



**BİR EGR SOĞUTUCUSU GEOMETRİSİNİN DEĞİŞİMİNİN AKIŞ VE ISI
TRANSFERİNE ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ**

Şeyma Nur EKMEKÇİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Şeyma Nur EKMEKÇİ tarafından hazırlanan “BİR EGR SOĞUTUCUSU GEOMETRİSİNİN DEĞİŞİMİNİN AKIŞ VE ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nureddin DİNLER

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Haşmet TÜRKOĞLU

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Nuri YÜCEL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 19/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şeyma Nur EKMEKÇİ

19/06/2019

BİR EGR SOĞUTUCUSU GEOMETRİSİNİN DEĞİŞİMİNİN AKIŞ VE ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Şeyma Nur EKMEKÇİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Modern dizel motorlardan yayılan NO_x miktarını azaltan en yaygın teknoloji, Egzoz Gazı Resirkülasyon (EGR) sistemidir. EGR soğutucusu, EGR sistemindeki önemli bileşenlerden biridir. EGR soğutucuları, kabuk-boru tipi ısı değiştiricisi gibi çalışır; sıcak egzoz gazı borulardan geçirilir ve soğutucu akışkan kabuk boyunca soğutmayı sağlar. EGR soğutucusu, motor sıcaklığını düşürerek yüksek sıcaklıkta oluşan zararlı NO_x gazlarının kontrol edilmesine yardımcı olur. EGR soğutucusunun performansı büyük ölçüde soğutucu borularının ve dağıtıcının tasarımına, şekline ve boyutuna bağlıdır. Boruların boyutunu ve şeklini en uygun hale getirerek EGR soğutucusunun etkinliğini artırmak mümkündür. Bu çalışmada, temel tasarımlar düz EGR soğutucusu ve bölmeli EGR soğutucusu olmak üzere beş model üzerinden akış ve ısı transfer özellikleri incelenmiştir. Üç boyutlu EGR soğutucularındaki akışkanların sıcaklık, hız ve basınç bölgeleri simüle edilmiştir. Analiz için ticari bir yazılım olan ANSYS FLUENT programı kullanılmıştır. EGR soğutucuları sayısal olarak incelenirken egzoz gazının giriş debisi değiştirilmiştir. Elde edilen verilerle farklı EGR soğutucusu tasarımlarının ve egzoz gazı giriş debilerinin EGR performansı üzerine etkisi incelenerek sayısal olarak sunulmuştur. En yüksek soğutucu etkinliği (%77,8) ve sıcaklık düşüşü (%39,8), Model 2'deki bölmeli EGR soğutucusunda egzoz gazının giriş debisi en düşük (0,005 kg/s) olduğunda elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91411

Anahtar Kelimeler : Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR), egzoz gazı, içten yanmalı motor, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Sayfa Adedi : 99

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nureddin DİNLER

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CHANGE OF AN EGR
COOLER GEOMETRY ON FLOW AND HEAT TRANSFER

(M. Sc. Thesis)

Şeyma Nur EKMEKÇİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

The most common technology that reduces the amount of NO_x emitted by modern diesel engines is the Exhaust Gas Recirculation (EGR) system. The EGR cooler is an important component of the EGR system. EGR coolers are made up like the shell-tube heat exchangers with the hot exhaust gas being passed through the tubes and the coolant brought into and taken out of the shell chamber. Since the formation of NO_x gases is accelerated at high temperatures, controlling the temperature also controls the formation of harmful NO_x gases. The performance of the EGR cooler is largely dependent on the design, shape and size of the cooler tubes and diffuser. It is possible to increase the effectiveness of the EGR cooler by optimizing the size and shape of the tubes. In this study, flow and heat transfer properties of five models are investigated. The temperature, velocity and pressure regions of the fluids in three-dimensional EGR coolers are simulated. In the process of analysis, commercial ANSYS FLUENT software was used. While the EGR coolers were examined numerically, the inlet flow rate of the exhaust gas was changed. The effects of different EGR cooler designs and exhaust gas inlet flow rates on EGR performance are presented numerically. The highest cooler efficiency (77.8%) and the temperature drop (39.8%) were obtained when the inlet flow rate of the exhaust gas was the lowest (0.005 kg/s) in the Model 2 EGR cooler.

Science Code : 91411

Key Words : Exhaust Gas Recirculation (EGR), exhaust gases, internal combustion engine, Computational Fluid Dynamics (CFD)

Page Number : 99

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Nureddin DİNLER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyip engin bilgi birikimi ile bana yol gösteren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Nureddin DİNLER'e sonsuz saygı ve minnetlerimi sunarım. Yapmış olduğum çalışmanın basamaklarında bilgisi ile destek olan sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Tolga PIRASACI'ya teşekkürlerimi sunarım. Destek ve katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan ve tez çalışmalarım süresince beni destekleyen hayat arkadaşım Fatih EKMEKÇİ'ye teşekkür ederim. Bu günlere gelmemi sağlayan, eğitim hayatım boyunca beni teşvik ve terbiye eden fedakâr aileme gösterdiği sabır ve destek için teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. EGZOZ EMİSYONLARI İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER.....	13
3.1. Motorlu Araçlardan Kaynaklanan Emisyonlar	13
3.1.2. Motorlu araçlarda egzoz emisyonuna etki eden faktörler	16
3.2. Motorlu Araçlarda Emisyon Kontrol Sistemleri.....	20
4. EGZOZ GAZI RESİRKÜLASYON SİSTEMİ.....	23
4.1. EGR Sisteminin Avantajları ve Dezavantajları.....	26
4.2. EGR Sisteminin Yapısı	27
4.3. EGR Sisteminde Etkinlik	29
5. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL.....	31
5.1. Problemin Tanımı ve Geometrinin Belirlenmesi	31
5.2. Kabuller	36
5.3. Genel Denklemler	37
5.3.1. Süreklilik denklemi	37
5.3.2. Momentum denklemi	37
5.3.3. Enerji korunum denklemi.....	38
5.3.4. Türbülans denklemleri	39

	Sayfa
5.4. Sınır Şartları.....	40
5.4.1. Giriş sınır şartı	40
5.4.2. Çıkış sınır şartı.....	41
5.4.3. Duvar sınır şartı	41
6. SAYISAL ÇÖZÜM	43
6.1. Çözüm Ağ Yapısı.....	44
6.2. Genel Ayarlar	47
6.2.1. Enerji denkleminin çözdürülmesi ve akış türünün belirlenmesi	49
6.3. Çözücü Ayarları	50
6.4. Yakınsama Kontrolü.....	51
6.4.1. Çözümün yakınsaması	52
6.4.2. Çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı.....	53
6.4.3. Korunum denklemleri kontrolü	53
6.4.4. Çözümün ağ yapısından bağımsızlığı	54
6.5. Doğrulama Çalışmaları.....	54
7. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	59
7.1. Model 1 Analizi.....	60
7.2. Model 2 Analizi.....	66
7.3. Model 3 Analizi.....	72
7.4. Model 4 Analizi.....	78
7.5. Model 5 Analizi.....	84
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. NO _x emisyonlarını azaltma yöntemleri.....	21
Çizelge 3.2. NO _x azaltmada kullanılan yöntemlerin etkileri	22
Çizelge 5.1. EGR soğutucusu modelleri için tasarım parametreleri	31
Çizelge 5.2. Sınır şartları.....	40
Çizelge 6.1. Ağ yapısının kalitesini gösteren parametreler ve değerleri	47
Çizelge 7.1. Sayısal çalışmalarda kullanılan sınır şartları	59
Çizelge 8.1. Egzoz gazı debisi (0,0155 kg/s) için analiz sonuçları.....	91
Çizelge 8.2. Egzoz gazı debisi (0,01 kg/s) için analiz sonuçları.....	91
Çizelge 8.3. Egzoz gazı debisi (0,005 kg/s) için analiz sonuçları.....	91

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Motorlu araçlardan egzoz yoluyla atılan kirletici türleri	14
Şekil 3.2. Emisyonların yakıt fazlalık katsayısı ile değişimi	16
Şekil 3.3. Kirletici gazların çıkış noktalarındaki oranları	21
Şekil 4.1. İçten yanmalı motorda EGR uygulaması.....	24
Şekil 4.2. EGR oranının kirletici emisyonlara etkisi	25
Şekil 4.3. EGR sisteminin çalışması	28
Şekil 4.4. EGR soğutucusunun kesiti.....	29
Şekil 5.1. EGR soğutucusunun kesit görüntüsü.....	32
Şekil 5.2. Problemin genel tanımı ve sayısal çözüm alanı.....	33
Şekil 5.3. Soğutucunun Design Modeler'deki genel görünümü	34
Şekil 5.4. EGR soğutucusu geometrisi	35
Şekil 5.5. EGR soğutucusu borularının perspektif görünüşü.....	36
Şekil 6.1. Sayısal çalışmalarda kullanılan örnek ağ yapıları	45
Şekil 6.2. Hücre kalitesi değer aralıkları.....	45
Şekil 6.3. Ağ yapısının kalitesi	47
Şekil 6.4. Ağ yapısının kontrolü	48
Şekil 6.5. Genel ayarların görüntüsü.....	49
Şekil 6.6. Enerji denkleminin çözdürülmesi ve akış türü tanımlaması yapılması	50
Şekil 6.7. Çözüm yöntemleri ve çözüm için ilk değerlerin atanması	51
Şekil 6.8. Örnek bir çözümün yakınsama grafiği	53
Şekil 6.9. Örnek bir çözümün kütlenin korunumu kontrolü	54
Şekil 6.10. Reynolds sayısının egzoz gazının sıcaklığına etkisinin karşılaştırılması	55
Şekil 6.11. EGR soğutucusu borularının içindeki sıcaklık dağılımı.....	56

Şekil	Sayfa
Şekil 6.12. Egzoz gazının ortalama sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması	57
Şekil 7.1. Egzoz gazı giriş debilerinin karşılaştırılması.....	59
Şekil 7.2. EGR soğutucusunun hız dağılımı	60
Şekil 7.3. EGR soğutucusunun basınç dağılımı.....	61
Şekil 7.4. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı.....	62
Şekil 7.5. Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı	63
Şekil 7.6. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.....	64
Şekil 7.7. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü	65
Şekil 7.8. EGR soğutucusunun hız dağılımı	66
Şekil 7.9. EGR soğutucusunun basınç dağılımı.....	67
Şekil 7.10. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı.....	68
Şekil 7.11. Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı	69
Şekil 7.12. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.....	70
Şekil 7.13. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü	71
Şekil 7.14. EGR soğutucusunun hız dağılımı	72
Şekil 7.15. EGR soğutucusunun basınç dağılımı.....	73
Şekil 7.16. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı.....	74
Şekil 7.17. Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı	75
Şekil 7.18. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.....	76
Şekil 7.19. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü	77
Şekil 7.20. EGR soğutucusunun hız dağılımı	78
Şekil 7.21. EGR soğutucusunun basınç dağılımı.....	79
Şekil 7.22. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı.....	80
Şekil 7.23. Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı	81

Şekil	Sayfa
Şekil 7.24. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.....	82
Şekil 7.25. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü	83
Şekil 7.26. EGR soğutucusunun hız dağılımı	84
Şekil 7.27. EGR soğutucusunun basınç dağılımı.....	85
Şekil 7.28. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı.....	86
Şekil 7.29. Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı	87
Şekil 7.30. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.....	88
Şekil 7.31. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü	89

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
°C	Santigrat Derece
dak	Dakika
h	Saat
H	Hidrojen
H ₂	Hidrojen Molekülü
H ₂ O	Su
HC	Hidrokarbon
m	Metre
mm	Milimetre
K	Kelvin
kg	Kilogram
l	Litre
N ₂	Azot
NO	Azot Monoksit
NO _x	Azot Oksit
O	Oksijen
O ₂	Oksijen Molekülü
Pa	Pascal
PM	Partikül Madde
s	Saniye
SO ₂	Kükürt Dioksit

Kısaltmalar	Açıklamalar
EGR	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
HAD	Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği

1. GİRİŞ

Çevre kirliliğinin temel sebeplerinden birisi atmosfere bırakılan gazlardır. Bu gazlar soluduğumuz havayı vücudumuz için zararlı hale getirmekte ve bütün canlıların yaşamını tehlike altına sokmaktadır. Günümüzde, özellikle büyük şehirlerde hava kirliliğinin artması, ülkelerin önemli sorunlarından birisi durumuna gelmiştir. Bu kirlenmede, sanayileşme ile birlikte şehir içi ulaşımında kullanılan taşıtların çıkardıkları zararlı egzoz emisyonlarının önemli bir payı bulunmaktadır. Bu sebeple birçok ülke alternatif yakıt arayışlarını sürdürmekte ve taşıtlardan kaynaklanan bu kirleticileri azaltmaya yönelik önlemler almaktadır.

Endüstri ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte sayıları sürekli artan sanayi kuruluşları ve motorlu taşıtlar insan yaşamını kolaylaştırırken çevre ve hava kirliliğini de beraberinde getirmektedir. Kentlerde görülen hava kirliliğinin başlıca kaynaklarından biri fosil yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlardır.

İçten yanmalı motorlar ulaşım taşıtlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Taşıtlar birçok alanda büyük faydalar sağlamasına rağmen, artan nüfus ve alım gücünün iyileşmesine bağlı olarak sayılarında meydana gelen hızlı artış taşıtları çevre kirliliğinin baş aktörlerinden biri haline getirmektedir. İçten yanmalı motorlarda gerçekleşen yanma işlemi sonunda yanmış veya yanmamış gazlardan kaynaklanan emisyonlar çevreyi olumsuz etkileyerek insan sağlığını tehdit etmektedir.

Günümüzde, içten yanmalı motorlu araçlardan kaynaklanan emisyonların azaltılması için birçok sistem ve yöntem geliştirilmektedir. Çevreye zararlı emisyon salınımlarının sınırlandırılması ve hava kalitesinin artırılması amacıyla içten yanmalı motorlar için egzoz emisyon düzenlemeleri dünya çapında çok fazla güçlendirilmektedir. Uluslararası mevzuat, üreticileri sürekli daha az emisyon salınımı yapan araçlar ve motorlar imal etmeye zorlarken üreticiler de sürekli değişen ve gelişen teknolojinin de yardımıyla daha çevreci, ekonomik ve performanslı araçlar üretmektedir. Artan emisyon kısıtlamalarını karşılayabilmek amacıyla içten yanmalı motorlardan kaynaklanan emisyonları azaltmaya yönelik sistemler geliştirilmektedir.

Enerji tasarrufu, çevresel kalitenin arttırılmasına yardımcı olan enerji hizmetlerinin kullanılmasını azaltır. Enerjinin verimli bir şekilde kullanılması, enerji tasarrufu için çok önemli bir faktördür. Hem enerji tasarrufu yapmak hem de egzoz gazı emisyonlarını azaltmak için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Motorlu taşıtların egzozundan çıkan emisyonların azaltılması için doğalgaz, metil ve etil alkol gibi alternatif yakıtların kullanılmasının yanı sıra Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR), dizel motorlu araçlarda partikül filtresi ve katalitik konvertörler gibi konularda çalışmalar yapılmaktadır (MEB, 2013: 4). EGR sistemlerinin kullanımı ile dizel motorlarda azot oksit (NO_x) emisyonunun azaltılması, çevre açısından en umut verici teknolojilerden biridir. EGR soğutucusu, motorlardan çıkan NO_x maddesinin kirliliğini azaltarak çevre kalitesini arttırmaya yardımcı olur.

EGR sistemi, egzoz gazının bir kısmının yeniden silindir içine yönlendirilerek yanma sonucunda oluşan sıcaklığı azaltmayı, bu şekilde çevreye zararlı NO_x gazlarını kontrol etmeyi hedefleyen sistemdir. Günümüzde hem benzinli hem de dizel motorlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. EGR soğutucusu, EGR sistemindeki önemli bileşenlerden biridir. EGR sistemi genellikle iki valf ve bir EGR soğutucusundan oluşmaktadır (Milli Eğitim Bakanlığı [MEB], 2013: 30).

EGR soğutucuları, kabuk-boru tipi ısı değiştiricisi gibi çalışır; sıcak egzoz gazı borulardan geçirilir ve soğutucu akışkan kabuk boyunca soğutmayı sağlar. EGR sistemi, egzoz gazının yanma odasına yani silindire dönmeden önce EGR soğutucusu boyunca soğutulması yoluyla, egzoz gazının bir bölümünün yanma odasına geri gönderilmesi ilkesi ile çalışır. Motora giren taze havanın egzoz gazı ile karışması, yanma sıcaklığını ve dizel motorlarda fazla oksijen miktarını azaltır. EGR soğutucusu, motor sıcaklığını düşürerek yüksek sıcaklıkta oluşan zararlı NO_x gazlarının kontrol edilmesine yardımcı olur (MEB, 2013: 30).

Uluslararası literatürde bu konuda yapılan çalışmalar olmasına rağmen ulusal anlamda yapılan çalışmalar oldukça azdır. EGR soğutucusunun performansı büyük ölçüde soğutucu borularının ve dağıtıcının tasarımına, şekline ve boyutuna bağlıdır. Boruların boyutunu ve şeklini en uygun hale getirerek EGR soğutucusunun etkinliğini artırmak mümkündür (Ghassemlou ve Torkaman, 2016).

Bu çalışmada, içten yanmalı motorlarda kullanılan Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR) sisteminde bulunan soğutucu içindeki akışın minimum basınç kaybına sebep olacak şekilde uygun geometrinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için farklı egzoz gazı debileri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olan ANSYS FLUENT yardımıyla EGR soğutucusuna giriş şartları olarak uygulanmıştır. Uygun geometrinin belirlenmesinde kullanılan ANSYS FLUENT yazılımı ile literatürde bulunan deneysel ve sayısal sonuçlarla örtüşen yaklaşımlar ortaya koyan bir bilgisayar simülasyonunun elde edilmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan soğutucu modelleri içerisindeki akış ve sıcaklık düşüşü türbülanslı şartlar için incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, EGR soğutucusu geometrisinin akış ve ısı transferine etkisini değerlendirmek için yapısal olarak farklı geometriler araştırılmıştır. Literatürde bulunan bir EGR geometrisi temel alınarak farklı geometrik düzenlemelerin etkisi incelenmiştir. Öncelikli amaç EGR soğutucusunda akışı ve ısı transferini artırmak olduğundan dolayı farklı soğutucu tasarımı da yapılmıştır. Çalışmanın sonunda, ANSYS FLUENT yazılımıyla gerçekleştirilen sayısal simülasyon ile gerçek EGR sistemindeki koşullar elde edilmeye çalışılmıştır.

Elde edilen verilerle farklı soğutucu tasarımlarının ve egzoz gazı giriş debilerinin EGR performansı üzerine etkisi incelenerek sayısal olarak sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilecek bulguların, daha farklı EGR soğutucularının geliştirilmesine katkıda bulunması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dizel motorlardan NO_x ve is emisyonlarını aynı anda azaltmak için bir yöntem bulmak amacıyla çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Son yıllarda, dizel otomobillerde EGR soğutucularının kullanımı hız kazanmış ve bununla ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Uluslararası literatürde bu konuda yapılan çalışmalar olmasına rağmen ulusal anlamda yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmada detaylı bir literatür taraması yapılarak emisyon azaltma yöntemlerindeki gelişmeler incelenmiştir.

Shabgard, Kheradmand, Farzaneh ve Bae'nin (2017) çalışmasında, EGR soğutucusu içindeki, ana akışkan olarak su içeren nano-akışkanların türbülanslı akışı sayısal olarak simüle edilmiş, ısı ve hidrodinamik davranışları incelenmiştir. Ana akışkan olarak su ve SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 ve Cu nano-partikülleri içeren dört nano-akışkanın ısı ve hidrodinamik davranışı, geniş bir Reynolds sayısı aralığı ve çeşitli partikül konsantrasyonları üzerinden karşılaştırılmıştır. Doğrulama, literatürde bulunan deneysel verilerle sağlanmıştır. Al_2O_3 -su nano-akışkanının en büyük ısı transferi artışını sağladığı bulunmuştur. Ayrıca, Reynolds sayısı arttıkça, ısı transfer oranının artışında nano-akışkanların etkinliğinin azaldığı bulunmuştur.

Ghassemlou ve Torkaman (2016), soğutucunun en uygun tasarımının yanı sıra egzoz gazlarının en uygun sıcaklıklarının belirlenmesi, verimlilik artışı, ağırlık azaltılması, boyut ve giderlerin azaltılması, tortu azaltılması ve önemli miktarda kükürt içeren dizel yakıt kullanımı ile en uygun performansı araştırmışlardır. Tek yönlü spiral boru kullanımı, soğutucunun ısıl etkinliğini tipik soğutuculara göre % 10 daha fazla arttırmış ve çok yönlü spiral boruların kullanılması borulardaki yarı düzgün akış nedeniyle basınç düşüşünün azalmasına neden olmuştur. Ayrıca akışkan hızının artması, tortunun azaltılmasına, kendi kendini temizlemeye ve ısı transferinin artmasına yardımcı olmuştur. Düzgün akış dağılımı, ısı verim artışı ve basınç düşüşünün azaltılması kapsamında giriş çapı / kabuk çapı oranı incelenmiştir. % 60 ila % 70 çap oranlarına sahip standart dağıtıcı şekli en uygun sonucu vermiştir.

Hoseini, Najafi ve Ghobadian (2016), üç tip EGR soğutucusunun (yarı, tam spiral ve tam düz) ısı transfer özelliklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak, F-Spiral EGR

soğutucusundaki basınç düşüşünün diğer EGR soğutucularından daha fazla olduğunu bulmuşlardır. F-spiral ve S-spiral EGR soğutucusunun dizel motorunda kullanılmasını önermişlerdir. S-spiralin ısı transferi verimliliğinin 0,17 değeri ile F-düz EGR soğutucusundan daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. S-spiral ve F-spiral EGR soğutucusunun ısı transferi veriminin aynı olduğu sonucuna varmışlardır.

Kumar, So. ve Kumar, Sa. (2016), tek bir borunun içindeki egzoz gazı akışının etkileri ve ayrıca kabuk kısmında bulunan soğutucu akışkan ile etkileşime girerken meydana gelen ısı transferini çalışmışlardır. Akış düzenini ve bu akışkanlar arasındaki ısı enerjisi etkileşimlerini anlamaya odaklanmışlardır. Tüm çalışma HAD üzerinde ve ANSYS FLUENT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Türbülans oluşturmak için kanatçıkları kullanarak kanatçıklarla ve kanatçıklar olmadan karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır.

Duraisamy, Bhaleghare Santosh, Sundaralingam, Thundil Karuppa Raj ve Elango (2012), sayısal tekniklere dayanan hesaplamalı akışkanlar dinamiği araçlarını kullanarak EGR soğutucusunu optimize etmişlerdir. Akış ve ısı dağılımı, EGR soğutucusunun optimize edilmiş geometrisi için analiz edilmiştir. Çalışma, STAR CCM + kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kütle, momentum ve enerjinin korunumu temel denklemleri çözülmüştür.

Haşimoğlu, İçingür ve Öğüt (2002), EGR oranının dizel motor üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, egzoz gazları belirli oranlarda (% 10, 20, 30) motorun emme hattına geri gönderilerek motor performansı ve egzoz emisyonlarındaki değişim izlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, NO_x emisyonları önemli ölçüde azalmasına rağmen duman emisyonu ve özgül yakıt tüketimi olumsuz sonuçlar vermiştir. Tam yük koşullarında, EGR oranının % 30'dan daha fazla artırılması, motorun performansını olumsuz yönde etkileyeceği için tavsiye edilmemiştir. Hem NO_x emisyonları, hem de diğer parametreler dikkate alındığında ideal EGR oranı % 10 olarak bulunmuştur.

Huang, Yu ve Lu (2008), üç farklı EGR soğutucusu modelini araştırmışlardır. Geleneksel bir model olan A modelini ve soğutma alanına sarmal bir bölme ekleyerek B ve C modellerini geliştirmişlerdir. B ve C modellerinde, soğutucu akışkanın giriş yönleri farklıdır ve bu, çoğunlukla akış direncini etkilemektedir. Sonuçlar, gelişmiş yapıların

sadece soğutucu sıvının akış yolunu uzatmakla kalmayıp, aynı zamanda soğuk ve sıcak akışkanlar arasındaki ısı transfer oranını da arttırdığını göstermektedir. Gelişmiş yapıların geleneksel yapıya göre daha güçlü olduğu sonucuna varmışlardır.

Jang, Park, Choi ve Kim (2011), kabuk-boru tipi ve yığın tipi EGR soğutucularının etkinliğini araştırmak için motor dinamometresi deneyleri yapmışlardır. Sonuçlar, yığın tipi EGR soğutucusunun ısı transferinin, artan yüzey alanı ve soğutucu akışının daha düzgün karışmasından dolayı kabuk-boru tipinden çok daha etkili olduğunu ve düşük egzoz gazı sıcaklığında yüksek sıcaklıktakinden daha fazla partikül madde üretildiğini göstermektedir.

Kim ve diğerleri (2008), bir EGR soğutucusunun iç şeklinin ısı değiştiricisi verimliliğini nasıl etkilediğini araştırmak için motor dinamometresi deneyleri ve sayısal analizler yapmışlardır. Düz ve spiral EGR soğutucularında ısı değiştiricisi verimleri incelenmiştir. Bu EGR soğutucularının içindeki sıcaklık ve basınç dağılımları, FLUENT sayısal paket programı kullanılarak üç boyutta elde edilmiştir.

Shrestha, Chung, Han, Hong ve Kim (2016), kabuk-boru tipi EGR'nin ısı performansı için hesaplamalı araştırma yapmışlardır. EGR'nin üç boyutlu modellenmesi ve EGR soğutucusu içindeki akış alanlarını ve sıcaklık dağılımını çözmek ve simüle etmek için FLUENT kullanılmıştır. Ayrıca, EGR'nin ısı performansı analiz edilmiş, karşılaştırılmış ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Kökkülünk, Parlak, Ayhan ve Cesur (2014), Taguchi Tasarım Yöntemlerini kullanarak en uygun çalışma şartlarını, motor performansını ve kirletici emisyon koşullarını incelemişlerdir. Çalışmada, emme manifolduna farklı oranlarda su buharı püskürtülmesi ve egzoz gazları resirkülasyonunun (EGR), NO_x emisyonları ve performansa etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda; farklı motor devirleri (1200, 1600, 2000 ve 2400 rpm), buhar oranları (% 10, % 20 ve % 30) ve EGR oranları (% 10, % 20, % 30) için performans ve emisyonlar standart değere göre karşılaştırılmıştır. Buhar ve EGR oranları emisyon parametrelerinde etkili iken, bu parametrelerin öneminin etkili güç ve tork için düşük olduğu bulunmuştur. Böylece Taguchi yönteminin, dizel motorların performans ve emisyon problemlerini çözmek için uygun olduğu gösterilmiştir.

Kökkülünk, Parlak, Bağcı ve Aydın (2012), NO_x emisyonlarını azaltmak için doğrudan enjeksiyonlu dizel motor üzerinde EGR ile buhar enjeksiyonu yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, performans ve NO_x , CO, CO_2 , HC emisyonları açısından standart dizel ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlarda, standart dizel ile karşılaştırıldığında NO_x emisyonlarının, EGR ile buhar enjekte edilmiş dizel motorda % 77,3'e düştüğü tespit edilmiştir. Özgül yakıt tüketimi, % 20 buhar enjeksiyonunda ve iki EGR oranında (% 20 ve % 30) artmıştır. Sonuç olarak, EGR ile buhar enjeksiyonu, NO_x emisyonlarında ve özgül yakıt tüketiminde olumlu sonuçlar vermiştir.

Al-Janabi ve Malayeri (2017), yüzey geometrisinin EGR soğutucularındaki kurum partikülü oluşumuna etkisini değerlendirmek için dört adet yapısal olarak farklı yüzeyi, temiz ve ciddi kirlenme koşulları altında araştırmışlardır.

Castano, Sanchez, Grande ve Paz (2007), oluklu boruların EGR soğutucusunda kullanılmasının, aynı ebattaki düz borulara kıyasla ısıl etkinlik kaybını azaltacağını bulmuşlardır.

Gawai ve Dalvi (2016), yanma işlemini gerçekleştirmek için motora uygun egzoz gazı sıcaklığını bulmak amacıyla bölmelerde, parametrelerde ve sıcaklıkta çeşitli değişiklikler sağlayarak EGR soğutucusunda bulunan kabuk-boru tipi ısı değiştiricisinin performansını araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Üç boyutlu EGR soğutucusu modelleri HAD yazılımı kullanılarak denenmiş ve EGR soğutucularındaki akışkanların sıcaklık, hız ve basınç bölgeleri simüle edilmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. Soğutucuların performansları farklı değişikliklerle analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Karanje ve Bhusnoor (2017), geliştirilmiş emisyon ve motor egzozundan yüksek ısı geri kazanımı için EGR soğutucusunun teorik analizini ve HAD simülasyonunu yapmışlardır. CRDI motorunda üç tip EGR soğutuculu deneyler yapılmış ve sonuçlar geliştirilen modelle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ile geliştirilen modelin uyumlu olduğu görülmüştür.

Kimura, Aoki, Kitahara ve Aiyoshizawa (2001), düzenlenmiş kinetik yanma modelinde yakıt tüketimini artırmadan eş zamanlı ve ön karışimli yanmayı sağlamışlardır. Yüksek EGR oranlarında oksijen konsantrasyonunu azaltarak NO_x emisyonlarını azaltmışlardır.

Kwon ve diğerkleri (2017), taşınabilir emisyon ölçüm sistemi kullanan Euro 6 hafif hizmet dizel araçlarından elde edilen NO_x emisyonlarının özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada düşük atmosfer sıcaklıklarında NO_x azaltıcı sistemlere ve EGR'ye ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Lee ve Min (2014), iç şekil özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin EGR soğutucularının ısı transfer verimliliğini nasıl artırabileceğini değerlendirmek için sayısal analizler, teçhizat testleri ve motor testleri yapmışlardır. EGR soğutucularının ısı transfer verimleri, bir kirlenme işlemi sırasında sayısal ve deneysel olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, test edilen ikinci tip oval EGR soğutucusunun, ilk tip oval EGR soğutucusundan veya incelenen kabuk-boru tipi soğutucudan daha yüksek bir ısı transfer verimliliği sergilediğini göstermiştir.

Mohammadi ve Malayeri (2015), çeşitli EGR soğutucusu yapıları geliştirmişlerdir. Daha sonra sayısal akışkanlar dinamiği kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, düz plakalı dikdörtgen EGR soğutucusu ile karşılaştırılmıştır. Aynı giriş hızı için EGR yüzey yapısının değiştirilmesinin, kayma gerilmesinde önemli bir artışa neden olabileceğinin altını çizmişlerdir. Sayısal bulgular, kayma gerilmesinin % 150'den % 350'ye yükseldiğini ve genel basınç düşüşünün her zaman 550 mbar'ın altında olduğunu göstermiştir. Geometrik modifikasyonlar, EGR'nin etkili ısı transfer alanında % 7'lik bir azalmaya neden olmuştur.

Manimaran ve Thundil Karuppa Raj (2013), HAD ile üç bölgeli genişletilmiş alevli model kullanarak doğrudan enjeksiyonlu sabit hızlı dizel motorda egzoz gazı resirkülasyonunu değiştirmişlerdir. Üç bölge; karıştırılmamış yakıt bölgesi, karışık gazlar bölgesi, karıştırılmamış hava ve EGR bölgesidir. Karışık bölge, yanmanın gerçekleştiği diğer iki bölgedeki gazlar arasında, türbülanslı ve moleküler karışımın sonucudur. Modeli deneylerle doğrulamak için ön çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışma, silindirdeki EGR'yi değiştirerek gerçekleştirilmiştir. EGR arttıkça azot oksitler, dizel motorlarda gözlenen genel eğilimde azalmıştır. Yanma odasındaki alev sıcaklığının EGR'deki artış ile düştüğünü göstermişlerdir. Azot oksitler azaldıkça, düşük oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak kurumun arttığını bulmuşlardır. Silindirdeki sıcaklık konturları ve reaksiyon değişkeni, EGR arttıkça yanmanın gerilediğini ortaya koymuştur.

Mani, Nagarajan ve Sampath (2010), % 100 atık plastik yağ kullanarak soğutulmuş EGR'nin dizel motor üzerindeki etkisini araştırmışlardır. EGR hızının artmasıyla NO_x , CO, CO_2 ve duman emisyonlarının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Paz, Suarez, Concheiro ve Porteiro (2013), kurum birikme-giderme dengesine dayalı olan üç boyutlu bir geçici kirlenme modelinin gerçek bir EGR soğutucusuna uygulanmasını sunmuşlardır. Modelin HAD uygulaması ANSYS FLUENT'te yapılmıştır. Sonuçlar, egzoz ortamında çalışan soğutucunun deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tüm soğutucunun zaman içindeki performans düşüşünün, makul bir hesaplama maliyetiyle tahmin edilebileceğini doğrulamaktadır.

Shah ve Namdeo'nun (2014) çalışmasında, Pro / Engineer Wildfire yazılımı kullanılarak EGR soğutucusunun iki modeli (model-a ve model-b) geliştirilmiştir. Model-a, konik şekilli dağıtıcıları (gaz giriş / çıkış odası) olan düz borulu, tek geçişli, bölmeli, kabuk-boru tipi ısı değiştiricisidir. Model b, Model a'da olduğu gibi aynı boru düzenine sahip, ancak düz borular, iç yüzey alanını arttırmak için içten kanatlı borular ile değiştirilmiştir. Kanatlı borular, düz borularla aynı dış çapa ve aynı tüp malzemesine sahiptir. Model a ve Model b'de hem soğutucu akışkanın hem de egzoz gazının giriş koşulları aynıdır. Bu modeller ANSYS FLUENT yazılımı ile analiz edilmiştir. HAD sonuçları, düz tüplerin içten kanatlı tüplerle değiştirilmesiyle, soğutucu akışkan ile egzoz gazları arasındaki ısı transfer oranının arttığını göstermektedir.

Guerra (2017), EGR soğutucularında kirlenme etkisinin, nedenlerinin ve bileşenlerinin performansı üzerindeki sonuçlarının detaylı bir çalışmasına odaklanmıştır. Analiz, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı ANSYS FLUENT'teki simülasyonların gerçekleştirilmesiyle sağlanmıştır. Isı değiştiricilerinin işleyişinde büyük etkiye sahip olan faktörleri araştırmıştır.

Lutz (2004), hâlihazırda kullanılan sistemlere kıyasla devridaim oranını arttırmak ve çok daha yüksek bir basınç seviyesine ulaşmak için tasarlanan EGR soğutucularının, güç yoğunluğu ve mutlak performansının, basınç dayanımı ve titreşime dayanıklılığının artırılması ve kirlenmesinin daha fazla azaltılmadığı takdirde en azından mevcut seviyelerde tutulması gerektiğini belirtmiştir.

Xie, Hong, Su, Zhang ve Jiang (2017), sıcak EGR ilavesinin motorun yanması ve partikül

sayısı emisyon karakteristikleri üzerine etkisini, bir kıvılcım ateşlemeli GDI motorunda deneysel olarak araştırmışlardır. Soğutulmuş ve sıcak EGR ilavesi yöntemleri arasındaki farklı etkiler karşılaştırılmıştır. Farklı hız ve yüklerde altı motor çalışma koşulunda yakıt tüketimi ve partikül sayısı emisyonu değişimleri analiz edilmiştir. Araştırma sonucu; sıcak EGR oranı % 20'ye yükseldiğinde, sadece fren özgül yakıt tüketimi (BSFC) değil, aynı zamanda NO_x ve partikül sayısı emisyonları da düşürülmüştür. Soğutulmuş EGR ile karşılaştırıldığında, sıcak EGR ile alev gelişim ve yayılma hızları artırılmıştır. Motor devri arttıkça ve yük azaldıkça, sıcak EGR yöntemi ile motor yakıt tüketimi ve emisyonu artmıştır.

Bu çalışmada detaylı bir literatür taraması yapılarak emisyon azaltma yöntemlerindeki gelişmeler incelenmiştir. Yapılan taramada, uluslararası literatürde bu konuda yapılan çalışmalar olmasına rağmen ulusal anlamda yapılan çalışmaların oldukça az olduğu görülmüştür. Özellikle tez çalışması gibi kapsamlı bir çalışma pek fazla bulunmamaktadır. Ulusal anlamda yapılan çalışmalarda, EGR oranının dizel motor üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada ise farklı soğutucu tasarımlarının ve egzoz gazı giriş debilerinin EGR performansı üzerine etkisi incelenerek sayısal olarak sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilecek bulguların, farklı şekilde yapılandırılmış EGR soğutucularının geliştirilmesine katkıda bulunması amaçlanmıştır.

