeki momentum denkleminin iki defa integrali alınır;

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{y^2}{2} + c_2 y + c_1 \quad (3.35)$$

Hız denkleminde sınır şartları yerine konular  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları bulunur. Sınır şartları olarak  $y=0$  ve  $y=a$  noktalarında  $u=0$ 'dır;

$$c_1 = 0$$

$$c_2 = -\frac{dp}{dx} \frac{a}{2\mu} \quad (3.36)$$

Hız denkleminin tekrardan düzenlenirse;

$$u = \frac{a^2}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left( \left( \frac{y}{a} \right)^2 - \left( \frac{y}{a} \right) \right) \quad (3.37)$$

Kanal içerisinde geçen egzoz gazının debisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Q = \int_0^a u \, dy \quad (3.38)$$

$$Q = \int_0^a \frac{a^2}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left( \left( \frac{y}{a} \right)^2 - \left( \frac{y}{a} \right) \right) dy \quad (3.39)$$

$$Q = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{a^3}{12} \quad (3.40)$$

Kanal içerisindeki ortalama hız;

$$u_o = \frac{Q}{a} = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{a^2}{12} \quad (3.41)$$

Kanal içerisindeki maksimum hız ise kanal merkezinde oluşmaktadır.

$$Y = a/2; \quad u = u_{\text{mak}}$$

$$u_{\text{mak}} = -\frac{1}{8\mu} \frac{dp}{dx} a^2 \quad (3.42)$$

Kanal içerisindeki maksimum ve ortalama hız arasındaki ilişkisi denklem 3.43.'de verilmiştir.

$$u_{\text{mak}} = \frac{3}{2} u_o \quad (3.43)$$

Kanal içerisindeki sürtünme kaynaklı basınç kaybı maksimum hız dikkate alınarak Denklem 3.44. ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta P_s = \frac{24\mu u_o L}{3a^2} \quad (3.44)$$

### 3.2.5. Partikül madde birikmesinden kaynaklı basınç kaybı

Partikül filtresinde basınç kaybına neden sebeplerden biri de partikül maddenin filtrenin içerisinde birikmesinden kaynaklanmaktadır. Partikül maddenin neden olduğu basınç kaybını bulabilmek için, akışın gözenekli yapıdaki hareketinden yararlanılır. Çünkü partikül maddenin, kanal içerisinde birikmesi sonucu partikül



filtre duvarlarındaki gibi gözenekli yapı oluşmaktadır [65]. Darcy denklemi, DPF içerisinde biriken partikül madde için yazılırsa Denklem 3.45. elde edilir.

$$\Delta P_i = \frac{\mu \vartheta_x}{k_p} h \quad (3.45)$$

Denklemde ifade edilen  $k_p$ ; partikül filtre içerisinde biriken partikül maddenin geçirgenlik değerini,  $h$ ; biriken partikül maddenin kalınlığını ifade etmektedir. Partikül maddeden kaynaklanan basınç kaybı değişken bir değerdir. Partikül maddenin birikmesiyle birlikte basınç kaybı artacaktır.

### 3.3. Partikül Filtresindeki Toplam Basınç Kaybı

Partikül filtresindeki oluşan basınç kayıpları ayrı olarak incelenmiştir. Tüm bu etkiler göz önünde bulundurulduğunda partikül filtresine ait basınç kaybı hesaplanabilmektedir.

$$\Delta P_T = \Delta P_p + \Delta P_i + \Delta P_{S,giriş} + \Delta P_{S,çıkış} + \Delta P_{g,d} \quad (3.46)$$

$$\Delta P_T = \left( \left( \frac{\mu}{k} \vartheta_w w \right) \right) + \left( \frac{\mu}{k_p} \int_0^h v(x) dx \right) + \left( \frac{24\mu u_{0,g} L}{3a^2} \right) + \left( \frac{24\mu u_{0,\zeta} L}{3a^2} \right) + \zeta \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (3.47)$$

Gözenekli malzeme içerisindeki hız hesaplanırken, bir kanal içerisine giren akışkanın debisi ve kanal yüzey alanı ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.48.'de gözenekli malzeme içerisindeki hız hesaplanmıştır. Denklem 3.49.'de  $Q_0$ ; kanal içerisindeki debiyi,  $u_0$ ; kanal içerisindeki hızı,  $a$ ; kanal genişliğini,  $L$ ; partikül filtresinin uzunluğunu,  $A_{kanal}$ ; ise kanalın yüzeyini ifade etmektedir.

$$\vartheta_w = \frac{Q_0}{A_{kanal}} = \frac{u_0 A_0}{4aL} = \frac{u_0 a}{4L} \quad (3.48)$$

Akışkanın, biriken partikül madde içerisindeki hızı, miktara göre değişmektedir. Partikül maddelerin kanal yüzeylerinde eşit dağılmış olduğu varsayımı yapılarak, Denklem 3.49.'dan hız hesaplanabilmektedir. Biriken partikül madde miktarı zamana

göre değişiklik göstereceğinden dolayı, hız integral olarak bulunabilmektedir. Denklem 3.49.'da h biriken partikül maddenin kalınlığını ifade etmektedir.

$$\int_0^h v(x) dx = \int_0^h \frac{Q_0}{A_{kanal}} dx = \int_0^h \frac{Q_0}{4(a-2(h-x))L} dx \quad (3.49)$$

Kanal içerisindeki sürtünme kaybının hesaplanabilmesi için, kanal içerisindeki hızın hesaplanması gerekmektedir. Kanal içerisindeki hız Denklem 3.50. ile hesaplanmaktadır. Birim alandaki kanal sayısından, bir kanala düşen debi hesaplanır. Partikül filtresinde kanalların biri açık biri kapalı olduğu için, bir kanala düşen debinin iki ile çarpılması gerekmektedir. Denklem 3.50.'deki bölümde yer alan  $\frac{1}{2}$  bunun içindedir.

$$u_{0,g} = \frac{Q}{\Sigma A_{0,giriş}} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2 1(a-2h)^2}{4 \cdot 2(a+w)^2}} = \frac{8Q}{\pi D^2 \sigma(a-2h)^2} \quad (3.50)$$

## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Dizel partikül filtresinin geçirgenlik (permeability) ve içsel kayıp katsayısı deneysel yollarla tespit edilebilmektedir. Partikül filtreleri deney düzeneklerinde test edilerek debi değerine karşılık gelen basınç kayıpları ölçülmektedir. Bu değerler matematik modelde elde edilen ifadeye yerine konularak partikül filtresine ait olan geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları hesaplanmaktadır.

### 4.1. Materyal

Testlerde kullanılan ve Liqtech firmasından tedarik edinilen partikül filtreleri Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Partikül filtrelerinin geometrik özellikleri ise Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. 150 CPSI partikül filtresi



Şekil 4.2. 90 CPSI partikül filtresi

Tablo 4.1. Partikül filtrelerinin geometrik özellikleri

	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	CPSI	Kanal genişliği (mm)	Duvar genişliği (mm)	Porozite
A	Ø118	205	90	0,76	1,9	0,43
B	Ø118	152,4	90	0,76	1,9	0,43
C	Ø118	152,4	150	0,5	1,6	0,43

## 4.2. Yöntem

Dizel partikül filtrelerindeki basınç kaybının ölçülebilmesi partikül filtresine gönderilen havanın debisi veya hızı ve buna karşılık gelen basınç kaybının ölçülmesi gerekmektedir. Geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısının doğru olarak hesaplanabilmesi için birkaç farklı noktada ölçüm yapılması ve bunların ortalaması alınmalıdır.

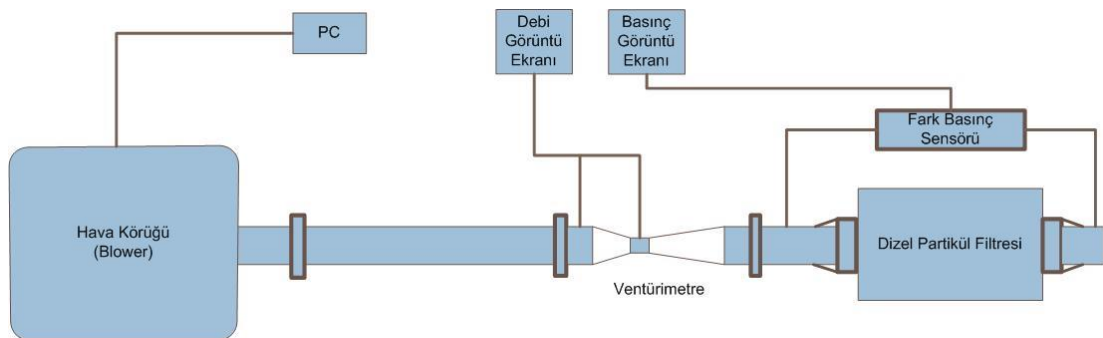
Testlerin gerçekleştirilmesi için Bilen Egzost San. Tic. A.Ş.'de bulunan, susturucuların geri basınçlarının ölçülmesi için kullanılan deney düzeneğinden faydalanılmıştır [66]. Deney düzeneği üzerindeki basınç sensörü, fark basınç sensörü ile değiştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.3.'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Deney düzeneği

#### 4.2.1. Ölçüm düzeneği

Ölçüm düzeneğinde hava körüğü yardımıyla partikül filtresi içerisine ortam sıcaklığında hava gönderilmektedir. Frekans kontrollü olarak çalışan hava körüğünün ürettiği debiyi kademeli olarak artılabilmektedir. Böylelikle debi artışıyla birlikte dizel partikül filtresinde oluşan basınç farkı görülebilmektedir. Partikül filtresine gönderilen debinin miktarı ise venturi metre ile ölçülmektedir. Kesit alanındaki değişimden dolayı iki nokta arasında bir basınç farkı meydana gelmektedir. Oluşan bu basınç kaybından debi hesabı yapılabilmektedir. Dizel partikül filtresindeki basınç kaybı ise fark basınç sensörü yardımıyla ölçülmektedir. Deney düzeneği şeması Şekil 4.4.'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Deney düzeneği şeması

#### 4.2.2. Ekipmanlar

Ölçüm sisteminde kullanılan ekipmanlara ait özellikler aşağıda verilmiştir.

