

**T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI YAKIT YAKAN HAREKETLİ IZGARALI KAZANLARIN SAYISAL  
AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Betül ŞAHİN**

**(101119204)**

**Anabilim Dalı: Makine Eğitimi**

**Programı: Enerji**

**Danışman: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31 Ekim 2018**

**ARALIK-2018**



**KATI YAKIT YAKAN HAREKETLİ IZGARALI  
KAZANLARIN SAYISAL AKIŞKANLAR  
DİNAMİĞİ İLE ANALİZİ**

**Betül ŞAHİN**

**Doktora Tezi  
Makine Eğitimi Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP  
ARALIK-2018**

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATI YAKIT YAKAN HAREKETLİ IZGARALI KAZANLARIN  
SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE ANALİZİ


DOKTORA TEZİ


Betül ŞAHİN


(101119204)


Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Ekim 2018


Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Aralık 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP (F.Ü.) 

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü.) 

Prof. Dr. Ebru KAVAK AKPINAR (F.Ü.) 

Dr. Öğr. Üye. Ömer Faruk CAN (D.Ü.) 

Dr. Öğr. Üye. Fatih BAYRAK (S.İ.Ü.) 

ARALIK-2018

## ÖNSÖZ

Bu doktora tezi, hareketli ızgaralı bir kazanda, kömür yakılması sonucu oluşan, akış, ısı transferi ve emisyon sonuçlarını içermektedir.

Sayısal olarak gerçekleştirilen çalışma, ANSYS Fluent yardımıyla üç boyutlu olarak modellenmiş, uygun bir ağ yapısı ile örüldükten sonra Eddy Dissipation yanma modeli uygulanmıştır. Problem, antrasit, linyit ve turba olmak üzere üç farklı yakıt ile çözdürülmüştür. Sonuçlar Mimsan A. Ş.' den alınan veriler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar teze eklenerek açıklanmıştır.

Doktora çalışmam süresince engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, çalışma prensibini ve hayata duruşunu örnek aldığım, birlikte çalışmaktan onur duyduğum değerli hocam Prof. Dr. Hakan F. Öztop' a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın tamamlanması sırasında her tür zorluğu birlikte göğüslediğim, desteğini bir an olsun esirgemeyen değerli eşim ve varlığıyla güç bulduğum güzel kızıma canı gönülden teşekkür ederim.

Bu doktora tezini, çalışmalarım sürerken aniden kaybettiğim, hayatımın her anında güler yüzüyle beni destekleyen, yüreklendiren, sevgi dolu biricik anneme, derin bir hüznün ve özlemle atfediyorum.

**Betül ŞAHİN**  
**Elazığ – 2018**

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ .....	XII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XIII
KISALTMALAR .....	XVI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması.....	2
1.2. Kömür.....	10
1.2.1. Kömürün Oluşumu ve Kömürleşme Süreci.....	11
1.2.2. Kömürün Sınıflandırılması.....	13
1.2.2.1. Peat (Turba, Genç Kömür) .....	13
1.2.2.2. Linyit (Kahverengi) Kömür.....	13
1.2.2.3. Bitümlü Kömür.....	14
1.2.2.4. Antrasit .....	14
1.2.3. Kömürleşme Derecesinin Kömür Özellikleri ve Kullanımına Etkisi.....	14
1.2.4. Kömür Analizi .....	15
1.2.4.1. Kömürün Kısa Analizi.....	15
1.2.4.1.1. Nem .....	15
1.2.4.1.2. Kül .....	16
1.2.4.1.3. Mineral Madde .....	16
1.2.4.1.4. Uçucu Madde.....	17
1.2.4.1.5. Sabit Karbon İçeriği .....	17
1.2.4.2. Kömürün Elemental Analizi .....	18
1.2.4.2.1. Karbon .....	18
1.2.4.2.2. Hidrojen.....	18