3. EGZOZ EMİSYONLARI İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER

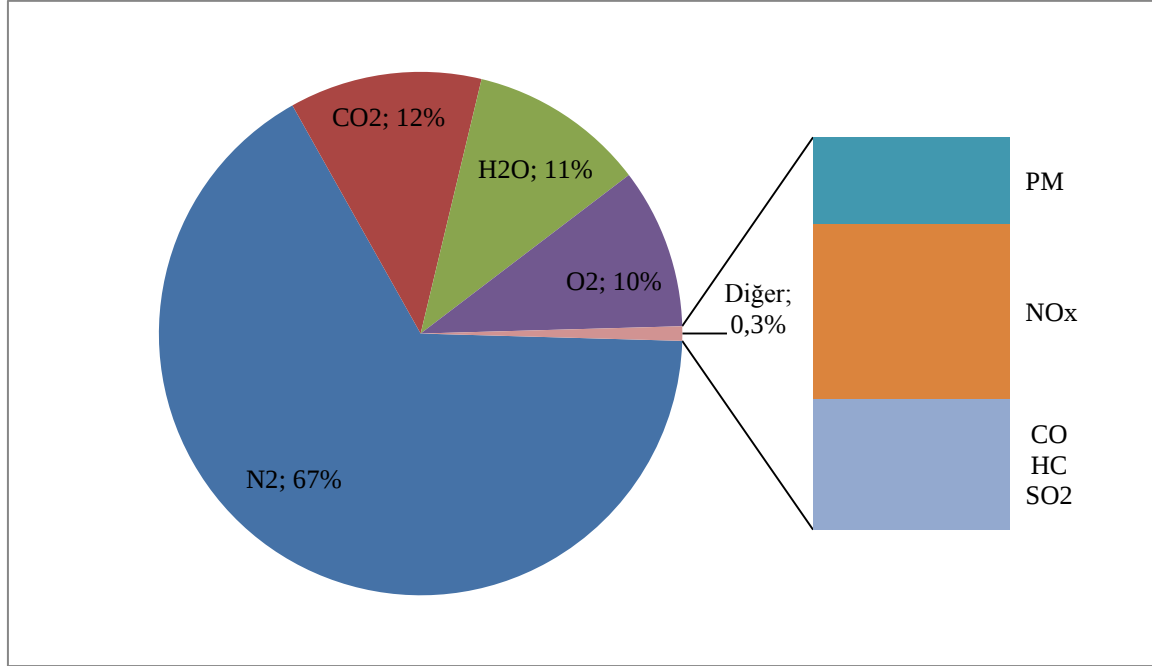
İçten yanmalı motorlar ulaşım taşıtlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda gerçekleşen yanma işlemi sonunda havaya verdikleri kirletici egzoz emisyonları çevremizi olumsuz etkileyerek insan sağlığını tehdit etmektedir.

Atmosferdeki kirleticiler, emisyon kaynaklarından havaya doğrudan verilen kirleticiler ve bu kirleticilerin atmosferde gerçekleştirdiği kimyasal olaylar sonucunda ortaya çıkan kirleticiler olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. Emisyonlar, havanın doğal yapısında bulunan gazların karışımını değiştiren ve atmosferde katı, sıvı ve gaz olarak bulunabilen kimyasal maddelerdir (MEB, 2011: 4).

Ulaşım araçları arasında gerek kirletme potansiyelinin fazla olması gerekse yaygınlığı nedeniyle içten yanmalı motorlu araçlar hava kirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Diğer yandan, çok sayıda değişkene bağlı olması nedeniyle bu kirleticiler, kontrolü en güç kaynakları oluşturmaktadır. Taşıtların oluşturduğu kirlenme; motor ve yakıt türü, aracın yaşı, bakım durumu, motor teknolojisi, aracın çalışma koşulu, yüklenmesi, hızı ve aracın bulunduğu trafik ve yol koşullarına bağlıdır. Bu nedenle taşıt emisyonlarının belirlenmesi ve bunların sınırlandırılması son derece güçtür (Marmara Araştırma Merkezi [MAM], 1993: 81).

3.1. Motorlu Araçlardan Kaynaklanan Emisyonlar

Emisyonlar, içten yanmalı motorlarda yakıt hava karışımının yanması sonucu açığa çıkan zararlı gazların oluşturduğu kimyasal maddelerdir. Motorlarda kullanılan yakıtların hava ile yanması sonucunda karbondioksit (CO_2), kükürt dioksit (SO_2), su (H_2O), oksijen (O_2) ve azot (N_2) gibi emisyonlar oluşmaktadır (Şekil 3.1). Eğer tam yanma olmayıp parçalanma varsa ek olarak karbonmonoksit (CO), hidrojen (H_2) ve azot oksit (NO) gibi ürünler de ortaya çıkmaktadır (MEB, 2013: 29).



Şekil 3.1. Motorlu araçlardan egzoz yoluyla atılan kirletici türleri (MEB, 2013: 29)

Atmosferde doğal olarak bulunan oksijen (O₂), karbondioksit (CO₂), su buharı (H₂O), hidrojen (H₂) ve azot (N₂) zararsız gazlar olduğundan kirletici egzoz emisyonları olarak kabul edilmemektedir. Egzoz gazı içerisindeki azot oksit (NO_x), karbonmonoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), partikül madde ve hidrokarbonlar (HC) ise zehirli egzoz emisyonları olduğundan kirletici olarak kabul edilmektedir. Egzoz gazıyla ortama bırakılan hava kirletici emisyonlarının olumsuz etkileri aşağıda açıklanmıştır.

Karbonmonoksit (CO), silindir içerisinde yanma esnasında yakıtın yeterli miktarda oksijen ile reaksiyona girememesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Zengin karışımla çalışan motorlarda daha çok görülmektedir. Fakir karışımla çalışan motorlarda ise heterojen karışım, silindir içerisinde sıcaklık dağılımının homojen olmaması ve karbonmonoksitin oksijenle tekrar reaksiyona girmeden egzozdan dışarıya atılması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Dizel motorlarda genellikle fakir karışım oranları ile çalışıldığı için karbonmonoksit emisyonu düşük olmaktadır. Renksiz ve kokusuz olan karbonmonoksit gazı, kandaki oksijen taşıyıcı hemoglobine bağlanarak dokulardaki oksijen miktarını azaltmaktadır. Karbonmonoksitin oksijen taşıma kapasitesini azaltması sonucunda kandaki oksijen yetersizliği nedeniyle kan damarlarının çeperleri, beyin ve kalp gibi hassas organ ve dokularda fonksiyon bozuklukları meydana gelmektedir (Kaytakoğlu, Var ve Öcal, 1995).

Karbondioksit (CO_2), renksiz ve yanmayan bir gazdır. Yanma sonucunda ortaya çıkan gazlar arasında en zararsız olan gazdır. Karbondioksit zehirli bir gaz değildir ancak atmosferdeki oranı sınır değerleri aştığında küresel ısınmaya sebep olmaktadır. CO_2 gazı bitkilerin fotosentez yapması sonucunda oksijene dönüştürülmektedir (MEB, 2011: 16).

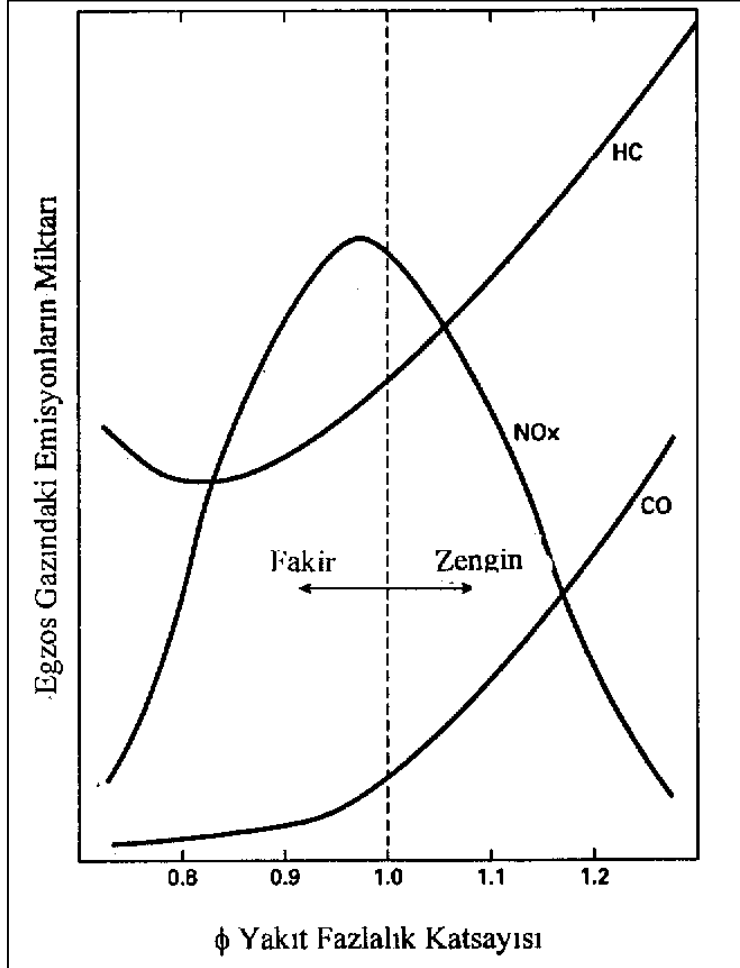
Hidrokarbon (HC), içten yanmalı motorlarda hidrokarbonlu yakıtların tam yanmaması ve yakıtın buharlaşması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Motor hafif yük altındayken yanma odasında oluşan zengin karışım, HC emisyonunun büyük bir kaynağıdır (MEB, 2011: 17).

Azot Oksitler (NO_x), yanma olayından sonra havaya verilen en önemli kirleticiler arasında yer almaktadır. NO_x oluşumu da diğer emisyonlar gibi motor hızı, yanma odası sıcaklıkları, O_2 konsantrasyonu, püskürtme zamanı gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Azot oksit oluşumunu etkileyen birçok faktör bulunsada yanma sonucunda silindir içerisindeki sıcaklığın yükselmesi ve buna bağlı olarak oksijen konsantrasyonunun artması ile birlikte NO_x oluşumu da artmaktadır. Bundan dolayı NO_x emisyonunu azaltmanın yollarından biri de silindir içerisindeki sıcaklığı düşürmektir (İlkılıç, Behçet, Aydın ve Aydın, 2009). Yanma odası içindeki karışımın egzoz gazları ile seyreltilmesi sonucu yanma sonu sıcaklıkları, dolayısıyla açığa çıkan NO_x emisyonları azaltılmaktadır (İçingür ve Salman, 1993).

Çok yüksek sıcaklıkta olan egzoz gazı içeri alınmakta olan temiz havanın sıcaklığını arttırırken yoğunluğunu azaltmaktadır. Bu durum içeri alınan havanın normalden çok yüksek olmasından dolayı yanma sonu sıcaklığının artmasına ve NO_x oluşumunun hızlanmasına neden olabilmektedir (Uyumaz, Boz, Yılmaz, Solmaz ve Polat, 2017). Tutuşma gecikmesinin kısılması, özellikle yüksek setan sayılı yakıtlar kullanıldığında yanma odasında biriken yakıt miktarını ve ani yanma periyodundaki sıcaklığı azalttığı için NO_x emisyonunun düşmesine neden olmaktadır. Dizel motorlarda karışımın oluşmasında etkili olan türbülans oranı, enjektör memesi delik sayısı, yanma odası tasarımı, püskürtme basıncı gibi parametreler NO_x oluşumuna sebep olmaktadır (Uyumaz ve diğerleri, 2017).

Genel olarak, buji ateşlemeli motorlarda emisyonlar, yakıt fazlalık katsayısına bağlıdır. Hava/yakıt oranının azaltılması NO_x emisyonlarını azaltmaktadır. Ancak dizel motorlarda yakıt püskürtmesinin düzgün yapılamaması nedeniyle NO_x emisyonlarının azaltılması daha fazla olmamaktadır.

Şekil 3.1’de buji ateşlemeli bir motorun emisyonlarının yakıt fazlalık katsayısına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir (Heywood, 1988: 649).



Şekil 3.2. Emisyonların yakıt fazlalık katsayısı ile değişimi (Heywood, 1988)

3.1.2. Motorlu araçlarda egzoz emisyonuna etki eden faktörler

Karayolu taşıtlarından kaynaklanan ve atmosferi kirleten emisyonlar karbonmonoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC) ve azot oksitlerden (NO_x) oluşmaktadır. Ayrıca dizel motorlu araçlardan kaynaklanan partikül madde (PM) emisyonları da bulunmaktadır. Yakıt püskürtme basınçlarının artırılması, enjektörlerin silindir duvarlarına yakın yerleştirilmesi ve damlacık çaplarının azaltılması HC ve CO emisyonlarını azaltırken NO_x emisyonlarını arttırmaktadır (Borat, Balcı ve Sürmen, 1994).

Bu emisyonların oluşumunda motorun çalışma koşulları, motorun ve taşıtın yapısal

özellikleri kadar etkin olmaktadır. Dolayısıyla taşıtın çalışması sırasında hava fazlalık katsayısının, motor devrinin, ateşleme zamanının, motor ve ortam sıcaklıklarının değişimi yanma sürecini etkilemekte ve emisyonlar üzerinde etkin rol oynamaktadır. Bu nedenle taşıtın boşta çalışma, hızlanma, yavaşlama, sabit hızda seyir gibi farklı çalışma koşullarında farklı emisyon değerleri elde edilmektedir. Yapılan araştırmaların amacı, en az emisyon salınımı ile en verimli çalışan sistemlerin geliştirilmesidir.

Motorlu araçlarda egzoz emisyonuna etki eden birçok faktör vardır. Püskürtme avansının değiştirilmesi, fakir ya da zengin yanma, sıkıştırma oranının değiştirilmesi, emme supabı ve ön yanma odasının özellikleri motordaki yanma işlemine etki eden önemli parametrelerdir (Haşimoğlu ve diğerleri, 2002). Egzoz gazıyla ortama bırakılan hava kirletici emisyonlarına etki eden faktörler aşağıda açıklanmıştır.

Sıkıştırma oranı

Buji ile ateşlemeli motorlarda oluşan süreçleri anlatan Otto çevrimi, verimin hacimsel sıkıştırma oranıyla değişimini göstermektedir.

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (2.1)$$

Burada kullanılan;

η : Verim

ε : Hacimsel sıkıştırma oranı

k : C_p/C_v için kullanılan özgül ısı kapasitesi oranı

Sıkıştırma oranı arttıkça ısı verim artmakta ve özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Yakıt ekonomisinin sağlanması emisyon değerlerini de düşürmektedir (MEB, 2011: 35). Sıkıştırma oranının artması içten yanmalı motorlarda tutuşma gecikmesini kısaltarak NO oluşumunu azaltmaktadır. Fakat bu da sürtünmeyi arttırdığından çevrim verimi olumsuz yönde etkilenmektedir. Sıkıştırma oranının artmasıyla yanma odasındaki ortalama gaz hızlarında, sıcaklık ve basınç seviyesinde artış görülmektedir. Bu da yanmanın gerçekleştiği süre zarfında HC miktarını olumsuz yönde etkilemektedir.

Hava / yakıt oranı

Motorda en ekonomik çalışma fakir karışımla sağlanmaktadır. Maksimum güç alınması için ise zengin karışım olması gerekmektedir. Motorlarda ekonomik çalışmanın ölçümü, birim güç için birim zamanda harcanan yakıt miktarını veren efektif yakıt sarfiyatıdır. Motorun farklı çalışma koşullarında hava/yakıt oranının düzgün bir şekilde sağlanması, değişimin en düşük seviyede kalması gerekmektedir (MEB, 2011: 36).

Ateşleme avansı

Ateşleme avansı artınca yakıt ekonomisi olumlu yönde etkilenmektedir. Ancak ateşleme avansı istenildiği kadar arttırılamamaktadır. Her motorun farklı çalışma koşullarında değişik miktarlarda ateşleme avansına ihtiyacı vardır (MEB, 2011: 37).

Yakıt kalitesi

Benzinli motorlarda yakıt kalitesi oktan oranıyla belirlenmektedir ve yakıtın kendiliğinden yanmaya direnci olarak ifade edilmektedir. Oktan oranı, motor üzerinde gerçekleştirilen test ve kontroller ile belirlenmektedir. Motorda kendiliğinden yanma; sıkıştırma oranı, hava/yakıt oranı, ateşleme zamanı, gaz ayarı, motor hızı, hava giriş sıcaklığı ve yanma odası tasarımı gibi birçok parametreye bağlıdır.

Benzinde aranan performans özellikleri; vuruntuya karşı dayanıklı olması, uygun buharlaşmanın olması, zank ve vernik oluşturmaması, yakıt veya yanma ürünlerinin aşındırıcı olmaması, alevlenme tehlikesinin olmaması gibi sıralanabilir (MEB, 2011: 38).

Bu şekilde motor daha verimli, daha yumuşak ve sarsıntısız çalışarak emisyonlar azaltılmış olacaktır.

Motorda alev hızı

Yanma olayının kısa sürede tamamlanması, alev hızını artırarak motor performansını olumlu etkilemektedir. Çift buji kullanılmasıyla hızlı ve etkili bir yanma gerçekleştirilerek yakıt ekonomisi ve taşıt performansında iyileşme sağlanmaktadır (MEB, 2011: 38).

Motor sürtünmesi

Motorlarda iç sürtünme balans, yatak yuvası tasarımı ve pistonlar dikkate alınarak azaltılmaya çalışılmaktadır. Sürtünme kuvvetindeki artma, doğrusal hız artışından fazla olacağından dolayı, yüksek hızlarda mekanik verim önemli ölçüde düşük olacaktır. Bunun için motor hızını sınırlamak önem teşkil etmektedir.

Pistonlardaki sürtünmenin azaltılmasıyla sürtünme kayıplarında % 10 azalma olduğu ve bu azalmanın maksimum güçte % 2 artma, yakıt tüketiminde ise % 3 azalma sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca segman sayısının ve ağırlığının azaltılmasının yanında kullanılan düşük viskoziteli yağlar, aracın yakıt ekonomisini olumlu etkilerken çevreye salınan zararlı emisyon değerlerinin azalmasına katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir (MEB, 2011: 39).

Yanma odası tasarımı

Silindirlerde etkili bir yanmanın gerçekleşmesinde yanma odası tasarımı önemli bir yer tutmaktadır. Bu sebeple yanma odasının yüzey alanının hacmine oranı emisyonlar açısından önemli bir faktördür. Yüzey alanının hacme oranı arttıkça ısı kayıpları da artacak, yanma odasındaki sıcaklıklar düşecek ve böylelikle NO emisyonları azalacaktır. CO emisyonu ise daha çok hava/yakıt oranına bağlı olduğundan çok fazla değişmeyecektir. Yanma odasındaki çatlaklardan kaçınılmalıdır; çünkü alev bu çatlakların soğutma etkisiyle sönmekte, yanmamış hava/yakıt karışımı bu çatlaklarda birikerek verimi düşürmekte ve yüksek hidrokarbon emisyonuna neden olmaktadır (MEB, 2011: 40).

Taşıt tasarımı

Taşıtın tasarımının, taşıtın ağırlığını ve hava ile arasındaki sürtünmeyi etkileyeceğinden yakıt tüketimi dolayısıyla da egzoz emisyonları üzerinde önemli bir rolü bulunmaktadır. Yakıt tüketimlerinin azaltılabilmesi için taşıt ağırlıkları azaltılmaya çalışılmaktadır. Taşıtlardaki diğer bir tasarım çalışması da, motordan alınan gücün en kısa ve etkili bir şekilde tekerleklerle iletilmesinin sağlanmasıdır. Günümüzde özellikle enine yerleştirilmiş motor sistemleri ve önden çekişli taşıtlar yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, taşıtın ağırlığında ve maliyetinde büyük azalmalar, yakıt ekonomisinde ve performansında ise iyileşmeler sağlamaktadır (MEB, 2011: 42).

Taşıt aerodinamiği

Taşıtın aerodinamik yapısı, taşıt tasarımındaki önemli konulardan biridir. Bir taşıtın aerodinamik yapısı aracın yakıt tüketimini ve emisyon salınımlarını etkilemektedir. Aerodinamik tasarımın doğru yapılması, yakıt tüketimini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda emisyonlarda da azalma sağlamaktadır.

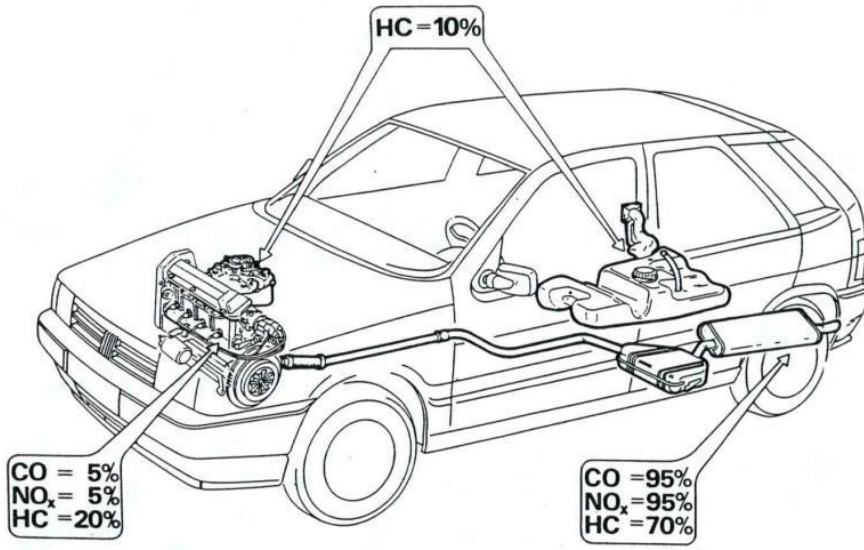
Aerodinamik kayıplar üç bölümde incelenmektedir. Birincisi taşıtın sınır tabakasında küçük miktarda oluşan, türbülans ile meydana gelen sürtünme kayıpları, ikincisi taşıtın radyatör kısmından ve havalandırmasından giren sürtünme kayıpları, üçüncüsü ise sınır tabakanın yüzeyden ayrım noktasında oluşan, büyük ölçekli türbülansın sebep olduğu kayıplardır. Aerodinamik çalışmaların esası; sınır tabakanın, taşıtın yüzeyinde türbülans meydana getirmeyecek bir şekilde ayrılmasını en aza indirmektir (MEB, 2011: 42).

3.2. Motorlu Araçlarda Emisyon Kontrol Sistemleri

Günümüzde taşıt teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak araçların birim mesafe başına yakıt tüketim miktarında ve atmosfere bıraktıkları emisyonlarda önemli bir azalma sağlanmaktadır. Ancak araç sayısı ve araç kullanım miktarının giderek artması, ulaşım sektöründen ve özellikle karayolu ulaşımından kaynaklanan emisyonların ve sera gazlarının artmasına neden olmaktadır (Soruşbay, Ergeneman, Öztürk ve Sel, 2010).

Son yıllarda hava kirliliğine yol açan önemli faktörlerden biri, motorlu taşıtların yaydığı egzoz gazı emisyonlarından kaynaklanan kirliliktir. Bu yüzden özellikle taşıtlar için emisyon kontrol teknolojilerinin geliştirilmesi zaruri bir hal almıştır.

Motorlu taşıtların egzozundan çıkan emisyonların azaltılması için doğalgaz, metil ve etil alkol gibi alternatif yakıtların kullanılmasının yanı sıra Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR), dizel motorlu araçlarda partikül filtresi, karter havalandırma ve katalitik konvertörler gibi konularda çalışmalar yapılmaktadır (MEB, 2013: 4). Emisyon kontrol sistemlerinin amacı egzozdan atılan zararlı maddelerin miktarını azaltmak ve kirleticileri zararsız hale getirmektir. Bir binek araçta kirleticiler gazların çıkış noktalarındaki oranları Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

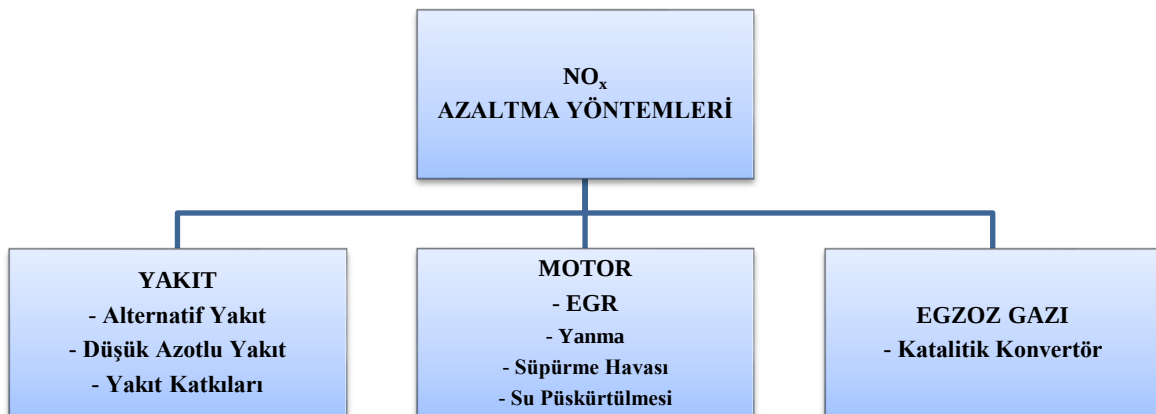


Şekil 3.3. Kirlenici gazların çıkış noktalarındaki oranları (MEB, 2013: 4)

İçten yanmalı motorlarda, atmosferi kirleten temel emisyonlar karbonmonoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC) ve azot oksitlerden (NO_x) oluşmaktadır. Bu kirleticiler, hava/yakıt oranıyla doğrudan bağlantılıdır. Bunun için hava/yakıt oranı değiştirilerek CO ve HC oranları kontrol altında tutulmaktadır. Fakat yanma sonu sıcaklığının artması sonucu NO_x oranındaki artış, CO ve HC emisyonlarıyla ters orantılı olduğundan kontrol sorunları ortaya çıkmaktadır.

Dizel motorlarında NO_x emisyonlarını kontrol etmede kullanılan yöntemler Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Bu yöntemler; yakıtta, motorda ve egzoz gazlarında alınacak önlemler olarak üç başlıkta açıklanmıştır.

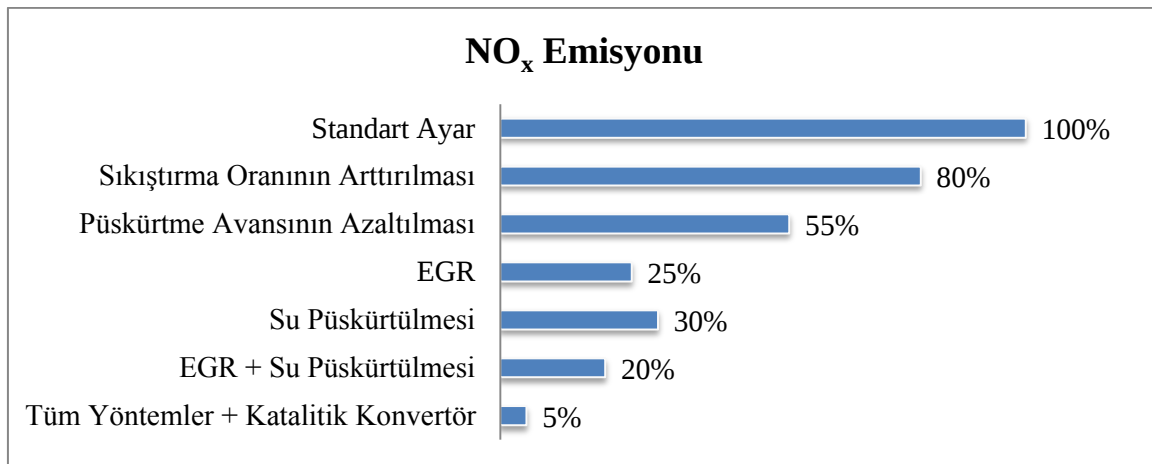
Çizelge 3.1. NO_x emisyonlarını azaltma yöntemleri (Haşimoğlu ve diğerleri, 2002)



Motorlu taşıtlarda NO_x emisyonunu kontrol altında tutmak için geliştirilen iki ana sistem vardır. Dizel motorlarda yanma esnasında oluşan NO_x emisyonunu azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri EGR sistemidir. Diğeri ise katalitik konvertör kullanarak egzoz gazını kimyasal işleme tabi tutmaktır. EGR ile egzoz gazlarının bir kısmı yanma odası içerisinde tutularak NO_x emisyonunun kontrolü için kullanılmaktadır. EGR, egzoz gazının bir kısmını tekrar silindirlere vererek yanma sonucunda oluşan sıcaklığı düşürmeyi, bu şekilde çevre açısından zararlı NO_x gazını kontrol altında tutmayı hedefleyen sistemdir (MEB, 2013: 30).

NO_x emisyonunun azaltılmasında kullanılan bazı yöntemler yakıt ekonomisi, yanmamış hidrokarbonlar ve partikül madde emisyonları gibi diğere parametreleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, NO_x emisyonunu kontrol yöntemlerinin birkaçı beraber kullanılarak hem NO_x hem de diğere parametreler en uygun hale getirilmelidir (İlkılıç ve diğere, 2009). Dizel motorlarda NO_x emisyonunu azaltmada kullanılan yöntemlerin etkileri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Standart ayarda NO_x emisyonu % 100 olarak kabul edildiğinde, EGR'nin tek başına uygulanması ile NO_x emisyonunda % 75'lik bir azalış elde edilebilmektedir. Su püskürtülmesi ile pik alev sıcaklığı düşürülerek NO_x emisyonunda % 70'lik bir azalma sağlanmaktadır. Tüm yöntemler ve katalitik konvertör beraber kullanılarak ise NO_x emisyonunda % 95'lik bir azalma sağlanmaktadır (Haşimoğlu ve diğere, 2002).

Çizelge 3.2. NO_x azaltmada kullanılan yöntemlerin etkileri (Haşimoğlu ve diğere, 2002)



Bu çalışmanın konusu olan Egzoz Gazı Resirkülasyon (EGR) sistemi Bölüm 4'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

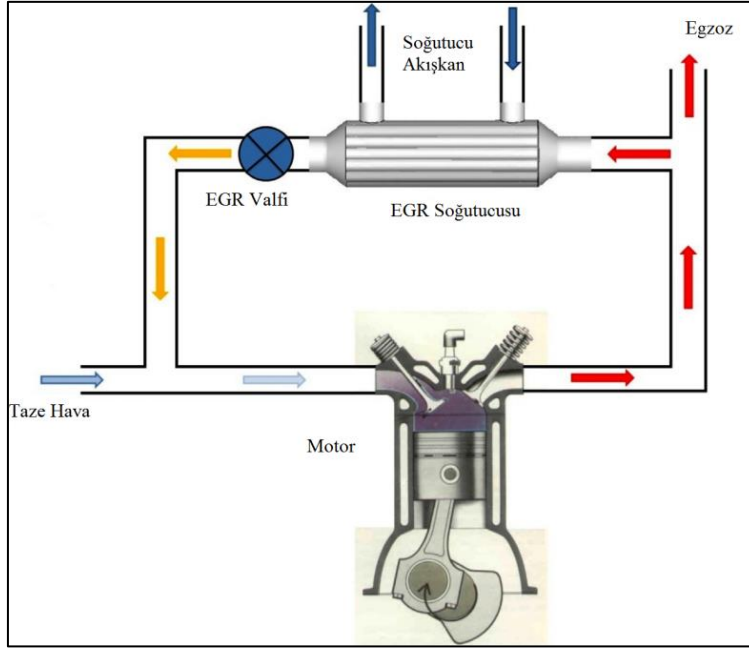
4. EGZOZ GAZI RESİRKÜLASYON SİSTEMİ

Egzoz Gazı Resirkülasyon (EGR) sistemi, motora giren taze havanın egzoz gazının bir kısmı ile karışmasını sağlayarak yeniden dolgu olarak emme kanalına geri göndermektedir. Motorlarda yanma sonu sıcaklığı arttıkça NO_x oluşumu artmaktadır. EGR sisteminden gelerek taze silindir dolgusu içerisine karıştırılan egzoz gazları ile motorun yanma odasındaki yanma sonu sıcaklığı düşürülmektedir. EGR sistemi, hava/yakıt oranını düşürerek yakıtın daha az oksitlenmesini sağlamakta ve alev sıcaklığını düşürmektedir. Böylece, NO_x emisyonu azaltılmakta ve karışımın ısı kapasitesi artırılmaktadır (Uyumaz ve diğerleri, 2017).

Yanmış gazların sıcaklığı maksimum iken NO_x oluşma ihtimali de artmaktadır. Bu maksimum sıcaklık, yanma başlangıcından ve maksimum silindir basıncı oluşmasından hemen sonra oluşmaktadır. Erken yanmaya başlayan karışımın sıcaklığı, piston sıkıştırmaya devam ettiği için yükselmektedir. Bu nedenle NO_x oluşum hızı da artmaktadır (İlkılıç ve diğerleri, 2009).

Motorlarda NO_x , son alev cephesindeki sıcak gazlarda oluşmaktadır. NO_x 'in başlangıçtaki oluşum hızı kısmen sıcaklığa bağlıdır. Oksijen yoğunluğunun yüksek olması da NO_x oluşum hızını arttırmaktadır. EGR ile silindir içindeki oksijenin bir kısmının yerini atık karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) aldığından dolayı lokal oksijen yoğunluğu azalmaktadır. Bu durum yakıt ve oksijen moleküllerinin birleşip reaksiyona girme ihtimalini azaltmaktadır. Buna bağlı olarak reaksiyon hızı ve lokal alev sıcaklığı düşerek NO_x oluşumu azalmaktadır (İçingür ve Salman, 1993).

EGR uygulaması, emisyon standartlarını sağlamak için NO_x emisyonlarının düşürülmesinde etkin bir metottur. Dizel emisyon düzenlemeleri son zamanlarda daha şiddetli hale gelmektedir. Yeni emisyon standartlarının soğutulmuş egzoz gazı devridaim kullanımının artmasına neden olacağı ve önemli ölçüde daha yüksek devridaim hızları gerektireceği beklenmektedir (Lutz, 2004). Modern motorlarda EGR, hem motorun emme gücünü azaltmak için hem de atık gazın belirli sürüş durumlarında yanmaya olan pozitif etkisini kullanmak için tasarlanmıştır.



Şekil 4.1. İçten yanmalı motorda EGR uygulaması (Shabgard ve diğerleri, 2017)

Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR), egzoz gazının bir kısmının emme sistemine geri yönlendirilmesiyle yapılmaktadır. Egzoz gazı, toplam emme karışımının yaklaşık % 30'una kadar geri dönüştürülebilmektedir. EGR gazı, maksimum yanma sıcaklığını etkin bir şekilde azaltmak için, silindirde bir önceki döngüden kalan egzoz kalıntısıyla birleşmektedir.

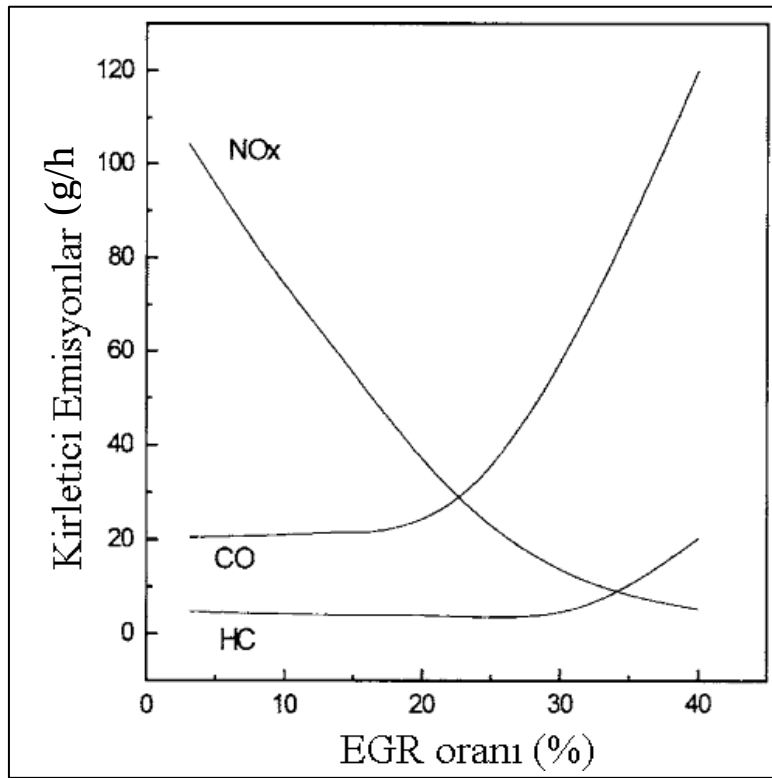
Geri dönüştürülen egzoz gazı kütlesinin toplam emme karışımına oranının yüzdesi EGR oranı olarak tanımlanmaktadır (Pulkrabek, 1997: 305).

$$\text{EGR (\%)} = \left(\frac{m_{\text{EGR}}}{m_i} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

EGR oranı motor devrine, motor yüküne ve çevre koşullarına göre değişkenlik göstermektedir. Düşük devirlerde, piston içindeki O_2 ve N_2 miktarı az olduğundan EGR oranı daha yüksektir; devir ve motor yükü arttıkça EGR oranı azalmaktadır. Tam yük durumunda maksimum güç elde etmek için EGR devre dışı bırakılabilmektedir.

EGR'nin yanma odasındaki değişik oranları, tutuşma gecikmesi ve maksimum silindir içi basıncı gibi parametreler üzerinde etkili olmaktadır. EGR oranı ile ateşleme süresindeki gecikme artmaktadır.

EGR oranının artırılması NO_x emisyonunu azaltırken diğer yandan CO, HC ve PM emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Şekil 4.2’de EGR oranının CO, HC ve NO_x emisyonlarına eş zamanlı etkisi görülmektedir. EGR oranının % 20’nin üzerine çıkmasıyla birlikte CO ve HC emisyonlarının hızla arttığı görülmektedir. Benzin motorlarında EGR oranı maksimum % 20 civarında uygulanabilmekteyken dizel motorlarda bu oran % 50’ye kadar çıkabilmektedir. Belirtilen sınırların dışında yanma işlemi olumsuz yönde etkilenerek motor performansının düşmesine ve diğer emisyonların kontrol edilememesine neden olmaktadır (Uyumaz ve diğerleri, 2017).