- 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.

#### 4.2.3. Venturimetre debi hesabı

Venturimetre, akışkanların hacimsel veya kütleli debilerini ölçmeye yarayan alettir. Kesit alanı orta kısma doğru daralarak, giriş ve daralan kısımda bir basınç farkı meydana getirmektedir. Bu basınç farkından yararlanılarak akışkanların debileri ölçülebilmektedir. Deney düzeneğinde akışkanın debisinin hesaplanabilmesi için TS EN ISO 5167-4 numaralı standarttan yararlanılmıştır. Bu standarta venturimetreden geçen havanın kütleli debisi Denklem 4.1.'de verilen matematiksel ifade ile hesaplanmıştır.

$$q_m = \frac{H}{\sqrt{1-\gamma^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (4.1)$$

Burada H; boşaltım katsayısını,  $\gamma$ ; venturimetrenin daralan kısım ve girişteki çapın oranını, d; daralan kısımdaki çapı,  $\Delta P$ ; venturimedeki basınç farkını,  $\rho$ ; venturimetreden geçen akışkanın yoğunluğunu,  $\varepsilon$ ; genişletirlik faktörünü ifade etmektedir.

Venturimetredeki debi hesabı yapılırken boşaltım katsayısı, genişletirlik faktörü venturimenin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bunlar tespit edildikten sonra değerler formülde ilgili yerlerine konularak debi hesabı yapılabilir.

Formülde  $\gamma$ , daralan kısımdaki çapın giriş kısmındaki olan çapa oranı olarak belirtilmiştir. Daralan kısımdaki çap 60 mm, giriş kısmındaki çap ise 140 mm'dir.

$$\gamma = \frac{d}{D} = \frac{60}{140} = 0,4285 \quad (4.2)$$

Boşaltım katsayısı ise Reynolds sayısı ve venturimetrenin imal edilme yöntemine göre hesaplanabilmektedir. Venturimetrenin daralan kısmı kaba kaynaklı sacdan imal edilmiştir. İlgili standarda boşaltım katsayısı, kaba kaynaklı sacdan mamül venturimetreler için Tablo 4.2.'de verilmiştir. Tablo 4.1.'e bakılarak en yüksek belirsiz değeri göz önünde bulundurularak boşaltım katsayısı olarak 0,96 değeri seçilmiştir.

Tablo 4.2. Boşaltım katsayısı

$Re_D$	H	Belirsizlik (%)
$4 \times 10^4$	0,96	3
$6 \times 10^4$	0,97	2,5
$1 \times 10^5$	0,98	2,5

Genleşebilirlik faktörünün belirlenmesi için venturimede oluşacak olan minimum ve maksimum basınç farkının göz önünde bulundurulması gerekmektedir.  $P_1$ , venturimenin girişindeki basıncı;  $P_2$  ise daralan kısımdaki basıncı ifade etmektedir. İki nokta arasındaki basınç farkı en az 0,2 mbar, en çok ise 15 mbar olarak alınmıştır.

$$P_1 = 101325 \text{ Pa}$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P$$

$$P_2 = 101325 - 1500 = 99825 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 101325 - 20 = 101305 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 101325 - 20 = 101305 \text{ Pa}$$

$$P_{2,ort} = 100566 \text{ Pa}$$

Genleşebilirlik faktörü TS EN ISO 5167-4 standarttan veya Denklem 4.3.'den bulunabilir [67]. Burada z; izentropik sıkıştırma oranını (hava için 1,4) ifade etmektedir.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{1-H^4}{1-H^4\tau^{2/z}}\right) \left(\frac{1-\tau^{(z-1)/z}}{1-\tau}\right) \left(\frac{z\tau^{2/z}}{z-1}\right)} \quad (4.3)$$

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{100565}{101325} = 0,9924 \quad (4.4)$$

Yukarıdaki işlem sonucunda genleşebilirlik faktörü 0,989 olarak bulunmuştur. Genleşebilir faktörü denklem 4.3.'den değil standarttan bulunursa değeri 0,986 olacaktır. Sonucun daha hassas olması için bunların ortalaması alınmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{tablo} + \varepsilon_{formül}}{2} = 0,987 \quad (4.5)$$

Böylelikle genleşebilirlik faktörü 0,987 olarak hesaplanmıştır. Havanın yoğunluğu ise ideal gaz denklerimden bulunabilmektedir.

$$P = \rho RT \quad (4.6)$$

Denklem 4.6.'da P; atmosfer basıncını,  $\rho$ ; havanın yoğunluğunu, R; evrensel gaz sabitini, T; ise sıcaklığı ifade etmektedir.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (4.7)$$

Formülde belirtilen sabitler ve değerler yerine konulursa son hali aşağıdaki denklemdeki gibi olacaktır.

$$q_m = 3600 \frac{0,96}{\sqrt{1-0,4825^4}} 0,987 \frac{\pi}{4} (0,06)^2 \sqrt{2\Delta p \left(\frac{101325}{287(273+K)}\right)} \quad (4.8)$$

Formülde belirtilen  $\Delta p$  yerine venturimetredeki basınç farkı girilerek debi hesaplanmış olacaktır.



### 4.3. Geçirgenlik ve İçsel Kayıp Katsayılarının Hesaplanması

Partikül filtresine ait özellikler olan geçirgenlik ve içsel kayıp katsayılarını hesaplayabilmek için deney düzeneği üzerinde basınç kayıpları ölçülmüştür. Basınç kayıplarının ölçülebilmesi için partikül filtreleri uygun adaptör yardımı ile deney düzeneğine bağlanmıştır.

Partikül filtresinde basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilirken, fark basınç sensörü bağlantı problemleri boru üzerinde partikül filtresinin kanal genişliğinin 100 katı uzaklıkta bağlanmıştır. Bunun sebebi akıştaki düzensizliklerin ölçüm sonuçlarını etkilmesini önlemektir. Şekil 4.5.'de fark basınç sensörünün deney düzeneği üzerinde konumlandırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Fark basınç sensörünün bağlantısı

Dizel partikül filtresindeki basınç kaybı ölçümleri için debi arttırılarak farklı noktalarda ölçüm gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6.'deki ekranlardan venturimetredeki basınç farkı ve fark basınç sensöründen ölçülen değerler okunmaktadır. Ekrandan okunan değerler Excel'de oluşturulan formula debi değeri ve bu debi değerine karşılık gelen basınç kayıpları hesaplanması için kullanılmaktadır.

Partikül filtrelerinin testleri sonucunda basınç kaybı-debi grafiği elde edilmiştir. Farklı noktalarda alınan debi ve basınç düşüm değerlerinin ortalamasıyla geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları hesaplanmıştır.

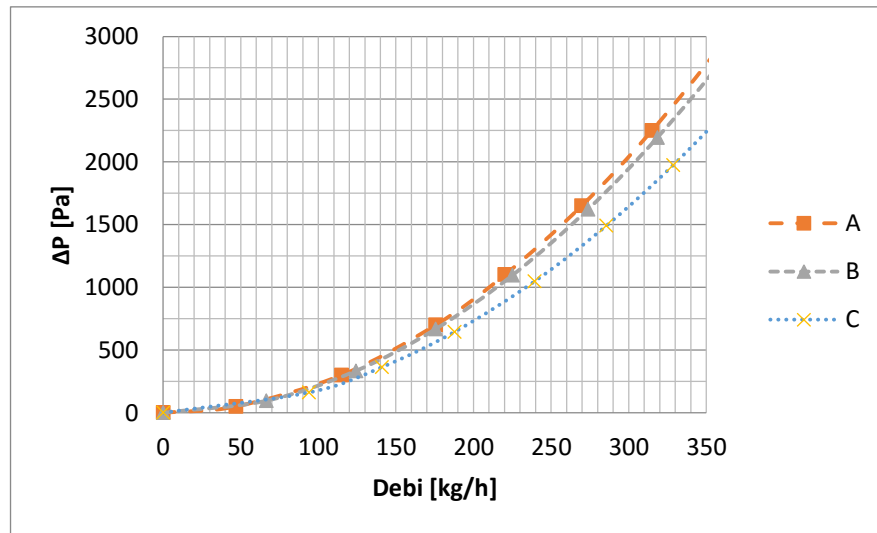


Şekil 4.6. Basınç farkı ve venturimetre değerlerini okuma ekranları

Test düzeneğinde ilgili debi değerinde oluşan partikül filtrelerinin basınç kayıp değerleri bulunmuştur. Şekil 4.7.'de basınç kayıplarına ait grafik verilmiştir.

Testler deney düzeneğinde gerçekleştirildiği ve içerisine hava gönderildiği için partikül madde birikmemiştir. Bu nedenden dolayı, basınç kaybı formülünde partikül madde birikmesinden kaynaklı basınç kaybı ihmal edilmiştir.

Dizel partikül filtresine ait basınç kaybı formülü debi-basınç kaybına göre tekrar düzenlenirse denklem 4.9.'da verilen eşitlik elde edilmiştir.

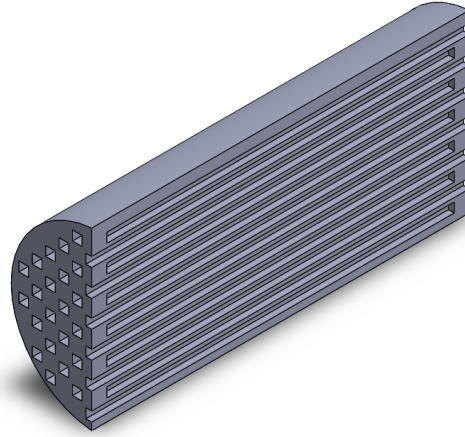


Şekil 4.7. Partikül filtrelerinin deneysel basınç kayıplarına ait grafik



## BÖLÜM 5. DİZEL PARTİKÜL FİLTRESİNİN NÜMERİK ANALİZLERİ

Partikül filtrelerinin akış analizleri sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS CFX modülü ile gerçekleştirilmiştir. Partikül filtrelerinin 3 boyutlu modelleri oluşturularak ilgili hız değerindeki basınç kayıpları hesaplanmıştır. Şekil 5.1.'de partikül filtresinin katı modeli verilmiştir.

