



## Numerical investigation of regeneration process of diesel particulate filter (DPF) made of different constitutive materials

Müjdat Fırat<sup>1\*</sup>, Nevfel Yunus Coşkun<sup>2</sup>, Mutlu Okcu<sup>3</sup>, Yasin Varol<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Education, Firat University, Elazığ, 23119, Turkey

<sup>2</sup>Sorgun Vocational School, Bozok University, Yozgat, 66700, Turkey

<sup>3</sup>Department of Automotive Engineering, Firat University, Elazığ, 23119, Turkey

### Highlights:

- Three type of DPF substrate materials are analyzed and a major impact has observed on the DPF performance
- It was seen that filtration efficiency of the SiC material is higher than those of the other materials
- During the regeneration process, it has been determined that NO<sub>x</sub>, CO and CO<sub>2</sub> emissions have affected by DPF and PM filtration

### Graphical/Tabular Abstract

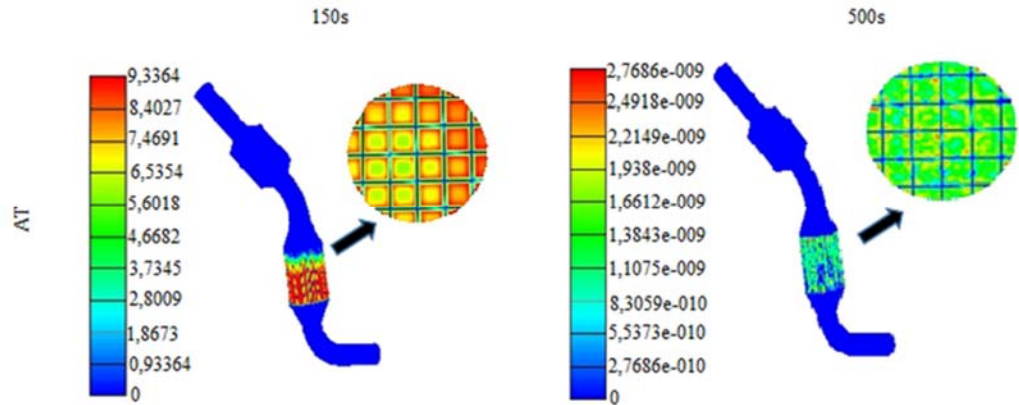


Figure A. PM accumulation for Aluminum Titanate

### Keywords:

- Diesel particulate filter
- Regeneration
- Exhaust emissions,
- Heat transfer

### Article Info:

Research Article  
Received: 13.06.2017  
Accepted: 02.11.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416491

### Acknowledgement:

Author thanks to AVL company for their software support and Firat University Scientific and Research Fund for their financial support with project number TEKF.15.12.

### Correspondence:

Author: Müjdat Fırat  
e-mail:  
mujdatfirat@gmail.com  
phone: +90 424 237 00  
00/4375

**Purpose:** In this study, the filtration characteristics of different DPF materials including SiC, Crd and AT were investigated under the New European Driving Cycle (NEDC) standards by designing the exhaust system for a diesel vehicle with Diesel Oxidation Catalyst (DOC) and DPF.

### Theory and Methods:

The study was performed in three dimensions with using of the AVL-FIRE software. The properties of materials which are alternatives to SiC (Silicon Carbide), the most widely used as DPF material, have been investigated.

### Results:

The effects of DPF material on heat transfer, pressure drop and exhaust emissions were shown in this study. As a result, it is seen that the used materials in this study have similar characteristics on the studied parameters. However, DPF materials have been found to have effects on pressure drop, CO and NO<sub>x</sub>.

### Conclusion:

For DPF with SiC material, thermal losses are high at the beginning of regeneration, CO emissions are low when the AT (Aluminum Titanate) material used, and pressure drop is high for Crd (Cordierite) material.



## Farklı malzemelerden yapılmış dizel partikül filtresi (DPF)'nin rejenerasyon sürecinin sayısal olarak incelenmesi

Müjdat Fırat<sup>1\*</sup>, Nevfel Yunus Coşkun<sup>2</sup>, Mutlu Okcu<sup>3</sup>, Yasin Varol<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup>Bozok Üniversitesi, Sorgun MYO, Otomotiv Teknolojisi Programı, 66700, Yozgat, Türkiye

<sup>3</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Üç farklı DPF malzemesi analiz edildiğinde, farklı malzemelerin DPF performansını etkilediği gözlemlenmiştir
- SiC malzemesinin filtrasyon veriminin diğer malzemelerinkinden daha iyi olduğu görülmüştür
- Rejenerasyon süreci boyunca PM filtrasyonunun yanında NO<sub>x</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının da DPF'den etkilendiği belirlenmiştir

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 13.06.2017

Kabul: 02.11.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416491

#### Anahtar Kelimeler:

Dizel partikül filtre,  
rejenerasyon,  
egzoz emisyonları,  
ısı transferi

#### ÖZET

Dizel Partikül Filtreleri (DPF) günümüzde birçok dizel araçta kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Dizel Oksidasyon Katalisti (DOK) ve DPF'e sahip bir dizel araç için egzoz sistemi tasarımı yapılarak, farklı DPF malzemelerinin (SiC, Crd, AT) filtrasyon özellikleri Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (YASÇ) standartları altında incelenmiştir. Egzoz sistemi modeli, kullanımda olan dizel araçlar incelenerek belirlenmiştir. Çalışma, AVL-FIRE yazılımı vasıtasıyla üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. DPF malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzeme olan SiC'e (Silisyum Karbür) alternatif olan malzemelerin çalışma özellikleri incelenmiştir. DPF malzemesinin ısı dağılımı, basınç düşümü ve egzoz emisyonları üzerine etkileri, bu çalışma sonucunda gösterilmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde kullanılan malzemelerin benzer özellikler gösterdiği görülmüştür. Bunun yanında DPF malzemesinin, özellikle basınç düşümü, CO ve NO<sub>x</sub> üzerinde etkileri olduğu görülmüştür. SiC malzemeli DPF için ısı kayıplarının rejenerasyon başlangıcında yüksek olduğu, AT (Alüminyum Titanat) malzemesi kullanımında CO emisyonlarının kısmen düştüğü ve Crd (Kordierit) malzemesi kullanımında ise basınç düşümünün arttığı çalışmada öne çıkan sonuçlar arasındadır.

## Numerical investigation of regeneration process of diesel particulate filter (DPF) made of different constitutive materials

### H I G H L I G H T S

- Three type of DPF substrate materials are analyzed and a major impact has observed on the DPF performance
- It was seen that filtration efficiency of the SiC material is higher than those of the other materials
- During the regeneration process, it has been determined that NO<sub>x</sub>, CO and CO<sub>2</sub> emissions have affected by DPF and PM filtration

#### Article Info

Research Article

Received: 13.06.2017

Accepted: 02.11.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416491

#### Keywords:

Diesel particulate filter,  
regeneration,  
exhaust emissions,  
heat transfer

#### ABSTRACT

Diesel Particulate Filters (DPF) are currently used in many diesel vehicles. In this study, the filtration characteristics of different DPF materials including SiC, Crd and AT were investigated under the New European Driving Cycle (NEDC) standards by designing the exhaust system for a diesel vehicle with Diesel Oxidation Catalyst (DOC) and DPF. The exhaust system model is determined by examining of the diesel vehicles. The study was performed in three dimensions with using of the AVL-FIRE software. The properties of materials which are alternatives to SiC (Silicon Carbide), the most widely used as DPF material, have been investigated. The effects of DPF material on heat transfer, pressure drop and exhaust emissions were shown in this study. As a result, it is seen that the used materials in this study have similar characteristics on the studied parameters. However, DPF materials have been found to have effects on pressure drop, CO and NO<sub>x</sub>. For DPF with SiC material, thermal losses are high at the beginning of regeneration, CO emissions are low when the AT (Aluminum Titanate) material used, and pressure drop is high for Crd (Cordierite) material.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: mujdatfirat@gmail.com, nevfelyunus@gmail.com, mutluokcu@gmail.com, yvarol@gmail.com /  
Tel: +90 424 237 0000 / 4375