1.2.4.2.3. Oksijen.....	18
1.2.4.2.4. Azot.....	19
1.2.4.2.5. Kükürt.....	19
1.2.5. Isıl Değer .....	19
1.2.6. Isıl Test .....	20
1.3. Yakıtlar ve Yanma.....	20
1.4. Kömürün Yanması.....	22
1.5. Kazanlar.....	26
1.5.1. Kazanlarda Kömürün Yakılması .....	27
1.5.1.1. Izgaralı (Sabit Yatakta) Yakma .....	27
1.5.1.2. Pülverize (Toz) Kömürün Yanması.....	28
1.5.1.3. Akışkan Yataklı Kazanlar.....	29
1.6. Emisyon Kontrolü .....	31
1.7. Partikül Kontrolü .....	32
1.8. Kükürt Gazlarının Kontrolü .....	32
1.9. Azot Gazlarının Kontrolü .....	32
2. MATERYAL ve METOT .....	34
2.1. SAYISAL ÇALIŞMA .....	34
2.1.1. Problem Geometrisi ve Sınır Şartları .....	35
2.1.2. Ağ Yapısının (Mesh) Test Edilmesi .....	35
2.1.3. Yönetici Denklemler .....	37
2.1.3.1. Enerji Denklemi.....	38
2.1.3.2. Momentumun Korunumu Denklemi .....	38
2.1.3.3. Kütle Korunumu Denklemi .....	39
2.1.3.4. Tür Korunumu (Kimyasal Bileşenlerin Korunumu) .....	39
2.1.3.5. İdeal Gaz Denklemi- Sıkıştırılabilir Akışlar.....	39
2.1.3.6. Türbülans Modelleme - Standart k-ε Türbülans Modeli .....	40
2.1.3.7. Species Transport Denklemleri .....	41
2.1.3.8. Eddy Dissipation Model .....	41
2.1.3.9. Işınlama ile Isı Geçişi - P1 Işınlama Modeli .....	42
2.1.3.10. Ayrık Faz Modeli .....	43
2.1.4. Çözümün Geçerliliği .....	43
3. BULGULAR .....	45

3.1. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen Hız Sonuçları .....	46
3.2. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları .....	56
3.3. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen Basınç Sonuçları .....	65
3.4. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen CO Sonuçları .....	73
3.5. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen CO <sub>2</sub> Sonuçları .....	81
3.6. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen NO Sonuçları .....	89
3.7. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen NO <sub>2</sub> Sonuçları .....	97
3.8. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen H <sub>2</sub> O Sonuçları .....	105
3.9. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen SO <sub>2</sub> Sonuçları.....	112
4. SONUÇLAR.....	122
5. ÖNERİLER .....	125
KAYNAKLAR.....	126
ÖZGEÇMİŞ.....	132

## ÖZET

Enerjiye olan ihtiyaç dünya nüfus artışı ile giderek artmaktadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak için en fazla kullanılan kaynaklar fosil yakıtlardır. Fosil yakıtlar içerisinde ise kömür, en geniş kullanım alanına sahiptir. Ancak özellikle endüstrilerde kömürün yanlış yakılması, hava kirliliğine neden olmakta ve atmosfere zarar vermektedir. Bu nedenle kömürden enerji elde edilirken çevreci, ekonomik, verimli yakıtların ve yakıcıların kullanılması gerekmektedir. Düşük kaliteli yakıtları yakan hareketli ızgaralı kazanlar kömürün yüksek ısı transferi ve düşük emisyon ile yanmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada, hareketli ızgaralı kazanın sayısal modellemesi, ANSYS yazılımı içindeki FLUENT modülü kullanılarak yapılmıştır. Kazan gerçek çalışma koşullarına uygun şekilde üç boyutlu olarak modellenmiştir. Denklemler zamandan bağımsız olarak çözdürülmüştür. Modelde türbülans modeli olarak standart k- $\epsilon$  türbülans modeli seçilmiştir. Işınım modeli olarak, P1 ışınım modeli kullanılmıştır. Yanma modelinde ise Eddy Dissipation yanma modeli uygulanmıştır. Ayrık faz modeli kullanılarak gaz fazındaki türbülansın katı parçacıkların yörüngelerine olan etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Yakıt olarak antrasit, linyit ve turba kömürleri kullanılmıştır. Bu doktora tezi çalışmasın da hareketli ızgaralı bir kazanda farklı kömürler yakılmış, akış, ısı transferi ve emisyon sonuçları verilmiştir. Ayrıca, Mimsan şirketin de faaliyette olan bir hareketli ızgaralı kazan ile karşılaştırılarak doğruluğu teyit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yanma, Kömür, Hareketli Izgaralı Kazan, ANSYS Fluent