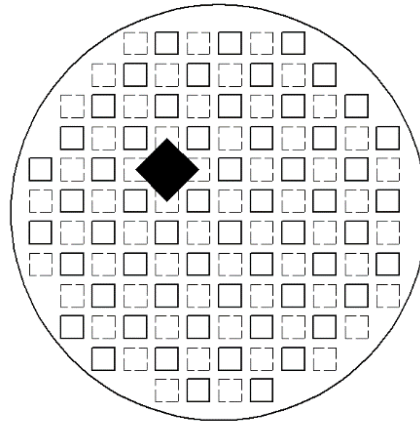


Şekil 5.1. 3B dizel partikül filtresi

Her bir partikül filtresine ait basınç kayıpları deneysel olarak belirlenmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen veriler ve oluşturulan matematik model yardımı ile her bir filtre için geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları hesaplanmıştır. Geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları partikül filtrelerinin akış analizleri için gerekmektedir. Akış analizinde gözenekli yapı tanımlanırken, partikül filtresine ait bu özelliklerin girdi olarak verilmesi gerekmektedir. Bu bölümde, deneysel olarak basınç kayıpları ölçülen partikül filtrelerinin akış analizleri gerçekleştirilmiştir.

### 5.1. Akış Analizi İçin Modelleme

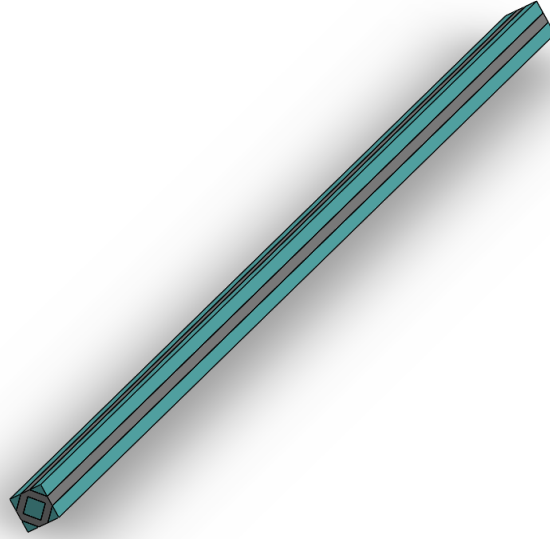
Partikül filtresinin akış analizinin gerçekleştirilebilmesi için modellenmesi gerekmektedir. Dizel partikül filtresinin tamamının modellenmesi ve analizinin gerçekleştirilmesi uzun bir zaman ve teknik özellikleri bakımından iyi bir bilgisayar gerektirmektedir. Partikül filtresinin simetrik yapısı gereği süreyi azaltmak için akış analizi için bir alan seçilmiş ve bunun üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Bu alan seçilirken partikül filtresinde basınç kaybına sebep olan tüm etkilerin bulundurulmasına dikkat edilmiştir. Şekil de bu alanın 3B görseli Şekil 5.2.'de verilmiştir. Egzoz gazları partikül filtresi içerisinde atmosfere atılırken, kendisine komşu kanalları kullanmaktadır. CFD analizleri gerçekleştirilirken, çıkış kanalı için kendisine komşu tüm kanallar seçilmiştir.



Şekil 5.2. Partikül filtresi CFD domain

Deney düzeneği üzerinde basınç kaybı ölçümleri gerçekleştirilen partikül filtreler tedarikçiden alınan ve kullanılmamış temiz filtrelerdir.

Deney düzeneği üzerinde filtrelerin ölçümü için akışkan olarak ortam sıcaklığında (25 °C) hava kullanılmıştır. Ansys CFX'de basınç kaybı analizleri gerçekleştirilirken de akışkan olarak hava atanmıştır.

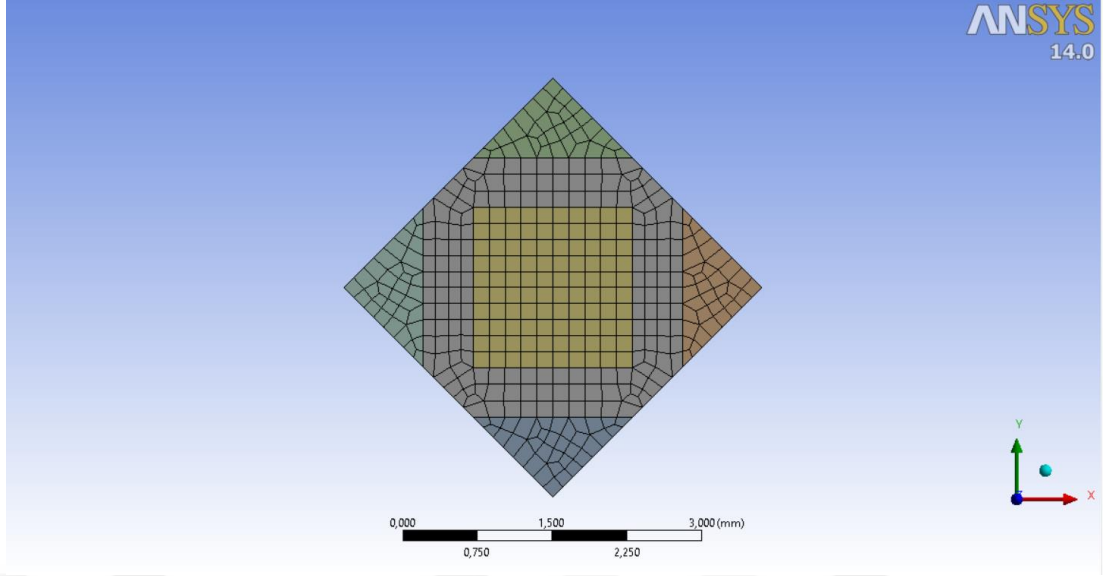


Şekil 5.3. Partikül filtresi 3B CFD domain

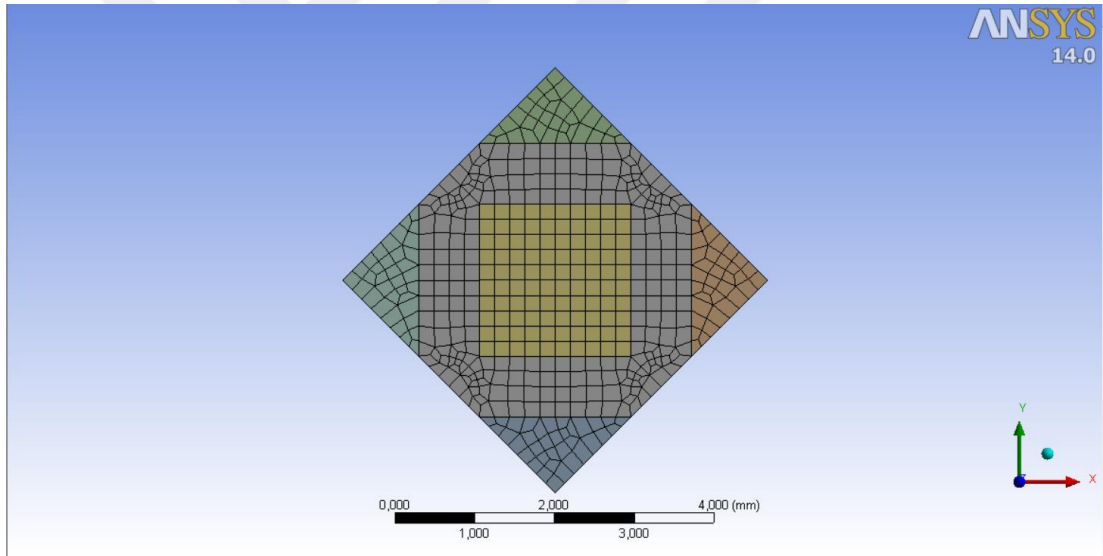
## 5.2. Ağ Örgüsü (Mesh) Yapısı

Partikül filtrelerin 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 filtrelerinin birim alandaki hücre sayıları 90 ve 150'ydı. 90 cpsi kanal genişliği 1.9 mm, 150 cpsi kanal genişliği ise 1.6'mmdir. Parçanın ağ örgüsü yapısı oluşturulurken A ve B partikül filtreleri için en küçük eleman olarak 0.19 mm, C partikül filtresi için en küçük eleman olarak 0.16 mm tanımlanmıştır. Şekil 5.4.'de 150 cpsi mesh yapısı, Şekil 5.5.'de ise 90 cpsi mesh yapısı gösterilmiştir.

Mesh yapıları incelendiğinde, parçaların düzgün aralıklarla parçalara ayrıldığı görülmüştür.