Şekil 4.2. EGR oranının kirletici emisyonlara etkisi (Lazaro ve diğerleri, 2002)

EGR dizel motordaki yanmayı ısı, kimyasal ve seyreltme olarak üç şekilde etkilemektedir. Isıl etki, hacimsel verimi etkileyen içerideki dolgu sıcaklığının yükselmesiyle CO_2 ve H_2O varlığına bağlı olarak dolgunun özgül ısı kapasitesinin artmasıyla ilişkilidir. Yanma boyunca düşük gaz sıcaklığı ve özellikle düşük alev sıcaklığı görülmektedir. Seyreltme etkisi, O_2 konsantrasyonu ile alakalıdır. Silindire giren O_2 konsantrasyonunun az olması sebebiyle silindir içinde bölgesel olarak O_2 basıncı düşmekte ve temel NO oluşum reaksiyonları etkilenmektedir. Kimyasal etki ise yanma sırasındaki yanma ürünlerinin ayrışmasıyla ilgilidir (Lazaro ve diğerleri, 2002).

4.1. EGR Sisteminin Avantajları ve Dezavantajları

Egzoz Gazı Resirkülasyonunun (EGR) iki etkisi bulunmaktadır; silindir içine geri dönen egzoz gazları yanma sonu sıcaklığını düşürmekte ve içeri giren taze hava/yakıt miktarını azaltmaktadır. Emme manifolduna giren hava/yakıt karışımına doğrudan etki eden bu egzoz gazları, motor gücünü ve NO_x miktarını düşürmekte ve özgül yakıt tüketimini artırmaktadır. Bu etkilere bağlı olarak bazı avantajlar ve dezavantajlar ortaya çıkmaktadır.

EGR'nin avantajları; NO_x emisyonunun azaltılması, kıvılcım ateşlemeli motorlarda kısmi yükteki kısma kayıplarının (throttling losses) potansiyel olarak azaltılması, düşük silindir sıcaklıkları sayesinde motor ömrünün, özellikle egzoz valfi ömrünün uzatılması olarak sayılabilir (İnternet, 2019).

EGR direkt püskürtmeli dizel motorlarda yakıt ekonomisini olumsuz yönde etkilemeden NO_x emisyonlarını azaltmanın en etkin yollarından biridir. Günümüzde hafif hizmet tipi dizel araçlarda başarı ile kullanılmasına rağmen, orta ve ağır hizmet tipi dizel motorlarda aşınmayı arttırdığından dolayı bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır (İlkılıç ve diğerleri, 2009).

EGR oranı arttıkça NO_x azalmakta, ancak aşırı EGR, silindir içindeki mevcut oksijeni azalttığı için hava/yakıt oranını bozacağından dolayı partikül madde, is oluşumu ve yakıt tüketimi artmaktadır. Ayrıca karışımdaki oksijen miktarının azalması CO emisyonlarını arttıracaktır. Partikül madde emisyonlarını azaltmak için dizel partikül filtresi ile EGR sistemi birlikte kullanılmaktadır (İnternet, 2019).

Silindirde mevcut olan oksijenin kasıtlı olarak azaltılması, motorda mevcut olan azami gücü azaltmaktadır. Bu nedenle, EGR genellikle tam güç istendiğinde kapatılmaktadır. Bu durumda, NO_x emisyonunu kontrol etmeye yönelik EGR yaklaşımı başarısız olmaktadır. EGR valfi, talepteki değişikliklere anında yanıt verememekte ve egzoz gazının EGR devresi etrafında akması zaman almaktadır. Bu durum, geçici EGR davranışının ayarlanmasını özellikle karmaşık hale getirmektedir; çünkü EGR valfi geçici durumlar sırasında kapatılmakta ve ardından sabit duruma ulaşıldığında yeniden açılmaktadır (İnternet, 2019).

Devridaim gazı normalde, çok silindirli bir motorda alınan miktar bölünmeden önce emme sistemine verilmektedir. Buna rağmen, gazın mükemmel bir şekilde karıştırılması, tüm motor hızlarında / yüklerinde ve özellikle geçici çalışma sırasında elde edilememektedir. Örneğin, egzoz gazının silindirden-silindire dengesiz olarak dağıtımı, bir silindirin çok fazla egzoz gazı almasına neden olabilmektedir, bu yüksek partikül emisyonuna neden olurken, başka bir silindir çok az almakta ve bu silindirden yüksek NO_x emisyonları ortaya çıkmaktadır (İnternet, 2019). Bunlar da EGR'nin dezavantajları olarak kabul edilmektedir.

4.2. EGR Sisteminin Yapısı

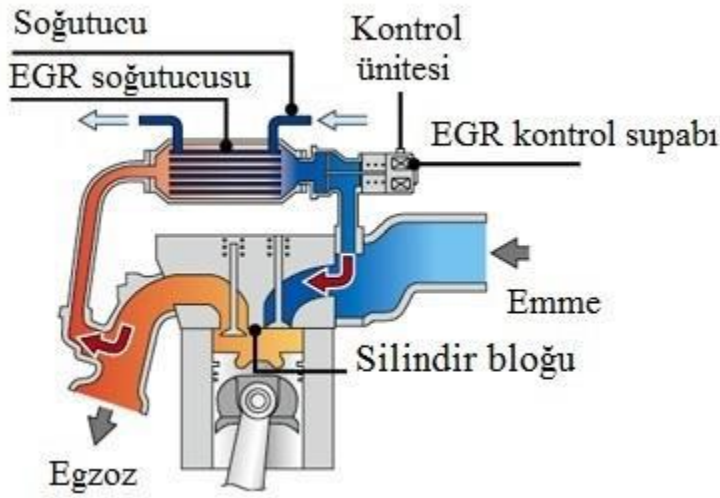
EGR sistemlerinin yapısı bazı farklılıklar gösterse de genellikle gaz akışını kontrol etmek için iki valf ve bir EGR soğutucusundan oluşmaktadır.

EGR selenoid valfi, elektronik olarak kumanda edilmektedir ve EGR valfine uygun bir vakum iletmektedir. Bu vakum sayesinde EGR valfi açılmakta ve atık gaz emme manifolduna iletilmektedir. Bu işlem, egzoz gazının bir kısmının bir supap yardımıyla motora emilen taze havanın içerisine verilmesi yoluyla yapılmaktadır. Supap, emme manifolduna yapılan bağlantıyla kontrol edilmekte ve egzoz gazı dolaşımı emme manifoldundaki vakumla orantılı bir şekilde çalışmaktadır. EGR rölantide ve tam yük durumunda devre dışı bırakılarak düzgün bir rölanti ve maksimum güç elde edilmekte, motor soğukken de kapalı tutularak ısınmayı etkilemesi önlenmektedir. Yeni nesil sistemlerde uygulanan elektronik kontrol ile NO_x emisyonları daha etkin kontrol edilerek hassas bir çalışma sağlanmaktadır. Sistemde yakıt ekonomisini etkilemeden egzoz gazının % 15'i dolaştırılabilmekte ancak daha fazla egzoz gazı verildiğinde oksijen azlığı nedeniyle yanma bozulmaktadır (MEB, 2013: 30).

Diğer bir EGR valfi, elektropnömatik bir valftir. Motor bölmesinde bulunan EGR valfi, egzoz gazı resirkülasyon işlemini kontrol etmek için kullanılmaktadır (MEB, 2013: 31).

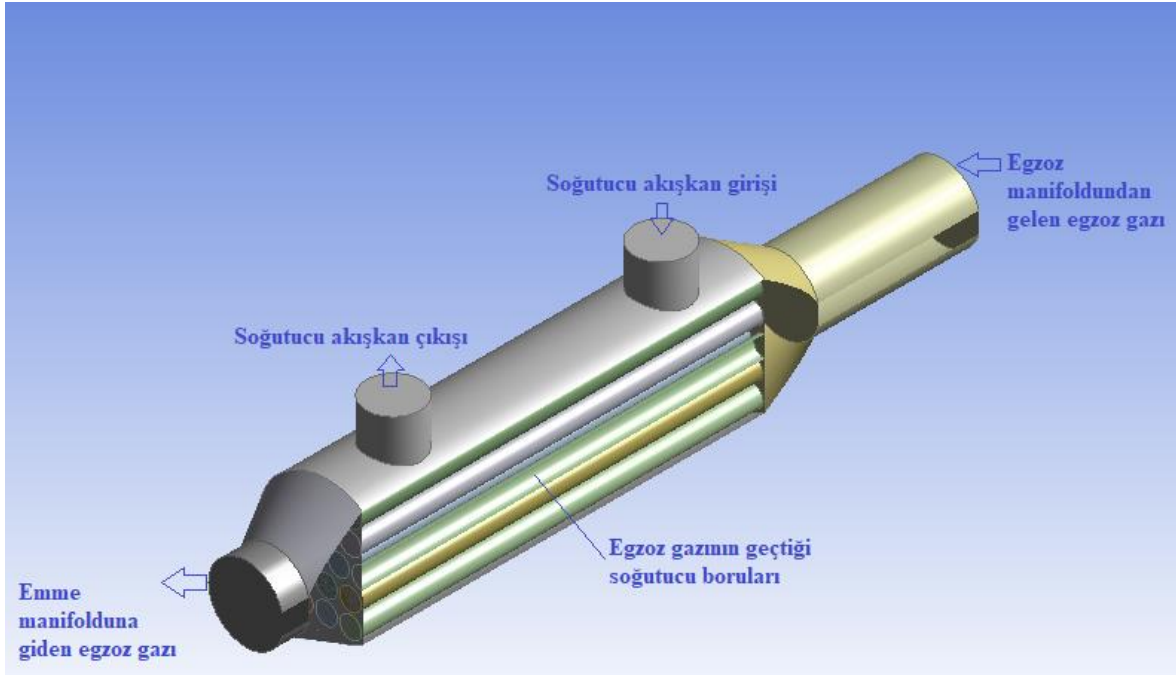
EGR sisteminin bu çalışmada incelenen kısmı ise EGR soğutucusudur. EGR sistemi, emme manifoldu ile egzoz manifoldu arasında çalışmaktadır. Egzoz manifoldundan çıkan egzoz gazlarının emme manifolduna gelmeden önce soğutulması gerekmektedir. Bu yüzden, EGR sistemleri üzerinde EGR soğutucusu bulunmaktadır.

EGR sistemi, egzoz manifoldundan metal bir boru ile aldığı egzoz gazını EGR soğutucusu ile soğutmaktadır. Bu gazın miktarını valfler ile hassas olarak ayarlayarak emme manifoldu girişine göndermektedir. Böylece, geri dönen egzoz gazı emme manifolduna girmeden önce soğutulmuş olarak içerisine karıştığı havayı ısıtması ve volümetrik verimi düşürmesi önlenmektedir (MEB, 2013: 31). Şekil 4.3’de örnek bir EGR sistemi görülmektedir.



Şekil 4.3. EGR sisteminin çalışması (Uyumaz ve diğerleri, 2017)

EGR soğutucusu, içerisinden geçen egzoz gazının soğutma yüzeyini büyütmek için petekli veya çoklu borulara sahip çeşitli kanallarla donatılmaktadır. Soğutucu kanallarında, soğutucu akışkan olarak motor soğutma suyu dolaştırılmaktadır. Geri dönen egzoz gazı soğutucu kanallarının içinden geçerken sıcaklığını soğutma suyuna aktarmaktadır. Motor suyu, soğutucu içerisinde yer alan borulardaki sıcaklığı üzerine alarak boruların içinden geçen egzoz gazını soğutmaktadır. Egzoz gazının soğutulması sayesinde silindir içi yanma sıcaklığı düşmekte ve NO_x ile kurum parçacıklarının oluşumunun azalması sağlanmaktadır (MEB, 2013: 35). Şekil 4.4’de örnek bir EGR soğutucusu görülmektedir.



Şekil 4.4. EGR soğutucusunun kesiti

4.3. EGR Sisteminde Etkinlik

Egzoz Gazı Resirkülasyon sisteminde ısıl etkinlik (ϵ), yalnızca sıcaklık değerlerine bağlı olduğundan kolayca belirlenebilmektedir. Bu nedenle, belirlenen çalışma koşullarında gerçek ısı transferi ve mümkün olan maksimum ısı transferinin oranı olarak tanımlanmaktadır.

Gerçek ısı transferi, sıcak akışkan tarafından kaybedilen enerji veya soğuk akışkan tarafından kazanılan enerji hesaplanarak bulunabilir.

$$q = \dot{m}_h c_h (T_{h1} - T_{h2}) = m_c c_c (T_{c2} - T_{c1}) \quad (4.2)$$

Mümkün olan maksimum ısı transferi,

$$q_{\text{maks}} = \dot{m}_h c_h (T_{h,\text{giriş}} - T_{c,\text{giriş}}) \quad (4.3)$$

Genel olarak etkinlik şöyle ifade edilir:

$$\epsilon = \frac{\Delta T}{\text{Isı değıştiricisindeki maksimum sıcaklık farkı}} \quad (4.4)$$

Isı değiştiricisindeki maksimum sıcaklık farkı, sıcak ve soğuk akışkanın giriş sıcaklıklarındaki farktır (Holman, 2010: 540).

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_h c_h (T_{h1} - T_{h2})}{\dot{m}_h c_h (T_{h1} - T_{c1})} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad (4.5)$$

Sonuç olarak, EGR soğutucusunda etkinlik aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$\varepsilon_{\text{soğutucu}} = \frac{T_{\text{gaz,giriş}} - T_{\text{gaz,ıkış}}}{T_{\text{gaz,giriş}} - T_{\text{soğutucu,giriş}}} = \frac{\Delta T_{\text{gaz}}}{\Delta T_{\text{gaz,maks}}} \quad (4.6)$$

5. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

5.1. Problemin Tanımı ve Geometrinin Belirlenmesi

Bilgisayar yardımıyla sayısal analizi gerçekleştirilecek olan bir problemin analizine geçmeden önce yapılması gereken ilk işlem problemin geometrisini tam anlamıyla yansıtan bir modelinin oluşturulmasıdır. HAD analizi yapılacak olan kabuk-boru tipi EGR soğutucusunun modeli ANSYS DESIGN MODELER programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

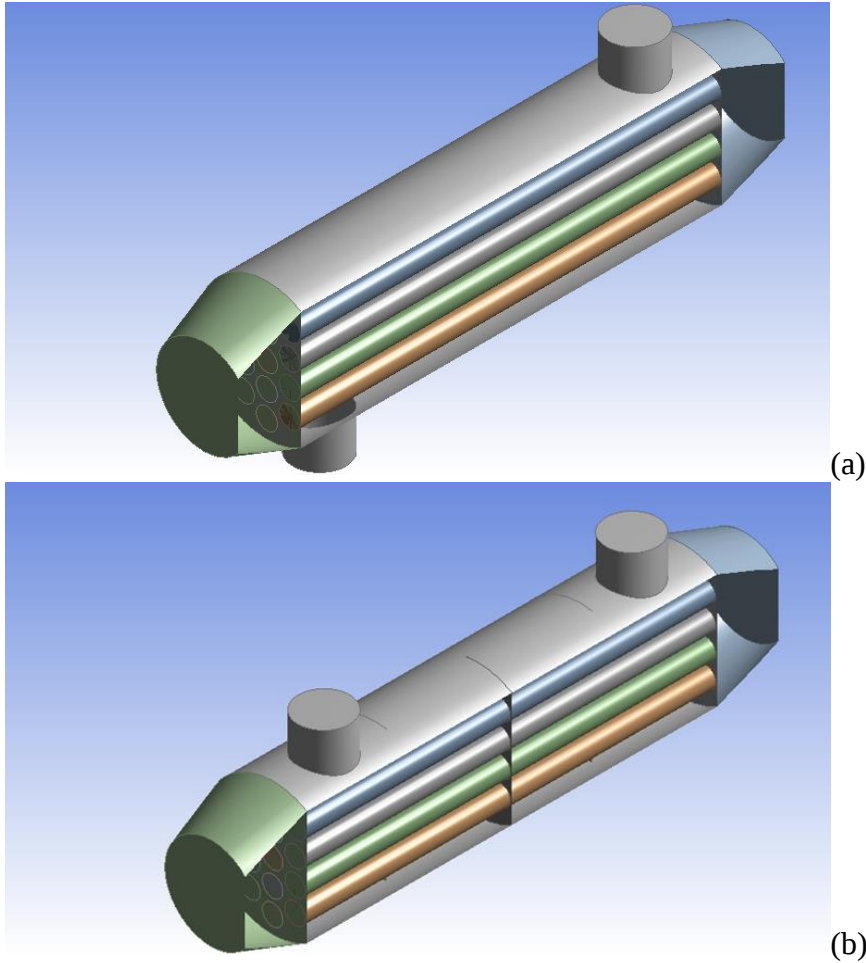
Geometri belirlenirken literatür ve gerçek şartlarla uyumlu olmasına dikkat edilmiştir. Oluşturulan farklı modellerin tasarım parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu modeller sayısal olarak incelenirken egzoz gazının giriş debisi değiştirilmiştir.

Çizelge 5.1. EGR soğutucusu modelleri için tasarım parametreleri

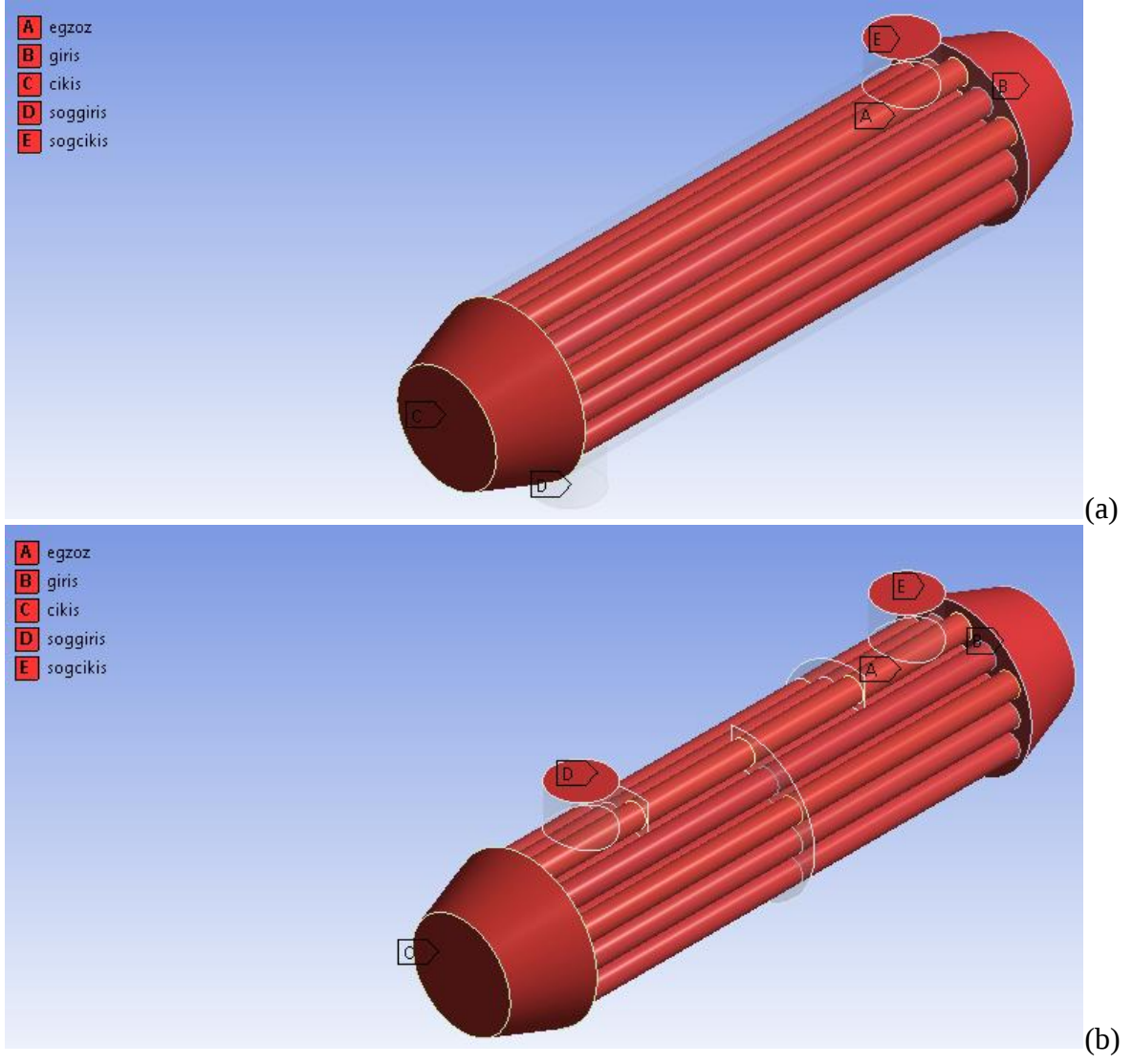
Parametre	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Bölme sayısı	-	4	3	5	5
Kabuk uzunluğu (mm)	260	260	210	260	230
Boru uzunluğu (mm)	200	200	150	200	190
Boruların çapı (mm)	10	10	10	10	10
Boru kalınlığı (mm)	1	1	1	1	1
Boru sayısı	19	19	19	19	19
Kabuk çapı (mm)	65	65	65	65	65
Egzoz gazı giriş çapı (mm)	45	45	45	45	45
Soğutucu akışkan giriş çapı (mm)	25	25	25	25	25

Örnek çözüm geometrilerinin kesit görüntüsü Şekil 5.1’de, sayısal çözüm alanı Şekil 5.2’de ve genel görüntüleri ise Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de verilmiştir. Şekillerde gösterildiği gibi, bölme plakaları olmayan 19 borulu bir EGR soğutucusu modellenmiş ve diğer modellerde aynı geometrinin soğutucu çıkış yönü ve boruların uzunluğu değiştirilerek bölme plakaları eklenmiştir.

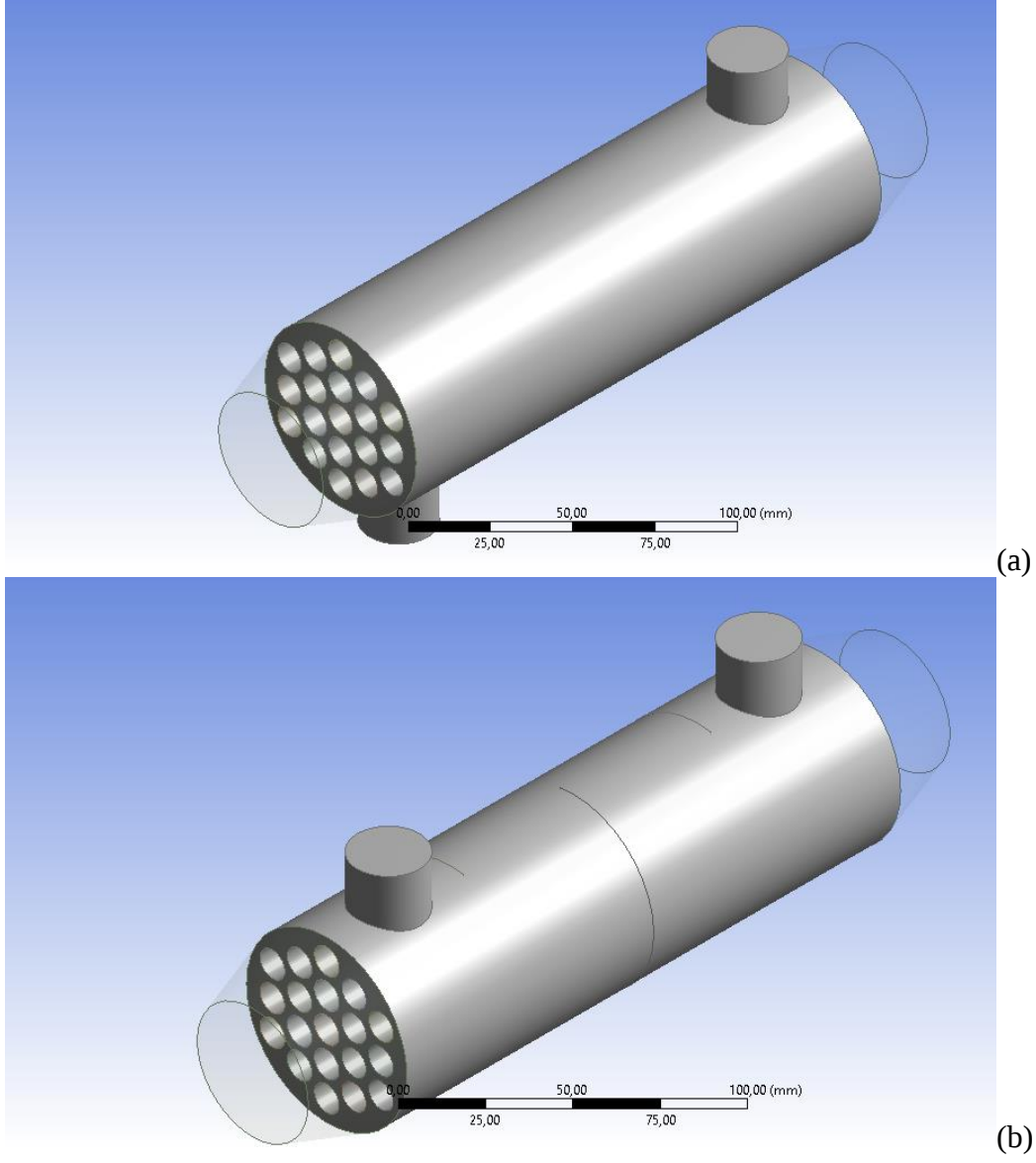
Borulardaki gaz akışının eşit dağıtımı, EGR soğutucusunun tasarlanmasında önemli konulardan biridir. Giriş çapının kabuk çapına oranının (D_1/D_2) azalması, yan borulardaki akış yüzdesini azaltmakta ve bunun sonucu olarak daha fazla akış merkezi borulara aktarılmaktadır. Bu durum, merkezi borularda basınç düşüşüne ve yakınlarındaki soğutucu akışkan sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, akış hızının düşmesi ve ardından yan borulardaki türbülansın azalması, yerel ısı transfer oranının düşmesine neden olmaktadır. Akış hızının düşmesi tortu artışına da neden olabilmektedir. Diğer taraftan, D_1/D_2 azaldıkça, akışı uygun ve eşit şekilde dağıtmak için giriş kısmının daha fazla uzunlukta olması gerekmektedir. Bu durum, daha büyük soğutucu uzunluğu ve daha fazla basınç düşüşüne neden olacaktır. Bunların hepsi, etkinliğin ve soğutucunun ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, önerilen D_1/D_2 oranları % 60 ila % 75 arasında değişmektedir (Ghassemlaglou ve Torkaman, 2016). Bu nedenle, bu çalışmada oluşturulan soğutucuların giriş çapının kabuk çapına oranı ($D_1/D_2 = 45/65$) yaklaşık % 70 olacak şekilde tasarlanmıştır.



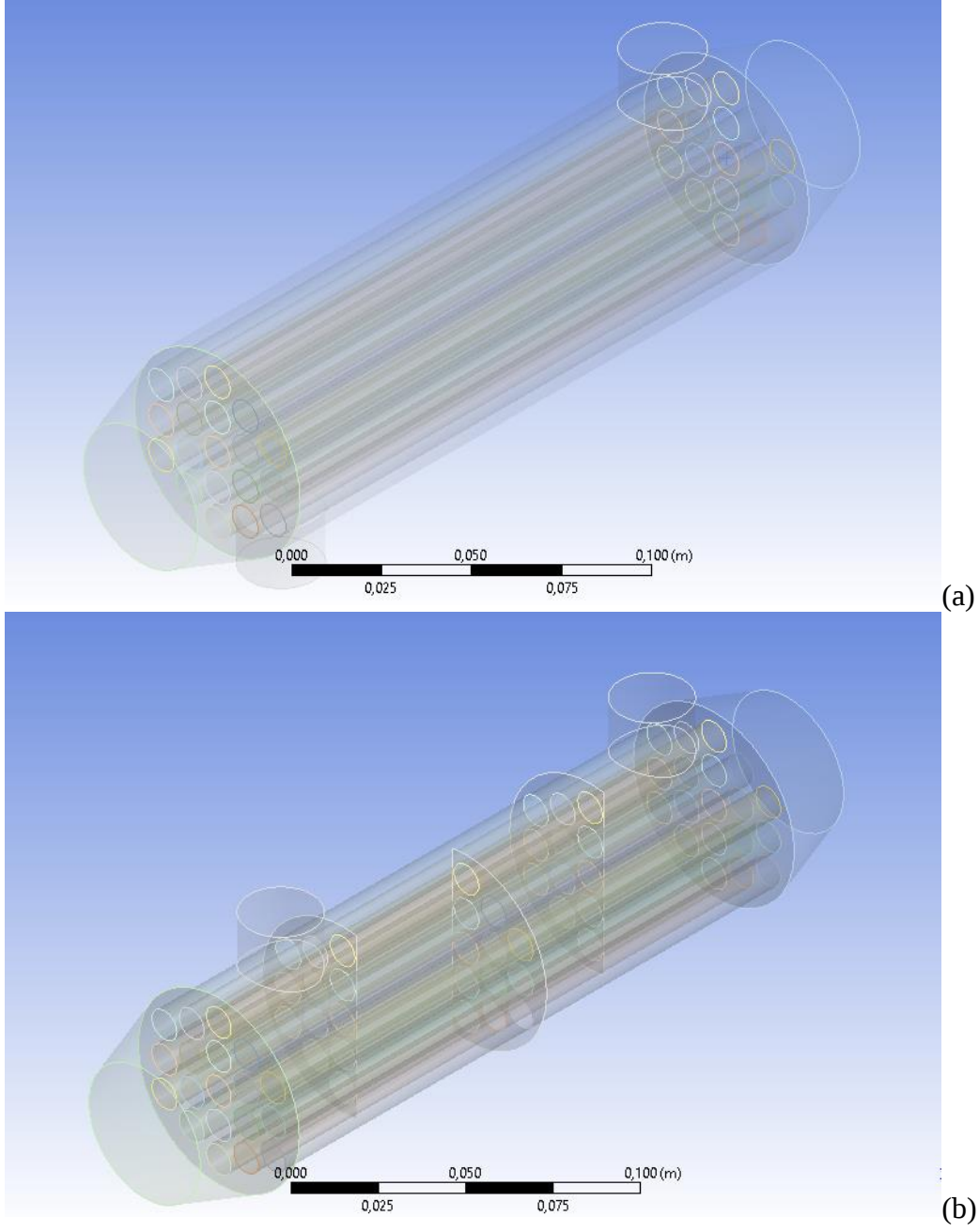
Şekil 5.1. EGR soğutucusunun kesit görüntüsü: (a) model 1, (b) model 2



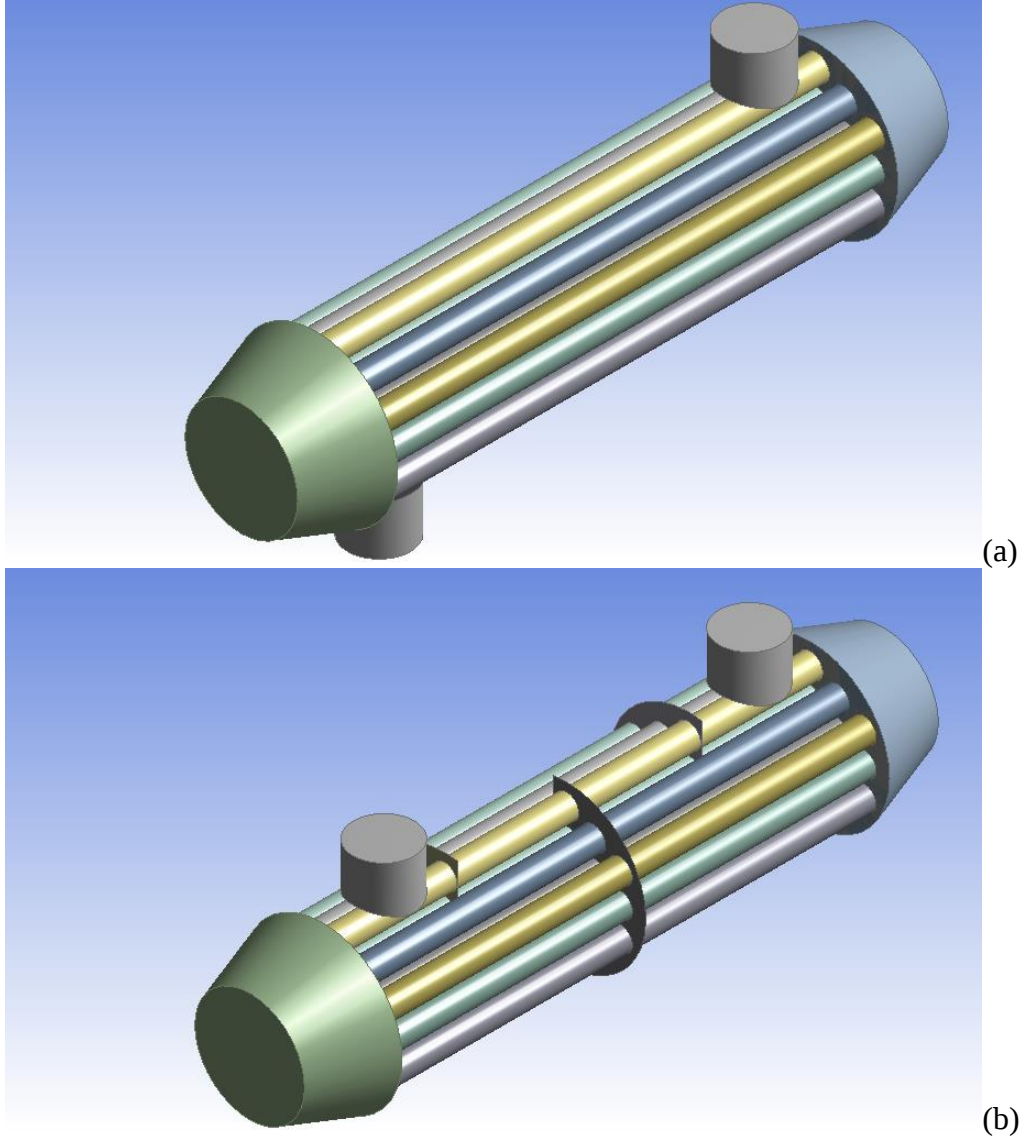
Şekil 5.2. Problemin genel tanımı ve sayısal çözüm alanı: (a) model 1, (b) model 2



Şekil 5.3. Soğutucunun Design Modeler'deki genel görünümü: (a) model 1, (b) model 2



Şekil 5.4. EGR soğutucusu geometrisi: (a) model 1, (b) model 2



Şekil 5.5. EGR soğutucusu borularının perspektif görünüşü: (a) model 1, (b) model 2

5.2. Kabuller

Yapılan çalışmada, fiziksel modeli oluşturulan EGR soğutucusunun hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan ANSYS FLUENT yardımıyla çözümünde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. Akış türbülanslı ve kararlıdır.
2. Akış sıkıştırılamaz olarak kabul edilmiştir.
3. Akış üç boyutludur.
4. Egzoz gazı akışkanı olarak hava ve soğutucu akışkan olarak su kullanılmıştır.
5. Yer çekiminin etkisi ihmal edilmiştir.

5.3. Genel Denklemler

Bir problemin tanımlanmasından sonra sayısal olarak çözülmesi için, öncelikle ihtiyaç duyulan denklemlerin ifade edilmesi gerekmektedir. Sonlu hacimlerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile çözümlenmesinde süreklilik ve momentum denklemleri kullanılmaktadır. Uygulamada bu denklemleri analitik olarak çözmek zordur. Bu yüzden bu denklemler paket programlar kullanılarak sayısal olarak çözümlenmektedir. Sayısal çözümlemelerde kullanılan FLUENT programının çözüm için sonlu hacimler metodunu kullandığı süreklilik, momentum, enerji korunum denklemleri ve türbülans denklemleri aşağıda belirtilmiştir.

5.3.1. Süreklilik denklemi

Süreklilik veya kütlenin korunumu denklemi, bir akış içerisinde yer alan kontrol hacmindeki kütle dengesi olarak ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

Eş. 5.1 kütlenin korunumu denkleminin çözülen problem için kullanılan halidir. u , x yönü hız bileşenini; v , y yönü hız bileşenini; w ise z yönü hız bileşenini temsil etmektedir (Holman, 2010: 667).

5.3.2. Momentum denklemi

Newton'un ikinci kanununa göre bir akışkan parçasının momentumunun değişim hızı bu akışkan parçasına etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir. Momentum korunum denklemi, sabit akışkan yoğunluğu varsayımıyla x , y ve z yönleri için Eş. 5.2'de gösterilmektedir (Novozhilov, 2001).

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Bu denklemlerde,

P : statik basınç

μ_{eff} : efektif viskozite (eşdeğer dinamik viskozite katsayısı)

5.3.3. Enerji korunum denklemi

Enerjinin korunumu, bir kontrol hacmindeki enerji değişim oranının, parçacıklara ısı ve iş ile aktarılan enerji dengesine eşit olduğu fiziki yasaya dayanmaktadır. Aşağıdaki Eş. 5.3 sıvı akışı boyunca enerji taşınımını tanımlar:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (5.3)$$

Bu denklemde,

E : toplam enerji (entalpi + kimyasal enerji)

k_{eff} : etkin ısı iletkenlik

$(\tau_{ij})_{eff}$ terimi,

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (5.4)$$

Etkin ısı iletkenlik,

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$$

k : ısı iletkenlik

Bu çalışmada kimyasal reaksiyon olmadığı için kimyasal enerji 0 (sıfır) olarak kabul edilmiştir. Türbülanslı Prandtl sayısının varsayılan değeri 0,85'tir (ANSYS Theory Guide, 2015: 56).