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dizel motorlar düşük yakıt tüketimi, yüksek tork ve düşük CO<sub>2</sub> emisyonları sebebiyle gerek taşımacılık gerekse güç üretimi alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Günümüzde Avrupa ülkeleri başta olmak üzere, öncelikle başkentleri ve büyük şehirlerine daha sonra tüm ülke geneline dizel motorlu taşıt almama fikri yaygınlaşmaktadır. Fakat, taşıt dışında dizel motorların kullanıldığı alanlar kısa ve orta vadede dizel motorlu araçların terkedilemeyecek olması, sorunun bu şekilde kolayca çözülemeyeceğini kanıtlamaktadır. Dizel motorların kullanımındaki problemler NO<sub>x</sub> ve partikül madde emisyonları başta olmak üzere kirlenici emisyonlardır. Bu emisyonlar çevre ve insan sağlığını doğrudan etkilemekte ve günümüz emisyon standartlarına uyumu zorlaştırmaktadır. Amerika (EPA), Avrupa (EURO) ve Japonya (EEC/ECE)'nin koyduğu emisyon standartlarına uymayan bu motorlar günümüzde emisyon skandallarıyla gündeme gelmektedir. Dizel motorlarda kirlenici emisyonların giderilmesi için kullanılan sistemlerden biri motor sonrası egzoz sistemleridir (after-treatment) [1, 2]. NO<sub>x</sub> emisyonları için seçici katalitik indirgeme SKİ (selective catalytic reduction(SCR)) ve diğer reaksiyonlar için DOK kullanımı emisyonların düşülmesi için bir çözüm olarak sunulmaktadır [3]. Bunların dışında en yaygın kullanılan sistem ise, DPF özellikle partikül madde filtrelenmesi için kullanılmaktadır [4]. Yüksek verimliliğe ulaşan bu sistemlerde partikül maddeler yüksek oranda filtrelense de bu filtrelerin rejenerasyonu büyük sorunlar doğurmaktadır. DPF sistemlerinde rejenerasyon iki temel yöntemle yapılmaktadır. Bunlar aktif ve pasif rejenerasyon yöntemleridir. Verimli bir rejenerasyon egzoz gazlarının sıcaklığına bağlıdır. DPF içerisinde biriken kurumun katalitik bir reaksiyonla yakılabilmesi için gerekli sıcaklıkların sağlanması gerekmektedir [5]. Aktif rejenerasyon ek ısıtma sistemleri, belirli aralıklarla ek yakıt verilerek veya aktif akış kontrol sistemleri ile yapılırken, pasif rejenerasyon daha çok filtre sistemi dizaynı ile sağlanmaktadır [6]. Yapılan çalışmalarda, aktif rejenerasyon yöntemleri için gereken ek enerji ve bu sistemlerin daha karışık olması sebebiyle pasif rejenerasyon yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [7].

Son zamanlarda özellikle pasif rejenerasyon yöntemlerine ilişkin çalışmalar artış göstermiş ve özellikle tasarımsal etkiler incelenmeye başlanmıştır. Tüm bu filtrasyon sistemlerinde farklı malzemeler, farklı geometrik şekillerde filtre tasarımı ve farklı reaktif bileşenlerle reaksiyonların oluşturulması çalışmaları yapılmaktadır [8]. Yapılan bu çalışmalarda, filtre malzemelerinin maliyeti ve filtre sistemlerinin yakıt ekonomisine olumsuz etkileri vurgulanmaktadır [9, 10]. DPF filtre malzemesinin farklı etkileri yapılan çalışmalarda farklı açılardan incelenmeye başlanmıştır. Tsuneyoshi ve Yamamoto [11], DPF filtre malzemesi hücresi en-kesit şeklinin altıgen ve geleneksel kare olması durumunda kontrollü ve kontrolsüz rejenerasyon durumunu incelemişlerdir. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada her iki filtre tipi birbiriyle kıyaslanarak kurum

birikimi, sıcaklık ve basınç dağılımları incelenmiştir. Çalışma sonucunda altıgen en-kesitli hücrelerden meydana gelen filtredeki rejenerasyon veriminin diğerinden daha yüksek olduğu ve geri basıncın ise daha düşük olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla geleneksel kare şekli yerine altıgen şekil kullanımının pasif rejenerasyon adına gelişme kaydedebileceği belirtilmiştir. Şekil parametresinin yanında en önemli etkilerden birisi de DPF malzemesinin özellikleridir. Literatürde ve sektörde özellikle silisyum karbür (SiC), kordierit (Crd) ve sinterlenmiş metal gibi farklı malzemelerin DPF malzemesi olarak kullanıldığı görülmüştür [12]. Millo vd. [13] farklı DPF malzemelerinin yakıt tüketimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada deneysel veriler bir boyutlu sayısal çalışmayla kıyaslanırken üç farklı filtre malzemesinin, filtre içerisinde kurum birikimine ve yakıt tüketimine etkilerini farklı sürüş koşulları altında incelemişlerdir. Çalışmada, SiC'nin yüksek ısı iletim oranına sahip olmasının dezavantajları olduğu, ısı kayıplarını artırdığı, bu durumun rejenerasyona zarar verdiği ve yakıt tüketimini olumsuz etkilediği gösterilmiştir. Jiao vd. [14] NO<sub>x</sub> – PM mekanizmasını geliştirmek için yaptıkları deneysel çalışmada, Crd malzemesi ile kaplanmış DPF'nin zamana ve sıcaklığa bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonundaki değişimini saptamışlardır. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonları artmıştır. Fakat kül emisyonları azalım göstermiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, 0-500 °C arasındaki sıcaklık değerlerinden 400-500°C sıcaklık aralığında kurum parçacıklarını giderme veriminin daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, N<sub>2</sub>O varlığının kurum parçacıklarının kritik ısınmasını daha da azaltabilir olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Pérez ve López [15] katalitik rejenerasyonunu inceledikleri çalışmalarında, Pt ve CePr katalizörleri kullanmış, bunların rejenerasyona etkilerini incelemişlerdir. Filtre malzemesini SiC seçerek katalizör olmadığı ve olduğu durumları araştırmışlardır. Bu katalizörlerle çok daha hızlı ve maksimum rejenerasyona ulaşıldığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, malzeme etkisinin kurum birikmesi ve yakılmasına etkisi açıkça görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda DPF filtresinin kurum birikimi, sıcaklık dağılımı ve basınç düşüşüne etkileri sıklıkla araştırılmakla birlikte [16], NO başta olmak üzere diğer emisyonlarla ilişkilerine değinilen çalışmalar da bulunmaktadır [14]. Bunların yanında dizel alternatifi yakıtların kullanımı durumunda DPF rejenerasyon veriminin de literatürde incelendiği görülmektedir [17].

Yıllarca, taşıtlarda emisyon değerlerinin düşürülmesi için daha çok içten yanmalı motorlara yoğunlaşmış ve çalışmalar yanma odası ve yanma konseptleri merkezli olmuştur. Son yıllarda ağırlaşan emisyon kriterleri sebebiyle bu çalışmalar yeterli olmamış ve motor sonrası emisyon sistemleri araştırılmaya başlanmıştır. Bu konulardaki çalışmalar eksik olmakla birlikte, pasif rejenerasyon yöntemlerinin araştırılması oldukça önemli bir hale gelmiştir. Bu çalışma kapsamında DPF filtre malzemesinin kurum birikimi, DPF sıcaklığı, basınç düşümü ve diğer emisyon türleri üzerine etkileri detaylı bir şekilde üç boyutlu olmak üzere sayısal olarak incelenmiştir. Filtre

malzemesinin etkisinin tüm bu sonuçlar üzerine etkilerini birlikte inceleyen bir çalışma literatürde olmamakla birlikte, yapılan çalışmayla bu eksikliğin giderileceği düşünülmektedir. Üç boyutlu sayısal analizlerle gerçekleştirilen bu çalışmayla birlikte, DPF malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin farklı parametreler üzerine etkileri detaylı olarak gösterilecektir. Çalışmada, Silisyum Karbür (SiC), Kordierit (Crd) ve Alüminyum Titanat (AT) malzemeleri DPF filtre malzemesi olarak seçilmiş ve bu malzemeler için analizler gerçekleştirilmiştir.

## 2. SAYISAL METOT (NUMERICAL METHOD)

Taşıtlarda salınan kirletici emisyonların çevre ve insan sağlığına etkileri bilinirken [18] dünya çapında bu etkileri en aza indirmek için farklı emisyon standartları belirlenmiştir. Taşıtların bu standartları sağlaması istenmekle birlikte, bu kriterler belirli sürelerle güncellenmekte ve

sıklaştırılmaktadır. Ülkemizde de kabul gören EURO standartlarına göre istenilen emisyon değerleri Tablo 1-3'de farklı taşıtlar için görülmektedir.