## SUMMARY

### **Solid Fuel Fired Moving Grate Boiler Analysis with Dynamics of Numerical Fluids**

Energy need is increasing steadily with the growth of world population. Fossil fuels are the most used resources to meet the growing energy need. In fossil fuels, coal is used most commonly. However, especially in industries, improper burning of the coal causes air pollution and harms the atmosphere. For this reason, it is necessary to use environmentally friendly, economical and efficient fuels while obtaining coal energy. Moving grate boiler, that burn low-quality fuels, make the coal burn with high heat transfer and low emissions.

In this study, numerical modeling of the moving grate boiler was carried out using the FLUENT module in ANSYS software. The boiler is modeled in three dimensions in accordance with the actual operating conditions. Equations solved independently in time. A standard k- $\epsilon$  turbulence model was chosen as the turbulence model in the model. As radiation model, P1 radiation model was used. In the combustion model, the Eddy Dissipation combustion model was applied. The effect of gas-phase turbulence on the orbits of solid particles is taken into account using the discrete phase model. Anthracite, lignite and peat coals were used as fuel. In this doctoral dissertation study, different coals was burned, flow, heat transfer and emission results were obtained in a moving grate boiler. In addition, the accuracy of the Mimsan company was confirmed by comparison with a boiler in operation.

**Keywords:** Combustion, Coal, Moving Grate Boiler, ANSYS Fluent

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Kömür oluşumu .....	11
Şekil 1.2. Kömür türleri, rezerv oranları ve kullanım alanları .....	12
Şekil 1.3. Kömürleşme .....	13
Şekil 1.4. Türkiye linyitleri .....	14
Şekil 1.5. Kömür analizi.....	23
Şekil 1.6. Bir kömür taneciğinin yanma basamakları. ....	24
Şekil 1.7. Kömürün yanma aşamaları .....	25
Şekil 1.8. Akışkanlaşma .....	31
Şekil 2.1. Fiziksel model.....	35
Şekil 2.2. Hareketli ızgaralı kazanın mesh yapısı .....	35
Şekil 2.3. Mesh testi .....	36
Şekil 2.4. Elde edilen sonuçların Mimsan A.Ş. ile karşılaştırılması .....	44
Şekil 3.1. Hareketli ızgaralı kazanın üç boyutlu ve XY-YZ kesitlerinden alınan hız vektörlerinin görünüşü a) Üç boyutlu görünüş b) XY kesiti c) YZ kesiti .....	48
Şekil 3.2. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle hız eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	49
Şekil 3.3. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti hız eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	50
Şekil 3.4. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti hız eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	51
Şekil 3.5. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin önden, yandan ve arkadan hız akım çizgileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	54
Şekil 3.6. Hareketli ızgaralı kazan merkezinden geçen bir çizgi boyunca alınan hız sonuçları.....	55
Şekil 3.7. Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça üzerinden alınan hız sonuçları .....	55
Şekil 3.8. Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle sıcaklık eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	58
Şekil 3.9. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti sıcaklık eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	59
Şekil 3.10. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti sıcaklık eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	60