5.3.4. Türbülans denklemleri

Bu çalışmada türbülanslı akış söz konusu olduğundan, türbülansı modellemek için standart k-ε modeli kullanılmıştır. Türbülans kinetik enerjisi k ve yayılma hızı ε, aşağıdaki taşınım denklemlerinden elde edilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5.6)$$

Bu denklemlerde,

ε : türbülans kinetik enerjisi yayılma hızı (m²/s³)

k : türbülans kinetik enerjisi (m²/s²)

G_k : ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi oluşumu

Y_M : sıkıştırılabilir türbülanstaki dalgalı dilatasyonun toplam yayılma hızına katkısı

C_{1ε}, C_{2ε}, C_{3ε} : sabitler

σ_k, σ_ε : k ve ε için türbülanslı Prandtl sayıları

S_k, S_ε : kullanıcı tanımlı kaynak terimleri

Türbülanslı (veya girdap) viskoziteye karşılık gelen μ_t , k ve ε ile hesaplanmaktadır:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.7)$$

Model sabitleri C_{1ε}, C_{2ε}, C_μ, σ_k, σ_ε aşağıdaki varsayılan değerlere sahiptir. Sıcaklıktan bağımsız olarak kabul edilen C_p ve ρ, ortalama sıcaklığa göre sabit değer olarak alınmıştır.

$$C_{1\varepsilon} = 1,44 , C_{2\varepsilon} = 1,92 , C_\mu = 0,09 , \sigma_k = 1,0 , \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Bu varsayılan değerler, temel türbülanslı akışlar için yapılan deneylerden belirlenmiştir. Çok sayıda duvara bağlı ve serbest kayma akışı için oldukça uyumlu çalıştıkları bulunmuştur (ANSYS Theory Guide, 2015: 47).

5.4. Sınır Şartları

Sayısal çalışmadaki amaç, farklı geometriye sahip soğutucuların aynı giriş şartları ile oluşan sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Programın çalıştığı sırada çözdüğü korunum denklemlerinden bahsedildikten sonra çözüm için gerekli sınır şartları tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan sınır şartlarının genel hali Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Sınır şartları

Parametre	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Egzoz gazı giriş debisi (kg/s)	0,0155 0,01 0,005	0,0155 0,01 0,005	0,0155 0,01 0,005	0,0155 0,01 0,005	0,0155 0,01 0,005
Egzoz gazı giriş sıcaklığı (K)	723	723	723	723	723
Soğutucu giriş debisi (kg/s)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Soğutucu giriş sıcaklığı (K)	353	353	353	353	353
Bölme sayısı	-	4	3	5	5
Kabuk uzunluğu (mm)	260	260	210	260	230
Boru uzunluğu (mm)	200	200	150	200	190

5.4.1. Giriş sınır şartı

Giriş sınır şartı olarak akış hacmi olan egzoz gazı ve soğutucu akışkan için kütle akışı (mass flow inlet) sınır şartı verilmiştir.

Motorun yanma odasına 3000 dev/dak'da giren toplam kütesel debi değeri Eşitlik 5.8'de verilen formülden hesaplanmıştır. Sıcaklıktan bağımsız olarak kabul edilen yoğunluk (ρ), ortalama sıcaklığa göre sabit değer olarak alınmıştır. Eşitlik 5.8'de; $\rho = 0,5243 \text{ kg/m}^3$, $n=N/2=25 \text{ çev/s}$, motor hacmi $zV_d = 4,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dev}$, $\eta_v = 0,85$ değerleri yerine konulduğunda $\dot{m} = 0,05 \text{ kg/s}$ olarak hesaplanmaktadır (Usta, 2011).

$$\dot{m} = \rho \cdot n \cdot zV_d \cdot \eta_v \quad (5.8)$$

Bu denklemde,

ρ : havanın yoğunluğu (kg/m^3)

n : $N/2$

N : çev/s

z : silindir sayısı

V_d : 1 silindirin hacmi

η_v : volumetrik verim

Eşitlik 5.8'de verilen formülden bulunan 0,05 kg/s değerinin % 10, % 20, % 30 EGR oranları ile hesaplanan egzoz gazı giriş debileri sırasıyla 0,005 kg/s, 0,01 kg/s, 0,0155 kg/s olarak bulunmuştur. Bu değerler, egzoz gazı için 3 farklı kütleli debi giriş şartı olarak verilmiştir. Soğutucu akışkanın giriş debisi 0,05 kg/s olarak alınmıştır. Giriş sıcaklık değerleri de literatürden yararlanılarak soğutucu için 353 K, egzoz gazı için 723 K olarak alınmıştır (Shabgard ve diğerleri, 2017). Yapılan sayısal çalışma sonuçlarını benzer çalışma sonuçlarıyla kıyaslama açısından bu sınır şartları seçilmiştir.

5.4.2. Çıkış sınır şartı

Soğutucu akışkanın ve egzoz gazının çıkışı için basınç (pressure outlet) sınır şartı tanımlanmıştır ve çıkış basıncı olarak atmosfer basıncı kabul edilerek ölçülen basınç farkı “sıfır” olarak tanımlanmıştır.

5.4.3. Duvar sınır şartı

Sıvı ve katı hacimleri belirlemek, sınırlamak ve farklı sınır şartları verebilmek için duvar (wall) sınır şartı kullanılmaktadır. Isı transferini simüle etmek amacıyla gaz ve soğutucu ile temas halindeki boruların dış kısmı için duvar sınır şartı kullanılmıştır. Soğutucunun dış duvarının sıcaklığı, soğutucu akışkan ile aynı sıcaklıkta alınmıştır. Tüm katı duvarlar için kayma ve penetrasyon sınır koşulları göz önüne alınmamıştır. Probleme uygun olarak hareketsiz (stationary wall) sınır şartı ve kaymasızlık (no slip) sınır şartı tanımlamaları yapılmıştır.

6. SAYISAL ÇÖZÜM

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD); akış, ısı ve kütle transferi problemlerinin sayısal olarak çözümlendiği bir analiz yöntemidir. Akışkanın hareketini tanımlayan diferansiyel denklemlerin çözümlendiği bu yöntem, özellikle deneysel çalışmalarla elde edilemeyen kayma gerilmesi, hız, basınç ve sıcaklık dağılımları, akışa ait akım çizgileri gibi akış alanı hakkındaki ayrıntıları elde etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, HAD analizleri sonucu elde edilen verilerin benzer deneysel ve teorik çalışmalarla karşılaştırılması ve doğrulanması bir sonraki süreçte gerekli deney sayısını düşürerek tasarım sürecinin kısalmasına da katkıda bulunmaktadır (Sözen ve Çiftçi, 2016).

Birçok akışkanlar dinamiği, ısı ve kütle transferi, enerji, yanma gibi problemlerin analitik olarak çözümü oldukça zordur ya da imkânsızdır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz tekniği, önerilen bir tasarımın performansını tahmin etmek için maliyet ve zaman tasarrufu konusunda çok etkili olmaktadır. Böylece, ele alınan problemler HAD yazılımları sayesinde hem daha az maliyetle hem de daha kısa sürelerde çözülebilmektedir.

Deneysel çalışmalarda akış şartlarını değiştirmek için bazı fiziksel ve maddi sorunlarla karşılaşılırken, farklı deneysel yöntemlerle doğrulanmış ve geliştirilmiş bir HAD yazılımı sayesinde farklı sınır şartları, farklı geometriler ve farklı akış parametreleri için kolaylıkla istenilen çözümler elde edilebilmektedir. HAD yazılımları sayesinde deneysel çalışmalara göre daha çok noktadan farklı akış özellikleri için farklı veriler elde edilebilirken, deneysel çalışmalarda bu verileri elde etmek oldukça zahmetli ve bazen imkânsız olabilmektedir. Ancak bu durum deneysel çalışmaları ortadan kaldırmak yerine doğrulama çalışmaları için deneysel çalışmaları gerekli kılmaktadır (Aktaş, 2015).

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı, önerilen tasarımın prototipini geliştirme ve test etme zamanını ve maliyetini ortadan kaldırdığından, kabuk-boru tipi EGR'nin tasarımı ve geliştirilmesi için çok önemli bir araçtır. Bu nedenle, EGR soğutucusu içindeki akış alanını ve sıcaklık dağılımını incelemek için sayısal simülasyonlar uygulanmaktadır. Bu çalışmada, EGR soğutucusunun sayısal analizi için genel amaçlı HAD yazılımı olan ANSYS FLUENT kullanılmıştır. Sonlu hacimler metoduyla çözüm yapan FLUENT programı çözücü seçenekleri bakımından oldukça gelişmiştir.

İlk aşamada, düz ve bölmeli olmak üzere iki tip soğutucunun üç boyutlu geometrileri ANSYS Workbench içerisindeki “Geometry” paneli yardımıyla oluşturulmuştur. Daha sonra, hücre yapısının oluşturulması için Workbench içerisindeki “Mesh” paneli yardımıyla uygun ağ yapısı tanımlanmıştır. Geometrinin sayısal hesaplamasını yapmak için Workbench içerisindeki “Fluent” programı kullanılmıştır.

Bu bölümde çözüm için sayısal ağ yapısının oluşturulması, sınır şartlarının tanımlanarak uygun çözücünün belirlenmesi ve elde edilen sonuçların kontrolünden bahsedilmiştir.

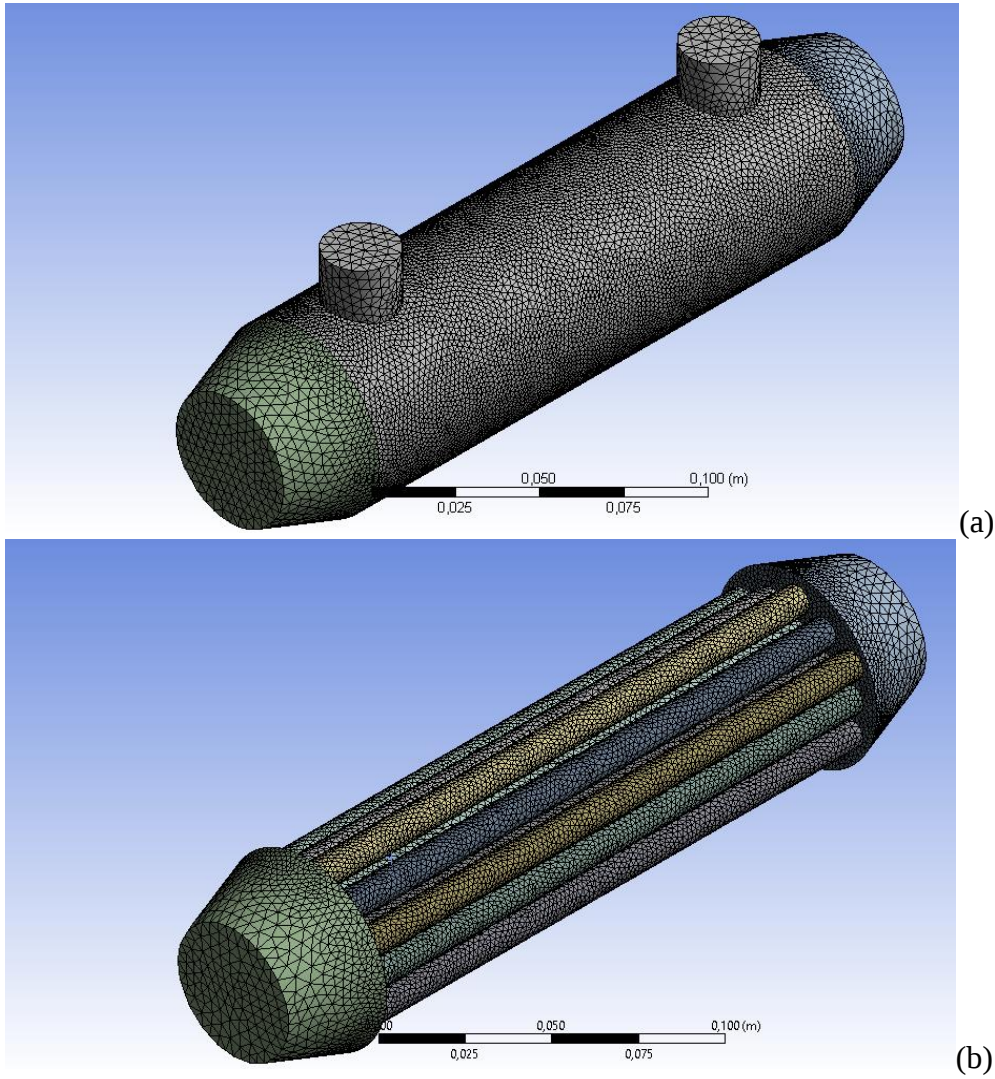
6.1. Çözüm Ağ Yapısı

Sonlu hacimler yöntemini kullanan ANSYS FLUENT programında, EGR soğutucusunu analiz etmeden önce çözüm alanını kontrol hacimlerine bölerek sayısal ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Çözüm alanının kontrol hacimlerine bölünmesinin sebebi diferansiyel denklem olarak ifade edilen matematiksel hesaplamaları cebirsel olarak ifade ederek denklemlerin sayısal olarak çözümünü sağlamaktır. Teorik olarak çözüm alanının içerisindeki her bir nokta için diferansiyel denklemler cebirsel olarak ayrı ayrı yazılabilmektedir. Ancak bu sonsuz sayıda cebirsel denklem anlamına gelmektedir. Bu denklemlerin çözümü imkânsız olduğundan bunun yerine cebirsel denklemler çözüm alanı içerisinde belirli sayıda noktada ifade edilmektedir. Çözüm alanı içerisinde diferansiyel denklemlerin belirli sayıda noktada ayrıklaştırılmasıyla elde edilen cebirsel eşitlikler çözülmekte ve bu noktalar için değişkenlerin değerleri bulunmaktadır (Aktaş, 2015).

Bir hesaplama bölgesi seçilerek yukarıda bahsedilen bu çözüm noktalarını içeren akış alanının oluşturulması HAD analizlerinde ağ (örgü) yapısı oluşturma (meshing) olarak ifade edilmektedir. Ağ yapısı içerisindeki her bir sonlu noktaya ise düğüm, grid, çözüm ya da hücre noktası gibi isimler verilmektedir. Ağ yapısının çok sayıda küçük elemana dönüştürülmesiyle hücre adı verilen birimler oluşturulmaktadır (Sözen ve Çiftçi, 2016).

Ağ yapısı, model simülasyonunun çözünürlüğünü ve sonuçların doğruluğunu göstermektedir. Bu nedenle, elemanların türü ve sayısı dikkatle düşünülmelidir. Bir model için ağ oluşturmada önemli bileşenlerden biri, simülasyon sonuçlarının oluşturulan hücre sayısından bağımsız olmasını sağlamaktır.

Farklı kesitteki geometriler için çözüm alanı farklı sayılarda elemanlara bölünerek uygun eleman sayısı ağ sayısından bağımsızlaştırılarak elde edilmiş ve çözümlemeler elde edilen sayılardaki elemanlarla yapılmıştır. Parametrik çalışmalar için kullanılan eleman sayıları 1,1 ile 1,3 milyon arasında değişmektedir. Sayısal hesaplama zamanını azaltmak için elde edilen minimum hücre sayısı kullanılmıştır. Sayısal çalışmalarda kullanılan örnek ağ yapıları Şekil 6.1’de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Sayısal çalışmalarda kullanılan örnek ağ yapıları: (a) soğutucu, (b) borular

HAD analizlerinden elde edilen sonuçların niteliği, büyük ölçüde oluşturulan ağ yapısının kalitesine bağlıdır. Ticari HAD yazılımlarında oluşturulan ağ yapısının kalitesini gösteren bazı parametreler vardır. Bu parametreler; çarpıklık oranı, diklik kalitesi ve eleman kalitesidir (Sözen ve Çiftçi, 2016).

Çarpıklık oranı, oluşturulan hücrelerin sahip olduğu geometrik şekillerin ideal geometrik şekillere (eşkenar üçgen, kare) ne ölçüde yakın olduğunu belirten skewness değeridir. 0 ile 1 arasında bir değer alan bu ifade, Eş. 6.1’de verilen denklemle hesaplanmaktadır (ANSYS Meshing Guide, 2015: 401).

$$Skewness = \frac{Ideal\ Hücre\ Boyutu - Gerçek\ Hücre\ Boyutu}{Ideal\ Hücre\ Boyutu} \quad (6.1)$$

Diklik kalitesi ise yine 0 ile 1 arasında değerler alan, hücre merkezlerinin bağlantı vektörleri ile hücrelerin yüzey normal vektörleri arasındaki açı olarak tanımlanan orthogonal quality değeridir. Skewness değerinden farklı olarak diklik kalitesinin 0’a yakın olması hücre yapısının kalitesiz olduğunu gösterirken 1’e yakın olması kaliteli hücrelerin çoğunlukta olduğunu bir göstergesi olarak yorumlanmaktadır (ANSYS Users Guide, 2015: 132).

Kullanılan modellerde hücre yapılarının kalitesini belirlemek için Şekil 6.2’deki tablodan yararlanılarak çarpıklık oranı (skewness) ve diklik kalitesi (orthogonal quality) değerlerinin uygun aralıkta olup olmadığı incelenmiştir.

Skewness mesh metrics spectrum:



Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:



Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Şekil 6.2. Hücre kalitesi değer aralıkları (ANSYS Meshing Guide, 2015: 401)

Bu çalışmada oluşturulan örnek bir ağ yapısının kalitesine ait bilgiler Çizelge 6.1 ve Şekil 6.3’te verilmiştir. Burada verilen skewness ve orthogonal quality değerlerine göre ağ kalitesi hakkında yorum yapmamız mümkün olmaktadır. Ortalama değerler ağ yapısındaki bütün elamanların göz önünde bulundurulmasıyla elde edilmiştir. Örneğin; ortalama çarpıklık oranı değerinin 0’a yakın olması ve ortalama diklik kalitesinin 1’e yakın olması, kaliteli hücrelerin çoğunlukta olduğunu göstermektedir.

Bu parametreler incelendiğinde, oluşturulan ağ yapısının kalitesinin çözüm için uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1. Ağ yapısının kalitesini gösteren parametreler ve değerleri

Parametre	En küçük değer	En büyük değer	Ortalama
Çarpıklık oranı	0,0002	0,8353	0,2465
Diklik kalitesi	0,2324	0,9979	0,8533

Details of "Mesh"	Details of "Mesh"																																
+ Sizing - Quality <table> <tr> <td>Check Mesh Quality</td><td>Yes, Errors</td></tr> <tr> <td>Smoothing</td><td>High</td></tr> <tr> <td>Mesh Metric</td><td>Skewness</td></tr> <tr> <td>☐ Min</td><td>2,1074e-004</td></tr> <tr> <td>☐ Max</td><td>0,83532</td></tr> <tr> <td>☐ Average</td><td>0,24648</td></tr> <tr> <td>☐ Standard Deviation</td><td>0,13112</td></tr> </table> + Inflation - Assembly Meshing <table> <tr> <td>Method</td><td>Tetrahedrons</td></tr> </table>	Check Mesh Quality	Yes, Errors	Smoothing	High	Mesh Metric	Skewness	☐ Min	2,1074e-004	☐ Max	0,83532	☐ Average	0,24648	☐ Standard Deviation	0,13112	Method	Tetrahedrons	+ Sizing - Quality <table> <tr> <td>Check Mesh Quality</td><td>Yes, Errors</td></tr> <tr> <td>Smoothing</td><td>High</td></tr> <tr> <td>Mesh Metric</td><td>Orthogonal Quality</td></tr> <tr> <td>☐ Min</td><td>0,23241</td></tr> <tr> <td>☐ Max</td><td>0,99794</td></tr> <tr> <td>☐ Average</td><td>0,85331</td></tr> <tr> <td>☐ Standard Deviation</td><td>8,8561e-002</td></tr> </table> + Inflation - Assembly Meshing <table> <tr> <td>Method</td><td>Tetrahedrons</td></tr> </table>	Check Mesh Quality	Yes, Errors	Smoothing	High	Mesh Metric	Orthogonal Quality	☐ Min	0,23241	☐ Max	0,99794	☐ Average	0,85331	☐ Standard Deviation	8,8561e-002	Method	Tetrahedrons
Check Mesh Quality	Yes, Errors																																
Smoothing	High																																
Mesh Metric	Skewness																																
☐ Min	2,1074e-004																																
☐ Max	0,83532																																
☐ Average	0,24648																																
☐ Standard Deviation	0,13112																																
Method	Tetrahedrons																																
Check Mesh Quality	Yes, Errors																																
Smoothing	High																																
Mesh Metric	Orthogonal Quality																																
☐ Min	0,23241																																
☐ Max	0,99794																																
☐ Average	0,85331																																
☐ Standard Deviation	8,8561e-002																																
Method	Tetrahedrons																																

Şekil 6.3. Ağ yapısının kalitesi

Daha düzgün bir ağ yapısı elde etmek için tetrahedrons (dört yüzlü) mesh tipi ve high smoothing (yüksek düzeltme) ayarları yapılmıştır.

6.2. Genel Ayarlar

HAD analizlerinde, ağ yapısının oluşturulması ve kalitesinin irdelenmesinin ardından uygun bir ağ yapısına karar verildikten sonra sayısal analize geçilmektedir. Sayısal analiz işlemleri ANSYS programının FLUENT modülünde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde matematiksel ve fiziksel tanımlaması yapılan modelin FLUENT programında nasıl tanımlandığından, giriş-çıkış sınır şartlarından, duvar sınır şartlarından ve çözücü ayarlarından bahsedilmiştir (Sözen ve Çiftçi, 2016).

Çözüm ağı kontrolü: İlk olarak çağrılan geometrinin birimlerinin, çalışmak istediğimiz birimlere uygun olup olmadığı "Scale" sekmesinden kontrol edilmiştir. Birimlerin, istenilen uygun birimlere dönüşümü bu sekme sayesinde sağlanabilmektedir.

Daha sonra “Check” sekmesi yardımıyla çağrılan geometrinin sınır uzunluk değerleri, yüzey ve hacim istatistik değerleri kontrol edilmiştir. Son olarak ise “Report Quality” sekmesi yardımıyla ağ yapısı kalitesinin çözüm için uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Yapılan parametrik çalışmalar için kullanılan hücre kalitesi değerlerinin kontrolü Şekil 6.4’te verilmiştir. Hacim elemanlarının pozitif değere sahip olduğu görülmüştür. Kontrol sonucunda negatif değerde bir hacim olduğu görülürse tekrar geometri düzenlemesine gidilerek gerekli düzenlemeler yapılmalıdır.

```
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -3.250000e-02, max (m) = 3.250000e-02
  y-coordinate: min (m) = -5.000000e-02, max (m) = 5.000000e-02
  z-coordinate: min (m) = -3.000000e-02, max (m) = 2.300000e-01
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 3.841893e-11
  maximum volume (m3): 3.084143e-08
  total volume (m3): 8.245009e-04
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 1.259209e-07
  maximum face area (m2): 2.004579e-05
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

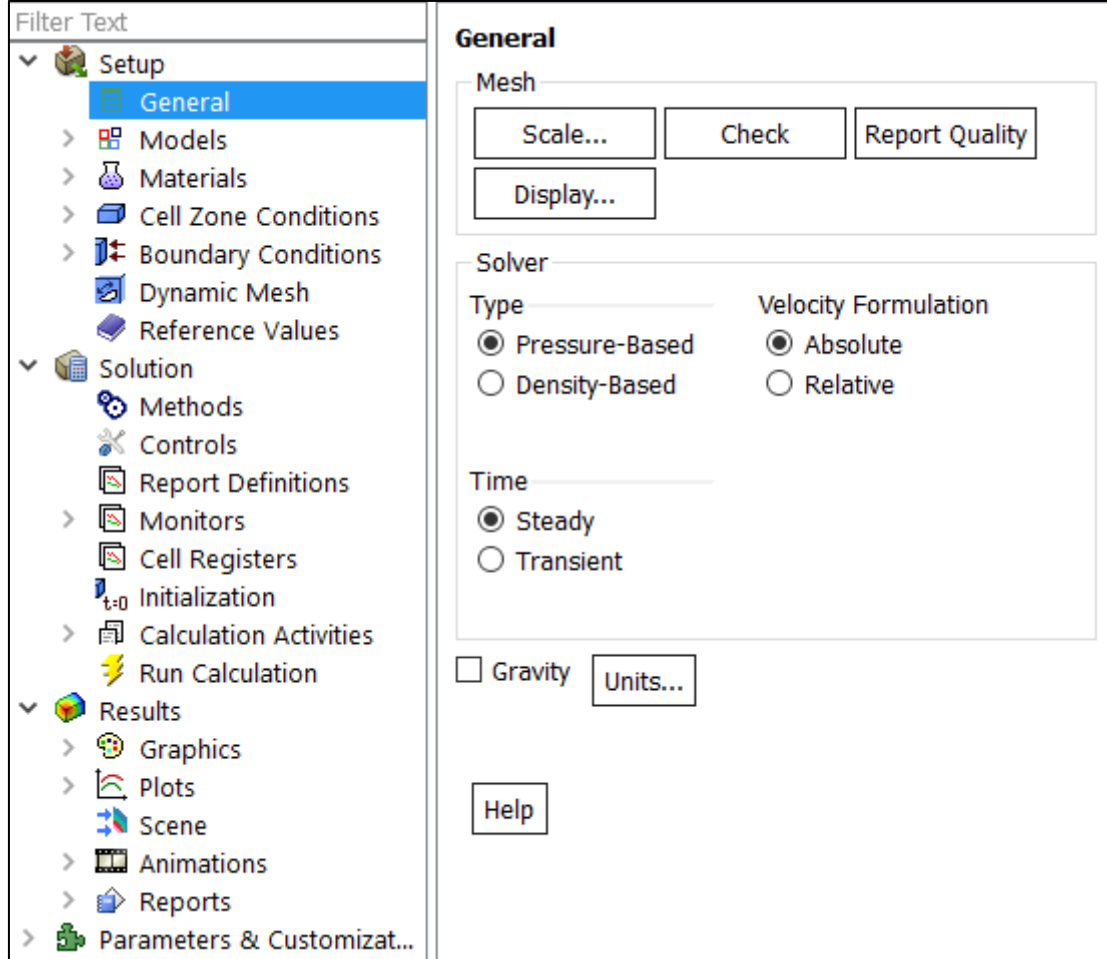
Minimum Orthogonal Quality = 1.64682e-01 cell 56931 on zone 9 (ID: 626)
(To improve Orthogonal quality , use "Inverse Orthogonal Quality"
where Inverse Orthogonal Quality = 1 - Orthogonal Quality)

Maximum Aspect Ratio = 1.97305e+01 cell 61523 on zone 9 (ID: 626)
```

Şekil 6.4. Ağ yapısının kontrolü

Genel çözücü ayarları: ANSYS FLUENT programında iki ayrı çözücü seçeneği bulunmaktadır. Bunlar basınç tabanlı (pressure-based) ve yoğunluk tabanlı (density-based) çözücülerdir. Basınç tabanlı çözücüler sıkıştırılamaz akışların, yoğunluk tabanlı çözücüler ise genellikle sıkıştırılabilir akışkanların çözümü için geliştirilmiştir. Her iki çözücüde de kontrol hacimler metodu kullanılarak süreklilik, momentum, enerji ve türbülans denklemleri çözülmektedir (ANSYS Users Guide, 2015: 132).

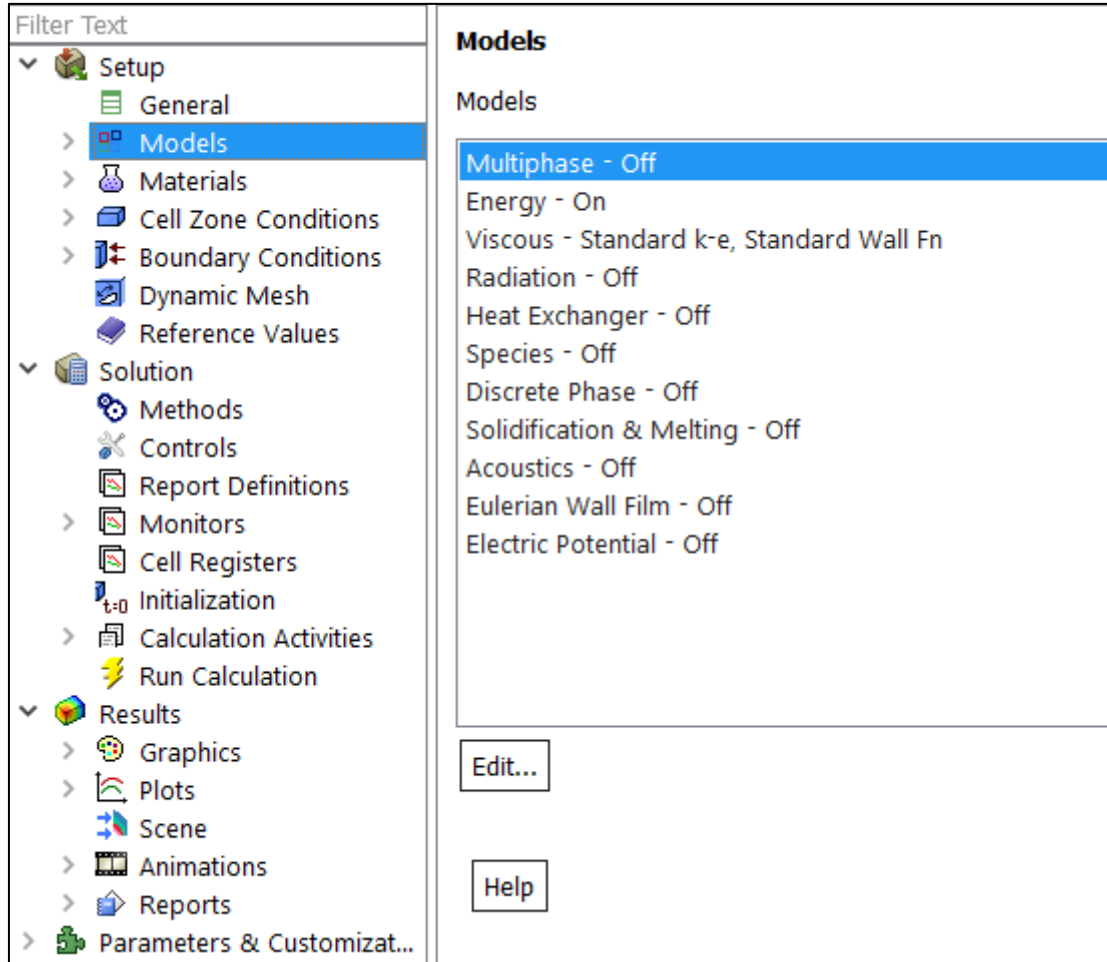
Yapılan sayısal çalışmada akışın sıkıştırılmaz olarak kabulünden dolayı çözücü seçeneği olarak basınç tabanlı çözücü kullanılmıştır. Ayrıca parametrik çalışmalar için zamandan bağımsız (steady) çözüm yapılmıştır. Yer çekiminin etkisi ihmal edildiği için “Gravity” seçeneği etkin hale getirilmemiştir. Genel ayarların görüntüsü Şekil 6.5’te verilmiştir.



Şekil 6.5. Genel ayarların görüntüsü

6.2.1. Enerji denkleminin çözdürülmesi ve akış türünün belirlenmesi

Problemimizde giriş sıcaklıkları olduğundan ısı transferini de hesaplamak için enerji denkleminin çözdürülmesini sağlayan “Energy” seçeneği etkin hale getirilmiştir. Bu çalışmada türbülanslı akış söz konusu olduğundan, akış türü olarak “türbülans” akış türü seçilmiştir. Türbülanslı modellemek için standart k-ε modeli kullanılmıştır. Duvar fonksiyonu olarak “Standard wall function” seçilmiştir. Enerji denklemi ve akış türü tanımlamasının yapılması Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Enerji denkleminin çözdürülmesi ve akış türü tanımlaması yapılması

6.3. Çözücü Ayarları

FLUENT programında SIMPLE, SIMPLEC, PISO ve COUPLED olmak üzere 4 farklı basınç-hız eşlenik çözüm seçeneği vardır. Problemden SIMPLE çözüm algoritması kullanılmıştır. SIMPLE çözüm algoritması, kütle korunumunu sağlamak ve çözüm hacmindeki basınç eğrilerini elde edebilmek için hız ile birlikte düzeltilmiş basınç arasındaki ilişkiyi kullanmaktadır. SIMPLE algoritmasının uyguladığı temel işlem ise aşağıdaki gibidir (ANSYS Users Guide, 2015: 132; Aktaş, 2015).

1. Basınç dağılımı tahmin edilir.
2. Tahmini basınç dağılımı ile hız bileşenleri çözülür.
3. Çözülen hız bileşenlerinin süreklilik denklemini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.
4. Süreklilik denklemi sağlanmıyorsa basınç düzeltilir.
5. İkinci adımdan sonraki işlemler tekrarlanır.

Ayrıca ayırıklaştırma yöntemi olarak Least Squares Cell Based, standart basınç tabanlı ayırıklaştırma yöntemleri, momentum, türbülans ve enerji denklemlerinin ayırıklaştırılması için birinci derece çözüm yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan çözüm ve ayırıklaştırma yöntemleri Şekil 6.7’de verilmiştir.

Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme

SIMPLE

Spatial Discretization

Gradient

Least Squares Cell Based

Pressure

Standard

Momentum

First Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy

First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate

First Order Upwind

Solution Initialization

Initialization Methods

☐ Hybrid Initialization

☒ Standard Initialization

Compute from

Inlet

Reference Frame

☒ Relative to Cell Zone

☐ Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)

0

X Velocity (m/s)

0

Y Velocity (m/s)

0

Z Velocity (m/s)

0

Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)

0.1937242

Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)

23.12272

Initialize Reset Patch...

Şekil 6.7. Çözüm yöntemleri ve çözüm için ilk değerlerin atanması

Sonuçların yakınsaması için relaxation değerlerine müdahale edilmemiştir. Çözümün başlaması için ise egzoz gazı giriş değerleri temel alınarak çözüm yaptırılmıştır.

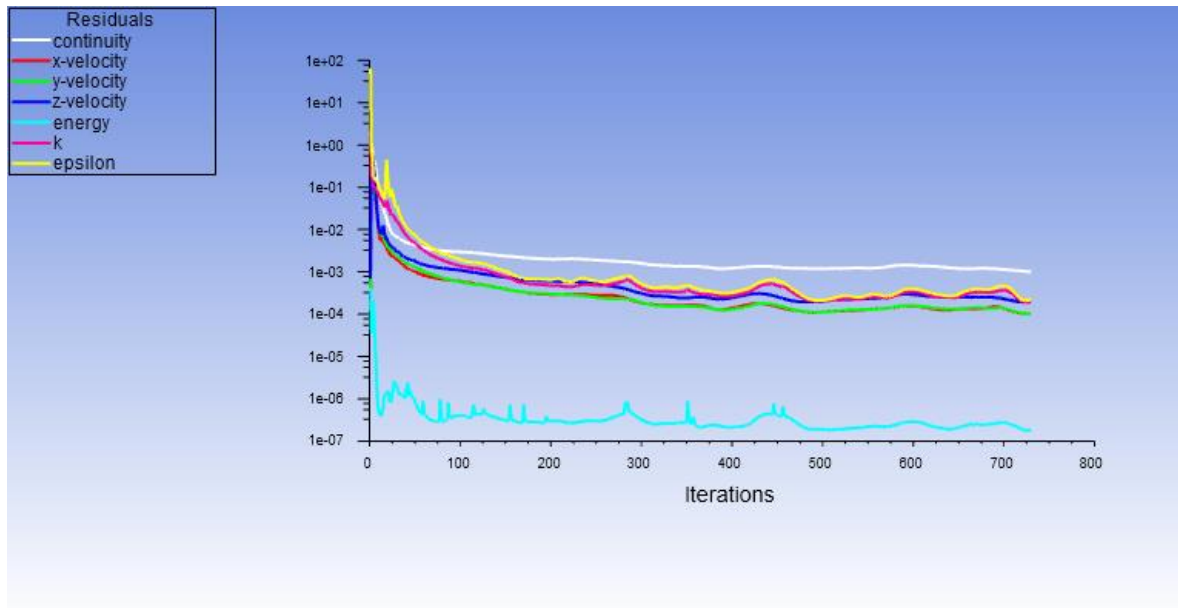
6.4. Yakınsama Kontrolü

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımları kullanarak birçok sayısal çözüm elde etmek mümkündür. Bazen çok kısa sürelerde belirli problemlerin sonucuna ulaşılabilir. Bazen çok uzun sürelerde belirli problemlerin sonucuna ulaşılabilir.

Ancak elde edilen sonuçların fiziksel kanunlara ve olaylara uygun olması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı elde edilen çözümler birçok kere değiştirilerek, düzeltilerek ve farklı tanımlamalar yapılarak farklı çözücü ayarlarıyla birlikte, daha gerçekçi çözümler elde edilene kadar bu işlemler tekrarlanmaktadır. Elde edilen sonuçların doğruluğu için yapılması gereken kontroller aşağıda belirtilmiştir (Aktaş, 2015).