Şekil 5.4. 150 CPSI mesh yapısı



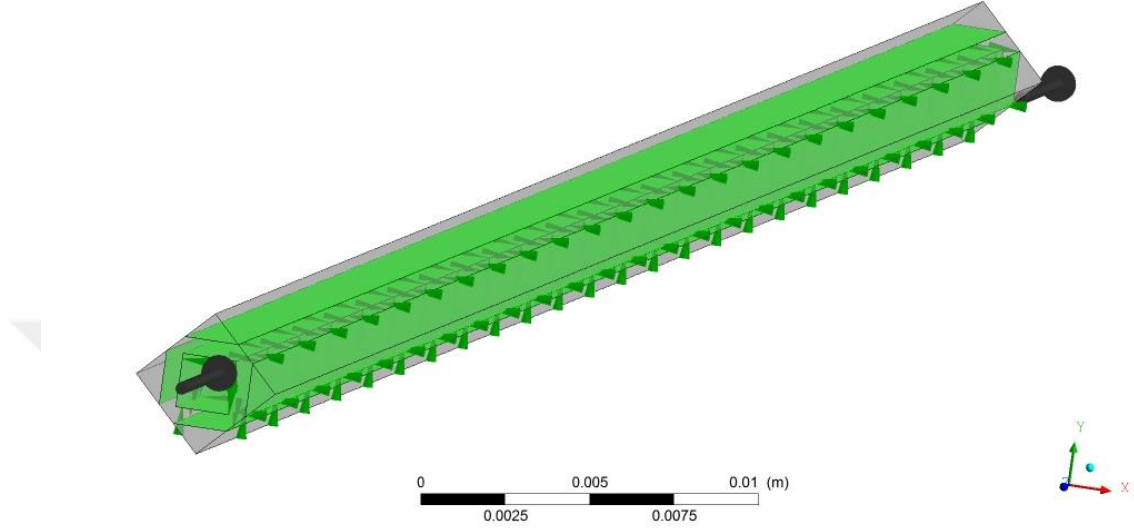
Şekil 5.5. 90CPSI mesh yapısı

### 5.3. CFD Modeli

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 ile giriş ve çıkış kanallarının birleştiği yüzeyler, temas yüzeyleri olarak tanımlanmıştır. Temas yüzeyleri Şekil 5.6.'da gösterilmiştir.

ANSYS



Şekil 5.6. Gözenekli malzeme ve akışkan temas bölgeleri

Akış analizleri gerçekleştirilirken her bir partikül filtresi için deneysel ölçümler sonucunda elde edilen 6 noktadaki hız değerleri için gerçekleştirilmiştir.

## 5.4. Akış Analizleri

### 5.4.1. A partikül filtresi

A partikül filtresine ait yapısal ve geometrik özellikler Tablo 4.2.'de verildi. Hacim porozitesi üretici tarafından bildirilen değer olan 0,43'dür.

A partikül filtresinin deneysel ölçüm sonucuna dayanarak elde edilen debi değeri için kanal içerisinden geçen akışkanın hız hesaplaması yapılmıştır. Hız hesaplaması yapılırken deney düzeneği üzerinde venturimetre ile ölçülen değerler alınmıştır. Bir kanala düşen debi hesabı yapılırken birim alandaki hücre sayısından (cps) yararlanılmıştır.



A partikül filtresine akış analizleri Tablo 5.1.'de verilen hız değerleri için gerçekleştirilmiştir.

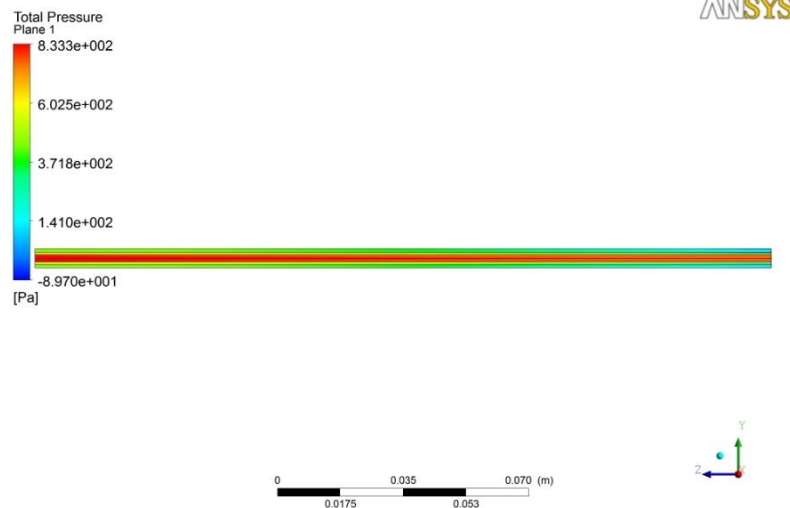
Tablo 5.1. A partikül filtresi hız değerleri

Debi [m <sup>3</sup> /h]	Hız [m/s]
99,06	9,86
151,31	15,07
189,68	18,89
232,31	23,13
271,28	27,01
310,63	30,93

Akış analizleri sonucunda partikül filtresine ait basınç kaybı hesabı yapılırken giriş ve çıkış arasındaki basınç farkı alınmıştır. CFX modülünde basınç farkı denklem 5.1. ile hesaplanmaktadır.

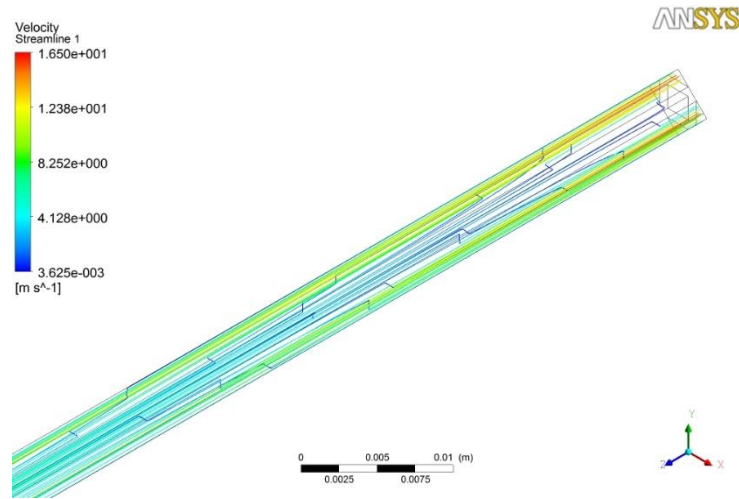
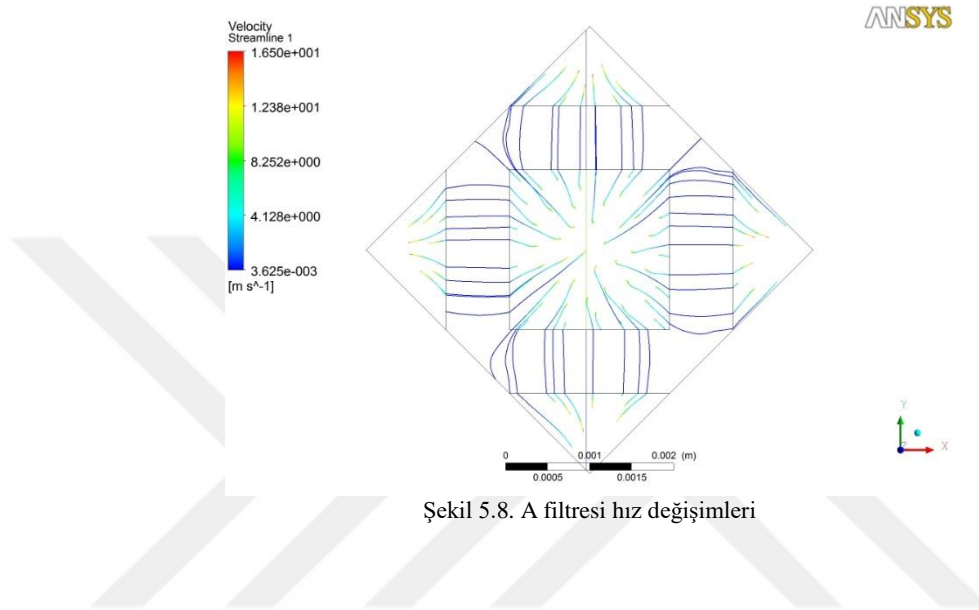
$$\text{massFlowAve(Total Pressure)@In} - \text{massFlowAve(Total Pressure)@Out} \quad (5.1)$$

Hava gözenekli malzeme içerisinde hareket ederek, komşu kanallara geçmekte ve buradan tahliye olmaktadır. Gözenekli malzeme içerisinde akışkanın hızının düştüğü görülmüştür. Partikül filtreleri akışkanı süzerek içerisindeki partikül maddelerin birikmesini sağlamaktadır. Partikül filtresinin basınç değişimi Şekil 5.7.'de verilmiştir. En yüksek basınç giriş kanalında görülmektedir.

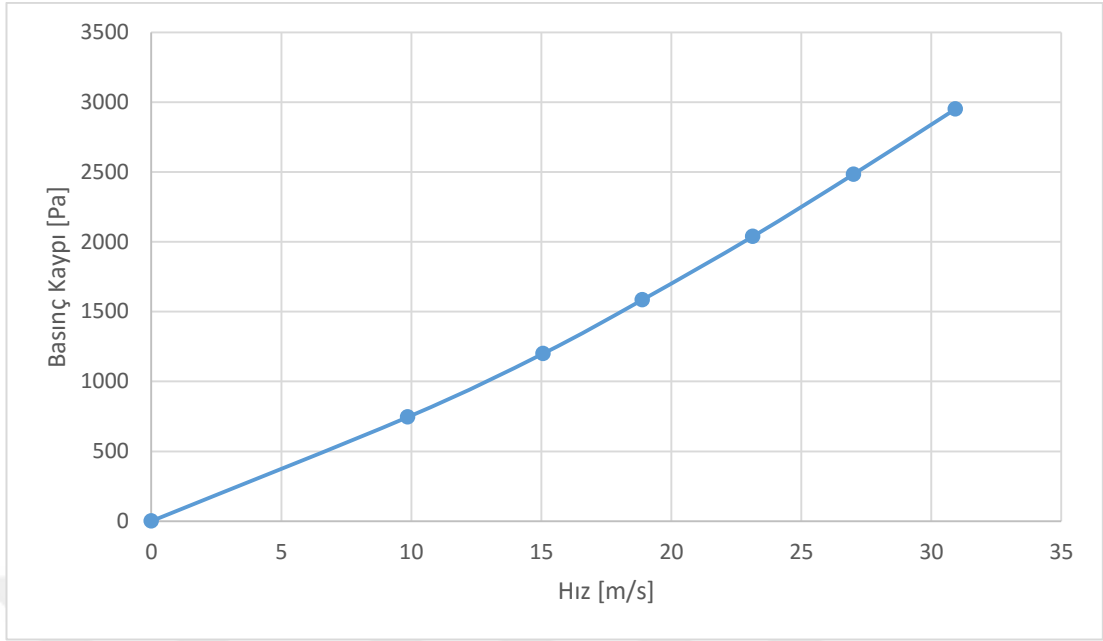


Şekil 5.7. A filtresi basınç değişimleri

A filtresine ait gerçekleştirilen akış analizi sonucunda hız çizgileri Şekil 5.8. ve 5.9.'da verilmiştir. Görüldüğü üzere partikül filtresi içerisinde akış giriş kanalı içerisinde hareket etmekte ve kanal sonunda bulunan duvara çarpmaktadır. Hız kanal sonunda 0 m/s'dir.