Bu standartların sağlanması için kullanılan motor sonrası egzoz sistemlerinden olan DPF sisteminin performansının iyileştirilmesi de bu çalışmanın hedefini oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında dizel oksidasyon katalisti (DOK) ve dizel partikül filtresi (DPF) birlikte modellenmiş bir dizel taşıtı referans alınmış ve modellemeler yapılmıştır. Bu iki sistemin uygulamada genelde birlikte kullanımı düşünülerek (Şekil 1) daha gerçekçi bir yaklaşım sağlanmıştır.

Çalışmanın temel amacı, farklı DPF malzemelerinin kullanılması sonucunda egzoz sistemindeki sıcaklık ve akış özelliklerini incelemek ve emisyon sonuçlarını elde etmek olarak belirlenmiştir. Çalışma 500 saniye süreli bir analizi içermektedir. Tüm çalışma zamanı için sonuçlar grafikler

**Tablo 1.** Otomobiller için Euro emisyon standartları (Euro emissions standard for automobiles) [19].

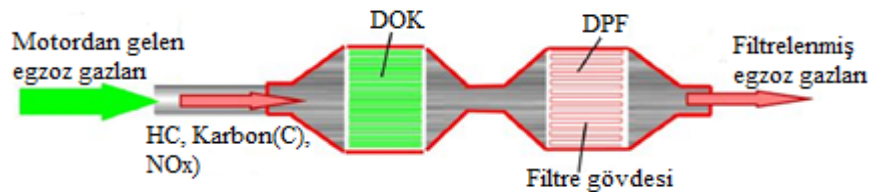
Standart	Tarih	CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	HC+NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)
Euro 1	Temmuz 1992	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	0,14 (0,18)
Euro 2	Ocak 1996	1,0	-	0,7	0,08
Euro 3	Ocak 2000	0,64	0,50	0,56	0,05
Euro 4	Ocak 2005	0,50	0,25	0,30	0,025
Euro 5	Eylül 2009	0,50	0,180	0,230	0,005
Euro 6	Eylül 2014	0,50	0,080	0,170	0,005

**Tablo 2.** Ağırlıkları 1305 kg'den düşük hafif ticari taşıtlar için Euro emisyon standartları (Euro emissions standard for light commercial vehicles at weight of <1305kg) [19].

Standart	Tarih	CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	HC+NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)
Euro 1	Temmuz 1992	2,72	-	0,97	0,14
Euro 2	Ocak 1996	1,0	-	0,7	0,08
Euro 3	Ocak 2000	0,64	0,50	0,56	0,05
Euro 4	Ocak 2005	0,5	0,25	0,30	0,025
Euro 5	Eylül 2009	0,5	0,18	0,23	0,005
Euro 6	Eylül 2014	0,5	0,08	0,17	0,005

**Tablo 3.** Ağırlıkları 1305kg-1760kg arasındaki hafif ticari taşıtlar için Euro emisyon standartları (Euro emissions standard for light commercial vehicle at weight of 1305kg-1760kg) [19].

Standart	Tarih	CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	HC+NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)
Euro 1	Temmuz 1992	5,17	-	1,4	0,19
Euro 2	Ocak 1996	1,25	-	1,0	0,12
Euro 3	Ocak 2000	0,80	0,65	0,72	0,07
Euro 4	Ocak 2005	0,63	0,33	0,39	0,04
Euro 5	Eylül 2009	0,640	0,235	0,295	0,005
Euro 6	Eylül 2014	0,640	0,105	0,195	0,005



**Şekil 1.** DOK ve DPF sisteminin şematik görünümü (DOC-DPF system schematic view) [20].

halinde sunulurken, ayrıca 150. ve 500. saniyelerdeki sonuçlar farklı kesit görüntüleriyle desteklenmiş ve daha detaylı hale getirilmiştir.

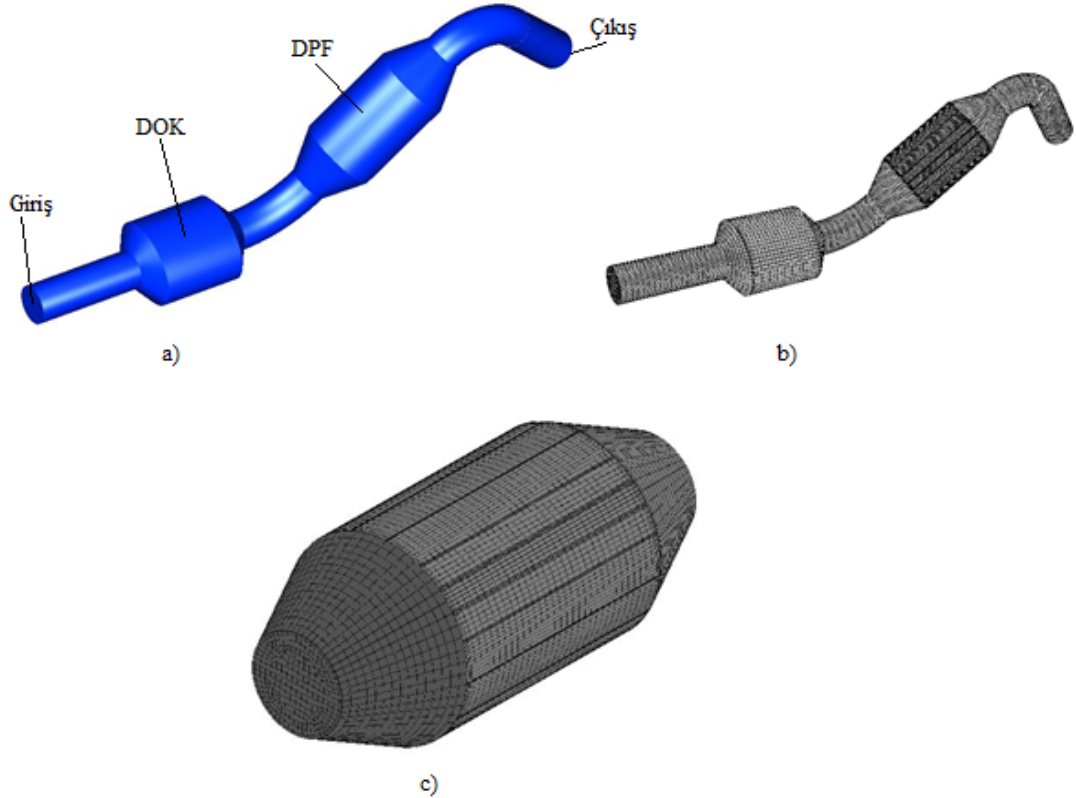
Çalışmada sayısal yazılım olarak, AVL FIRE'in FIRE ESE AFTERTREATMENT [21] kısmı kullanılmış ve üç boyutlu egzoz modeli oluşturulmuştur. Modelin oluşturulması AVL FIRE'da dört kısımda gerçekleştirilmiştir. Birinci kısımda, genel sistem verilerinin girişi yapılmış ve Avrupa, Amerika veya Japon standartlarında çalışılacak olan standart seçilmiştir. İkinci kısımda, dizel bir aracın egzoz sistem tasarımı yapılmıştır. Üçüncü kısımda, oluşturulan geometrik şeklin ağ yapısı yani çalışma alanı oluşturulmuştur. Dördüncü kısımda ise çalışılacak simülasyon parametrelerinin ve sınır şartlarının girişi yapılmıştır. Modelleme için genel şartlar seçilirken taşıt dizel kabul edilmiştir. Bu analizler için en önemli şartlardan birisi sürüş standardının belirlenmesidir. Çalışma kapsamında YASÇ standartlarında bir kullanım yapıldığı kabul edilmiştir.

Uygun geometrinin oluşturulması için çeşitli dizel araçların egzoz sistemleri, DOK ve DPF'leri incelenmiştir. İncelenen araçların DPF ve DOK boyutlarından faydalanılarak elde edilen ölçümler doğrultusunda Tablo 4.'de ki değerler uygun görülmüştür. Kullanılan değerler incelenen sistemlere paralel olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Şekil 2'de görülen model elde edilmiştir.