6.4.1. Çözümün yakınsaması

Yakınsama, sayısal çalışmalarda kullanılan her bir nokta için tüm korunum denklemlerinin çözüm alanındaki her noktada dengeye geldiği zaman gerçekleşmektedir. Çözümün yakınsaması için bütün değişkenlerin tekdüze bir azalma göstermesi gerekmektedir. Yapılan bir HAD çözümlemesinde, çalışmaya başlamadan önce belirtilen yakınsama kriterine göre çözümün başlatılması ve bu değere yakınsaması gözlemlenmektedir. Bu kriter ise çözümdeki hatanın oranı hakkında bize bilgi vermektedir. Bu kriterler programa tanıtılarak istediğimiz hassasiyette ve istediğimiz hata oranına ulaşana kadar çözümün devam etmesi sağlanmaktadır. Bu çalışmada her bir değişken için yakınsama kriteri 1×10^{-3} olarak kabul edilmiştir. Kullanılan FLUENT programında iterasyon sayısına bağlı olarak tüm değişkenler için elde edilen örnek bir çözümün yakınsama grafiği Şekil 6.8’de gösterilmektedir.



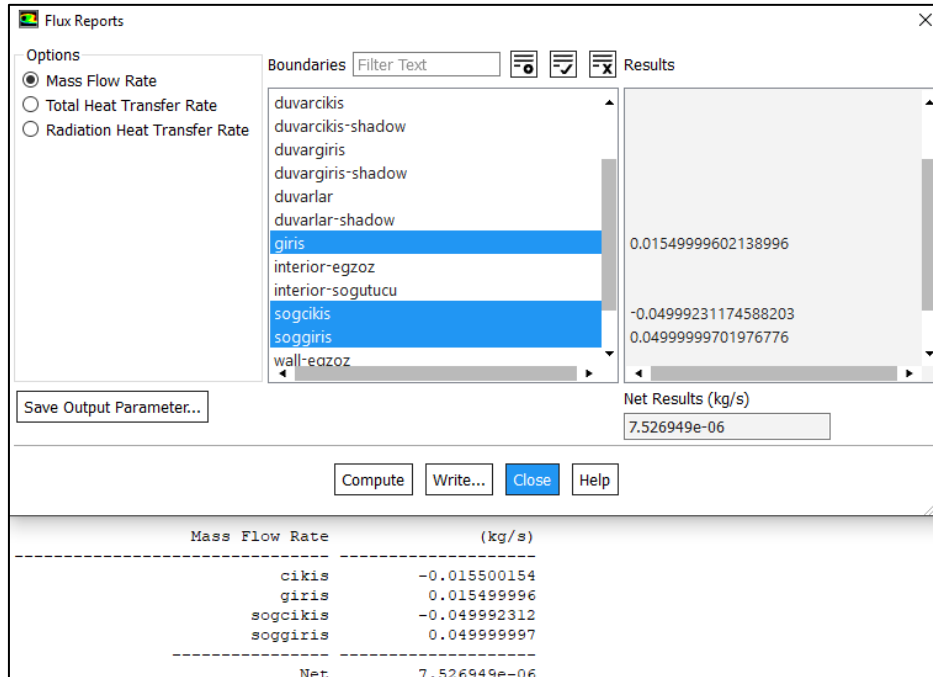
Şekil 6.8. Örnek bir çözümün yakınsama grafiği

6.4.2. Çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı

Çözümün doğruluğu ve yakınsaması iterasyon sayısı ile yakından ilişkilidir. Bazı problemlerin çözümü 100 iterasyon ile geçerli duruma gelirken bazı problemler için ise 10000 iterasyon bile yeterli olmamaktadır. Bu sebepten dolayı iterasyon sayısı artırılarak yakınsamanın ve incelenen sonucun nasıl değiştiği sürekli olarak gözlemlenmelidir. Bunun amacı, iterasyon sayısının artışı ile belirli bir noktadan sonra yakınsamanın değişmediğini veya devam ettiğini gözlemlemektir. Yakınsamanın değişmediği iterasyon sayısı yapılacak çözümler için referans olarak alınmakta ve tüm çözümler için bu iterasyon sayısı kullanılmaktadır. Böylece doğru sonuca en uygun iterasyon sayısı ile daha hızlı bir şekilde ulaşılabilmektedir. Bu çalışmada yaklaşık 1000. iterasyondan sonra çözüm sonucunun değişmediği görülmüş ve diğer tüm çözümler için iterasyon sayısı 1000 olarak belirlenmiştir.

6.4.3. Korunum denklemleri kontrolü

Çözümün yakınsadığı ve iterasyon sayısından bağımsızlaştığı görüldükten sonra problemin çözümünün sonucunda kütle korunumu denkleminin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 6.9. Örnek bir çözümün kütle korunumu kontrolü

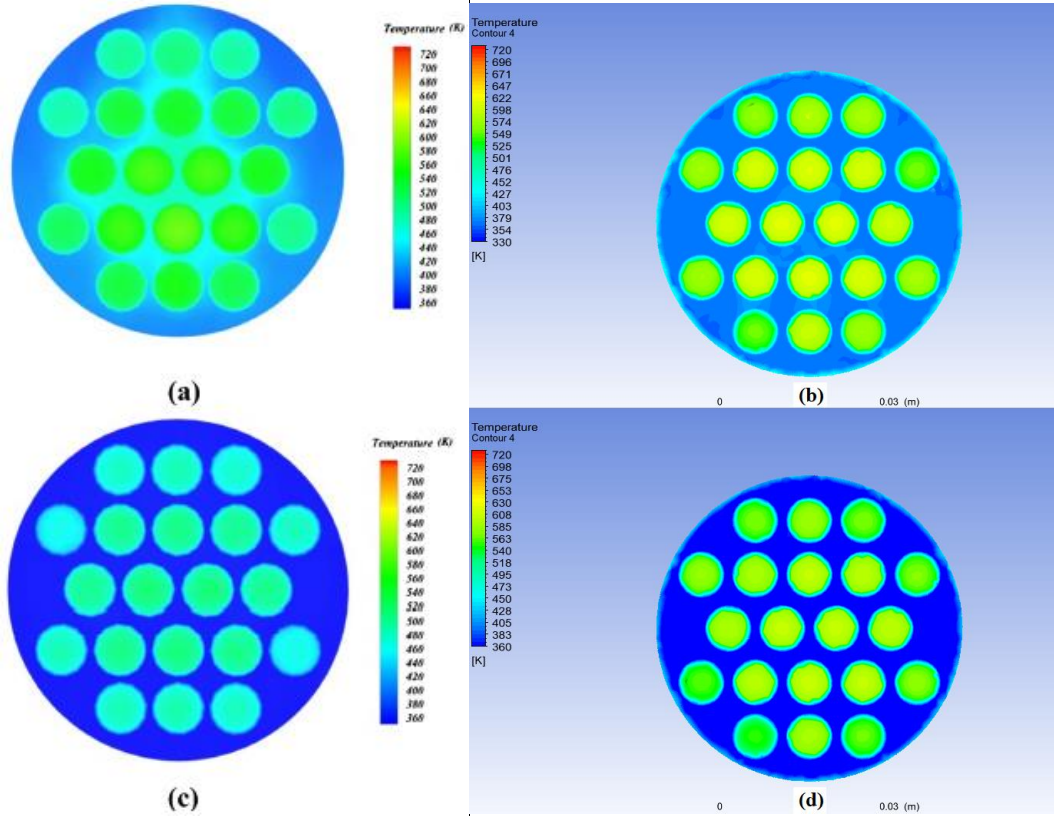
6.4.4. Çözümün ağ yapısından bağımsızlığı

Ağ yapısından bağımsızlık, oluşturulan ağ yapısındaki hücrelerin sayısında, boyutunda veya geometrisinde bazı değişiklikler yapılmasına karşın elde edilen sonuçların kabul edilebilir hata oranları içerisinde olmasıdır (Sözen ve Çiftçi, 2016). Ağ yapısı, elde edilecek sonuçları doğrudan etkileyebilmektedir. Bu sebepten dolayı elde edilen yeni sonucun bir önceki sonuçla aynı olması durumuna kadar ya da çok küçük değişiklikler gösterene kadar sonuçlar izlenerek en uygun hücre yapısı ve sayısı belirlenmeli ve çözüm ağ yapısından bağımsızlaştırılmalıdır. Bu çalışmada, en uygun hücre sayısının 1,1 ile 1,3 milyon arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

6.5. Doğrulama Çalışmaları

Literatürden alınan verilerdeki aynı şartlar için aynı model oluşturularak uygulandığında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

Shabgard ve diğerlerinin (2017) çalışmasında, soğutucunun uzunluğu 260 mm, dış çapı 51 mm, soğutucunun içinde çapı 8 mm, kalınlığı 0,5 mm ve uzunluğu 150 mm olan 20 boru yer almaktadır. Egzoz gazı ve soğutucu akışkan girişlerinin çapları sırasıyla 28 mm ve 20 mm'dir. Giriş şartı olarak egzoz gazı 0,0138 kg/s kütle akış oranında ve 723 K sıcaklıkta belirtilmiştir. Soğutucu akışkanın giriş sıcaklığı da 353 K olarak tanımlanmıştır. Bu çalışma, aynı sınır şartları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmıştır.

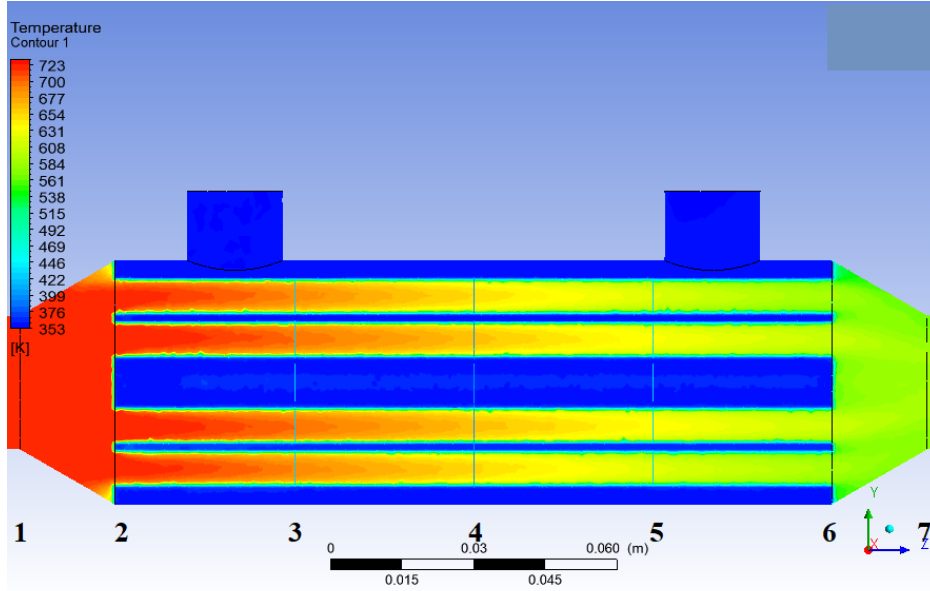


Şekil 6.10. Reynolds sayısının egzoz gazının sıcaklığına etkisinin karşılaştırılması: (a,b) $Re=5 \times 10^3$, (c,d) $Re=10^5$. (a,c: Shabgard vd.; b,d: Bu çalışma)

Reynolds sayısının, EGR soğutucusunun çıkış kesitindeki egzoz gazının sıcaklığına etkisi Şekil 6.10'da karşılaştırılmıştır. Shabgard ve diğerlerinin (2017) çalışmasında elde edilen sonuçlar Şekil 6.10-a,c'de verilmiştir. Aynı şartlar için aynı model oluşturularak uygulandığında elde edilen sonuç ise Şekil 6.10-b,d'de verilmiştir. Oluşturulan model sayısal çözümle karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların uyum içinde olduğu saptanmıştır. Düşük debilerde her iki model de benzer sonuçlar vermiştir. Ancak, daha büyük debiler için sonuçlar sapmıştır. Bu farklılıklar, matematiksel modelde kullanılan varsayımlara ve simülasyon sırasında yapılan basitleştirmelere bağlı olabilmektedir.

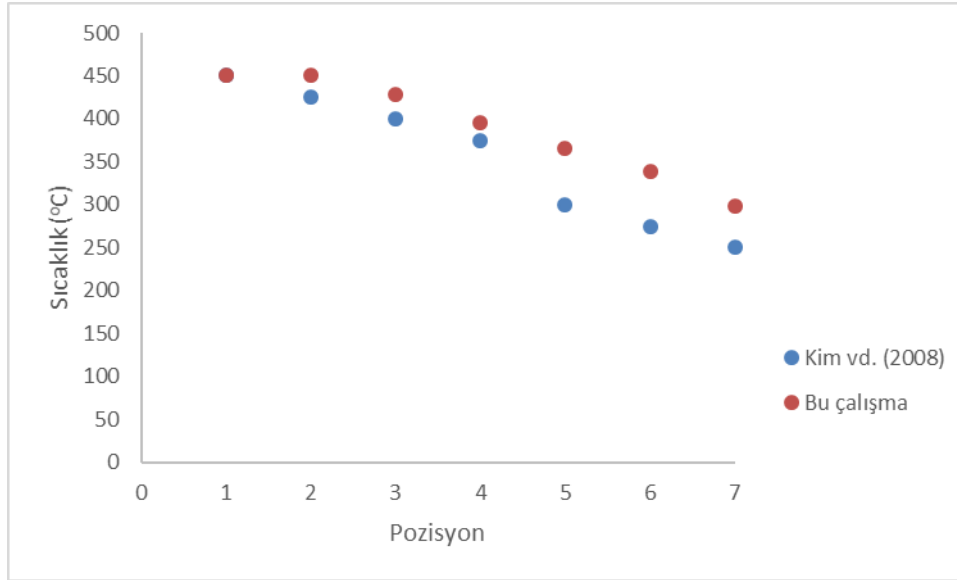
Jang ve diğerleri (2011) ile Kim ve diğerlerinin (2008) çalışmasında, soğutucunun içinde çapı 8 mm, kalınlığı 0,5 mm ve uzunluğu 150 mm olan 20 çelik boru yer almaktadır. Giriş şartı olarak egzoz gazını 50 kg/h kütle akış oranında ve 450°C sıcaklıkta belirtmişlerdir. Soğutucu akışkanı 30 l/dak kütle akış oranında ve giriş sıcaklığını da 80°C olarak tanımlamışlardır. Bu çalışmalar, aynı sınır şartları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmıştır.

Şekil 6.11, EGR soğutucusu borularının içindeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Soğutucunun boru uzunluğu boyunca egzoz gazlarının sıcaklığında büyük bir değişiklik olduğu görülmektedir.



Şekil 6.11. EGR soğutucusu borularının içindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 6.12'deki grafik, söz konusu çalışma ile sayısal doğrulama arasındaki sonuca dayanarak boru uzunluğu boyunca ortalama sıcaklık dağılımlarının bir karşılaştırmasını göstermektedir. Sıcak hava soğutucuya 450°C (723 K) sıcaklıkta girmektedir. Grafik, her iki sonucun da sıcaklıktaki farkla aynı yolu takip ettiğini göstermektedir. Yaptığımız doğrulama, 4 numaralı pozisyona kadar söz konusu çalışma ile benzer performans göstermektedir. Ancak, 4 numaralı pozisyonun ötesinde, karşılaştırılan iki sonuç arasındaki fark artarak yaklaşık % 20'ye kadar çıkmıştır.



Şekil 6.12. Egzoz gazının ortalama sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması

Sonuç olarak oluşturulan model, bir deneysel ve iki farklı sayısal çözümle karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların uyum içinde olduğu saptanmıştır.

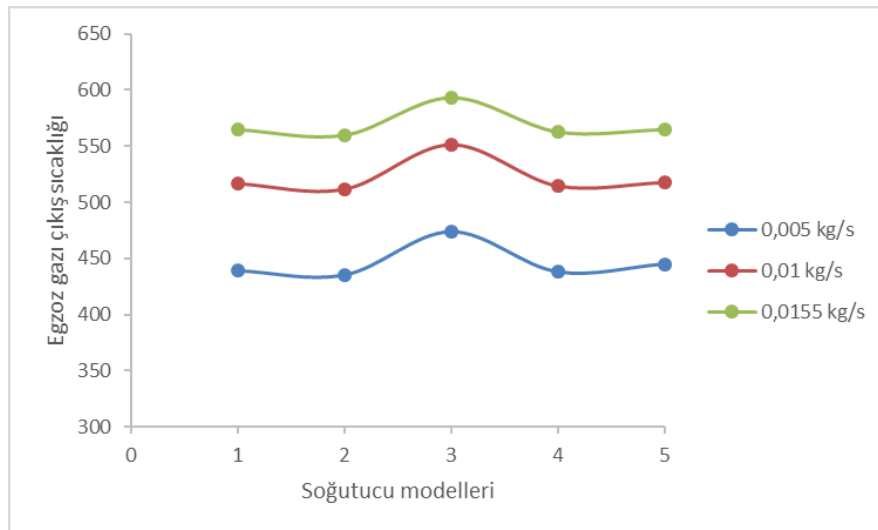
7. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, soğutucu akışkanın giriş debisi sabit tutulurken soğutucuya giren egzoz gazı giriş debisi parametrik olarak değiştirilmiştir. Analizlerde kullanılan sınır şartlarının genel hali Çizelge 7.1’de verilmiştir. Burada açıklanan modeller için egzoz gazlarının farklı kütle akış oranları ile sayısal analizler yapılmıştır. Böylece, bu parametrelerin etkileri karşılaştırılmış ve sonuçları incelenmiştir.

Çizelge 7.1. Sayısal çalışmalarda kullanılan sınır şartları

Parametre	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Egzoz gazı giriş debisi (kg/s)	0,0155 0,01 0,005	0,0155 0,01 0,005	0,0155 0,01 0,005	0,0155 0,01 0,005	0,0155 0,01 0,005
Egzoz gazı giriş sıcaklığı (K)	723	723	723	723	723
Soğutucu giriş debisi (kg/s)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Soğutucu giriş sıcaklığı (K)	353	353	353	353	353
Bölme sayısı	-	4	3	5	5
Kabuk uzunluğu (mm)	260	260	210	260	230
Boru uzunluğu (mm)	200	200	150	200	190

Analizlerde kullanılan egzoz gazı giriş debilerinin çıkış sıcaklığına etkisi Şekil 7.1’de verilmiştir. Egzoz gazının 0,01 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debilerinde, egzoz gazı sıcaklığının en düşük değerlerine ulaşılmıştır.

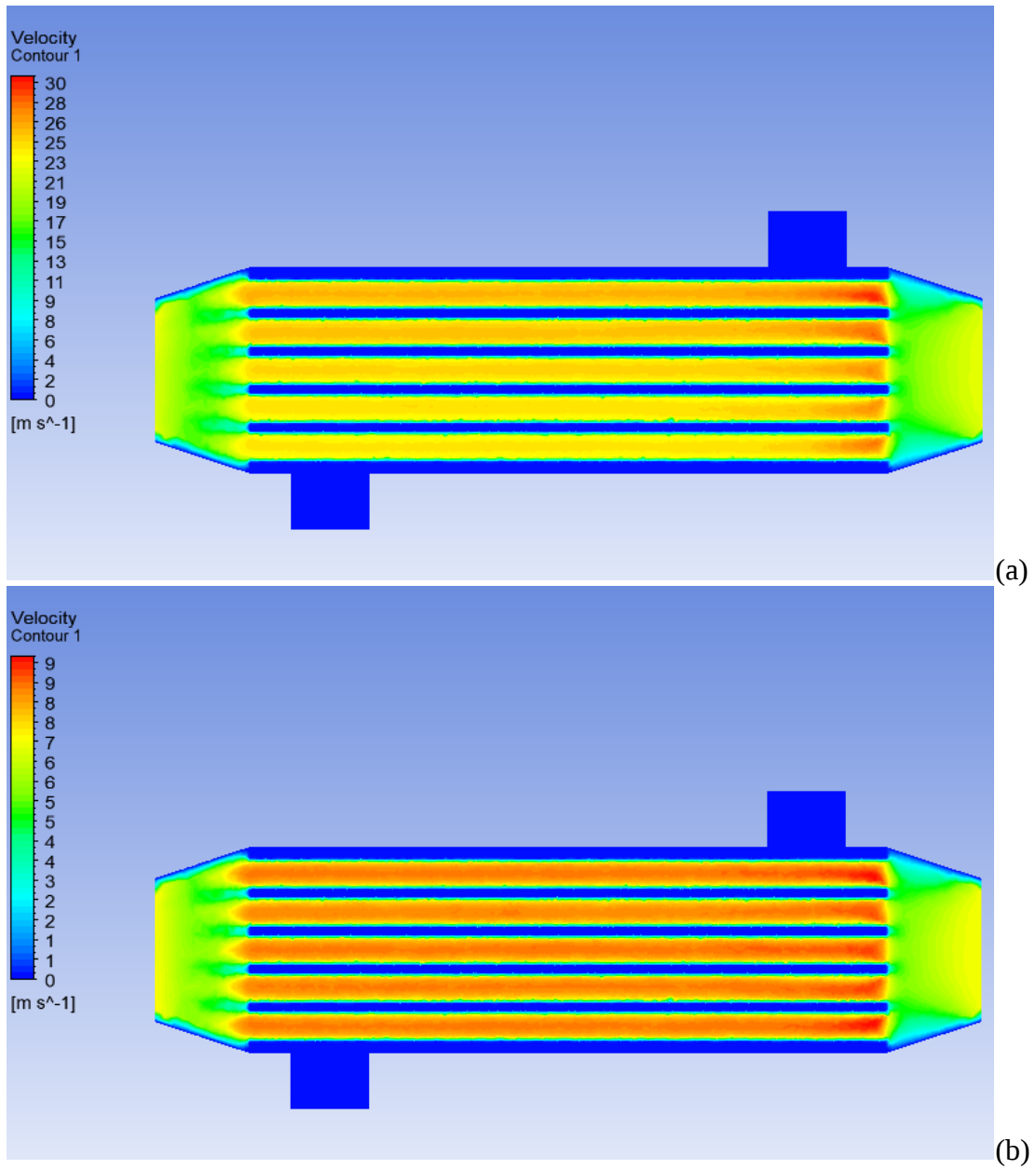


Şekil 7.1. Egzoz gazı giriş debilerinin karşılaştırılması

7.1. Model 1 Analizi

Hız dağılımı

Simüle edilen düz soğutucunun hız dağılımı Şekil 7.2'de, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir. Bu dağılım, EGR soğutucusunun farklı bölgelerinde bulunan akışkan parçacıklarının hız büyüklüklerini ve egzoz gazları ile soğutucu akışkan arasındaki ısı aktarımına nasıl tepki verdiklerini göstermektedir.

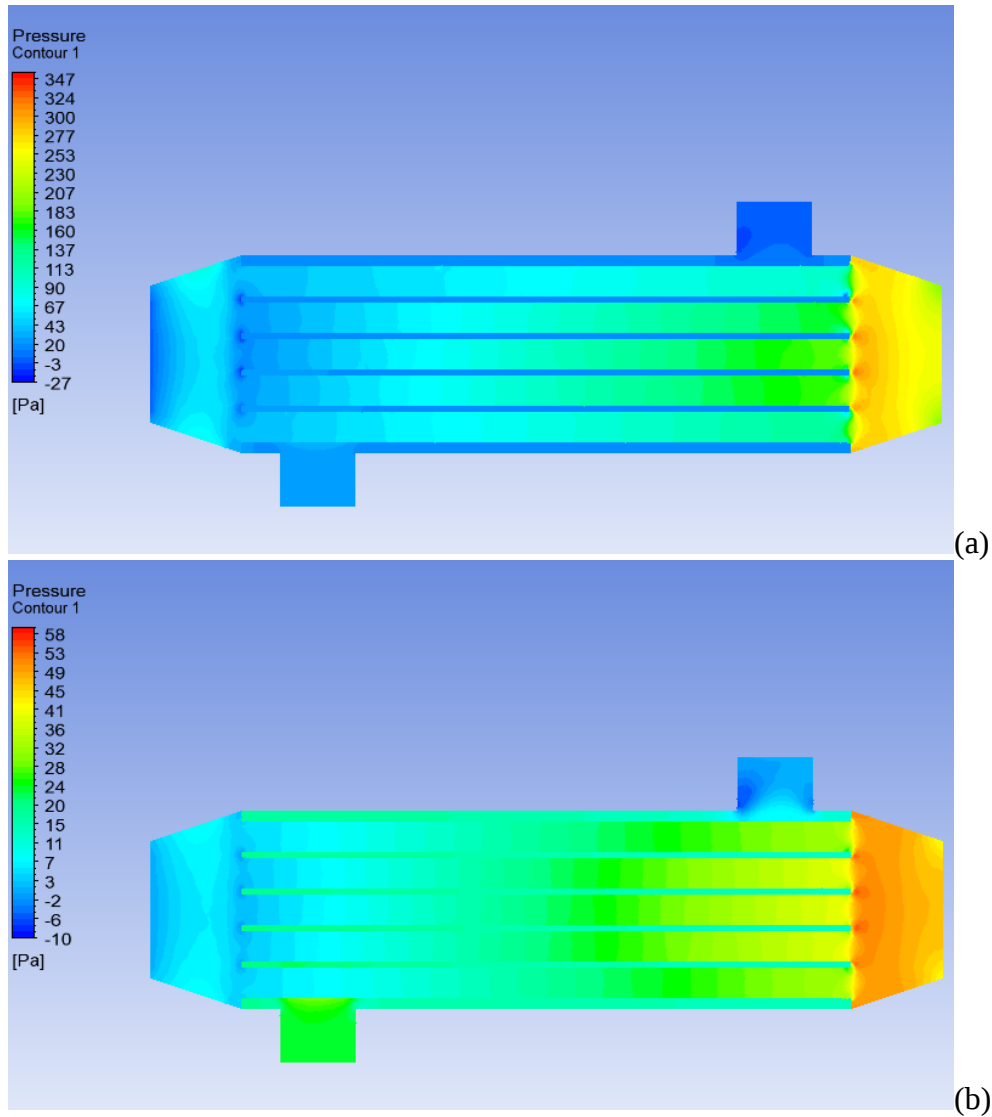


Şekil 7.2. EGR soğutucusunun hız dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.2'ye göre, akışkan alanı boyunca hızların değişken büyüklük bölgelerine sahip olduğu görülmektedir. EGR soğutucusunun girişindeki hız daha düşüktür. Ancak, egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken boruların girişindeki hızın maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Borulardaki akış ilerledikçe egzoz gazı hızı azalmaktadır. Egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken hızın maksimum değeri 30 m/s, debi 0,005 kg/s iken hızın maksimum değeri 9 m/s değere ulaşmıştır.

Basınç dağılımı

Simüle edilen düz soğutucusunun basınç dağılımı Şekil 7.3'de, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir.

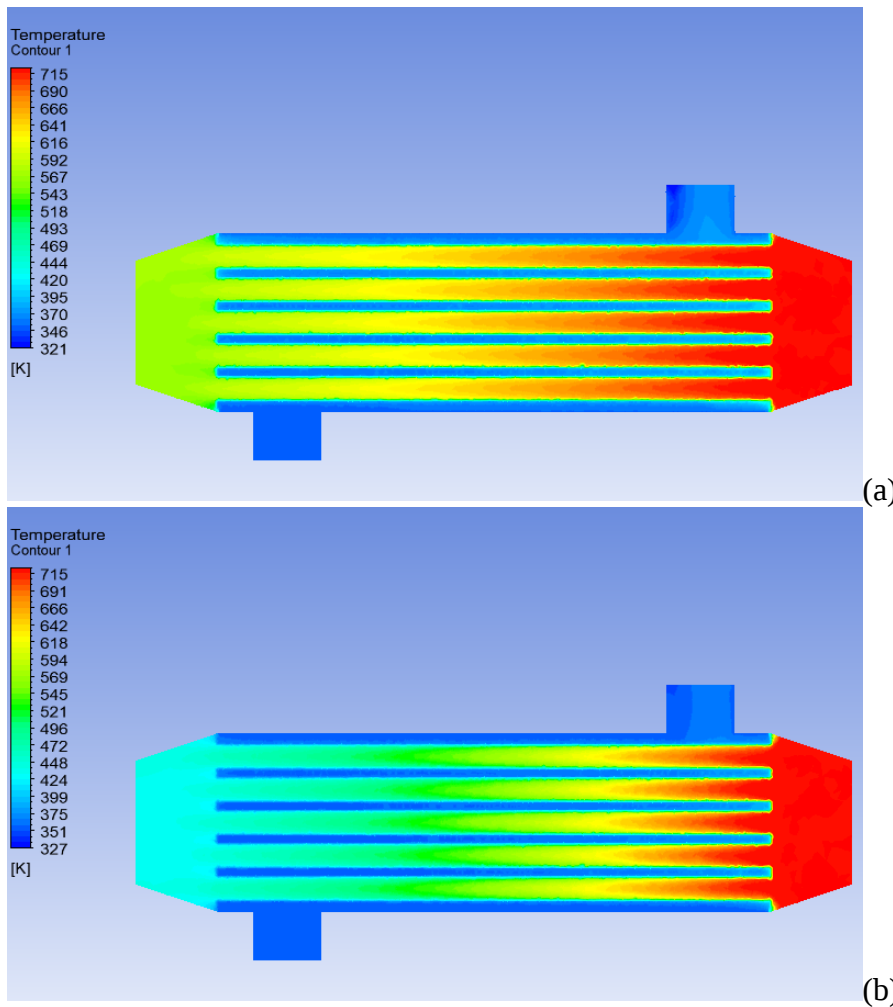


Şekil 7.3. EGR soğutucusunun basınç dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.3'e göre, soğutucunun borularından geçerken egzoz gazı basıncı düşmektedir, ancak basınç düşüşünün çok yüksek olmadığı görülmektedir. Basınç düşüşü miktarı; 0,0155 kg/s debide, 0,005 kg/s debiye göre bir miktar daha fazla elde edilmiştir. Soğutucu akışkan kısmındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 70 Pa, 0,005 kg/s debide 40 Pa mertebesinde elde edilmiştir. Egzoz gazının geçtiği soğutucu borularındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 250 Pa, 0,005 kg/s debide 50 Pa mertebesinde elde edilmiştir.

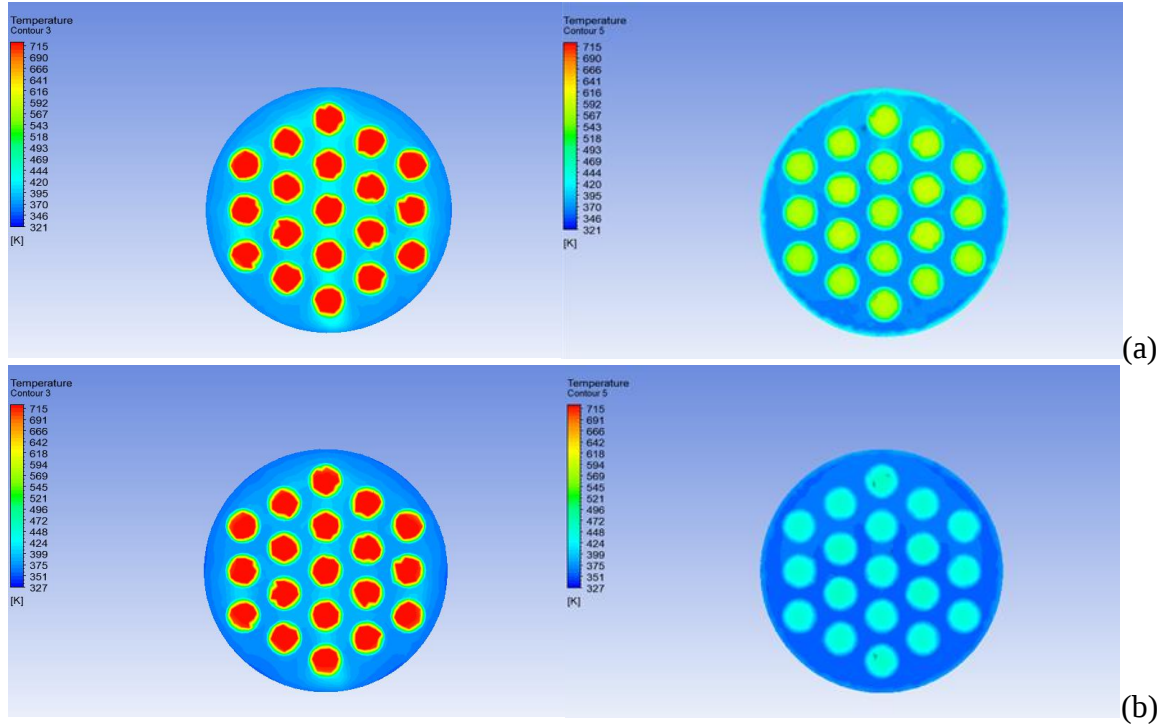
Sıcaklık dağılımı

Şekil 7.4, EGR soğutucusu borularının içindeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Soğutucunun boru uzunluğu boyunca egzoz gazlarının sıcaklığında büyük bir değişiklik olduğu görülmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı, girişten çıkışa doğru akış ilerledikçe düşmüştür. Kabuk tarafındaki soğutucu akışkanın sıcaklığı ise bir miktar yükselmiştir.



Şekil 7.4. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

EGR soğutucusunun giriş ve çıkışındaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı Şekil 7.5'de gösterilmiştir.



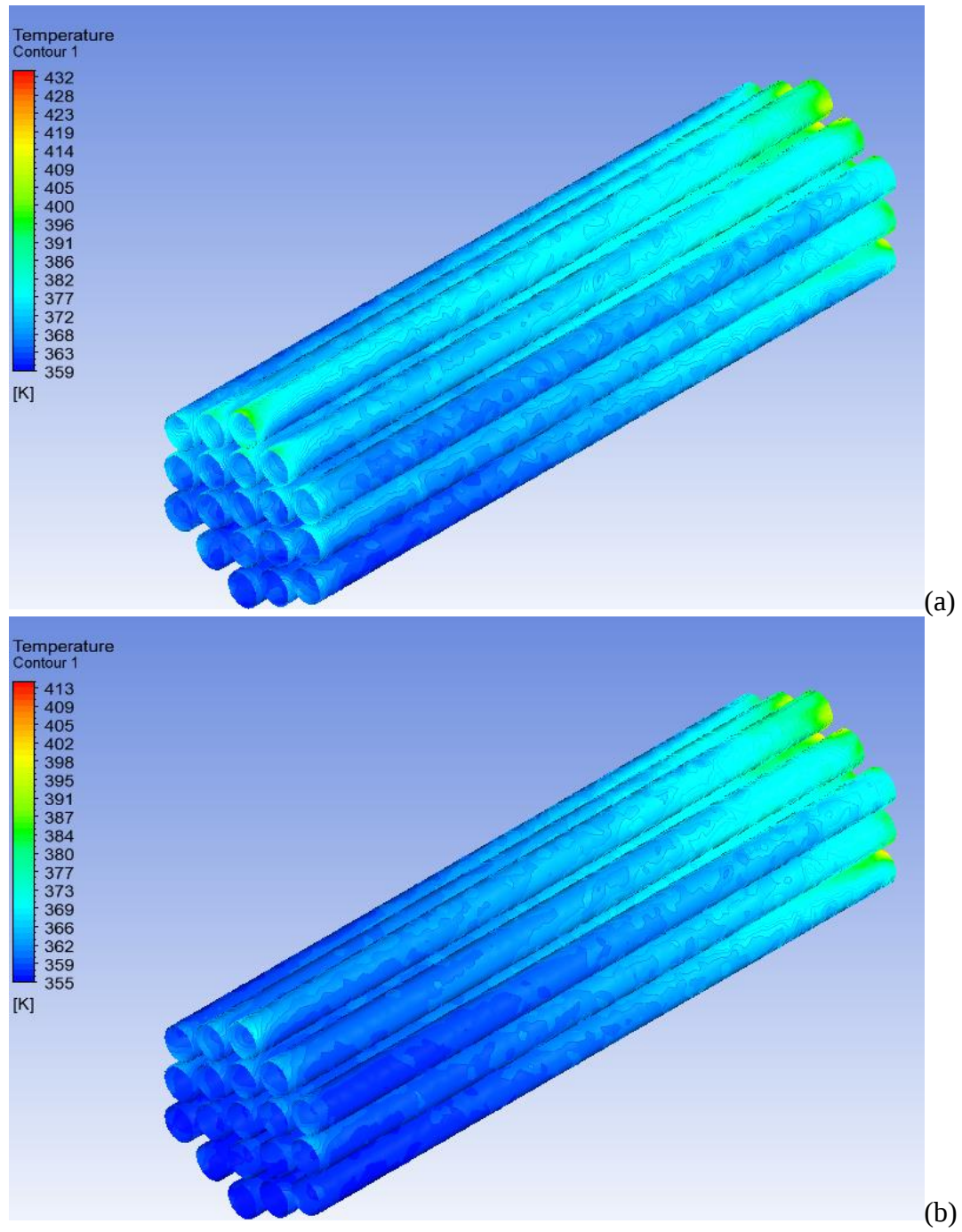
Şekil 7.5. Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Egzoz gazından soğutucu akışkana enerji dağılımı borular arasında farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, analizlerde egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı hesaplanmaktadır. Egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken 565 K, debi 0,005 kg/s iken 439 K değerine ulaşmıştır. Egzoz gazının sıcaklık düşüşü; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 21,8, debi 0,005 kg/s iken % 39,3 oranında sağlanmıştır. Bunun nedeni de akışkanın hızının azalması ile ısı transferinin artmasıdır.