Akış analizi sonucunda A partikül filtresine ait basınç kayıpları Şekil 5.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. A filtresi CFD basınç kaybı sonuçları

#### 5.4.2. B partikül filtresi

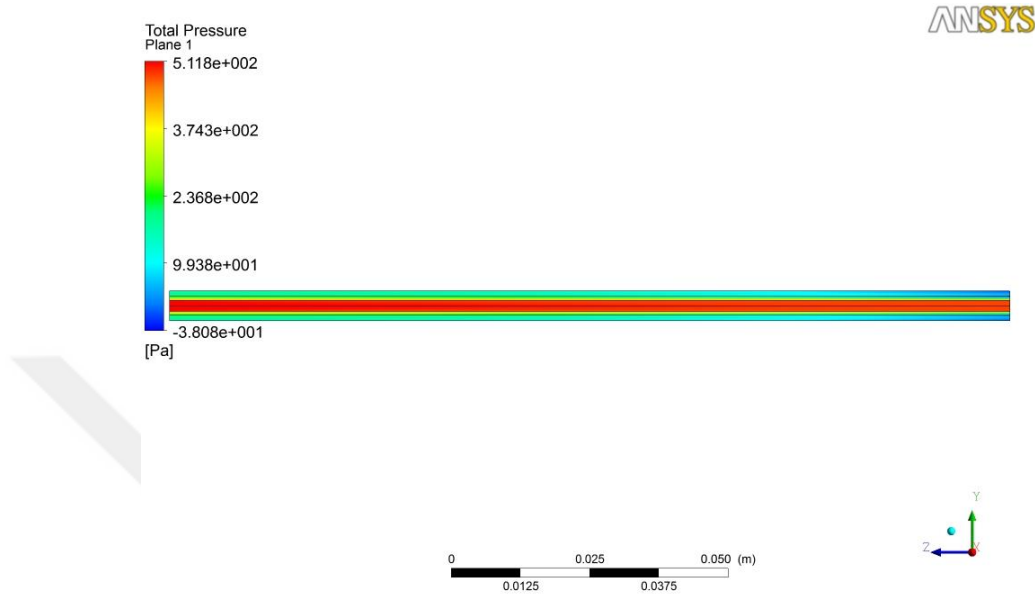
Deney düzeneği üzerinde elde edilen basınç kaybına göre farklı noktalardaki hızları hesaplanmıştır. Bu hızlardaki basınç kaybı için akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinden elde edilen hız değerleri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. B partikül filtresi hız değerleri

Debi [m <sup>3</sup> /h]	Hız [m/s]
55,36	5,51
103,57	10,31
146,47	14,58
187,73	18,69
228,26	22,73
265,5	26,44

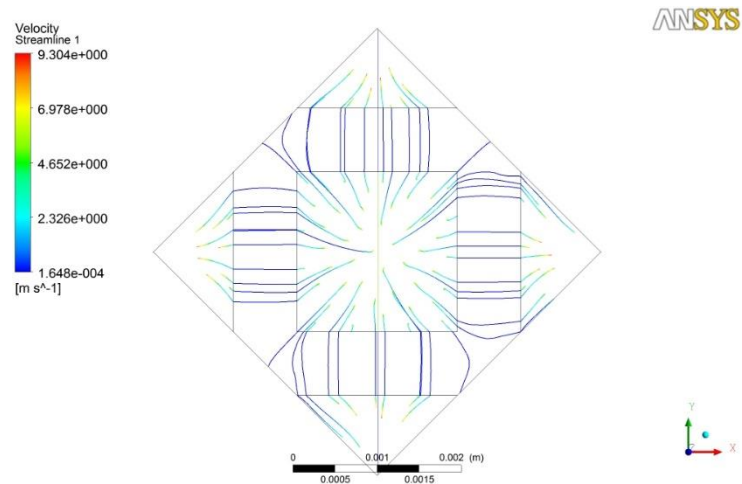
B partikül filtresi içinde, kanaldaki debi hesabı ve bu debi değerinden hız hesaplanmıştır. B partikül filtresinin birim alandaki kanal sayısı bilinmektedir. Deney düzeneği üzerinde ölçülen kütleli debi, hacimsel debiye çevrilmiştir. Daha sonra ilgili debi değerindeki kanal içerisine giren havanın hızları hesaplanmıştır.

Akış analizleri sonucunda B partikül filtresindeki basınç değişimlerinin A ile benzer sonuç verdiği görülmüştür. B partikül filtresine ait basınç değişimleri Şekil 5.11.'de verilmiştir. Hava, giriş kanalında en yüksek basınca sahiptir.

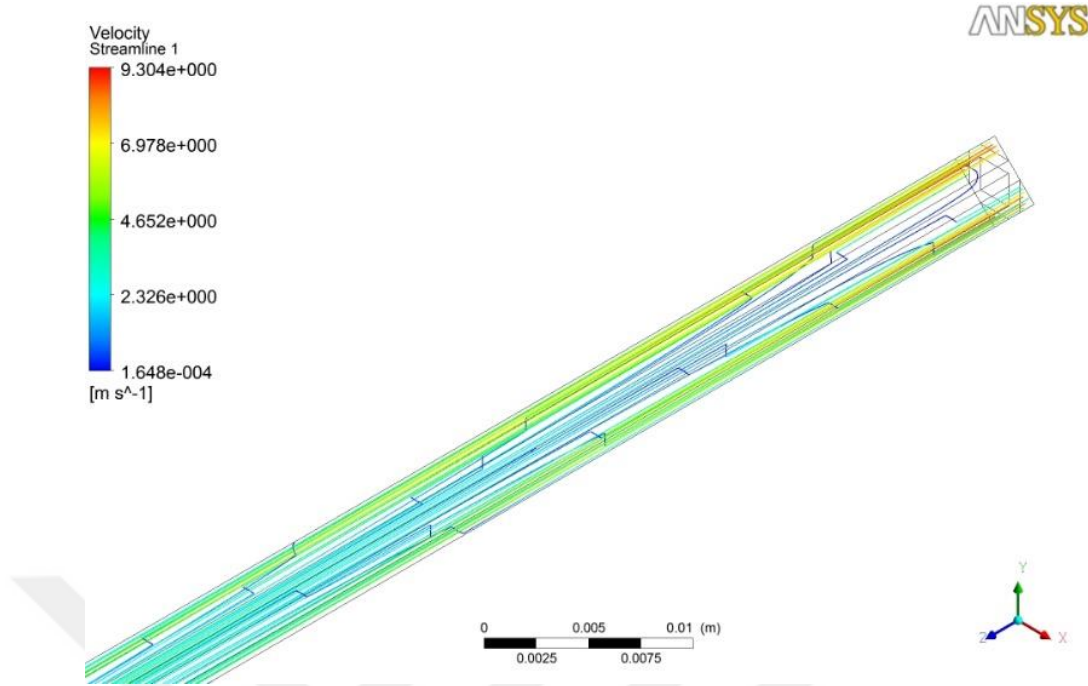


Şekil 5.11. B filtresi basınç değişimleri

B partikül filtresindeki hız değişimleri Şekil 5.12. ve Şekil 5.13.'de verilmiştir. Havanın gözenekli malzeme içerisindeki hızı düşmektedir. Bu da basınç kaybını etkileyen önemli parametrenin, akışın bu bölgedeki hareketinden meydana geldiğini göstermektedir.

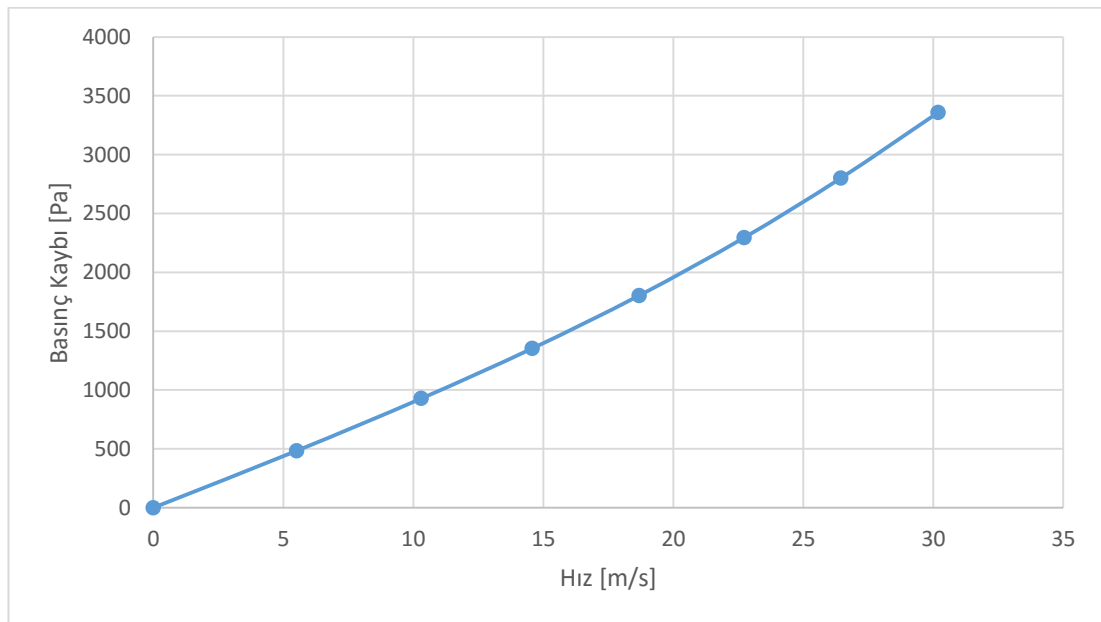


Şekil 5.12. B filtresi hız değişimleri



Şekil 5.13. B filtresi hız çizgileri

B partikül filtresine ait basınç kayıpları Şekil 5.14.'de verilmiştir. A ve B partikül filtresi arasındaki fark uzunluktur. Nümerik sonuçlar incelendiğinde birim alandaki kanal sayısı 90 için uzunluğun değişmesi basınç kaybına çok az etki etmiştir.