**Tablo 4.** Egzoz sistemi parçaları ve uzunlukları  
(Components and length of exhaust system)

Parça Adı	Uzunluk
Giriş borusu	0,2 m
DOK giriş çıkış konisi	0,03 m
DOK	0,15 m
Ara dirseğin yarıçapı ve eğim açısı	0,2 m / 45°
DPF giriş-çıkış konisi	0,075 m
DPF	0,18 m
Çıkış dirseğin yarıçapı ve eğim açısı	0,1 m / 90°
Çıkış borusu	0,15 m
Toplam sistem	1,085 m

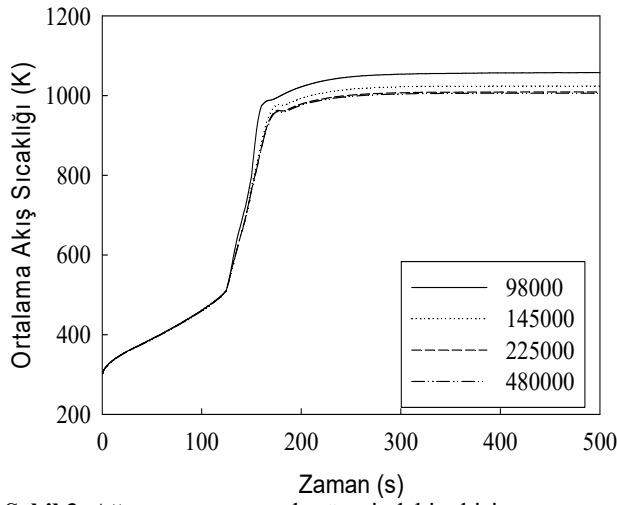
Analizlerin doğruluğu ve hassasiyeti için DPF bölgesi özellikle daha yoğun bir ağ yapısına sahiptir. Ağ yapısından bağımsız çözümün hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında önemli olduğu bilinmektedir. Geçerliliği sağlamak için farklı sayılarda elemanlar kullanılarak (98000, 145000, 225000 ve 480000) testler yapılmıştır. Yapılan testlerde programın düzenli çalışması başta olmak üzere akış sıcaklığı parametresi dikkate alınmış ve en uygun eleman sayısı 225000 olarak belirlenmiştir. Ağ yapısının ortalama akış sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Literatürde incelenen çalışmalarda 100, 300 ve 500 saniyelerde çalışıldığı görülmüştür. Bu çalışmada ise 500



**Şekil 2.** a) Egzoz sistemi modeli, b) genel ağ yapısı, c) DPF ağ yapısı  
(a) Model of exhaust system, b) General grid structure, c) DPF grid structure)



saniye süresince çalışma yapılmıştır. Çalışma 0.2 zaman adımı kullanılarak her zaman adımı için yaklaşık 100 iterasyon yaptırılarak yürütülmüştür. Sınır koşullarından giriş şartlarından kütle akışı 180 kg/h, sıcaklık değeri başlangıçta soğuk çalışma için 300 K ve sonrasında 150. saniyeden sonra ısınma şartları için 600 K olarak kabul edilmiştir. Bu değerler genel çalışma şartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Egzoz gazı bileşenlerinin başlangıç değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Bu değerler incelenen dizel motorların DOK öncesi egzoz değerleri referans alınarak ve yazılımın önerdiği değerlerle kıyaslanarak oluşturulmuştur. Egzoz gazları içerisinde bulunan on farklı tür için toplamları bir olacak şekilde başlangıç değerleri girilmiştir. Bu şekilde egzoz gazının tamamının bu bileşenlerden oluştuğu kabul edilmiştir.



**Şekil 3.** Ağ yapısının sonuçlar üzerindeki etkisi (Effect of grid structure on results)

Oksidasyon katalistinin özelliklerinden katalist tipi kare hücreli katalist seçilmiş ve katalistin değerleri Tablo 6.’da verilmiştir. Basınç düşüşü, katalizör ve DPF kanalları boyunca gerçekleşir. Kanal yüzeyleri üzerindeki birikime bağlı oluşan direnç basınç düşüşünü etkiler. Katalizör ve DPF kanalları boyunca meydana gelen basınç düşüşü Eş. 1’de verilmiştir.

**Tablo 5.** Emisyonların başlangıç değerleri (Inlet values of emissions)

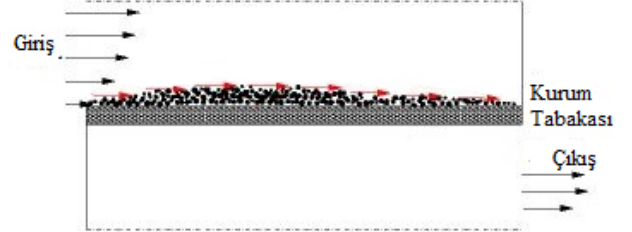
Emisyonlar	CO	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	NO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	N <sub>2</sub>
Başlangıç Değerleri	5,91e-3	7,6567e-3	6,67e-5	1,178e-1	9,98e-2	5,58e-5	9,25e-5	1e-6	1e-6	0,768

**Tablo 6.** Oksidasyon katalistinin özellikleri (Properties of oxidation catalyst)

Katalist Özellikleri	Hücre Yoğunluğu (1/m <sup>2</sup> )	Duvar Kalınlığı (m <sup>2</sup> )	Katalist Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Isıl İletkenlik (W/mK)	Özgül Isı (J/kgK)	Katalizör Başlangıç Sıcaklığı (K)	Katalist İterasyon Sayısı
Değerler	5,911e-3	0,0001524	1000	3	950	300	20000

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{\lambda_{Lam}}{\lambda_{Tür}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W^2 \quad (1)$$

Şekil 4.’de kurum parçacıklarının birikimi verilmiştir. Biriken kurumun yüksekliği ve akış hızına bağlı külün yüksekliğinin değişimi de Eş. 2’deki gibi hesaplanmıştır.



**Şekil 4.** Kurum parçacıklarının birikimi (Accumulation of soot particles)

$$\frac{\partial \delta_{sc}}{\partial t} + c_m \cdot \frac{\partial (v_1 \cdot \delta_{sc})}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Rejenerasyon sırasında çözülen denklemler Eş. (3-7)’de verilmiştir.

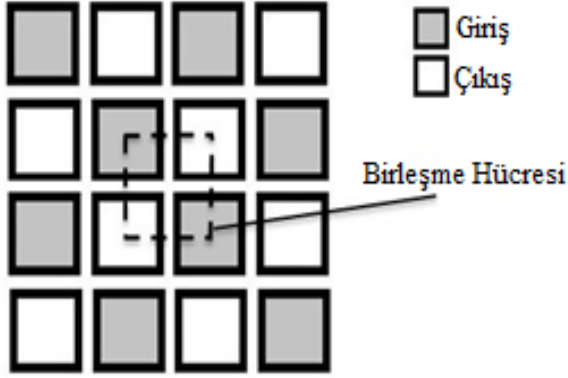


$$r_1 = f_{co} \cdot k_1^0 \cdot \exp\left(\frac{-E_{A,1}}{R \cdot T_{Kati}}\right) \cdot C_{O_2}^B \quad (5)$$

$$r_2 = (1 - f_{co}) \cdot k_1^0 \cdot \exp\left(\frac{-E_{A,1}}{R \cdot T_{Kati}}\right) \cdot C_{O_2}^B \quad (6)$$

$$f_{co} = \frac{1}{1 + P_1 \cdot Y^{P^2} \cdot \exp\left(\frac{P_3}{R \cdot T_{Kati}}\right)} \quad (7)$$

Bu çalışma kapsamında DPF’nin özelliklerinden asimetrik kare hücreli DPF tercih edilerek bu kanal tipi bu çalışma kapsamında sabit tutulmuştur. Hücre şekli Şekil 5’te görülmektedir. DPF için kullanılan AT, Crd ve SiC malzemelerine ait özellikler Tablo 7’de görülmektedir.



Şekil 5. Asimetrik kare hücreli yapı  
(Asymmetric square cell structure)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Farklı DPF Malzemelerinin Sıcaklıklar Üzerindeki Etkileri (Effects of Different DPF Substrate Materials on Temperatures)

Şekil 6a'da görüldüğü gibi DPF malzemesi olarak Crd ve AT kullanımında 0 saniyede 300 K olan ortalama akış sıcaklığı 150 saniyede 600 K'ye geçmiş ve yaklaşık 200 saniyede 970 K'e çıkarak maksimum değerine ulaşmıştır. SiC kullanımında ise başlangıç sıcaklığının biraz daha yüksek olduğu ancak ilerleyen süreçte sıcaklık yükselmesinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bununla beraber SiC

kullanımında maksimum sıcaklık değerine 200 saniyeden sonra ulaşılmış ve yaklaşık olarak 990 K olmuştur. Şekil 6b'de DPF ortalama yüzey sıcaklığı içinde benzer bir değişim görülmektedir. SiC kullanımında ki değişimin temel nedeni olarak ısı iletim katsayısı verilebilir. Isı iletim katsayısı yüksek olduğundan tüm DPF'in denge sıcaklığına gelmesi hızlıdır fakat bu süreçte ısı kayıpları yüksektir. Bu durum literatürde de bu şekilde görülmektedir [13].