Soğutucu etkinliği; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 42,7, debi 0,005 kg/s iken % 76,8 oranında sağlanmıştır. Bu durum, soğutucuya giren egzoz gazının debisi dolayısıyla hızı azaldıkça soğutucu etkinliğinin arttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı, egzoz gazı debisi 0,005 kg/s iken en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, EGR soğutucusuna giren düşük hızdaki egzoz gazının, yüksek hıza göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir.

EGR soğutucusu borularının yüzeyindeki sıcaklık dağılımları Şekil 7.6’da gösterilmiştir.

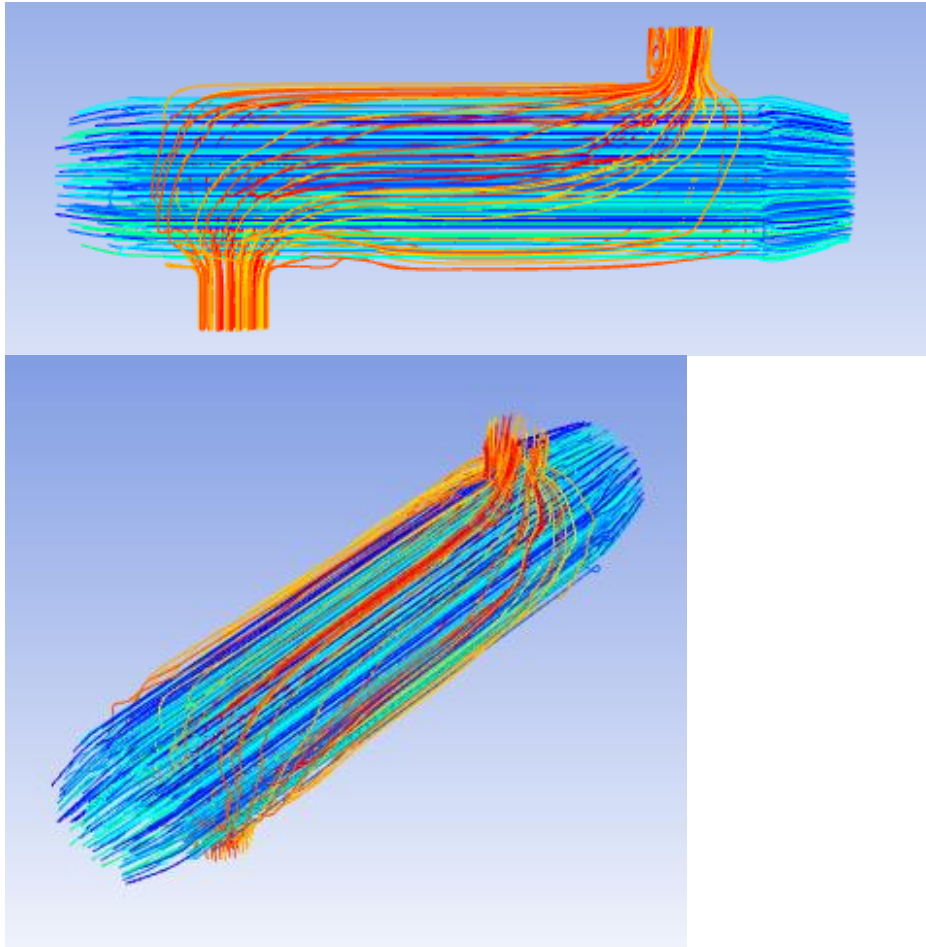


Şekil 7.6. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Soğutucuda egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken boruların yüzeyindeki sıcaklığın, 0,005 kg/s debiye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu dağılımlar, soğutucuya giren egzoz gazı debisi dolayısıyla hızı azaldıkça ısı transferinin toplam verimliliğinin arttığını göstermektedir. Soğutucu akışkanın girdiği alt tarafın etkisinden dolayı, boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı giriş bölgesinde zayıflamıştır. Bunun sonucunda da sıcaklık dağılımında asimetrik bir görünüm elde edilmiştir. Sonuç olarak, tüm soğutucunun ısı transferi düşük hızda egzoz gazı kullanılarak arttırılmıştır.

Parçacık çizgileri (Pathline)

Şekil 7.7, soğutucunun kabuk kısmından giden soğutucu akışkan ve boruların içinden geçen egzoz gazının parçacık çizgilerini (pathline) göstermektedir. Mavi çizgilerle belirtilen motor egzoz gazlarının akışına dik yönde gelen kırmızı çizgiler kabuktaki soğutucunun parçacık çizgilerini (pathline) göstermektedir.

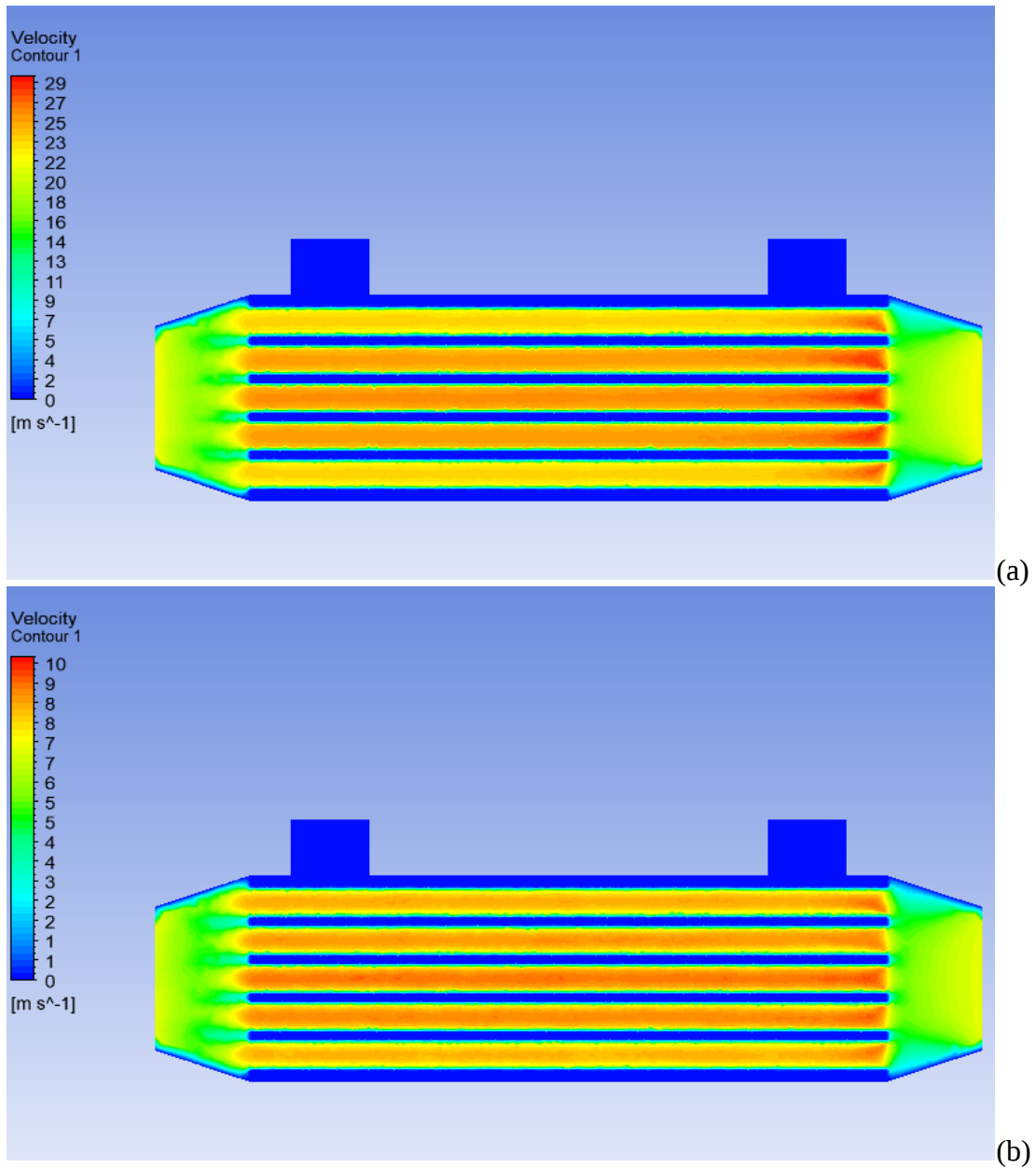


Şekil 7.7. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü

7.2. Model 2 Analizi

Hız dağılımı

Boru uzunluğu 200 mm olan 4 bölmeli soğutucunun hız dağılımı Şekil 7.8'de, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir. Bu dağılım, EGR soğutucusunun farklı bölgelerinde bulunan akışkan parçacıklarının hız büyüklüklerini ve egzoz gazları ile soğutucu akışkan arasındaki ısı aktarımına nasıl tepki verdiklerini göstermektedir.

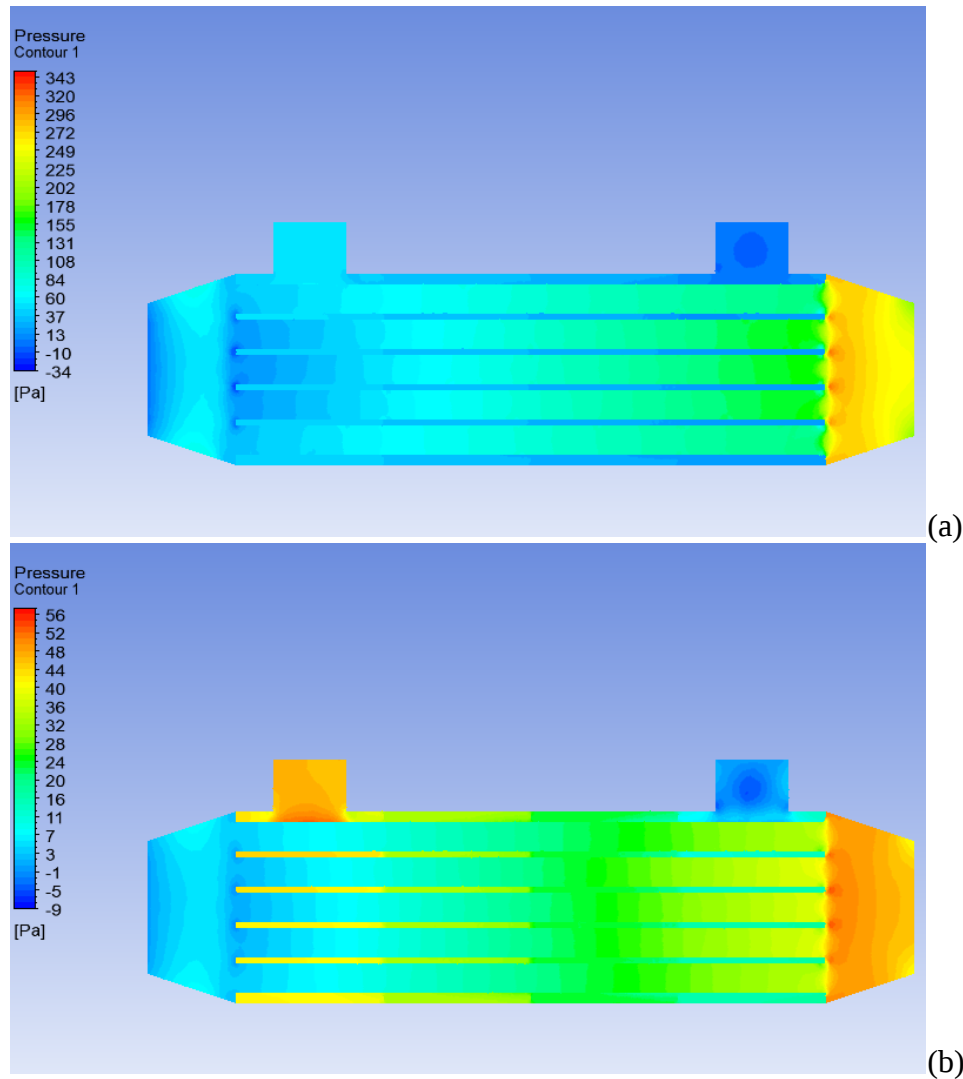


Şekil 7.8. EGR soğutucusunun hız dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.8'e göre, akışkan alanı boyunca hızların değişken büyüklük bölgelerine sahip olduğu görülmektedir. EGR soğutucusunun girişindeki hız daha düşüktür. Ancak, egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken boruların girişindeki hızın maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Borulardaki akış ilerledikçe egzoz gazı hızı azalmaktadır. Merkezi borularda, yüksek gaz akış hızı oluşmuştur. Egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken hızın maksimum değeri 29 m/s, debi 0,005 kg/s iken hızın maksimum değeri 10 m/s değere ulaşmıştır.

Basınç dağılımı

Simüle edilen bölmeli soğutucusunun basınç dağılımı Şekil 7.9'da, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir.

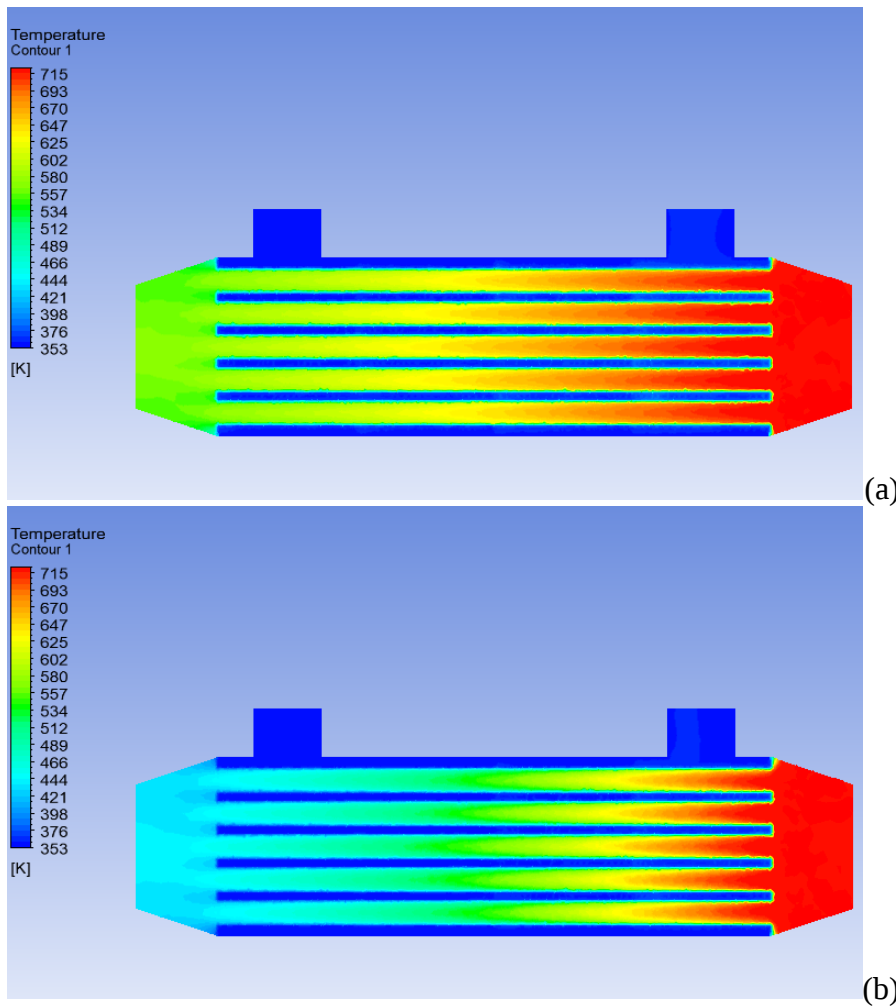


Şekil 7.9. EGR soğutucusunun basınç dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.9'a göre, soğutucunun borularından geçerken egzoz gazı basıncı düşmektedir, ancak basınç düşüşünün çok yüksek olmadığı görülmektedir. Basınç düşüşü miktarı; 0,0155 kg/s debide, 0,005 kg/s debiye göre bir miktar daha fazla elde edilmiştir. Soğutucu akışkan kısmındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 120 Pa, 0,005 kg/s debide 60 Pa mertebesinde elde edilmiştir. Egzoz gazının geçtiği soğutucu borularındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 250 Pa, 0,005 kg/s debide 50 Pa mertebesinde elde edilmiştir.

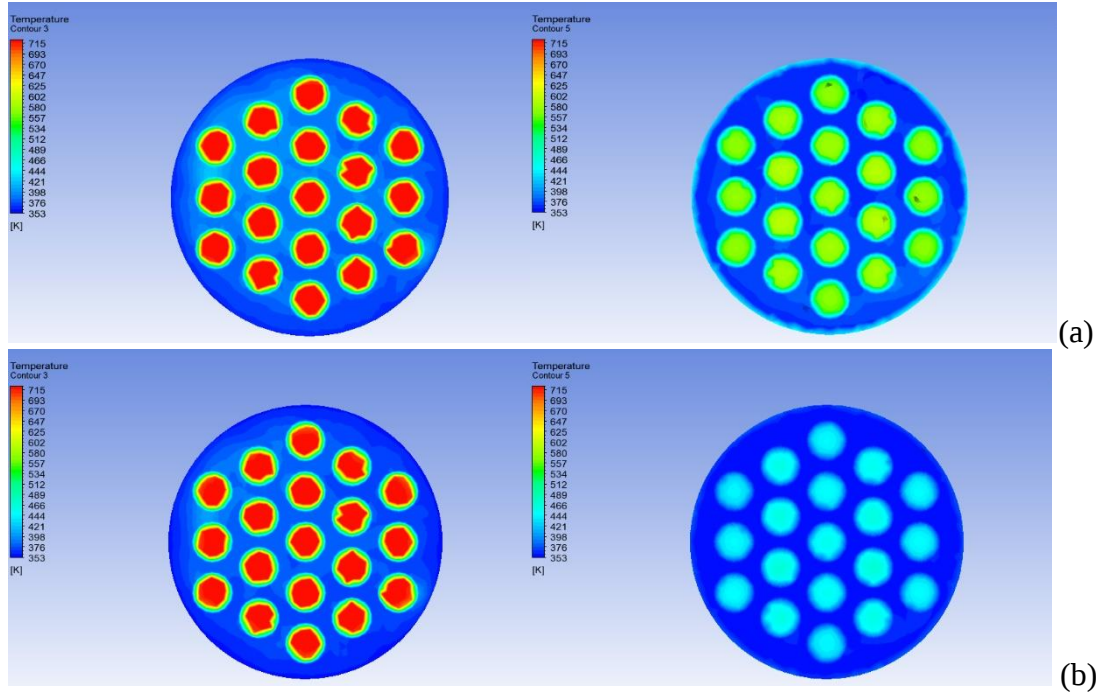
Sıcaklık dağılımı

Şekil 7.10, EGR soğutucusu borularının içindeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Soğutucunun boru uzunluğu boyunca egzoz gazlarının sıcaklığında büyük bir değişiklik olduğu görülmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı, girişten çıkışa doğru akış ilerledikçe düşmüştür. Kabuk tarafındaki soğutucu akışkanın sıcaklığı ise bir miktar yükselmiştir.



Şekil 7.10. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

EGR soğutucusunun giriş ve çıkışındaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı Şekil 7.11'de gösterilmiştir.



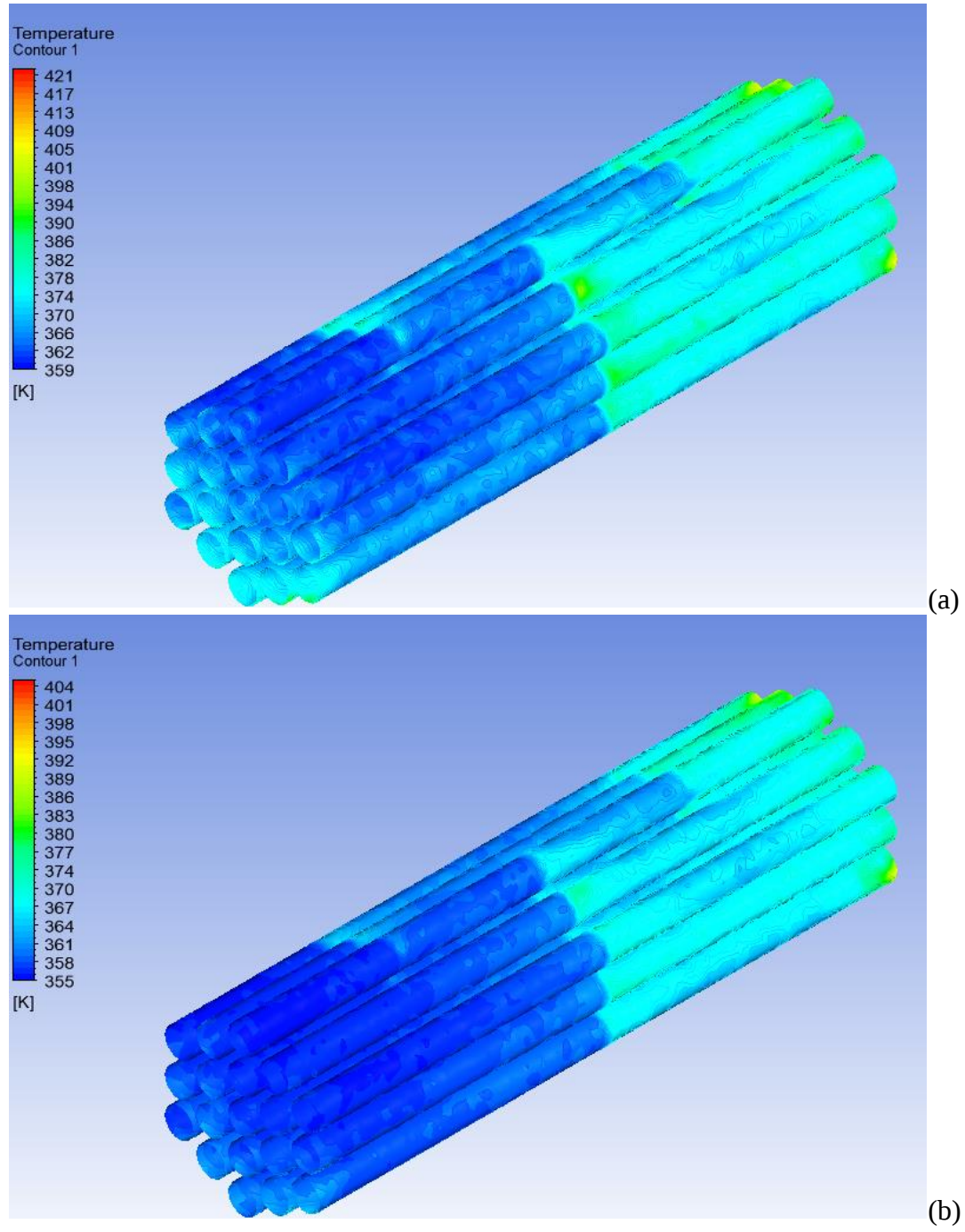
Şekil 7.11.Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Egzoz gazından soğutucu akışkana enerji dağılımı borular arasında farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, analizlerde egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı hesaplanmaktadır. Egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken 560 K, debi 0,005 kg/s iken 435 K değerine ulaşmıştır. Egzoz gazının sıcaklık düşüşü; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 22,5, debi 0,005 kg/s iken % 39,8 oranında sağlanmıştır. Bunun nedeni de akışkanın hızının azalması ile ısı transferinin artmasıdır.

Soğutucu etkinliği; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 44,1, debi 0,005 kg/s iken % 77,8 oranında sağlanmıştır. Bu durum, soğutucuya giren egzoz gazının debisi dolayısıyla hızı azaldıkça soğutucu etkinliğinin arttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı, egzoz gazı debisi 0,005 kg/s iken en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, EGR soğutucusuna giren düşük hızdaki egzoz gazının, yüksek hıza göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir.

EGR soğutucusu borularının yüzeyindeki sıcaklık dağılımları Şekil 7.12’de gösterilmiştir.



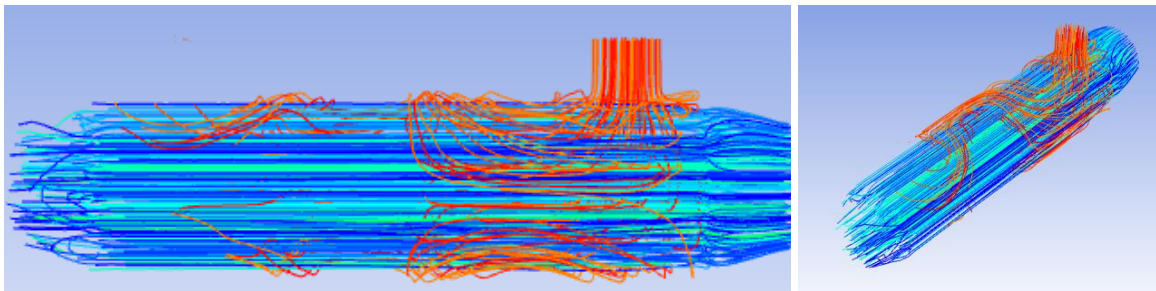
Şekil 7.12. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Soğutucuda egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken boruların yüzeyindeki sıcaklığın, 0,005 kg/s debiye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu dağılımlar, soğutucuya eklenen bölmenin temel işlevinin, kendi içindeki ısı değişimini güçlendirmek değil, ısı transferinin toplam verimliliğini arttırmak olduğunu göstermektedir. Bölmelerin yönlendirici etkisinden dolayı, akış hızı belirli bölgelerde azalmaktadır. Bunun sonucunda da boruların yüzeyinde elde edilen sıcaklık dağılımında asimetrik bir görünüm elde edilmiştir. Bölmelerin neden olduğu yanlış akış ve sıcaklık dağılımları, soğutma performansı ve güvenilirliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir. Sonuç olarak, tüm soğutucunun ısı transferi bölme kullanılarak artırılmıştır.

Egzoz gazlarının ortalama çıkış sıcaklığı, düz EGR soğutucusuna göre bölmeli soğutucuda en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, bölmeli EGR soğutucusunun, düz olan EGR modeline göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir.

Parçacık çizgileri (Pathline)

Şekil 7.13, soğutucunun kabuk kısmından giden soğutucu akışkan ve boruların içinden geçen egzoz gazının parçacık çizgilerini (pathline) göstermektedir. Mavi çizgilerle belirtilen motor egzoz gazlarının akışına dik yönde gelen kırmızı çizgiler kabuktaki soğutucunun parçacık çizgilerini göstermektedir.



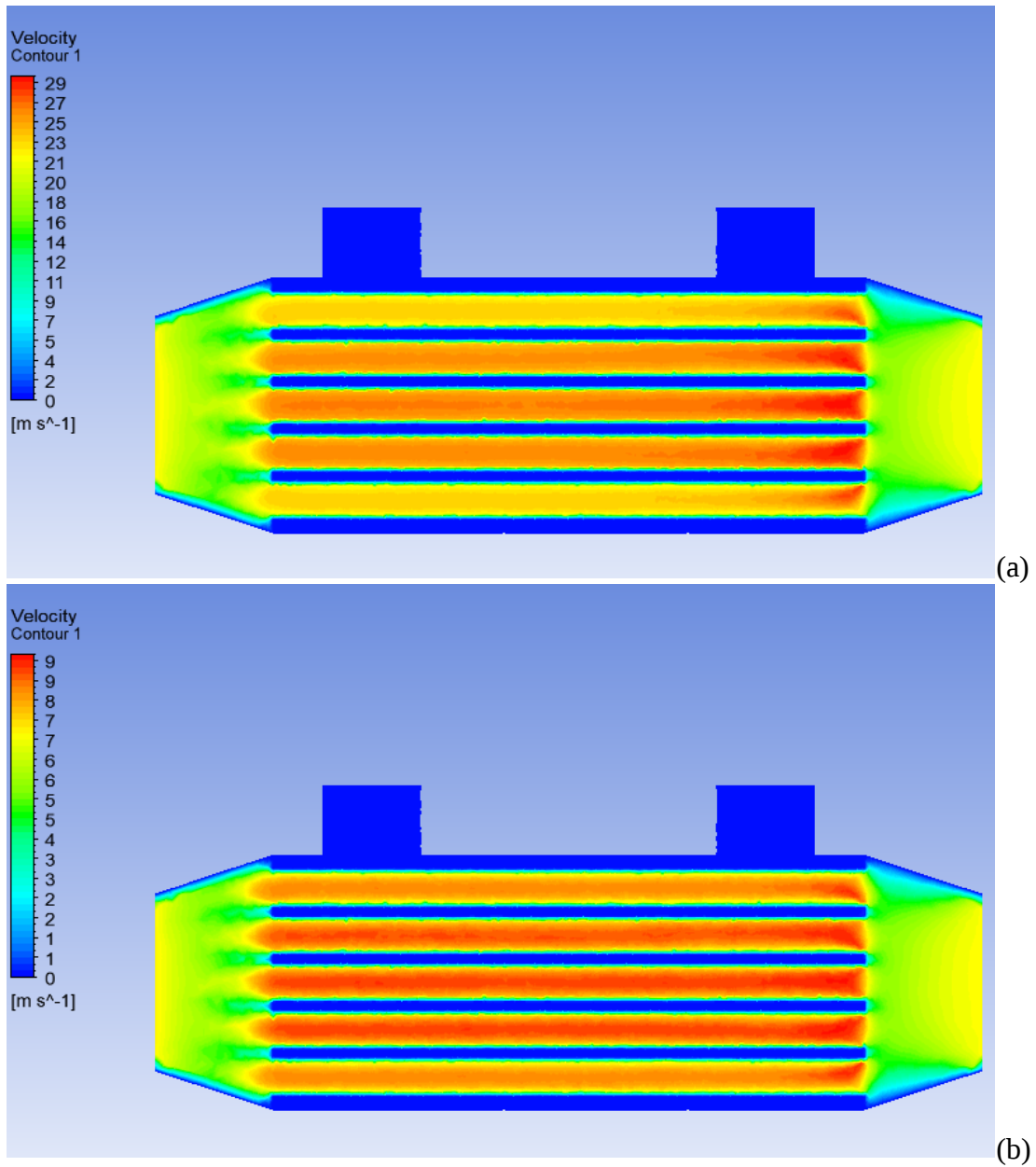
Şekil 7.13. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü

Şekil 7.13, akış mesafesini uzatan ve akışı güçlendiren bölmeler kullanılarak su akış alanlarının büyük ölçüde değiştirilebildiğini göstermektedir. Böylece, ısı transferi artırılarak egzoz gazının sıcaklığının daha çok düşmesi sağlanmıştır.

7.3. Model 3 Analizi

Hız dağılımı

Boru uzunluğu 150 mm olan 3 bölmeli soğutucunun hız dağılımı Şekil 7.14'de, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir. Bu dağılım, EGR soğutucusunun farklı bölgelerinde bulunan akışkan parçacıklarının hız büyüklüklerini ve egzoz gazları ile soğutucu akışkan arasındaki ısı aktarımına nasıl tepki verdiklerini göstermektedir.

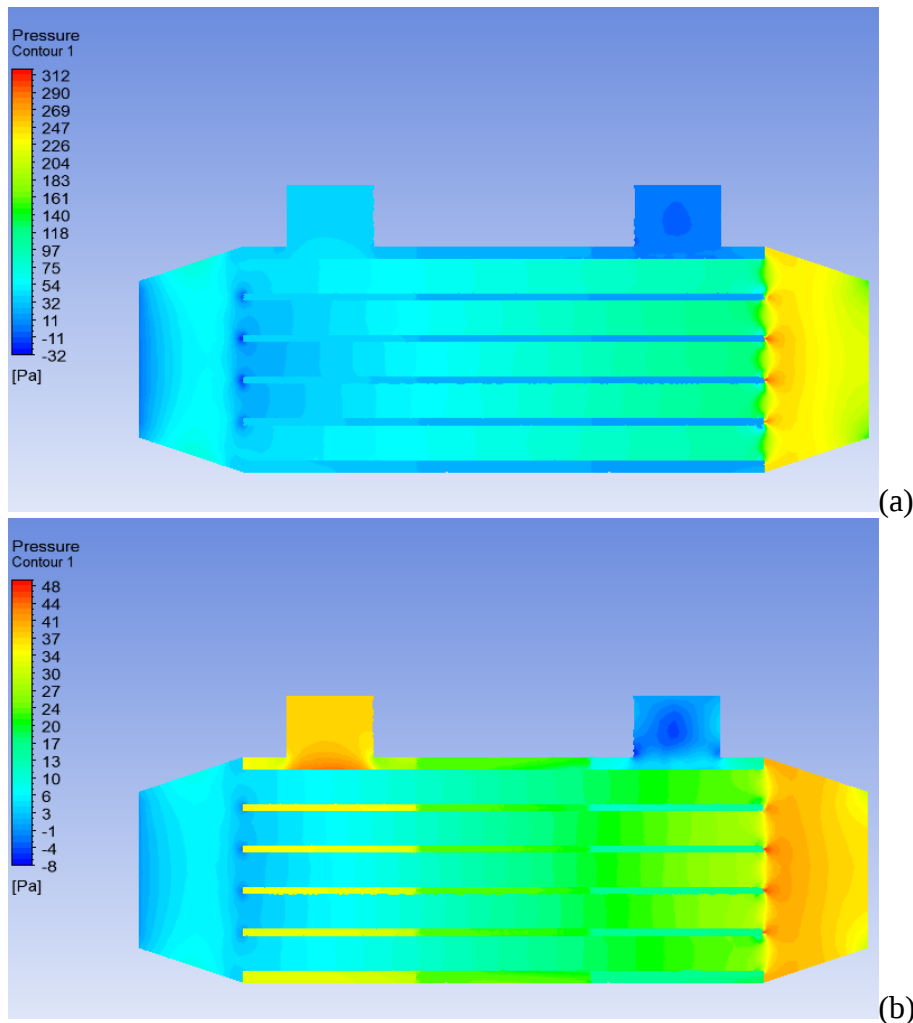


Şekil 7.14. EGR soğutucusunun hız dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.14'e göre, akışkan alanı boyunca hızların değişken büyüklük bölgelerine sahip olduğu görülmektedir. EGR soğutucusunun girişindeki hız daha düşüktür. Ancak, egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken boruların girişindeki hızın maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Borulardaki akış ilerledikçe egzoz gazı hızı azalmaktadır. Merkezi borularda, yüksek gaz akış hızı oluşmuştur. Egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken hızın maksimum değeri 29 m/s, debi 0,005 kg/s iken hızın maksimum değeri 9 m/s değere ulaşmıştır. Ayrıca, soğutucu boyunun egzoz gazının hızını doğru orantılı olarak etkilediği görülmektedir.

Basınç dağılımı

Simüle edilen bölmeli soğutucunun basınç dağılımı Şekil 7.15'de, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir.

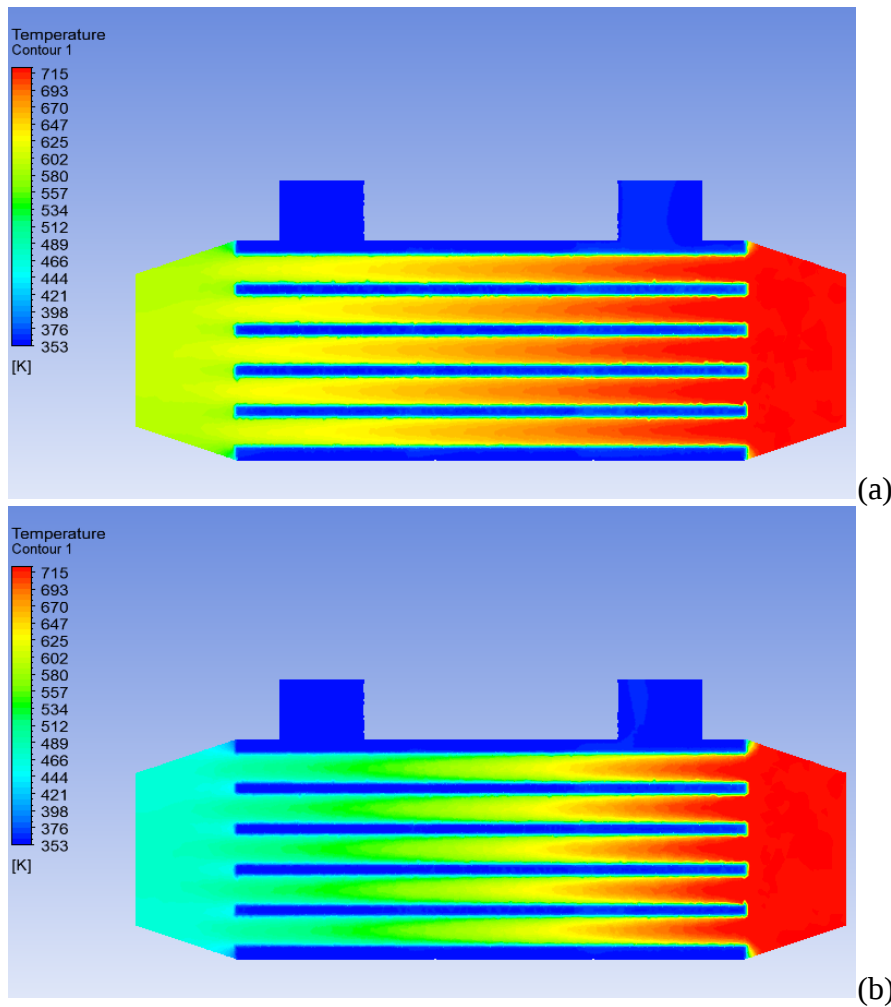


Şekil 7.15. EGR soğutucusunun basınç dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.15'e göre, soğutucunun borularından geçerken egzoz gazı basıncı düşmektedir, ancak basınç düşüşünün çok yüksek olmadığı görülmektedir. Basınç düşüşü miktarı; 0,0155 kg/s debide, 0,005 kg/s debiye göre bir miktar daha fazla elde edilmiştir. Soğutucu akışkan kısmındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 100 Pa, 0,005 kg/s debide 50 Pa mertebesinde elde edilmiştir. Egzoz gazının geçtiği soğutucu borularındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 200 Pa, 0,005 kg/s debide 40 Pa mertebesinde elde edilmiştir.