<b>Şekil 3.11.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin önden, yandan ve arkadan sıcaklık akım çizgileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	63
<b>Şekil 3.12.</b> Hareketli ızgaralı kazanın ortasından geçen bir çizgi boyunca alınan sıcaklık sonuçlarının dağılımı.....	64
<b>Şekil 3.13.</b> Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan sıcaklık sonuçlarının dağılımı.....	64
<b>Şekil 3.14.</b> Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle basınç eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	67
<b>Şekil 3.15.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti basınç eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	68
<b>Şekil 3.16.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti basınç eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	69
<b>Şekil 3.17.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin farklı açılardan kontürleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	72
<b>Şekil 3.18.</b> Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan basınç sonuçları .....	73
<b>Şekil 3.19.</b> Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle CO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	75
<b>Şekil 3.20.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti CO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	76
<b>Şekil 3.21.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti CO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	77
<b>Şekil 3.22.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin CO emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	80
<b>Şekil 3.23.</b> Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan CO sonuçları .....	81
<b>Şekil 3.24.</b> Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle CO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	83
<b>Şekil 3.25.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti CO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	84
<b>Şekil 3.26.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti CO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	85
<b>Şekil 3.27.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin CO <sub>2</sub> emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	88
<b>Şekil 3.28.</b> Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan CO <sub>2</sub> sonuçları.....	89
<b>Şekil 3.29.</b> Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle NO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	91

<b>Şekil 3.30.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti NO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	92
<b>Şekil 3.31.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti NO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	93
<b>Şekil 3.32.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin NO emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	96
<b>Şekil 3.33</b> Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan NO sonuçları.....	97
<b>Şekil 3.34.</b> Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle NO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	99
<b>Şekil 3.35.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti NO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	100
<b>Şekil 3.36.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti NO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	101
<b>Şekil 3.37.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin NO <sub>2</sub> emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	104
<b>Şekil 3.38.</b> Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan NO <sub>2</sub> sonuçları.....	105
<b>Şekil 3.39.</b> Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle H <sub>2</sub> O eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	107
<b>Şekil 3.40.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti H <sub>2</sub> O eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	108
<b>Şekil 3.41.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti H <sub>2</sub> O eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	109
<b>Şekil 3.42</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin H <sub>2</sub> O emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	112
<b>Şekil 3.43.</b> Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan H <sub>2</sub> O sonuçları.....	113
<b>Şekil 3.44.</b> Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle SO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	115
<b>Şekil 3.45.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti SO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	116
<b>Şekil 3.46</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti SO <sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba .....	117
<b>Şekil 3.47.</b> Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin SO <sub>2</sub> emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba.....	120

**Şekil 3.48.** Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan SO<sub>2</sub> sonuçları..... 121



## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

**Tablo 2.1.** Antrasit, linyit, turba kömürlerinin nihai ve kısa analizleri..... 37



## SEMBOLLER LİSTESİ

$a$	: Absorpsiyon katsayısı (L/mol/cm)
$(a+\sigma_s)s$	: Optik kalınlık
$c$	: Ses hızı (m/s)
$C$	: Lineer anizotropik faz fonksiyonu ( $\psi$ )
$d_p$	: Partikül çapı (mm)
$f$	: Karışım fraksiyonu
$f'^2$	: Karışım fraksiyon varyansı
$F$	: Partikül kütlesi (kg)
$F_D$	: Sürükleme kuvveti (N)
$P$	: Statik basınç (Pa)
$P_0$	: Toplam basınç (Pa)
$p_{op}$	: İşletme basıncı (Pa)
$I$	: Radyasyon şiddeti
$J_i^k$	: Konsantrasyon gradyanları
$k$	: Türbülans kinetik enerjisi ( $m^2/s^2$ )
$T$	: Sıcaklık (K)
$T_0$	: Toplam sıcaklık (K)
$T_{ref,j}$	: J maddesinin referans sıcaklığı (K)
$R$	: Evrensel gaz sabiti (8,3145 J/(mol K))
$S$	: Ortalama gerinim tensörü
$S_i$	: Dağılık faz
$S_G$	: Işınım kaynağı
$S_{ct}$	: Türbülanslı akış için Schimidt sayısı
$S_c$	: Reaksiyon ilerleme kaynak terimi
$S_k$	: Kullanıcı tarafından tanımlanan k üretim terimi
$S_\varepsilon$	: Kullanıcı tarafından tanımlanan $\varepsilon$ üretim terimi
$S_h$	: Kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimi
$\vec{s}$	: Yön vektörü
$\vec{s}'$	: Saçılma yön vektörü