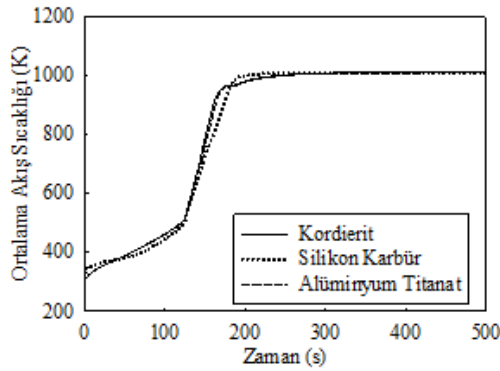
Şekil 7'de farklı malzemelerin, egzoz sisteminde ve DPF içerisindeki akış sıcaklığına etkileri görülmektedir. Görseller hem üç boyutlu olarak tüm sistemi gösterecek şekilde hem de DPF'in ortasından kesit olarak alınmıştır. Sıcaklık görselleri incelendiğinde AT için maksimum sıcaklık değerinin reaksiyonun 150. saniyesinde Crd ve SiC den daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda daimi olmayan yakım sürecinde PM kütesini azaltmada daha verimli olsa da genel filtrasyon verimi düşmektedir. Fakat SiC malzemesinin ısı iletim katsayısına bağlı olarak kısmen gecikmeyle birlikte daha düzenli bir sıcaklık dağılımına ulaştığı görülmektedir. Malzemelerin ortalama sıcaklıkları 500. saniyede yakın olmasından dolayı PM birikimleri aynı seviyededir.

#### 3.2. Farklı DPF Malzemelerinin Basınç Düşüşü Üzerindeki Etkileri (Effects of Different DPF Substrate Materials on Pressure Drop)

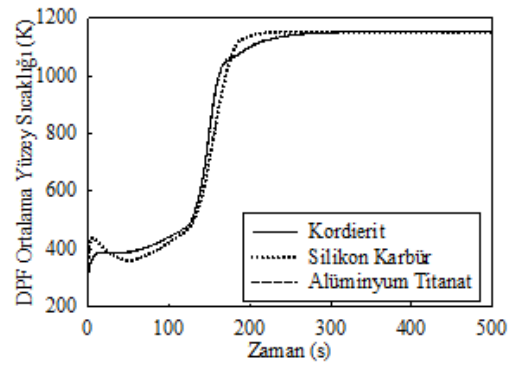
Şekil 8'de DPF içerisinde meydana gelen basınç düşüşü verilmiştir. Basınç düşüşü DPF'in giriş ve çıkışı arasında hesaplanmıştır. DPF'deki basınç düşüşüne bakıldığında, Crd kullanıldığı durumda basınç düşüşü SiC ve AT kullanımına

Tablo 7. Üç farklı DPF malzemesi için simülasyon değerleri (Values of simulation for the three DPF substrates materials)

Malzemeler	Hücre Yoğunluğu (cps)	Duvar Kalınlığı (mm)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Isı İletim katsayısı (W/mK)	Özgül Isı (J/kgK)
Alüminyum Titanat	300	0,305	1800	0,85	800
Kordierit	100	0,43	1400	0,85	1120
Silikon Karbür	300	0,305	1800	40	800

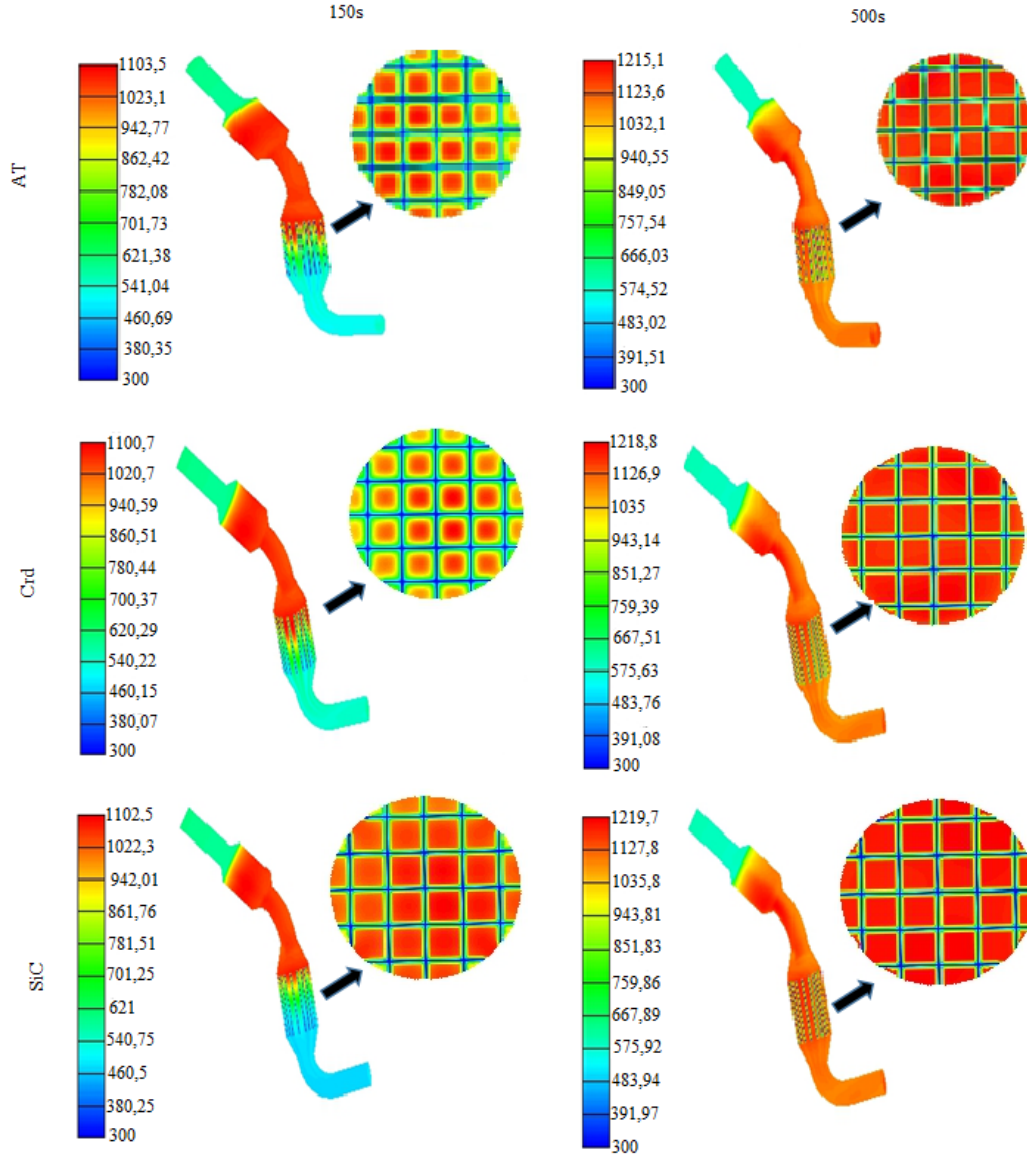


a)



b)

Şekil 6. DPF sıcaklıklarının zamanla değişimi a) Ortalama akış sıcaklığı, b) Ortalama yüzey sıcaklığı  
(Variation of DPF temperature depend on time a) Mean flow temperature b) Mean wall temperature)



Şekil 7. Rejenerasyon başlangıcı ve bitişinde sıcaklık dağılımları (K) (Temperature distribution for regeneration start and end (K))

göre çok yüksek olmuştur. DPF için basınç düşüşü temel olarak iki sebebe bağlıdır. Birincisi DPF'in kendi yapısı ikincisi ise PM birikimidir. DPF yapısı içerisinde DPF kanal şekli, malzemesi, hücre yoğunluğu ve duvar kalınlığı yer almaktadır. Bu parametrelerin her biri basınç düşümünü doğrudan etkilemektedir [13]. Çalışmada kanal şekli sabit tutulduğundan basınç düşüşü, diğer parametrelerin etkisi ve PM birikimine bağlanabilir. Tablo 7'de görüldüğü gibi Crd malzemesinin yüksek hücre yoğunluğu ve kısmen fazla duvar kalınlığı basınç düşüşünü ciddi oranda etkilemiştir. DPF uygulamalarında basınç düşüşünün motor performansı ve yakıt ekonomisi üzerindeki önemli etkisi dikkate alındığında SiC ve AT malzemeli DPF'lerin Crd malzemeli DPF'e göre daha uygun olduğu söylenebilir. DPF malzemesinin değiştirilmesi durumunda kurum birikiminin

doğrudan değiştiği ve buna bağlı olarak yakıt tüketiminin de değişeceği bu grafikte açıkça görülmektedir.