Şekil 5.14. B filtresi CFD basınç kaybı sonuçları

### 5.4.3. C partikül filtresi

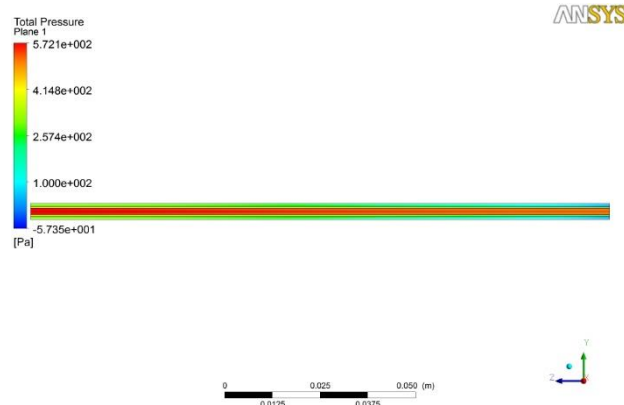
Akış analizleri, deney düzeneği üzerinde elde edilen hızlar için hesaplanmıştır. Deney düzeneğinden elde edilen hız değerleri Tablo 5.3.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.3. C partikül filtresi hız değerleri

Debi [m <sup>3</sup> /h]	Hız [m/s]
78,29	6,85
117,44	10,28
156,58	13,70
199,6	17,47
238,11	20,84
274,02	23,98

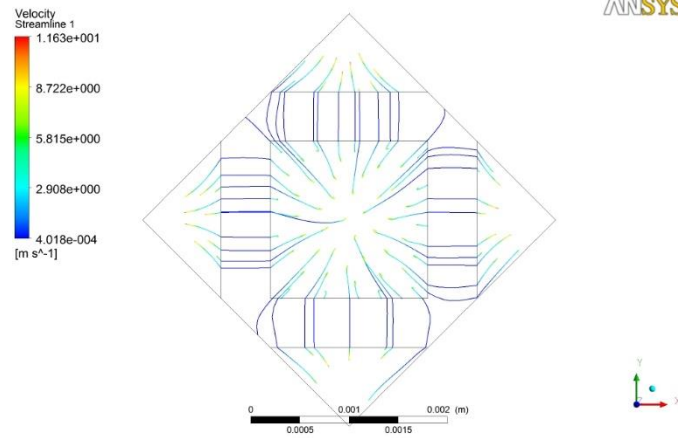
A ve B partikül filtrelerinde hız hesaplanması için kullanılan yöntem, C partikül filtresi içinde uygulanmıştır.

C partikül filtresindeki basınç değişimleri Şekil 5.15.'de verilmiştir. C partikül filtresinin giriş kanalında, A ve B filtrelerine göre daha düşük basınç oluşmaktadır. Bunun nedeni, C partikül filtresinin birim alandaki kanal sayısının A ve B'den fazla olmasıdır. Birim alandaki kanal sayısının fazla olması, duvar kalınlığını düşürmektedir. Bu da basınç kaybına en fazla neden olan gözenekli malzeme içerisindeki basınç kaybının az olmasından kaynaklanmaktadır.

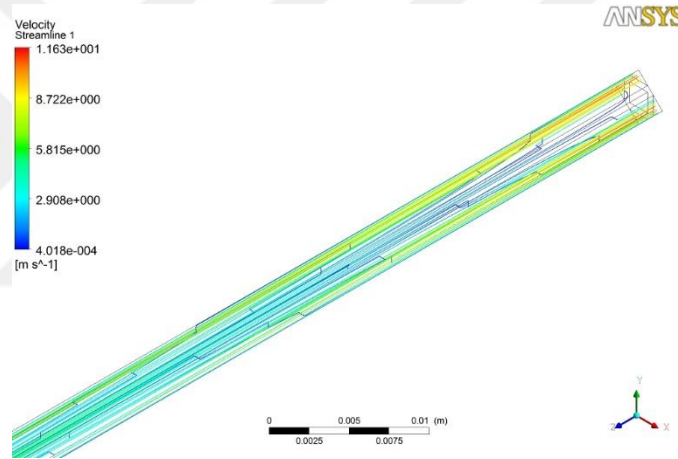


Şekil 5.15. C filtresi basınç değişimleri

C partikül filtresindeki hız değişimleri Şekil 5.16. ve Şekil 5.17.'de gösterilmiştir. Havanın partikül filtresi içerisindeki hareketi A ve B ile benzerdir.



Şekil 5.16. C filtresi hız değişimleri

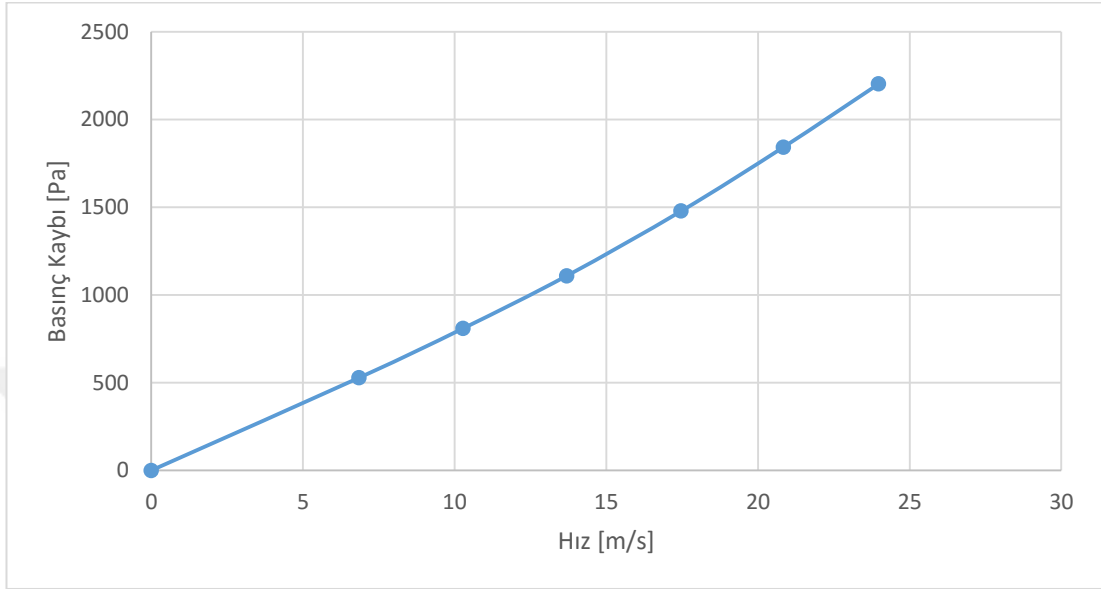


Şekil 5.17. C filtresi hız çizgileri

C partikül filtresine ait nümerik çözümün sonuçları Şekil 5.18.'de verilmiştir. A ve C partikül filtresi arasındaki fark hem uzunluk hemde birim alandaki kanal sayısıdır. Uzunluğun değişmesinin, basınç kaybına olan etkisinin çok düşük olduğu A ve B filtrelerinin basınç kaybı analizlerinde görülmüştür.

Analizler sonucunda basınç kaybına neden olan başlıca etkinin gözenekli malzeme olduğu görülmüştür. Birim alandaki kanal sayısının azalmasıyla birlikte duvar kalınlığı artmaktadır. Akışkanın gözenekli malzeme içerisindeki basınç kaybı, kalınlığı ile doğru orantılıdır.

B ve C filtreleri arasındaki fark hem uzunluk hemde birim alandaki kanal sayısıdır. Uzunluğun değişmesinin basınç kaybınan olan etkisi düşüktür, fakat birim alandaki kanal sayısının değişimi basınç kaybını direk olarak etkilemektedir.



Şekil 5.18. C filtresi CFD basınç kaybı sonuçları



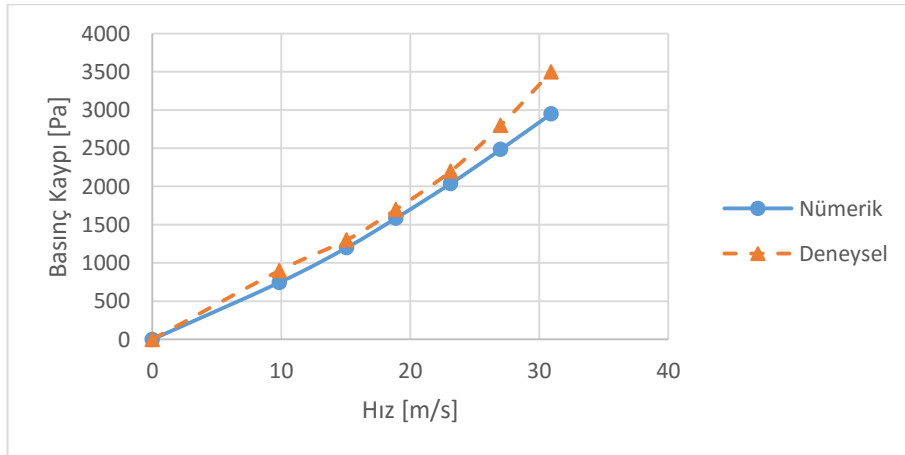
## BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dizel partikül filtresine ait basınç kayıpları deneysel ve nümerik olarak hesaplanmıştır. Bu bölümde deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

### 6.1. Sonuçlar

Partikül filtresine ait nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında zaman düşük hızlarda yakın sonuçlar verirken, yüksek hızlarda farklılıklar meydana gelmiştir. Bunun sebebi, nümerik çözümlerde akışın laminar olarak modellenmesidir. Yüksek hızlara çıkıldıkça türbülanslı akış oluşmakta ve bu da nümerik çözümün bozulmasına sebep olmaktadır.