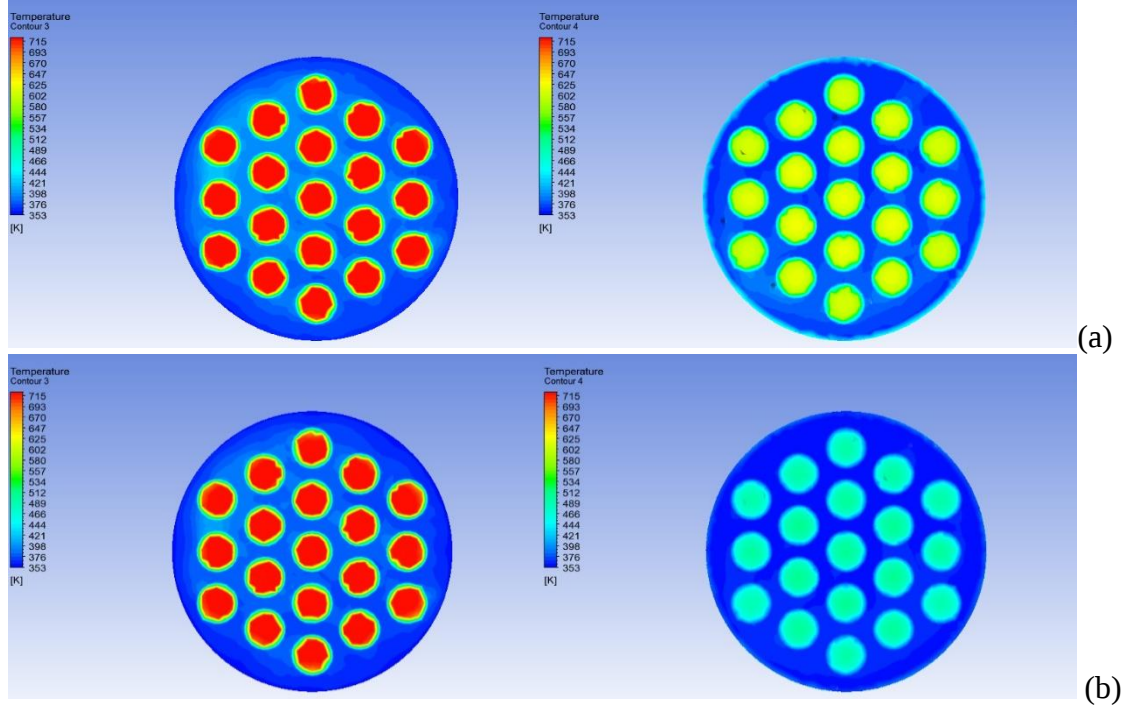
Sıcaklık dağılımı

Şekil 7.16, EGR soğutucusu borularının içindeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Soğutucunun boru uzunluğu boyunca egzoz gazlarının sıcaklığında büyük bir değişiklik olduğu görülmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı, girişten çıkışa doğru akış ilerledikçe düşmüştür. Kabuk tarafındaki soğutucu akışkanın sıcaklığı ise bir miktar yükselmiştir.



Şekil 7.16. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

EGR soğutucusunun giriş ve çıkışındaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı Şekil 7.17'de gösterilmiştir.



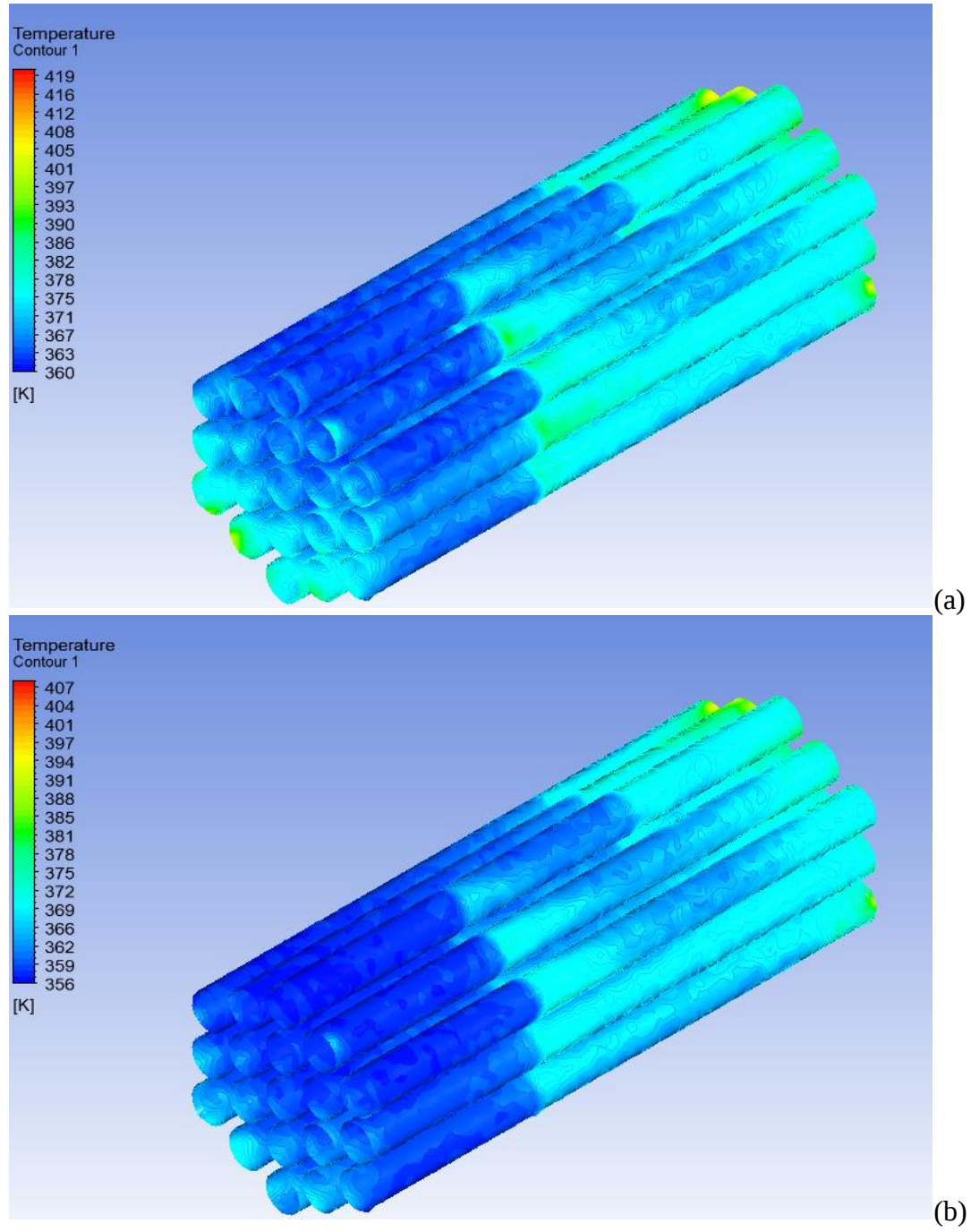
Şekil 7.17.Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Egzoz gazından soğutucu akışkana enerji dağılımı borular arasında farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, analizlerde egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı hesaplanmaktadır. Egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken 593 K, debi 0,005 kg/s iken 474 K değerine ulaşmıştır. Egzoz gazının sıcaklık düşüşü; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 17,9, debi 0,005 kg/s iken % 34,4 oranında sağlanmıştır. Bunun nedeni de akışkanın hızının azalması ile ısı transferinin artmasıdır.

Soğutucu etkinliği; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 35,1, debi 0,005 kg/s iken % 67,3 oranında sağlanmıştır. Bu durum, soğutucuya giren egzoz gazının debisi dolayısıyla hızı azaldıkça soğutucu etkinliğinin arttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı, egzoz gazı debisi 0,005 kg/s iken en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Ancak, soğutucu boyunun kısaltılması, ısı transferini azaltarak egzoz gazının sıcaklığının daha az düşürülmesini sağlamıştır.

EGR soğutucusu borularının yüzeyindeki sıcaklık dağılımları Şekil 7.18’de gösterilmiştir.



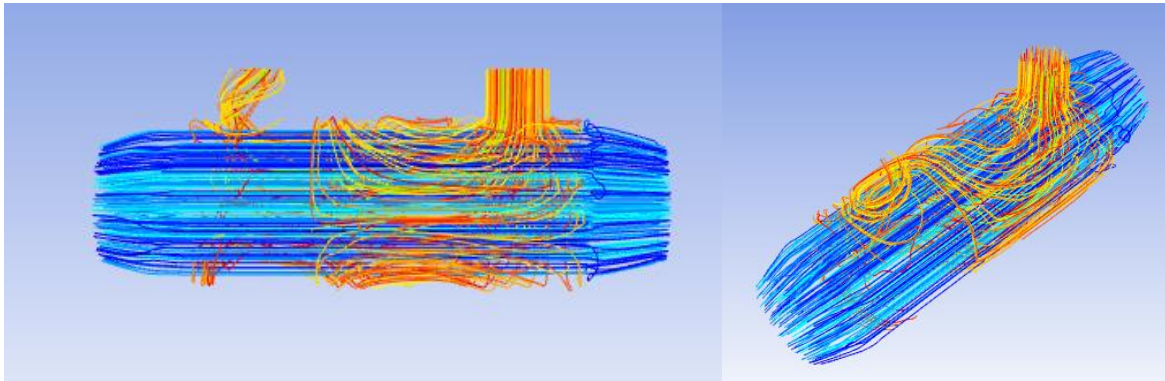
Şekil 7.18. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Soğutucuda egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken boruların yüzeyindeki sıcaklığın, 0,005 kg/s debiye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu dağılımlar, soğutucuya giren egzoz gazı debisi dolayısıyla hızı azaldıkça ısı transferinin toplam verimliliğinin arttığını göstermektedir. Soğutucu akışkanın girdiği tarafın etkisinden dolayı, boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı giriş bölgesinde zayıflamıştır. Bunun sonucunda da sıcaklık dağılımında asimetrik bir görünüm elde edilmiştir. Sonuç olarak, tüm soğutucunun ısı transferi düşük hızda egzoz gazı kullanılarak arttırılmıştır.

Egzoz gazlarının ortalama çıkış sıcaklığı, soğutucu borularının uzunluğu 150 mm olan EGR soğutucusuna göre 200 mm olan soğutucuda en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, uzunluğu daha fazla olan EGR soğutucusunun, kısa olan EGR modeline göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir. Ancak, soğutucu tasarımında daha büyük soğutucu uzunluğunun daha fazla basınç düşüşüne neden olacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Parçacık çizgileri (Pathline)

Şekil 7.19, soğutucunun kabuk kısmından giden soğutucu akışkan ve boruların içinden geçen egzoz gazının parçacık çizgilerini (pathline) göstermektedir. Mavi çizgilerle belirtilen motor egzoz gazlarının akışına dik yönde gelen kırmızı çizgiler kabuktaki soğutucunun parçacık çizgilerini (pathline) göstermektedir.

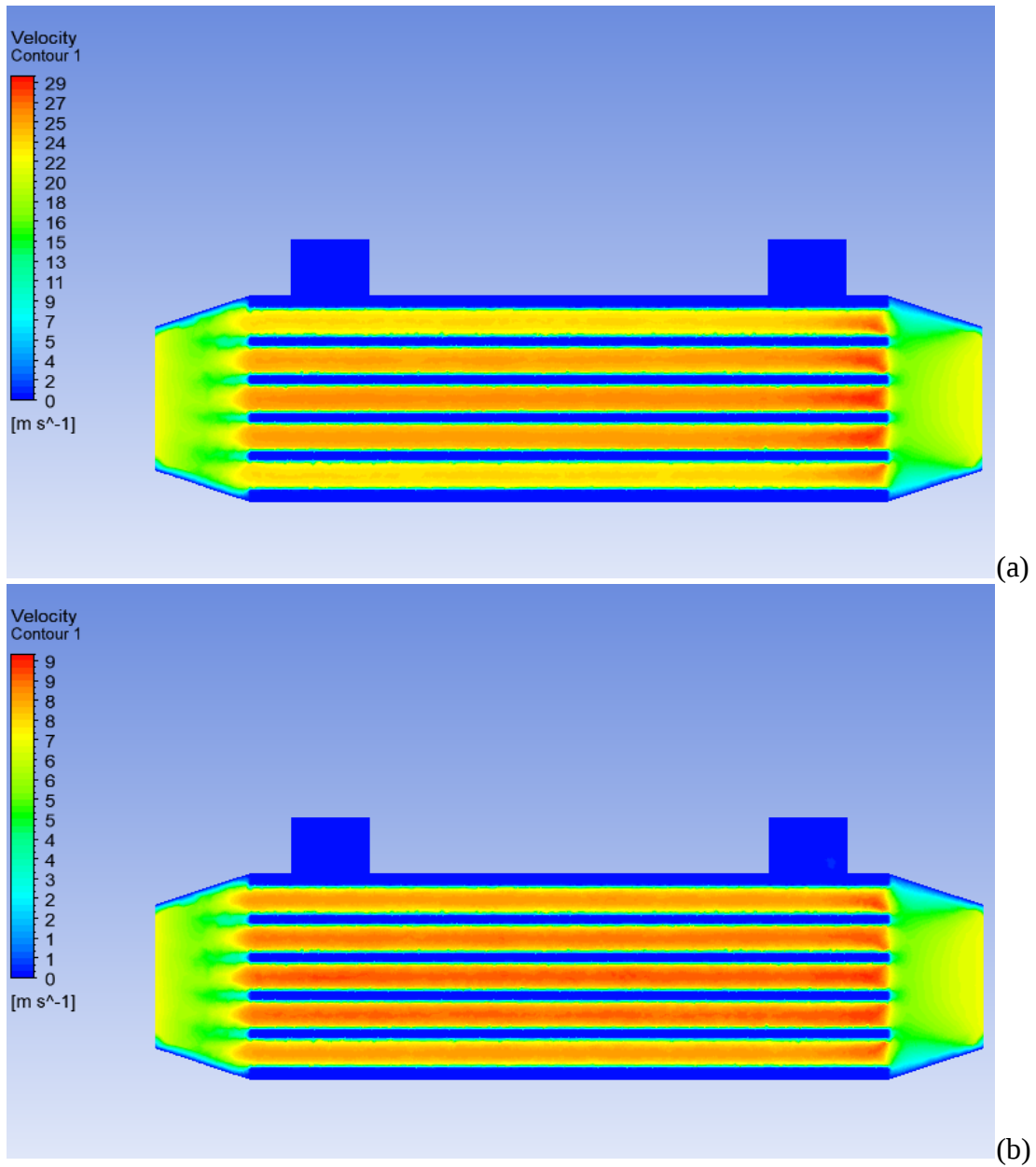


Şekil 7.19. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü

7.4. Model 4 Analizi

Hız dağılımı

Boru uzunluğu 200 mm olan 5 bölmeli soğutucunun hız dağılımı Şekil 7.20'de, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir. Bu dağılım, EGR soğutucusunun farklı bölgelerinde bulunan akışkan parçacıklarının hız büyüklüklerini ve egzoz gazları ile soğutucu akışkan arasındaki ısı aktarımına nasıl tepki verdiklerini göstermektedir.

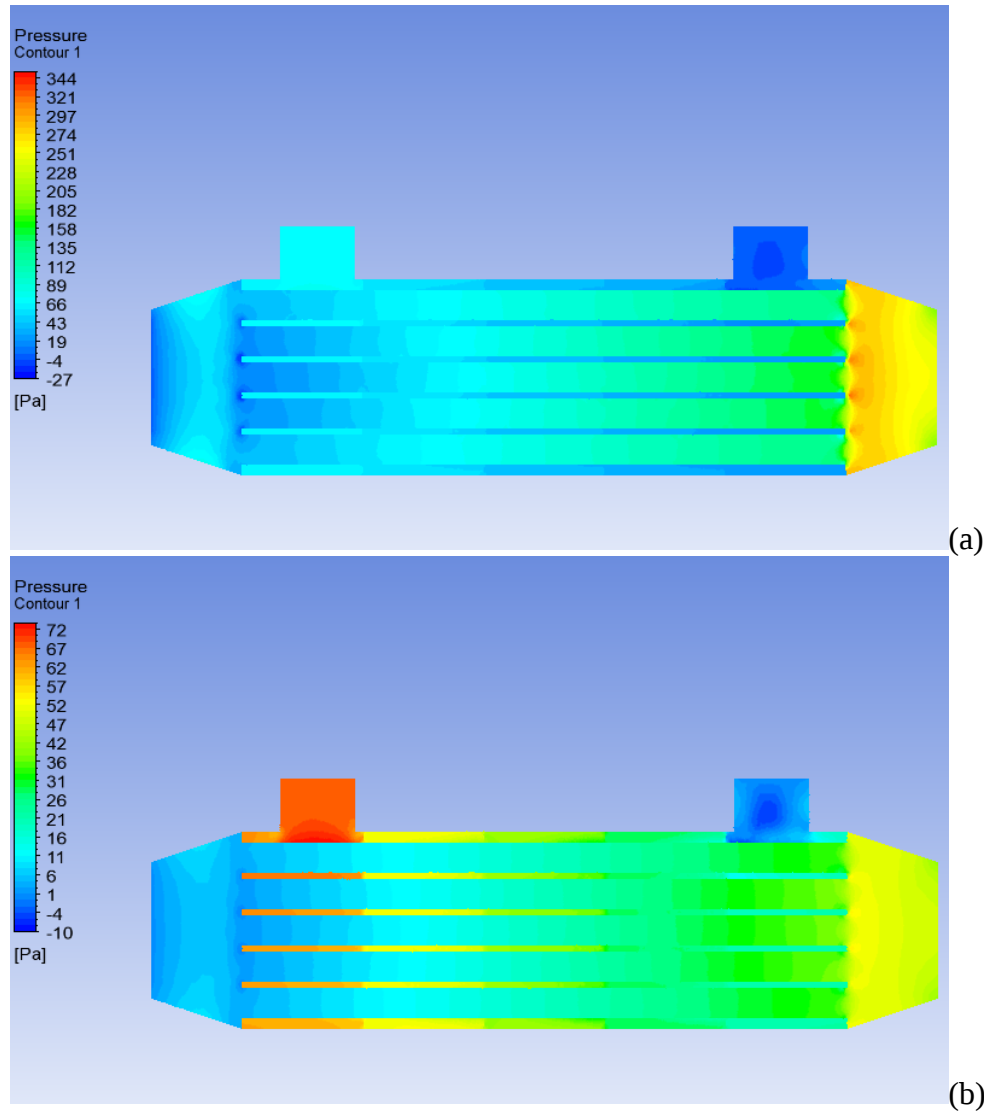


Şekil 7.20. EGR soğutucusunun hız dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.20'ye göre, akışkan alanı boyunca hızların değişken büyüklük bölgelerine sahip olduğu görülmektedir. EGR soğutucusunun girişindeki hız daha düşüktür. Ancak, boruların girişindeki hızın maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Borulardaki akış ilerledikçe egzoz gazı hızı azalmaktadır. Merkezi borularda, yüksek gaz akış hızı oluşmuştur. Egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken hızın maksimum değeri 29 m/s, debi 0,005 kg/s iken hızın maksimum değeri 9 m/s değere ulaşmıştır.

Basınç dağılımı

Simüle edilen bölmeli soğutucunun basınç dağılımı Şekil 7.21'de, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir.

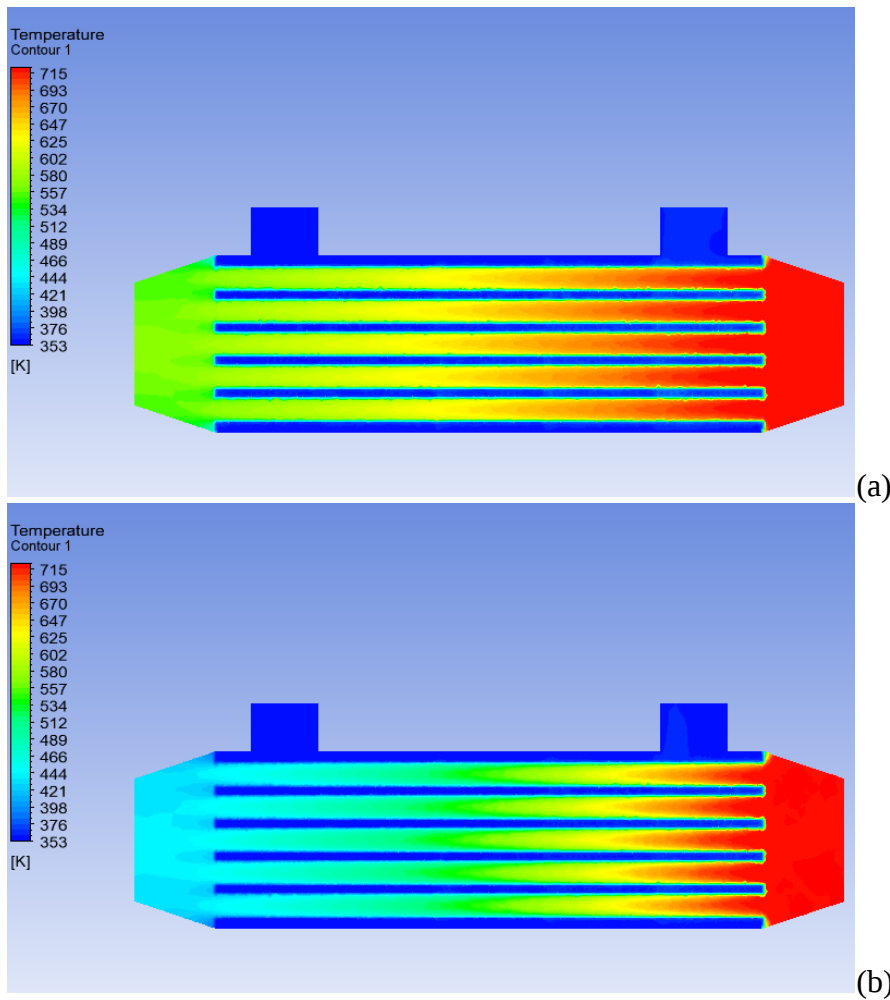


Şekil 7.21. EGR soğutucusunun basınç dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.21'e göre, soğutucunun borularından geçerken egzoz gazı basıncı düşmektedir, ancak basınç düşüşünün çok yüksek olmadığı görülmektedir. Basınç düşüşü miktarı; 0,0155 kg/s debide, 0,005 kg/s debiye göre bir miktar daha fazla elde edilmiştir. Soğutucu akışkan kısmındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 120 Pa, 0,005 kg/s debide 80 Pa mertebesinde elde edilmiştir. Egzoz gazının geçtiği soğutucu borularındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 250 Pa, 0,005 kg/s debide 50 Pa mertebesinde elde edilmiştir.

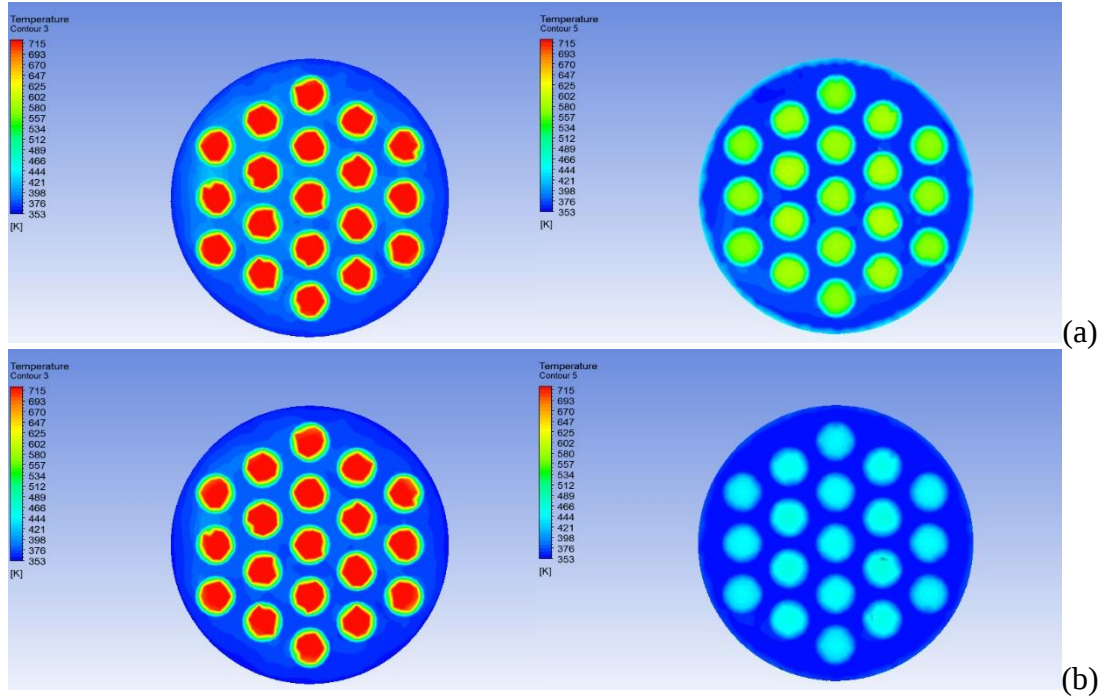
Sıcaklık dağılımı

Şekil 7.22, EGR soğutucusu borularının içindeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Soğutucunun boru uzunluğu boyunca egzoz gazlarının sıcaklığında büyük bir değişiklik olduğu görülmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı, girişten çıkışa doğru akış ilerledikçe düşmüştür. Kabuk tarafındaki soğutucu akışkanın sıcaklığı ise bir miktar yükselmiştir.



Şekil 7.22. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

EGR soğutucusunun giriş ve çıkışındaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı Şekil 7.23'de gösterilmiştir.



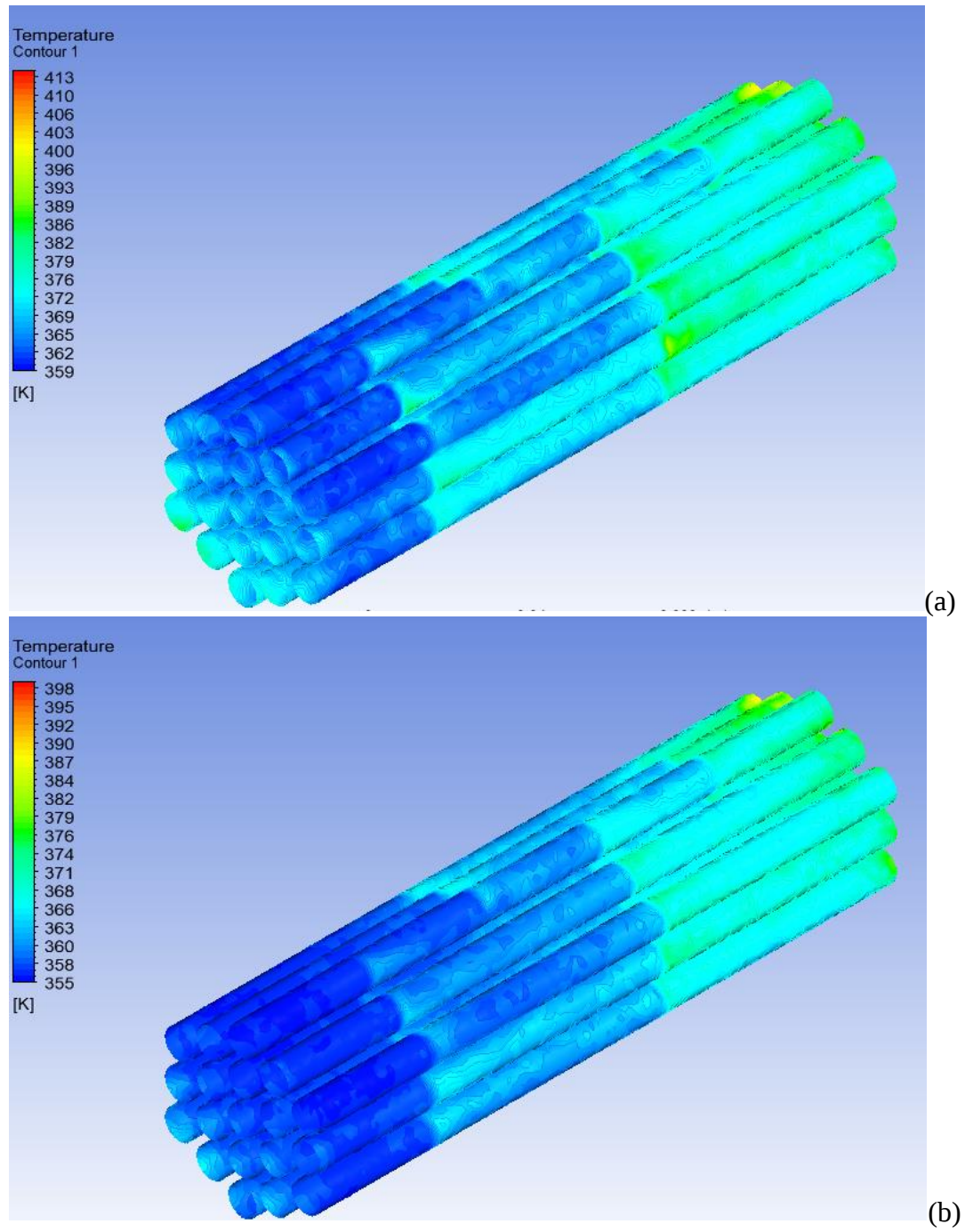
Şekil 7.23. Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Egzoz gazından soğutucu akışkana enerji dağılımı borular arasında farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, analizlerde egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı hesaplanmaktadır. Egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken 563 K, debi 0,005 kg/s iken 438 K değerine ulaşmıştır. Egzoz gazının sıcaklık düşüşü; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 22,1, debi 0,005 kg/s iken % 39,4 oranında sağlanmıştır. Bunun nedeni de akışkanın hızının azalması ile ısı transferinin artmasıdır.

Soğutucu etkinliği; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 43,2, debi 0,005 kg/s iken % 77,1 oranında sağlanmıştır. Bu durum, soğutucuya giren egzoz gazının debisi dolayısıyla hızı azaldıkça soğutucu etkinliğinin arttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı, egzoz gazı debisi 0,005 kg/s iken en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, EGR soğutucusuna giren düşük hızdaki egzoz gazının, yüksek hıza göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir.

EGR soğutucusu borularının yüzeyindeki sıcaklık dağılımları Şekil 7.24’de gösterilmiştir.



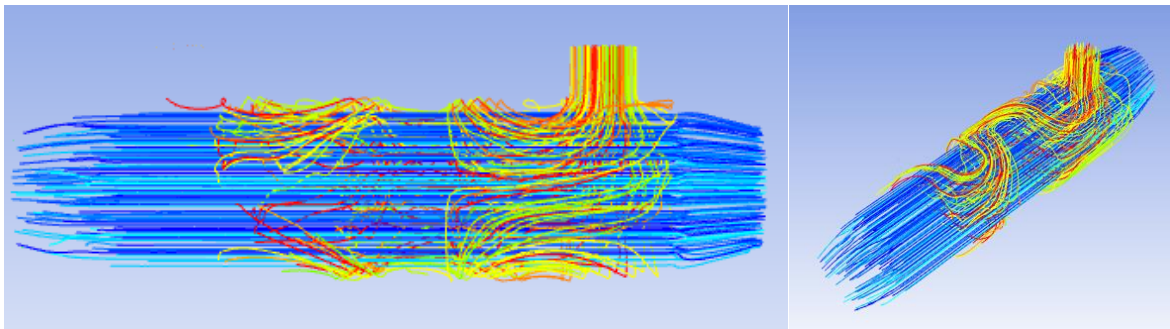
Şekil 7.24. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Soğutucuda egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken boruların yüzeyindeki sıcaklığın, 0,005 kg/s debiye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu dağılımlar, soğutucuya giren egzoz gazı debisi dolayısıyla hızı azaldıkça ısı transferinin toplam verimliliğinin arttığını göstermektedir. Soğutucu akışkanın girdiği tarafın etkisinden dolayı, boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı giriş bölgesinde zayıflamıştır. Bunun sonucunda da sıcaklık dağılımında asimetrik bir görünüm elde edilmiştir. Sonuç olarak, tüm soğutucunun ısı transferi düşük hızda egzoz gazı kullanılarak arttırılmıştır.

Egzoz gazlarının ortalama çıkış sıcaklığı, 5 bölmeli EGR soğutucusuna göre 4 bölmeli soğutucuda en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, bölme sayısının fazla olması soğutma performansının artacağı anlamına gelmemektedir. Bölmelerin yönlendirici etkisi, sıcaklık dağılımını asimetrik yapabilmektedir. Bölmelerin neden olduğu yanlış akış ve sıcaklık dağılımları, soğutma performansı ve güvenilirliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir.

Parçacık çizgileri (Pathline)

Şekil 7.25, soğutucunun kabuk kısmından giden soğutucu akışkan ve boruların içinden geçen egzoz gazının parçacık çizgilerini (pathline) göstermektedir. Mavi çizgilerle belirtilen motor egzoz gazlarının akışına dik yönde gelen kırmızı çizgiler kabuktaki soğutucunun parçacık çizgilerini göstermektedir.



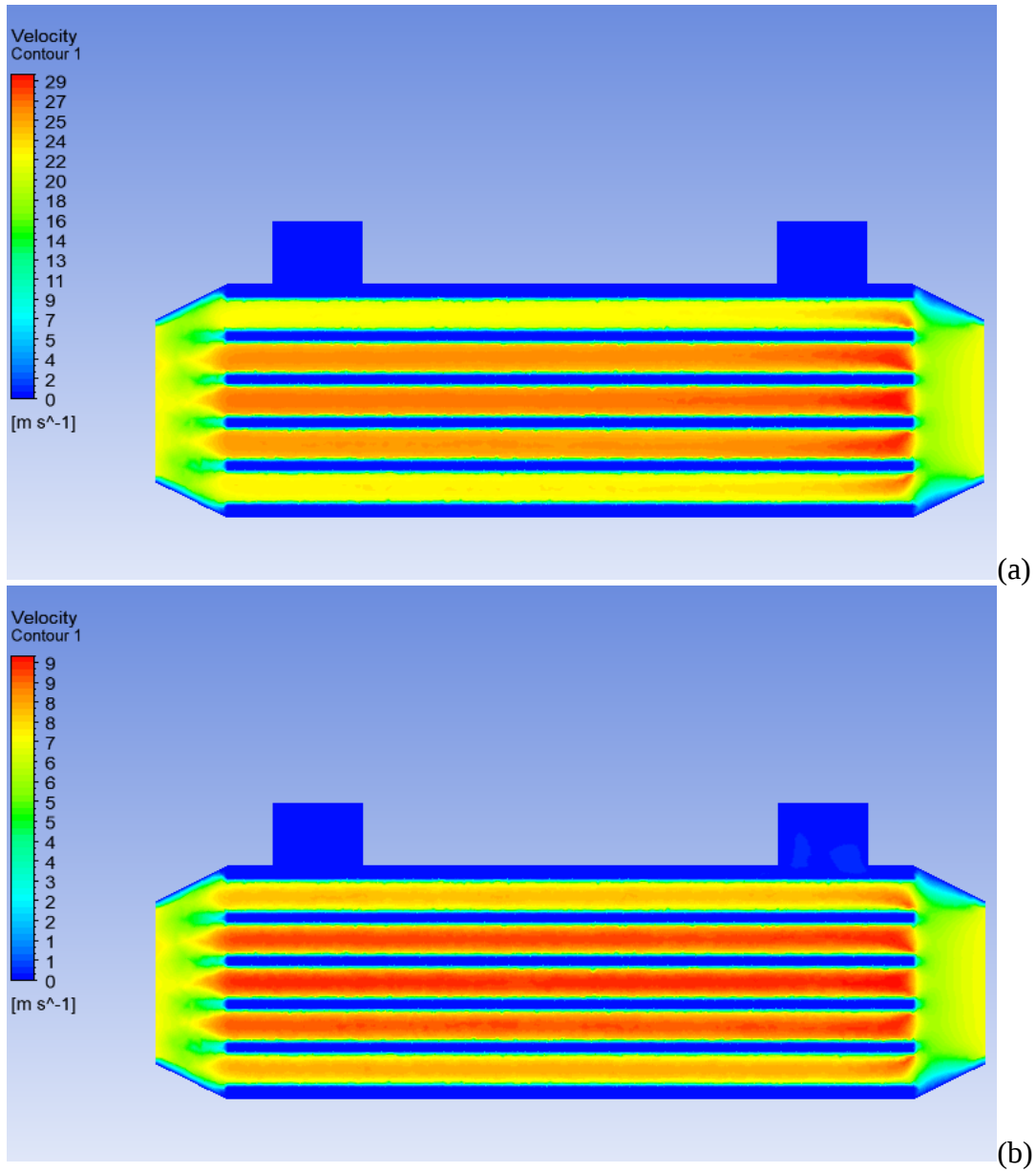
Şekil 7.25. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü

Şekil 7.25, akış mesafesini uzatan ve akışı güçlendiren bölmeler kullanılarak su akış alanlarının büyük ölçüde değiştirilebildiğini göstermektedir.