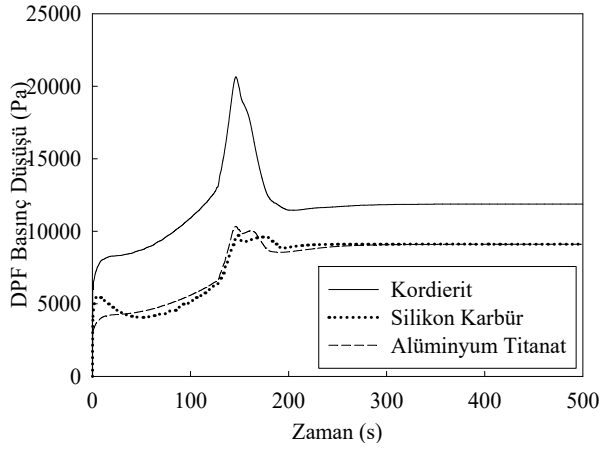
### 3.3. Farklı DPF Malzemelerinin Emisyonlar Üzerindeki Etkileri

(Effects of Different DPF Substrate Materials on Emissions)

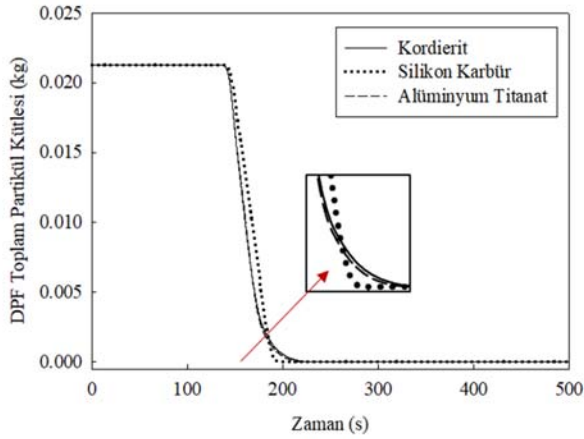
Şekil 9'de toplam PM kütlesi zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde DPF'de 150. saniyeye kadar uygun sıcaklığın oluşmamasından dolayı yüksek miktarda PM yakımı gerçekleşmemiştir. Bu da PM kütlesinin DPF'de birikimine sebep olmuştur. Bundan dolayı akışta zorlanma meydana gelmektedir. Bu zorlanmadan dolayı akış basıncı PM emisyonu azalana kadar artış gösterir. PM'lerin yakılmasıyla PM emisyon kütlesi azalmaktadır.



DPF reaksiyonlarının gerçekte hızı yaklaşık 150. saniyede sıcaklığın hızlı yükselişiyle artmıştır. Bu nedenle partikül kütlelerinde ani bir azalış görülmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi 200. saniyelere kadar akış sıcaklığının 1000-1050 K değerlerine ulaşmasından sonra PM kütlesi de 0'a yakın seviyelere kadar düşmüştür. SiC'in termal iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı PM yakımı süreci yavaş olmakla birlikte, diğer malzemelere göre daha önce tamamlanmıştır. Sürecin yavaş olması ısı kayıplardan kaynaklanırken sonrasında ısı dengesi sağlandıktan sonra hızlandığı görülmektedir [22].



**Şekil 8.** Farklı malzemeler için DPF basınç düşüşü (DPF pressure drop for different substrate materials)

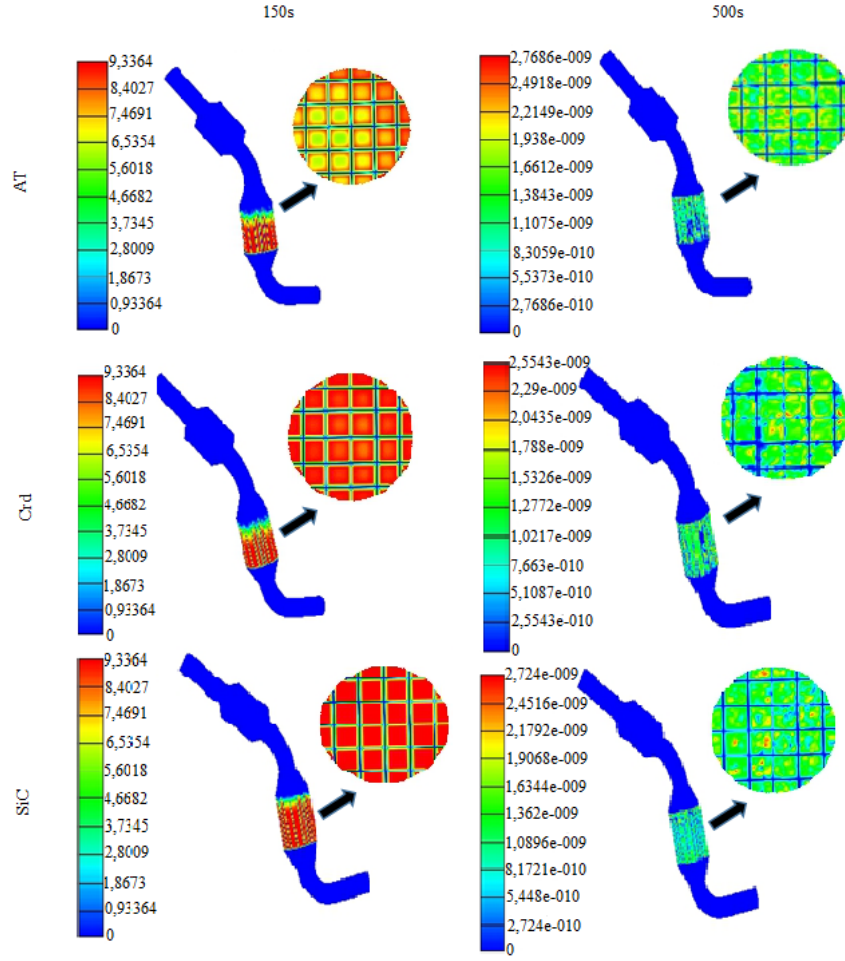


**Şekil 9.** Farklı malzemeler için DPF toplam partikül kütlesi (Total soot mass for different substrate materials)

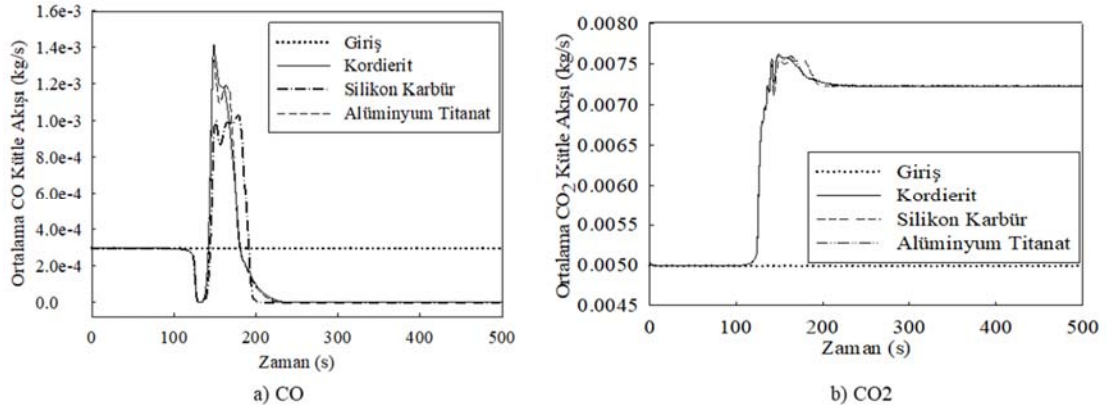
Şekil 10 yaklaşık olarak rejenerasyon başlangıcı ve bitişi olan 150s ve 500s için PM birikimini göstermektedir. Şekilde hem egzoz sistemi genel olarak gösterilmiş hem de DPF kanal görüntüsü ayrıntılı olarak verilmiştir. Egzoz sıcaklığı 150s'den hemen önce artmaya başlamış ve rejenerasyon yeni başlamaktadır. Her üç malzeme için, bu süreçte DPF kanalları PM ile doludur. Bu durum malzemelerin filtrasyon özelliklerini göstermektedir. Fakat bu süreçte AT malzemesine sahip DPF yerel olarak daha az

PM ile doludur. Bu durumun yerel olarak yüksek sıcaklıklara çıkılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SiC malzemesinin PM tutma kapasitesinin 150. saniyede oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum SiC malzemesinin yüksek filtrasyona sahip olduğunu göstermektedir. Her üç malzemenin 500s'de ise rejenerasyon verimlerinin yakın olduğu görülmekte ve PM birikimi ciddi oranda düşmektedir. Bu grafik Şekil 7 ile birlikte incelendiğinde yakma sıcaklıklarına çıkıldığında her üç malzeme için de yüksek PM yakımı söz konusu olduğu görülmektedir.