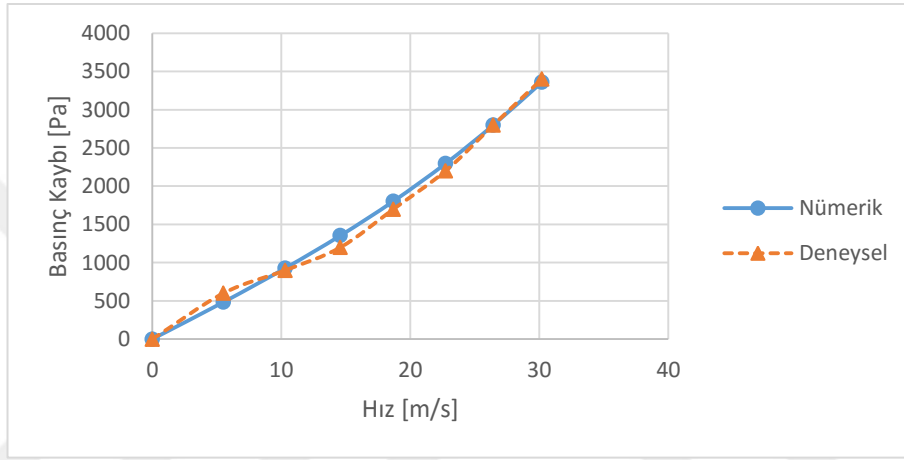
Gözenekli malzemeden kaynaklı basınç kaybının matematik modeli laminar akış için gerçekleştirilmişti. Yüksek hızlardaki, yani türbülanslı akıştaki Forchheimer katsayısı hesaplamalara dahil edilmemişti. Nümerik çözümlerde de akış laminar olarak modellenmiştir.



Şekil 6.1. A partikül filtresine ait nümerik ve deneysel basınç kayıpları

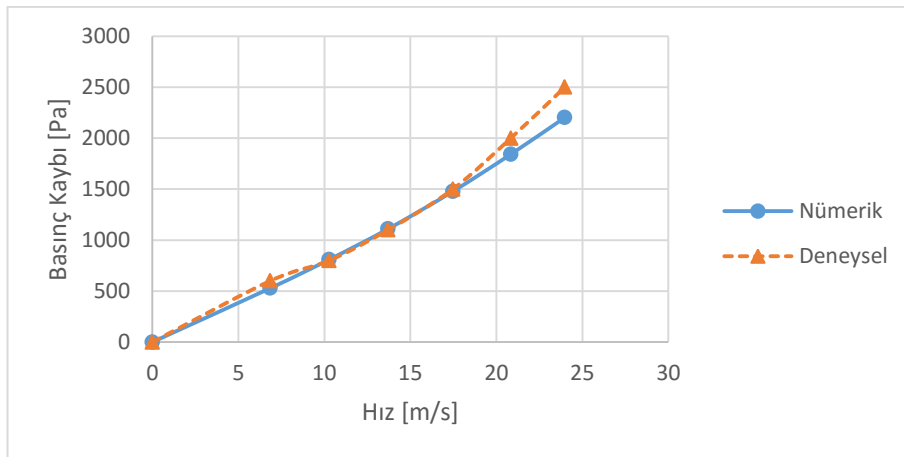
A partikül filtresine ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.1.'de verilmiştir. Yüksek hızlarda CFD ve deneysel sonuçlar arasında farklılıklar olduğu görülmüştür. Bunun sebebi havanın laminar akıştan türbülanslı akışa geçmesidir.

B Partikül filtresine ait basınç kayıpları Şekil 6.2.'de verilmiştir. Deneysel ve CFD sonuçları arasında uyum olduğu görülmüştür. Deneysel ve nümerik sonuçların uyum göstermiştir. Değerler arasındaki ufak farklar deney düzeneği üzerindeki belirsizliklerden kaynaklanabilir.



Şekil 6.2. B partikül filtresine ait nümerik ve deneysel basınç kayıpları

C partikül filtresinde ait nümerik ve deneysel sonuçlar Şekil 6.3.'de gösterilmiştir. Yüksek hızlarda deneysel ve CFD sonuçları arasında farklılıklar olduğu görülmüştür. Aynı durum A partikül filtresinde de görülmüştü.



Şekil 6.3. C partikül filtresine ait nümerik ve deneysel basınç kayıpları

## 6.2. Genel Değerlendirme ve Öneriler

Bu çalışmada dizel partikül filtresine ait nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Dizel partikül filtresine ait basınç kaybının matematik modeli oluşturulmuştur. Matematik modelde basınç kaybının hesaplanabilmesi için, partikül filtresine ait geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları, partikül filtresi içerisinde geçen akışkanın hızına göre değişebilmekte ve deneysel çalışmaların sonucunda bulunabilmektedir.

Nümerik çalışmalar için gerekli olan bu değerlerin bulunması için bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneği üzerinde, içerisinde geçen akışkanın (hava) debisine göre basınç kaybı ölçülebilmektedir. Bu basınç kaybı değerlerine göre partikül filtresinin yapısal özellikleri olan geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları hesaplanmıştır.

Nümerik çalışmalar, üç boyutta gerçekleştirilmiştir. Partikül filtresi, komşu kanallardan oluşmakta ve bu kanallar simetri özelliği bulunmaktadır. Nümerik çözümü daha kolaylaştırmak için partikül filtresinin tamamı yerine, bir adet giriş kanalı, bir adet çıkış kanalı ve gözenekli yapı dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Modellemede akışkan ve gözenekli malzeme temas noktaları belirtilmiştir. Akışkana ait sınır değerleri verilirken, giriş kanalı içerisindeki hız dikkate alınmıştır. Bunun sebebi partikül filtresinin tamamının değil, sadece kanalın modellenmesidir. Nümerik çözümler, deney düzeneği üzerinde ölçülen 6 farklı noktada hız değerleri için gerçekleştirilmiştir. Nümerik sonuçların deneysel sonuçlar ile, düşük hızlarda örtüştüğü görülmüştür. Yüksek hızlardaki farklılıkların sebebi ise türbülanslı akışa geçilmesidir. Nümerik çözüm için CFD analizleri laminar akışta gerçekleştirilmiştir. Bu da CFD modelin doğru kurulduğunu göstermektedir.

Çalışma sonucunda, dizel partikül filtresinde basınç kaybına neden olan temel etkenin partikül filtrenin yapısı olan gözenekli malzemenin neden olduğu görülmüştür. Birim alandaki kanal sayısının artması, duvar kalınlığının azalmasıdır. Duvar kalınlığının azalması gözenekli malzemedeki kaynaklı basınç kaybını azaltmaktadır. C partikül filtresi birim alandaki kanal sayısı diğerlerinden fazla

olduğu için en düşük basınç kaybı bu filtrede görölmüştür. Duvar kalınlığının azalması basınç kaybının azaltmaktadır, fakat partikül filtresinin filtreleme özelliğinin düşmesine neden olmaktadır.

Dizel partikül filtresinin basınç kaybına ait yapılan bu çalışmada, filtreler temiz ve içerisinde partikül madde birikmemiştir. Matematik model oluşturulurken, partikül maddeye ait basınç kaybı da hesaplanmıştır. Fakat deneysel çalışmalarda ve nümerik çözümde bu ihmal edilmiştir. Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda, kanal içerisinde biriken partikül madde miktarına göre basınç kaybı hesaplanmıştır. Bunun için partikül filtresinin bir motora bağlanması ve belirli süre çalıştırılması gerekmektedir. Motor, partikül madde emisyonlarına ve çalışma süresine göre biriken partikül madde miktarı hesaplanmalıdır. Deney düzeneği üzerinde tekrar ölçümler gerçekleştirilerek partikül maddeye ait geçirgenlik değeri de bulunacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Ayhan, V. Bir dizel motoruna buhar enjeksiyonunun NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarına etkisinin araştırılması. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Doktora Tezi, 2009.
- [2] Soruşbay, C. Egzoz gazları emisyonu ders notları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği, 2015.
- [3] Keskin A., Sağıroğlu S. Dizel motorlarından kaynaklanan egzoz emisyonları ve kontrol yöntemleri. Mühendis ve Makina, Cilt 51 (606), 2010.
- [4] Keskin A., Sağıroğlu S. Dizel motorlarından partikül madde emisyon kontrolü ve gelişmeler. 5. Uluslararası Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, 2009.
- [5] Johnson, T.V. Diesel emission control in review, SAE 2006-01-0030, 2006.
- [6] <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [7] <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [8] <http://www.sahakk.sakarya.edu.tr/documents/yonetmelik2011.pdf>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [9] <https://www.dieselnet.com/standards/tr/nonroad.php>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [10] İçingür, Y. Dizel motorları ve yakıt enjeksiyon sistemleri ders notları. Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Otomotiv Anabilim Dalı, 2003.
- [11] [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf), Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [12] Yıldız, E. Dizel motorlarda azot oksit oluşumun teorik ve deneysel incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2012.