7.5. Model 5 Analizi

Hız dağılımı

Bu modelde, boru uzunluğu 190 mm olan 5 bölmeli EGR soğutucusunun giriş kısmı diğer modellere göre daha kısa tutulmuştur. Hız dağılımı Şekil 7.26'da, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir. Bu dağılım, EGR soğutucusunun farklı bölgelerinde bulunan akışkan parçacıklarının hız büyüklüklerini ve egzoz gazları ile soğutucu akışkan arasındaki ısı aktarımına nasıl tepki verdiklerini göstermektedir.

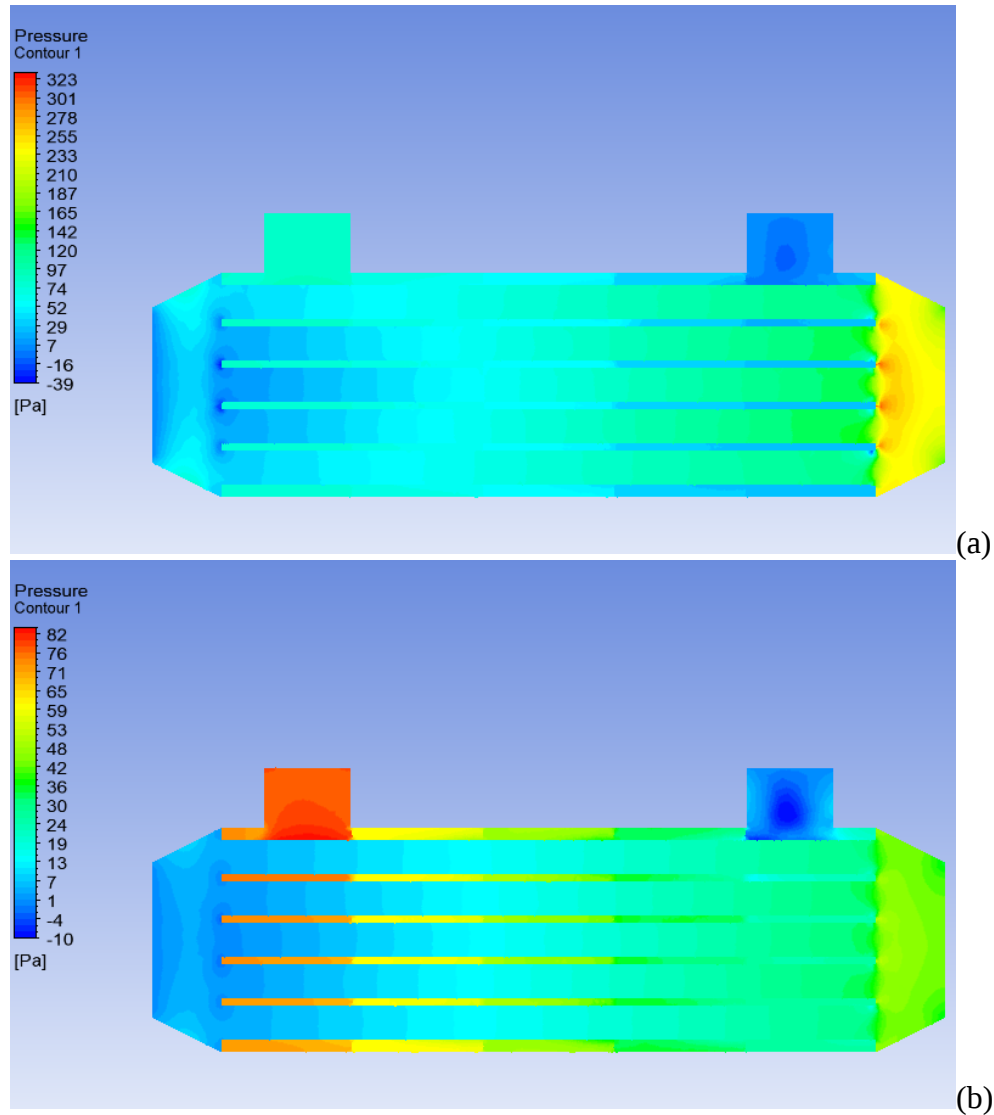


Şekil 7.26. EGR soğutucusunun hız dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.26'ya göre, akışkan alanı boyunca hızların değişken büyüklük bölgelerine sahip olduğu görülmektedir. EGR soğutucusunun girişindeki hız daha düşüktür. Ancak, boruların girişindeki hızın maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Borulardaki akış ilerledikçe egzoz gazı hızı azalmaktadır. Merkezi borularda, yüksek gaz akış hızı oluşmuştur. Egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken hızın maksimum değeri 29 m/s, debi 0,005 kg/s iken hızın maksimum değeri 9 m/s değere ulaşmıştır.

Basınç dağılımı

Simüle edilen bölmeli soğutucunun basınç dağılımı Şekil 7.27'de, 0,0155 kg/s ve 0,005 kg/s kütle debisinde gösterilmektedir.

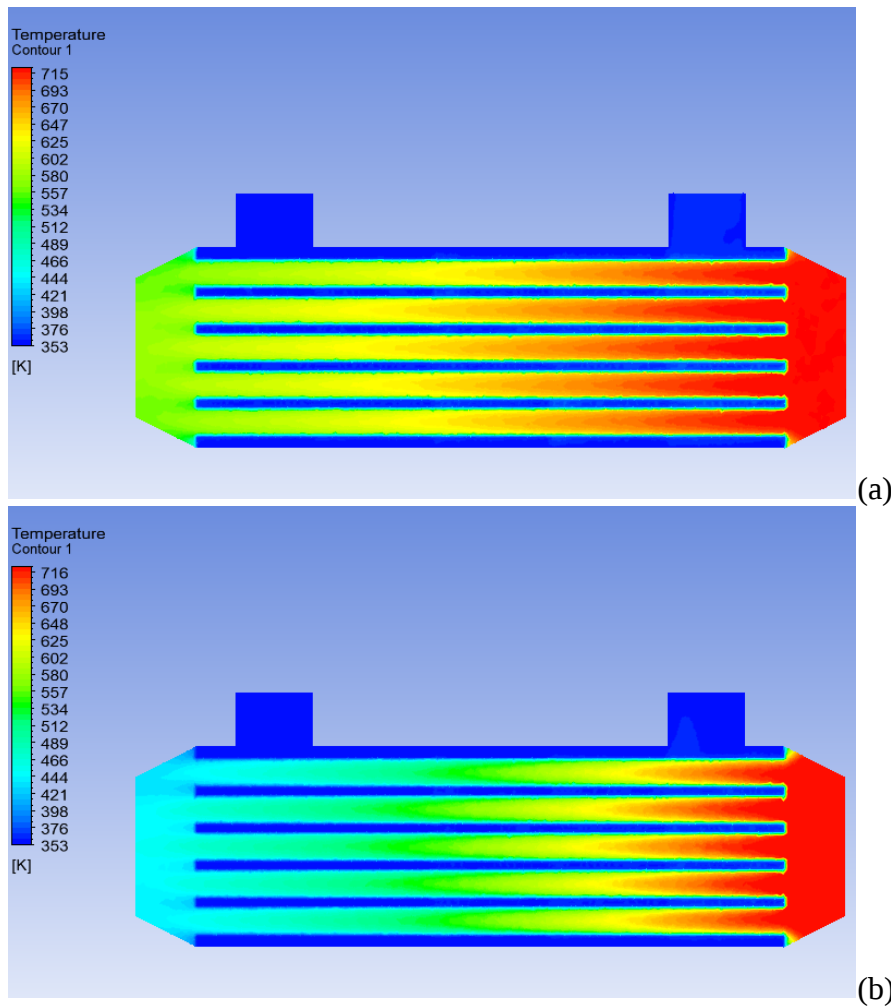


Şekil 7.27. EGR soğutucusunun basınç dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Şekil 7.27'ye göre, soğutucunun borularından geçerken egzoz gazı basıncı düşmektedir, ancak basınç düşüşünün çok yüksek olmadığı görülmektedir. Basınç düşüşü miktarı; 0,0155 kg/s debide, 0,005 kg/s debiye göre bir miktar daha fazla elde edilmiştir. Soğutucu akışkan kısmındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 160 Pa, 0,005 kg/s debide 90 Pa mertebesinde elde edilmiştir. Egzoz gazının geçtiği soğutucu borularındaki basınç düşüşü; 0,0155 kg/s debide 210 Pa, 0,005 kg/s debide 40 Pa mertebesinde elde edilmiştir.

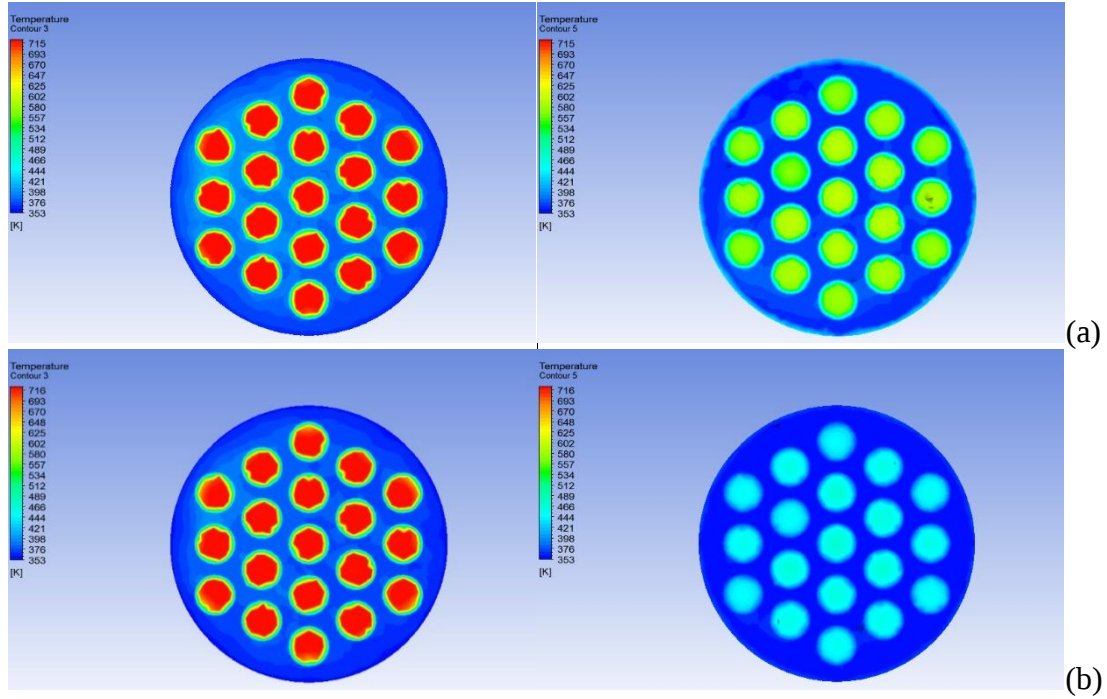
Sıcaklık dağılımı

Şekil 7.28, EGR soğutucusu borularının içindeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Soğutucunun boru uzunluğu boyunca egzoz gazlarının sıcaklığında büyük bir değişiklik olduğu görülmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı, girişten çıkışa doğru akış ilerledikçe düşmüştür. Kabuk tarafındaki soğutucu akışkanın sıcaklığı ise bir miktar yükselmiştir.



Şekil 7.28. EGR soğutucusunun sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

EGR soğutucusunun giriş ve çıkışındaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı Şekil 7.29'da gösterilmiştir.



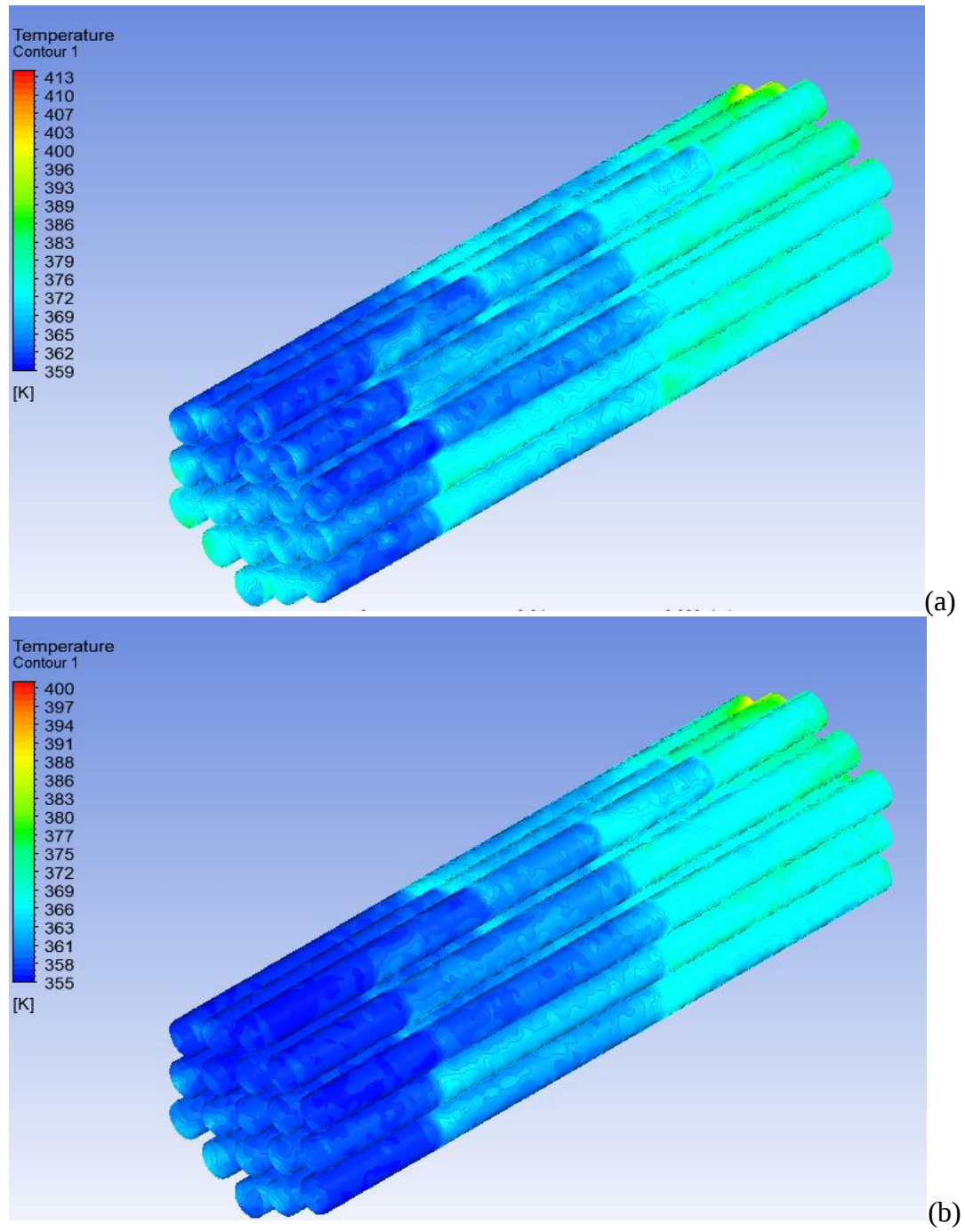
Şekil 7.29.Giriş ve çıkıştaki egzoz gazının sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Egzoz gazından soğutucu akışkana enerji dağılımı borular arasında farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, analizlerde egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı hesaplanmaktadır. Egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken 565 K, debi 0,005 kg/s iken 445 K değerine ulaşmıştır. Egzoz gazının sıcaklık düşüşü; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 21,8, debi 0,005 kg/s iken % 38,4 oranında sağlanmıştır. Bunun nedeni de akışkanın hızının azalması ile ısı transferinin artmasıdır.

Soğutucu etkinliği; egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken % 42,7, debi 0,005 kg/s iken % 75,1 oranında sağlanmıştır. Bu durum, soğutucuya giren egzoz gazının debisi dolayısıyla hızı azaldıkça soğutucu etkinliğinin arttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı, egzoz gazı debisi 0,005 kg/s iken en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, EGR soğutucusuna giren düşük hızdaki egzoz gazının, yüksek hıza göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir.

EGR soğutucusu borularının yüzeyindeki sıcaklık dağılımları Şekil 7.30’da gösterilmiştir.



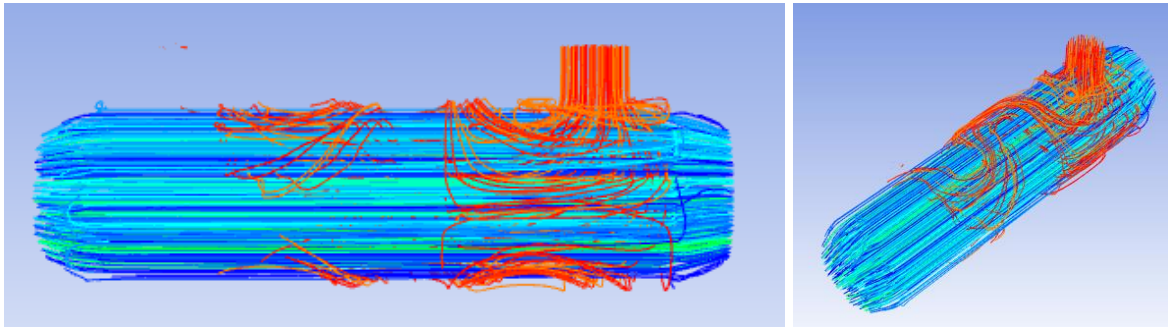
Şekil 7.30. Boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı: (a) 0,0155 kg/s, (b) 0,005 kg/s

Soğutucuda egzoz gazı debisi 0,0155 kg/s iken boruların yüzeyindeki sıcaklığın, 0,005 kg/s debiye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu dağılımlar, soğutucuya giren egzoz gazı debisi dolayısıyla hızı azaldıkça ısı transferinin toplam verimliliğinin arttığını göstermektedir. Soğutucu akışkanın girdiği tarafın etkisinden dolayı, boruların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı giriş bölgesinde zayıflamıştır. Bunun sonucunda da sıcaklık dağılımında asimetrik bir görünüm elde edilmiştir. Sonuç olarak, tüm soğutucunun ısı transferi düşük hızda egzoz gazı kullanılarak arttırılmıştır.

Egzoz gazlarının ortalama çıkış sıcaklığı, soğutucu borularının uzunluğu 190 mm olan EGR soğutucusuna göre 200 mm olan soğutucuda en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, uzunluğu daha fazla olan EGR soğutucusunun, kısa olan EGR modeline göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir. Ancak, soğutucu tasarımında daha büyük soğutucu uzunluğunun daha fazla basınç düşüşüne neden olacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Parçacık çizgileri (Pathline)

Şekil 7.31, soğutucunun kabuk kısmından giden soğutucu akışkan ve boruların içinden geçen egzoz gazının parçacık çizgilerini (pathline) göstermektedir. Mavi çizgilerle belirtilen motor egzoz gazlarının akışına dik yönde gelen kırmızı çizgiler kabuktaki soğutucunun parçacık çizgilerini (pathline) göstermektedir.



Şekil 7.31. EGR soğutucusunun parçacık çizgilerinin görünümü

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, temel tasarımlar düz EGR soğutucusu ve bölmeli EGR soğutucusu olmak üzere beş model üzerinden akış ve ısı transfer özellikleri araştırılmıştır. Çözümlemeler öncesinde literatürde yapılmış sayısal ve deneysel çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Beş farklı EGR soğutucusu modelinin sayısal analizi sonucunda elde edilen veriler aşağıda açıklanmıştır.

Çizelge 8.1, 8.2 ve 8.3, egzoz gazının giriş ve çıkış sıcaklıkları ile hesaplanan etkinlik ve yüzde olarak sıcaklık düşüşü ile soğutucudaki toplam basınç düşüşünü göstermektedir.

Çizelge 8.1. Egzoz gazı debisi (0,0155 kg/s) için analiz sonuçları

Parametre	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Egzoz gazı giriş sıcaklığı (K)	723	723	723	723	723
Egzoz gazı çıkış sıcaklığı (K)	565	560	593	563	565
Sıcaklık düşüşü (%)	21,8	22,5	17,9	22,1	21,8
Etkinlik (ϵ)	42,7	44,1	35,1	43,2	42,7
Basınç düşüşü (Pa)	374	377	344	371	362

Çizelge 8.2. Egzoz gazı debisi (0,01 kg/s) için analiz sonuçları

Parametre	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Egzoz gazı giriş sıcaklığı (K)	723	723	723	723	723
Egzoz gazı çıkış sıcaklığı (K)	517	512	551	515	518
Sıcaklık düşüşü (%)	28,5	29,2	23,8	28,8	28,4
Etkinlik (ϵ)	55,7	57,1	46,5	56,2	55,4
Basınç düşüşü (Pa)	177	179	160	178	171

Çizelge 8.3. Egzoz gazı debisi (0,005 kg/s) için analiz sonuçları

Parametre	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Egzoz gazı giriş sıcaklığı (K)	723	723	723	723	723
Egzoz gazı çıkış sıcaklığı (K)	439	435	474	438	445
Sıcaklık düşüşü (%)	39,3	39,8	34,4	39,4	38,4
Etkinlik (ϵ)	76,8	77,8	67,3	77,1	75,1
Basınç düşüşü (Pa)	68	65	56	82	92

En yüksek soğutucu etkinliği, tüm debiler için Model 2'deki bölmeli EGR soğutucusunda elde edilmiştir. Egzoz gazlarının ortalama çıkış sıcaklığı, Model 2'deki bölmeli soğutucuda en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır.

Aynı debide, bölmeli EGR soğutucusunun performansı düz EGR soğutucusundan daha yüksektir. Bölmeli soğutucularda (Model 2 ve 4) egzoz gazı sıcaklığının, Model 1'deki düz soğutucuya göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, soğutucuya eklenen bölmenin temel işlevinin, kendi içindeki ısı değişimini güçlendirmek değil, ısı transferinin toplam verimliliğini arttırmak olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bölmeli EGR soğutucusunun, düz olan EGR modeline (Model 1) göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir.

Egzoz gazı sıcaklığının EGR içine bölme eklenerek azaldığı görülmektedir. Akış mesafesini uzatan ve akışı güçlendiren bölmeler kullanılarak su akış alanlarının büyük ölçüde değiştirilebildiği gösterilmiştir. Böylece, ısı transferi artırılarak egzoz gazının sıcaklığının daha çok düşmesi sağlanmıştır. Sonuçlar, gelişmiş yapıların sadece soğutucu sıvının akış yolunu uzatmakla kalmayıp, aynı zamanda soğuk ve sıcak akışkanlar arasındaki ısı transfer oranını da arttırdığını göstermektedir. Ancak, soğutucunun uzunluğu da önemli bir parametredir. Nitekim Model 3'deki soğutucu bölmeli olmasına rağmen uzunluğu düz soğutucudan (Model 1) daha kısa olduğu için sıcaklık düşüşü ve etkinlik değerleri daha düşük bulunmuştur. Model 5'deki bölmeli soğutucunun uzunluğu ise düz soğutucuya (Model 1) yakın bir değere sahip olduğu için sıcaklık düşüşü ve etkinliği de yakın değerlerde bulunmuştur. Ancak, soğutucu tasarımında daha büyük soğutucu uzunluğunun daha fazla basınç düşüşüne neden olacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Egzoz gazlarının ortalama çıkış sıcaklığı, 5 bölmeli EGR soğutucusuna (Model 4) göre 4 bölmeli soğutucuda (Model 2) en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, bölme sayısının fazla olması soğutma performansının artacağı anlamına gelmemektedir. Bölmelerin yönlendirici etkisi, sıcaklık dağılımını asimetrik yapabilmektedir. Bölmelerin neden olduğu yanlış akış ve sıcaklık dağılımları, soğutma performansı ve güvenilirliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir. Emme açısını ve pozisyonunu değiştirmek, bu problemle başa çıkmak için alternatif bir yaklaşımdır.

En yüksek soğutucu etkinliği, egzoz gazının giriş debisi 0,005 kg/s olduğunda elde

edilmiştir. Egzoz gazının ortalama çıkış sıcaklığı, egzoz gazı debisi 0,005 kg/s iken en düşük sıcaklık aralığına ulaşmıştır. Bu nedenle, EGR soğutucusuna giren düşük hızdaki egzoz gazının, yüksek hıza göre sıcaklığı daha çok düşürdüğü ve böylece NO_x oluşumunun daha fazla azaltılmasını sağladığı sonucuna varılabilir. Ancak, akış hızının düşmesi de tortu artışına neden olabilmektedir. Bu durum, etkinliğin ve soğutucunun ömrünün azalmasına neden olmaktadır (Ghassemlaglou ve Torkaman, 2016). Bunların hepsi, soğutucu tasarımında göz önünde bulundurulması gereken kısıtlardır.

Borulardaki gaz akışının eşit dağıtımı, EGR soğutucusunun tasarlanmasında önemli konulardan biridir. Giriş çapının kabuk çapına oranının (D_1/D_2) azalması, yan borulardaki akış yüzdesini azaltmakta ve bunun sonucu olarak daha fazla akış merkezi borulara aktarılmaktadır. Bu durum, merkezi borularda basınç düşüşüne ve yakınlarındaki soğutucu akışkan sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bu bölgede, çalışma süresince soğutucu titreşimine ve ısıl gerilmelere neden olan yerel kaynamaya neden olabilmektedir. Ayrıca, akış hızının düşmesi ve ardından yan borulardaki türbülansın azalması, yerel ısı transfer oranının düşmesine neden olmaktadır. Akış hızının düşmesi tortu artışına da neden olabilmektedir. Diğer taraftan, D_1/D_2 azaldıkça, akışı uygun ve eşit şekilde dağıtmak için giriş kısmının yani dağıtıcının daha fazla uzunlukta olması gerekmektedir. Bu durum, daha büyük soğutucu uzunluğu ve daha fazla basınç düşüşüne neden olacaktır (Ghassemlaglou ve Torkaman, 2016). Bunların hepsi, etkinliğin ve soğutucunun ömrünün azalmasına neden olmaktadır.

EGR soğutucusunun performansı büyük ölçüde soğutucu borularının ve dağıtıcının tasarımına, şekline ve boyutuna bağlıdır. Boruların boyutunu ve şeklini en uygun hale getirerek EGR soğutucusunun etkinliğini artırmak mümkündür (Ghassemlaglou ve Torkaman, 2016). Isı transferini arttırmak için egzoz gazını taşıyan boruların geometrisi değiştirilebilir, ancak ısı transferi verimliliği ile basınç düşüşü arasındaki denge dikkate alınmalıdır. Basınç farkının artması durumunda, motor yakıt tüketimi ve motor performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu nedenle egzoz sistemindeki tüm elemanlarda düşük basınç farkı istenmektedir.

Tez çalışmasının devamında veya gelecekte, soğutucunun ve egzoz gazının farklı debi ve sıcaklıklarını içeren, daha ayrıntılı ve daha fazla borudan oluşan, daha karmaşık modeller kullanılarak daha hassas sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca, deneysel

alışmalara yer verilerek deney sonucu elde edilen verilerin sayısal sonuçlarla karşılaştırılması, doğrulanması ve tasarım sürecine katkıda bulunması sağlanabilecektir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda; soğutucu uzunluğunun etkisi, boruların geometrisinin etkisi, duvar malzemelerinin etkisi gibi parametreler incelenebilir. Araştırmacılar, daha karmaşık modeller de oluşturabilirler.

KAYNAKLAR

- Aktaş, F. (2015). *Katalitik Konvertör Öncesinde Isıtmanın Konvertör Verime Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Al-Janabi, A., and Malayeri, M. R. (2017). Turbulence induced structures in exhaust gas recirculation coolers to enhance thermal performance. *International Journal of Thermal Sciences*, 112, 118-128.
- ANSYS Meshing Guide. (2015). *ANSYS FLUENT Meshing User's Guide Version 15.0*. USA, 401.
- ANSYS Theory Guide. (2015). *ANSYS FLUENT Theory Guide Version 15.0*. USA, 47-56.
- ANSYS Users Guide. (2015). *ANSYS FLUENT User's Guide Version 15.0*. USA, 132.
- Borat, O., Balcı, M., ve Sürmen, A. (1994). *Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği*. (3). Ankara: Teknik Eğitim Vakfı Yayınları.
- Castano, C., Sanchez, A., Grande, J.A., and Paz, C. (2007). Advantages in the EGR cooler performance by using internal corrugated tubes technology. *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, 19-26.
- Duraisamy, S., Bhaleghare Santosh, S., Sundaralingam, S., Thundil Karuppa Raj, R., and Elango, T. (2012). Optimization of an Exhaust Gas Recirculation Cooler using CFD technique. *ISCA Journal of Engineering Sciences*, 1 (1), 62-67.
- Gawai, P.S., and Dalvi, S. (2016). Experimental and simulative performance analysis of Exhaust Gas Recirculation Cooler by using CFD. *Int. Journal of Precious Engineering Research and Applications*, ISSN: 2456-2734, 1 (1), August 2016, 7-17.
- Ghassemlou, N., and Torkaman, L. (2016). Efficient design of exhaust gas cooler in cold EGR equipped diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 55 (2), 769-778.
- Guerra, S. (2017). *Fouling of Exhaust Gas Recirculation Coolers*, Tese Mestrado Engenharia Mecânica, Master of Science in Mechanical Engineering to the Faculty of Engineering, University of Porto.
- Haşimoğlu, C., İçingür, Y., ve Ögüt, H. (2002). Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneyisel Analizi. *Turkish Journal of Engineering Environmental Science*, 26, 127-135.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. (Second Edition). New York, USA. McGraw-Hill, 504-649.
- Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer*. (Tenth Edition). New York, USA. McGraw-Hill, 540-667.

- Hoseini, S. S., Najafi, G., and Ghobadian, B. (2016). Experimental and numerical investigation of heat transfer and turbulent characteristics of a novel EGR cooler in diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1344-1356.
- Huang, Y., Yu, X., and Lu, G. (2008). Numerical simulation and optimization design of the EGR cooler in vehicle. *Journal of Zhejiang Univ Sci A*, 9 (9), 1270-1276.
- İçingür, Y., ve Salman, M.S. (1993). *İçten Yanmalı Motorlardan Kaynaklanan Emisyonlar ve Kontrol Yöntemleri*. 2. Ulusal Yanma ve Hava Kirliliği Sempozyumu, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- İlkılıç, C., Behçet, R., Aydın, S., ve Aydın, H. (2009, 13-15 Mayıs). *Dizel Motorlarında Azot Oksitlerin Oluşumu ve Kontrol Yöntemleri*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.
- İnternet: *Exhaust Gas Recirculation (EGR) and NOx measurement*. URL: <https://www.cambustion.com/products/egr>, Son Erişim Tarihi: 8 Ocak 2019.
- Jang, S., Park, S., Choi, K., and Kim, H. (2011). Experimental investigation of the influences of shape and surface area on the EGR cooler efficiency. *Heat Mass Transfer*, 47, 621-628.
- Karanje, S.C. and Bhusnoor, S.S. (2017). Design, modeling and CFD analysis of EGR cooler for future emission norms of diesel engine. *International Conference On Emanations in Modern Technology and Engineering (ICEMTE-2017)*, ISSN: 2321-8169. 5 (3), 65-71.
- Kaytakoğlu, S., Var, F., ve Öcal, S. E. (1995). *Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Kirlilik ve Giderme Yöntemleri*. Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü 3. Ulusal Sempozyumu, Ankara.
- Kim, H.M., Park, S.K., Choi, K.S., Wang, H.M., Lee, D.H., Lee, D.K., Cha, Y.S., Lee, J.S. and Lee, J. (2008). Investigation on the flow and heat transfer characteristics of diesel engine EGR Coolers. *International Journal of Automotive Technology*, 9 (2), 149-153.
- Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., and Aiyoshizawa, E. (2001). Ultra-clean combustion technology combining a low temperature and premixed combustion concept for meeting future emission standards, SAE paper no. 2001-01-0200, *Society of automotive Engineers Inc.*, Warrendale, PA.
- Kökkülünk, G., Parlak, A., Ayhan, V., ve Cesur, İ. (2012). Investigation of steam injection with Exhaust Gas Recirculation (EGR) on a diesel engine. *Latest Trends in Sustainable and Green Development*, 41-46.
- Kökkülünk, G., Parlak, A., Bağcı, E., ve Aydın, Z. (2014). Application of Taguchi Methods for the optimization of factors affecting engine performance and emission of Exhaust Gas Recirculation in steam-injected diesel engines. *Acta Polytechnica Hungarica*, 11 (5).

- Kumar, So., and Kumar, Sa. (2016). Complex turbulent flow and heat transfer characteristics of tube with different types of internal longitudinal fins in EGR cooler. *IJEDR*, 4 (2), ISSN: 2321-9939.
- Kwon, S., Park, Y., Park, J., Kima, J., Choi, K-H., and Cha, J-S. (2017). Characteristics of on-road NOx emissions from Euro 6 light-duty diesel vehicles using a portable emissions measurement system. *Science of the Total Environment*, 576, 70.
- Lazaro, J.L., Garcia-Bernad, J.L., Perez, C., Galindo, J., Climent, H., and Arnau, F.J. (2002). Cooled EGR modulation: A strategy to meet EURO IV emission standards in automotive DI diesel engines. *Society of Automotive Engineers Inc.*, Warrendale, PA SAE paper no. 2002-01-1154.
- Lee, J., and Min, K. (2014). A study of the fouling characteristics of EGR coolers in diesel engines. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28 (8), 3395-3401.
- Lutz, R. (2004). Commercial vehicle EGR Coolers for maximum load levels. *MTZ*, worldwide 9/2004. 65, 640.
- Mani, M., Nagarajan, G., and Sampath, S. (2010). An experimental investigation on a DI diesel engine using waste plastic oil with Exhaust Gas Recirculation. *Fuel*, 89, 1826-1832.
- Manimaran, R., and Thundil Karuppa Raj, R. (2013). CFD analysis of combustion and pollutant formation phenomena in a direct injection diesel engine at different EGR conditions. *Procedia Engineering*, 64, 497-506.
- Marmara Araştırma Merkezi (MAM). (1993). *Hava Kirliliği Kaynakları ve Kontrolü*. Kocaeli: Marmara Araştırma Merkezi, 81.
- Milli Eğitim Bakanlığı (MEB). (2011). *Motorlu Araçlar Teknolojisi, Egzoz Emisyon Kontrolü*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı, 4-42.
- Milli Eğitim Bakanlığı (MEB). (2013). *Motorlu Araçlar Teknolojisi, Emisyon Azaltıcı Sistemler*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı, 4-35.
- Mohammadi, K., and Malayeri, M.R. (2015). Model-Based performance of turbulence induced structures in Exhaust Gas Recirculation (EGR) Coolers. *Heat Transfer Engineering*, 36, 706-714.
- Novozhilov, V. (2001). Computational fluid dynamics modeling of compartment fires. *Progress in Energy and Combustion science*, 27 (6), 611-666.
- Paz, M.C., Suarez, E., Concheiro, M., and Porteiro, J. (2013). CFD transient simulation of fouling in an EGR Cooler in a diesel exhaust environment. *Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*.
- Pulkrabek, W.W. (1997). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. (Second Edition). New Jersey: Prentice Hall, 305.

- Shabgard, H., Kheradmand, S., Farzaneh, H., and Bae, C. (2017). Numerical simulation of cooling performance of an exhaust gas recirculation (EGR) cooler using nano-fluids. *Applied Thermal Engineering*, 110, 244-252.
- Shah, I.H. and Namdeo, A.K. (2014). Thermal analysis of baffled shell and tube type EGR cooler for different types of tubes using CFD. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 72-76.
- Shrestha, R., Chung, Y., Han, A., Hong, S., and Kim, W. (2016). Finite element analysis on thermal performance of Exhaust Gas Recirculation by using CFD. *International Journal of Applied Engineering Research*, ISSN 0973-4562. 11 (14), 8288-8292.
- Soruşbay, C., Ergeneman, M., Öztürk, T., ve Sel, E. (2010). *Binek Araçlarında Sürüş Koşullarının Kirletici Egzoz Emisyonlarına Etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Otomotiv Laboratuvarı, İstanbul 34439.
- Sözen, A., ve Çiftçi, E. (2016). Isı Tekerleği Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 19 (4), 547-554.
- Usta, S. E. (2011). *İçten Yanmalı Motor Egzoz Manifoldu Yapısının Motor Performansına Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uyumaz, A., Boz, F., Yılmaz, E., Solmaz, H., ve Polat, S. (2017). Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. Özel Sayı 1, 15-24.
- Xie, F., Hong, W., Su, Y., Zhang, M., and Jiang, B. (2017). Effect of external hot EGR dilution on combustion, performance and particulate emissions of a GDI engine. *Energy Conversion and Management*, 142, 69-81.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EKMEKÇİ, Şeyma Nur
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 06.11.1990, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (545) 409 84 81
 e-mail : snssarioglu@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2012
Lise	Gazi Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Türk Standardları Enstitüsü	TSE Uzmanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Ekmekci, Ş. N., Dinler, N. (2019, 26-27 Nisan). *Bir EGR Soğutucusunda Akış ve Sıcaklığın Sayısal İncelenmesi*, 6. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Kongresi, Gaziantep.

Hobiler

Tiyatro, Yürüyüş, Edebiyat, Seyahat, Blog yazarlığı (Haritadan yer beğen)



GAZİ GELECEKTİR...