Şekil 11 (a,b) göstermektedir ki DPF içerisindeki yetersiz  $O_2$ , yanmamış yakıt partiküllerin yanması için yeterli zamanın olmaması ve yanmanın eksik olmasından dolayı CO emisyonları oluşur [23]. Yüksek alev sıcaklıklarında su gazı reaksiyonu denklemi ( $CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$ )  $CO_2$  miktarına oranla daha fazla CO oluşmasının nedenlerindedir. Ancak sıcaklığın düşmesi ve yeterli zamanla birlikte CO'nun  $CO_2$ 'ye oksidasyonu gerçekleşir. Şekildeki CO akış grafiğine bakıldığında akış içerisinde üç farklı malzeme için Crd malzemesinde en yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Bu durum rejenerasyon başlangıcında Crd malzemesi kullanımında meydana gelen yüksek sıcaklıkla açıklanmaktadır. Benzer bir CO oluşumunu yine sıcaklık yükselmesine bağlı olarak AT malzemesi kullanımı da vermektedir (Şekil 6(a)). SiC daha geç bu sıcaklıklara ulaştığından CO oluşumu rejenerasyon başlangıcında ve sonrasında düşük seyretmektedir. Fakat sıcaklık sürekli bir hal aldıktan ve yükseldikten sonra CO oluşumu da devam etmektedir. Literatürde de DOK-DPF kullanımının CO ve  $CO_2$  emisyonlarını doğrudan etkilediği ve CO emisyonlarını ciddi oranda düşürdüğü gözlenmektedir [24]. Dizel motorlardan yayılan en kirletici emisyonlardan bir diğeri NOx olarak bilinmektedir [25]. Sıcaklık NOx oluşumunun önemli parametresidir. Şekil 12'de motordan gelen sıcak egzoz gazlarının 150. saniyede sıcaklığın daha da artması ve DPF'ye gelmeden önce DOK'da meydana gelen reaksiyonların hızının artması ile egzoz gaz sıcaklığı daha da yükselerek NOx'in artmasına neden olduğu görülmektedir. 150. saniyeden sonra egzoz sistemi boyunca egzoz gazlarının sıcaklığının düşmesiyle NOx emisyonları da azalmıştır. SiC malzemeli DPF'in daha kararlı bir sıcaklık dağılımı göstermesinden dolayı 150. saniyeden sonra daha düzgün bir azalma göstermiştir. SiC 200 s'de minimum seviyelere inmiştir. Ancak 150. saniyelerde Crd ve AT daha az NOx seviyelerine kadar inmiştir. Bunun nedeni termal iletkenliğin Crd ve AT'nin aynı ancak SiC'den düşük olmasıdır. DPF'deki kurum birikiminin ve sıcaklık değişimlerinin NOx üzerine etkileri literatürde görülmektedir [14]. NOx kütle akış grafiğinde önemli noktalardan birisi de 0-150s arasındaki bölgedir. Literatürde yapılan önemli çalışmalarda kurum radyasyonunun NOx oluşumuna etkileri araştırılmıştır. Araştırmalarda, kurum oluşumunun yüksek olduğu durumlardan NOx'nun düşüş gösterdiği, is oluşum mekanizmasının NOx oluşumunu geciktirdiği vurgulanmaktadır [26]. DPF içerisinde geçen 0-150s aralığında da bu etki görülmektedir. Bu sonuç aynı durumun egzoz sistemi içinde de gerçekleştiğini gösteren önemli bir bulgudur.



Şekil 10. Rejenerasyon başlangıcı ve bitişinde PM birikimi ( $\text{kg/m}^3$ ) (PM accumulation for regeneration start and end ( $\text{kg/m}^3$ ))

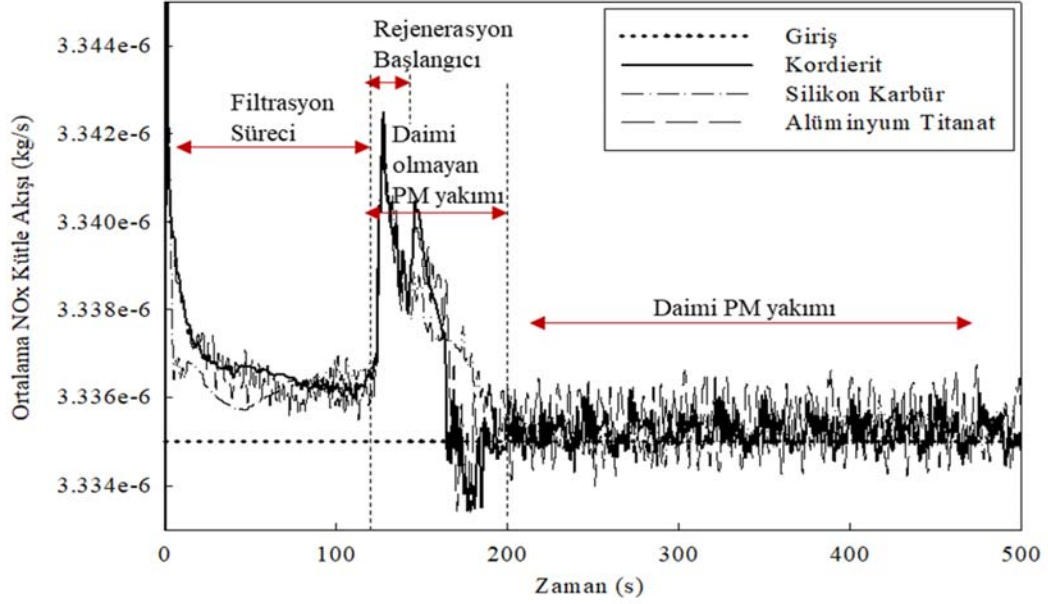


Şekil 11. Farklı DPF malzemeler için ortalama kütle akışları (Mean mass flow for different DPF substrate materials)

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

$c_m$  : Birikim sabiti ( $c_m=1$ )  
 $d_h$  : Ortalama hidrolik çap  
 $d_p/d_x$  : Gözenekli malzeme içerisindeki basınç gradienti  
 $f_{co}$  : DPF rejenerasyonunun oksijen ile sıcaklık bağımlılığı faktörü (-)

$k$  : Arrhenius frekans faktörü  
 $P$  : Basınç (Pa)  
 $R$  : Evrensel gaz sabiti (kJ/kmol.K)  
 $r_1, r_2$  : Reaksiyon oranları  
 $\lambda_L$  : Laminer boru sürtünme kaybı  
 $\lambda_T$  : Türbülanslı boru sürtünme kaybı  
 $\delta_{sc}$  : Kurum yüksekliği



Şekil 12. Farklı DPF malzemeler için ortalama NOx kütle akışı (NOx Mean mass flow for different DPF substrate materials)

#### 4.1. Kısaltmalar

AT	: Alüminyum Titanat
CO	: Karbon Monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
Crd	: Kordierit
DOC	: Dizel Oksidasyon Katalisti
DPF	: Dizel Partikül Filtresi
NOx	: Azot Oksit
PM	: Partikül Madde
SCR	: Seçici Katalitik İndirgeme
SiC	: Silisyum Karbür