- [13] Koltsakis, G. C., Stamatelos, A. M. Catalytic automotive exhaust aftertreatment. *Progress in Energy and Combustion Science*, 23.1: 1-39, 1997.
- [14] Dinler, N., Yücel, N. Karbüratörlü bir motora üç yollu katalitik konvertör uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19.1, 2004.
- [15] Russell, A., Epling, W. S. Diesel oxidation catalysts. *Catalysis Reviews*, 53.4: 337-423, 2011.
- [16] Stein, H. J. Diesel oxidation catalysts for commercial vehicle engines: strategies on their application for controlling particulate emissions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 10.1: 69-82, 1996.
- [17] Majewski, W. A. Diesel Particulate Filters. DieselNet.< <https://www.dieselnet.com/tech/dpf.php>, 2001.
- [18] Reddy, Y. R. Design optimization of diesel particulate filter using CFD. *International Journal of engineering Research and Applications*, 1.5: 119-128, 2015.
- [19] Haralampous, O. A., Mastellos, D. A multi channel mathematical model for partially failed diesel particulate filters. 8th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Yunanistan, 2015.
- [20] Huang, D. Modeling of diesel particulate filter filtration and regeneration for transient driving schedules. Michigan Teknoloji Üniversitesi, Doktora Tezi, 2011.
- [21] Masoudi, M. Pressure drop of segmented diesel particulate filters. SAE Technical Paper, 01-0971, 2005.
- [22] Konstandopolous, A. G., Kostoglou, M., Skaperdas, E., Papaioannou, E. Fundamental studies of diesel particulate filters: transient loading, regeneration and aging. SAE paper, 2000-01:1016, 2000.
- [23] Lavicka, D. J., Kovarik, P. Numerical simulation with particle deposition on channel walls in the DPF filter. *Experimental Fluid Mechanics*, 344-353, 2010.
- [24] Stratakis, G. A., Psarianos, D. L., Stamatelos, A. M. Experimental investigation of the pressure drop in porous ceramic diesel particulate filters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 216.9: 773-784, 2002.
- [25] Mcdonald, J. F., Purcell, D. L., Mcclue, B. T., Kittelson, D. B. Emissions characteristics of soy methyl ester fuels in an IDI compression ignition engine (No. 950400). SAE Technical Paper, 1995.

- [26] Parlak, A., Ayhan, V. Effects of using piston with thermal barrier layer in spark ignition engine on performance at WOT and cold start HC emission at idle, *Journal of Energy Institute*, Vol. 80, No.4, 2007.
- [27] Erdumanlı, P., Sekmen, Y., Çınar, C., Buji İle Ateşlemeli Değişken Sıkıştırma Oranlı Motorların Egzoz Emisyonları Açısından İncelenmesi, *Selçuk-Teknik Online Dergisi / Issn 1302- 6178*, Volume 2, Number: 1, Konya, 2001.
- [28] Karimi, E. R., Jane, A. H., A combustion system investigation to achieve low emissions on a heavy duty diesel engine, *Imech, MEP*, pp: 143-149, London.
- [29] Meriçboyu, A., Beker, Ü. G., Küçükbayrak, S., Kömür ve Çevre İlişkileri, *Enerji, Çevre ve Hukuku Ders Notları*.
- [30] EPA, Sourcebook, NO<sub>x</sub> Control Technology Data, 1991.
- [31] Ullmann, T. L. Investigation of the effects of fuel composition on heavy-duty diesel engine emissions. *SAE transactions*, 98.4: 833-851, 1989.
- [32] Ushakov, S. Particulate matter emission characteristics from diesel engines operating on conventional and alternative marine fuels. *Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Doctoral theses*, 2012.
- [33] Lee, R., Pedley, J., Hobbs, C. Fuel quality impact on heavy duty diesel emissions:-a literature review. *SAE Technical Paper*, 982649, 1998.
- [34] Villinger, J., Federer, W., Praun, S. Continuous pre and post catalyst hydrocarbon and nitrogen compounds monitoring of various DeNO<sub>x</sub> reactions by twin chemical ionization mass spectrometry. *SAE Technical Paper*, 2002-01-1679, 2002.
- [35] Hill, S. H., Systma, S. J. A Systems approach to oil consumption. *SAE Technical Paper*, 910743, 1991.
- [36] Gandhi, H. S., Graham, G. Automotive exhaust catalysis. *Journal of Catalysis*, 216.1: 433-442, 2003.
- [37] <http://www.aalcar.com/library/converter.htm>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [38] Mariqo, M. Matti. The effects of the catalytic converter and fuel sulfur level on motor vehicle particulate matter emissions: Light duty diesel vehicles. *Environmental Science & Technology*, 36.2: 283-289, 2002.

- [39] Harris, S. J., Mariqo, M. M. Signature size distributions for diesel and gasoline engine exhaust particulate matter. *Journal of Aerosol Science*, 32.6: 749-764, 2001.
- [40] Konstandopoulos, A. G., Johnson, J. H. Wall-flow diesel particulate filters and their pressure drop and collection efficiency. SAE Technical Paper, 890405, 1989.
- [41] <http://www.partikelfilter-fakten.de/en/startpage/nebenstromfilter.html>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [42] [https://www.dieselnet.com/tech/dpf\\_wall-flow.php](https://www.dieselnet.com/tech/dpf_wall-flow.php), Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [43] Walker, A. P. Controlling particulate emissions from diesel vehicles. *Topics in catalysis*, 28.1-4: 165-170, 2004.
- [44] <http://www.jmdpf.com/diesel-exhaust-filter-system-CRT-NRMM-johnson-matthey>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [45] York, A. P. Modeling of the catalysed continuously regenerating diesel particulate filter (CCR-DPF) system: model development and passive regeneration studies. SAE Technical Paper, 2007-01-0043, 2007.
- [46] Gorsmann, C. Catalytic coatings for active and passive diesel particulate filter regeneration. *Monatshefte für Chemie/Chemical Monthly*, 136.1: 91-105, 2005.
- [47] Campenon, T. Improvement and simplification of DPF system using a ceria-based fuel-borne catalyst for diesel particulate filter regeneration in serial applications. SAE Technical Paper, 2004-01-0071, 2004.
- [48] <http://www.jmdpf.com/Diesel-exhaust-catalysed-filter-CSF-system-johnson-matthey>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [49] Allanson, R. Optimising the low temperature performance and regeneration efficiency of the continuously regenerating diesel particulate filter (CR-DPF) system. SAE Technical Paper, 2002-01-0428, 2002.
- [50] Singh, P. An experimental study of active regeneration of an advanced catalysed particulate filter by diesel fuel injection upstream of an oxidation catalyst. SAE Technical Paper, 2006-01-0879, 2006.
- [51] Fino, D. Diesel emission control: Catalytic filters for particulate removal. *Science and Technology of Advanced Materials*, 8.1: 93-100, 2007.



- [52] <http://www.jmdpf.com/diesel-particulate-filter-exhaust-system-burner-johnson-matthey>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [53] Trautwein, W. AdBlue as a reducing agent for the decrease of NO<sub>x</sub> emissions from diesel engines of commercial vehicles. German Society for Petroleum and Coal Science and Technology, 2003.
- [54] Hesser, M., Lüders, H., Henning, R. SCR technology for NO<sub>x</sub> reduction: series experience and state of development. Proceedings of the Diesel Engine Emission Reduction Conference. 2005.
- [55] [https://www.dieselnet.com/tech/cat\\_scr\\_mobile\\_urea\\_dosing.php](https://www.dieselnet.com/tech/cat_scr_mobile_urea_dosing.php), Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [56] Majewski, W. A., Khair, M. K. Diesel emissions and their control. Society of Automotive Engineers, 2006.
- [57] Gieshoff, J. Improved SCR systems for heavy duty applications. SAE Technical Paper, 2000-01-0189, 2000.
- [58] <http://www.hybridcars.com/technologies-greener-gasoline-diesel-and-hybrid-delphi-53674/>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [59] Ström, H., Lundström, A., Andersson, B. Choice of urea-spray models in CFD simulations of urea-SCR systems. Chemical Engineering Journal, 150.1: 69-82, 2009.
- [60] Gil, E. S. Evaluation of ammonia slip catalysts. Chalmers University of Technology, Chemical Engineering, PhD Thesis, 2013.
- [61] Konstandopoulos, A. G. Progress in diesel particulate filter simulation. SAE Technical Paper, 2005-01-0946, 2005.
- [62] Frank, W. Fluid Mechanics, Seventh Edition, Mc- Graw Hill, 394-396, 2009.
- [63] Philip, J. R. Flow in porous media. Theoretical and applied mechanics. Springer Berlin Heidelberg, P. 279-294, 1973.
- [64] Andersen, O. H., Burcharth, H. F. On the One-Dimensional Steady and Unsteady Porous Flow Equation. Coastal Engineering, 24: 233-257, 1995.
- [65] Konstandopoulos, A. G., Skaperdas, E., Masoudi, M. Microstructural properties of soot deposits in diesel particulate traps. SAE Technical Paper, 2002-01-1015, 2002.

- [66] Çetin, O. Susturucularda basınç kaybı ve akustik performansın incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 2011.
- [67] TSE, TS EN ISO 5167-4, Borularda akışkan akışının ölçülmesi, Bölüm 4: Ventüri tüpleri, 2006



## ÖZGEÇMİŞ

Yunus Özkan, 15.08.1989'da İstanbul'da doğdu. İlk, orta eğitimini Bağcılar Uçanevler İlköğretim Okulunda tamamladı. 2007 yılında İbrahim Turhan Lisesi, Fen bölümünden mezun oldu. 2007 yılında başladığı Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2012 yılında bitirdi. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliğinde yüksek lisansa başladı. 2013 yılından itibaren Bilen Egzost A.Ş.'de Ar-Ge Mühendisi olarak görev almaktadır.