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında dizel motorlu taşıtlar için egzoz sisteminin tasarlanması amaçlanmıştır. Kullanımda olan bazı araçların egzoz sistemleri incelenerek gerçeğe uygun bir tasarım hedeflenmiştir. Bu tasarım kapsamında DOK ve DPF sistemlerinin birlikte kullanıldığı bir tasarım yapılarak özellikle DPF üzerinde bazı değişikliklere gidilmiştir. Çalışmada, sabit bir kanal şekli için üç farklı DPF malzemelerinin (AT, SiC, Crd) DPF sıcaklıkları, basınç düşümü ve emisyonlar üzerine etkileri analiz edilmiştir. Çalışma neticesinde ısı transferi, akışkanlar dinamiği ve egzoz emisyonlarına yönelik sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. Sonuçlar göstermektedir ki; DPF'nin filtrasyon verimini partikül toplanması ve atmosferdeki salınımı, temsil eder. SiC malzemeli DPF 'nin filtrasyon veriminin daha iyi olduğu görülmüştür. Sistem bileşenleri içerisinde ısının daha iyi dağılmasını malzemenin termal iletkenliği sağlamaktadır. Ancak kararlı sıcaklığa ulaşması için daha fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Her üç malzemenin termal

iletkenliğine bakıldığında SiC'in termal iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı rejenerasyon başlangıcında ısı kayıplara sebep olsa da ilerleyen zamanlarda hızlı bir dağılım göstermiştir. Yüksek ısı kapasitesine sahip bir DPF filtresi kurum yakma sıcaklığına ulaşması için daha fazla sıcaklığa ihtiyaç duymaktadır. Ancak kontrol edilemeyen rejenerasyon meydana gelirse, DPF filtresi olumsuz etkilenebilmektedir. Her üç malzemenin basınç düşümüne etkisi incelendiğinde Crd malzemeli DPF'de basınç düşümünün yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonucun Crd malzemeli DPF kullanılan araçlarda yakıt tüketimini olumsuz etkileyeceği belirlenmiştir. DPF'in CO emisyonları üzerinde ciddi etkisi olduğu da bu çalışma kapsamında belirlenmiştir. Özellikle AT malzemeli DPF için CO oluşumu daha düşük olurken, CO emisyonlarının filtre içerisinde CO<sub>2</sub> ye dönüştüğü görülmüştür. DPF içerisinde PM birikimi sürecinde kurum radyasyonu sebebiyle NOx emisyonlarının yüksek sıcaklığa rağmen kısmen düştüğü gözlenmiştir. Bu, sonraki araştırmalar için önemli bir sonuçtur. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte NOx oluşumu için yeterli aktivasyon enerjisine çıkmış ve NOx miktarı artmıştır. Egzoz çıkışında ise NOx emisyonları ciddi bir değişiklik olmamakla birlikte düşme eğilimi saptanmıştır. SiC malzemeli DPF lerin olumlu özelliklerinin yanında maliyet ve ısı kayıpları düşünüldüğünde, bu çalışmada kullanılan AT ve Crd malzemelerin de DPF'lerde kullanımının uygun olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki egzoz gaz sıcaklıklarının PM yakma sıcaklıklarına çıkmasına kadar geçen zamanda yüksek PM birikimi ve basınç düşüşü görülmektedir. Bu durum süregen rejimde sürekli soğuk kullanımı ve kısa mesafeli sürüşlerde yakıt tüketiminde yükselmelere ve DPF sorunlarına sebep olabilir.

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)**

Yazarlar, finansal desteklerinden dolayı TEKF 15.12 Nolu proje için Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Başkanlığı'na ve yazılım desteklerinden dolayı AVL firmasına teşekkür eder.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Lilik G.K., Boehman A.L., Advanced diesel combustion of a high cetane number fuel with low hydrocarbon and carbon monoxide emissions, *Energy Fuels*, 25, 1444–1456, 2011.
- Wanker R., Wurzenberger J.C., Peters B., Tatschl R., Integrated 1D and 3D modeling of exhaust-gas aftertreatment devices, *SAE International*, 01-1132, 2004.
- Bensaid S., Marchisio D.L., Fino D., Numerical simulation of soot filtration and combustion within diesel particulate filters, *Chemical Engineering Science*, 65, 357-363, 2010.
- Kumar A.P., Sreekumar J.S., Mohanan P., Experimental and CFD analysis of selective catalytic reduction system on DeNOx efficiency of single cylinder diesel engine using NH<sub>3</sub> as a reducing agent, *Procedia Technology*, 14, 116-124, 2014.
- Claudia A.N., Ezequiel D.B., Eduardo E.M., Carlos A.Q., Potassium-promoted Ce<sub>0.65</sub>Zr<sub>0.35</sub>O<sub>2</sub> monolithic catalysts for diesel soot combustion, *Chemical Engineering Journal*, 248, 394–405, 2014.
- Zheng M., Banerjee S., Diesel oxidation catalyst and particulate filter modeling in activate- Flow configurations, *Applied Thermal Engineering*, 29, 3021-3035, 2009.
- Coşkun N.Y., Dizel Motorlarda Kirletici Emisyonların Düşürülmesi İçin Egzoz Sisteminin Tasarımı ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- Bai S., Tang J., Wang G., Li G., Soot loading estimation model and passive regeneration characteristics of DPF system for heavy-duty engine, *Applied Thermal Engineering*, 100, 1292-1298, 2016.
- Jiaqiang E., Zuo W., Gao J., Peng Q., Zhang Z., Effect analysis on pressure drop of the continuous regeneration- Diesel particulate filter based on NO<sub>2</sub> assisted regeneration, *Applied Thermal Engineering*, 100, 356-366, 2016.
- Benaqqa C., Gomina M., Beurotte A., Boussue M., Delattre B., Pajot K., Pawlak E., Rodrigues F., Morphology, physical, thermal and mechanical properties of the constitutive materials of diesel particulate filters, *Applied Thermal Engineering*, 62, 599-606, 2014.
- Tsuneyoshi K., Yamamoto K., Experimental study of hexagonal and square diesel particulate filters under controlled and uncontrolled catalyzed regeneration, *Energy* 60, 325-332, 2013.
- Keskin A., Dizel motorlarında partikül madde emisyon kontrolü ve gelişmeler, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük-Türkiye, 13-15 Mayıs. 2009.
- Millo F., Andreatta M., Rafigh M., Mercuri D., Pozzi C., Impact on vehicle fuel economy of the soot loading on diesel particulate filters made of different substrate materials, *Energy*, 86, 19-30, 2015.
- Jiao P., Li Z., Shen B., Zhang W., Kong X., Jiang R., Research of DPF regeneration with NOx-PM coupled chemical reaction, *Applied Thermal Engineering*, 110, 737–745, 2017.
- Pérez V.R., López A.B., Catalytic regeneration of Diesel Particulate Filters: Comparison of Pt and CePr active phases, *Chemical Engineering Journal*, 279, 79–85, 2015.
- Lupše J., Campolo M., Soldati A., Modelling soot deposition and monolith regeneration for optimal design of automotive DPFs, *Chemical Engineering Science*, 151, 36–50, 2016.
- Liu H., Wang Z., Zhang J., Wang J., Shuai S., Study on combustion and emission characteristics of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers/diesel blends in light-duty and heavy-duty diesel engines, *Applied Energy*, 185 (2), 1393-1402, 2017.
- Oravisjärvi K., Pietikäinen M., Ruuskanen J., Niemi S., Laurén M., Voutilainen A., Keiski R.L., Rautio A., Diesel particle composition after exhaust after-treatment of an off-road diesel engine and modeling of deposition into the human lung, *Journal of Aerosol Science* 69, 32–47, 2014.
- [https://www.Academia.edu/2567724/Emisyon\\_Kontrol\\_Y%C3%B6ntemleri](https://www.Academia.edu/2567724/Emisyon_Kontrol_Y%C3%B6ntemleri) 20 Mayıs 2016.
- Jiaqiang E., Zuo W., Gao J., Peng Q., Zhang Z., Effect analysis on pressure drop of the continuous regeneration- Diesel particulate filter based on NO<sub>2</sub> assisted regeneration, *Applied Thermal Engineering*, 100, 356-366, 2016.
- AVL-FIRE user guide, 2014.
- Sarli V.D., Landi G., Lisi L., Saliva A., Benedetto A. D., Catalytic diesel particulate filters with highly dispersed ceria: Effect of the soot-catalyst contact on the regeneration performance, *Applied Catalysis B: Environmental*, 197, 116–124, 2016.
- Imran A., Varman M., Masjuki H.H., Kalam M.A., Review on alcohol fumigation on diesel engine: A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 739-751, 2013.
- Rounce P., Tsolakis A., York A.P.E., Speciation of particulate matter and hydrocarbon emissions from biodiesel combustion and its reduction by aftertreatment, *Fuel*, 96, 90–99, 2012.
- Sezer İ., Effect of additives including nano materials on fuel properties and combustion characteristics, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416469>, 2018.
- Song H., Jacobs T.J., The influence of soot radiation on NO emission in practical biodiesel combustion, *Fuel*, 128, 281–287, 2014.