$s$	: Yol uzunluğu (m)
$Ma$	: Mach sayısı (m/s)
$M_w$	: Moleküler ağırlık
$n$	: Mol sayısı
$G$	: Anlık radyasyon
$G_k$	: Hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi
$G_b$	: Kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi
$h_j^0(T_{ref,j})$	: J maddesinin referans sıcaklığındaki oluşum entalpisi (J/kg)
$H$	: Toplam entalpi (J/kg)
$u$	: Akışkan faz hızı (m/s)
$u_p$	: Partikül hızı (m/s)
$U_t$	: Türbülanslı yanma hızı (m/s)
$u_i$	: Hız vektörü
$u_p$	: Partikül hızı (m/s)
$\vec{r}$	: Pozisyon vektörü
$X_{kazan}$	: Hareketli ızgaralı kazan merkezinden geçen çizgi
$X_{silindir}$	: Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça merkezinden geçen çizgi
$\vec{v}$	: Akışkanın hızı (m/s)
$V$	: Hacim (m <sup>3</sup> )
$v_x$	: Eksenel hız (m/s)
$v_r$	: Radyal hız (m/s)
$v_z$	: Girdap hızı (m/s)
$Y_i$	: i türlerinin kütle fraksiyonu (kg/kg)
$Y_j$	: J maddesinin kütle fraksiyonu (kg/kg)
$Y_k$	: Kimyasal bileşenin kütle kesri
$Y_p$	: Herhangi bir ürünün kütle fraksiyonu (kg/kg)
$Y_R$	: Belirli bir ürünün kütle fraksiyonu (kg/kg)
$Z_i$	: İ elementinin elementsel kütle fraksiyonu (kg/kg)
$R$	: Kimyasal bileşen oluşum oranı
$Re$	: Bağlı Reynolds sayısı
$R_i$	: Türlerin net üretim oranı
$\rho$	: Akışkanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )



$\rho_u$	: Yanmamış karışımın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_p$	: Partikül yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_g$	: Yerçekimi kuvveti ( $\text{kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$ )
$\tau$	: Gerilme tensörü ( $\text{N/m}^2$ )
$\tau_{ij}$	: Viskoz kuvvet tensörü ( $\text{N/m}^2$ )
$\mu$	: Moleküler viskozite ( $\text{kg/ms}$ )
$\mu_{eff}$	: Efektif viskozite ( $\text{kg/ms}$ )
$\gamma$	: Özgül ısıların oranı
$\varepsilon$	: Disipasyon oranı
$\sigma$	: Stefan -Boltzmann sabiti ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W /m}^2 \text{ K}^4$ )
$\sigma_k$	: Türbülans kinetik enerjisi için Prandtl sayısı
$\sigma_\varepsilon$	: Disipasyon oranı için Prandtl sayısı
$\sigma_s$	: Saçılma katsayısı
$\Phi$	: Faz fonksiyonu
$\Omega'$	: Katı açısı ( $^\circ$ )

## KISALTMALAR

<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>CFD</b>	: Computational Fluid Dynamics
<b>DOM</b>	: Discrete Ordinates Model
<b>DTRM</b>	: Discrete Transfer Model
<b>EDCM</b>	: Eddy Dissipation Concept Model
<b>EDM</b>	: Eddy Dissipation Model
<b>ESP</b>	: Elektronik Çözümler
<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>ISO</b>	: International Standards Organization
<b>MTA</b>	: Maden Teknik ve Arama Kurumu
<b>MTEP</b>	: Milyon Ton Petrol Eş Değeri
<b>TSE</b>	: Türk Standartları Enstitüsü
<b>TKİ</b>	: Türkiye Kömür İşletmeleri
<b>TG</b>	: Thermogravimetry

## 1. GİRİŞ

Dünyada hızla artan nüfus, gelişen teknoloji, sanayileşme, uluslararası rekabet gibi nedenlerle enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmış, bu gücü elinde tutan ülkeleri güçlü kılmıştır. Enerji üretimi, harcanması ülkelerin gelişmişliğinin belirlenmesinde parametre olarak kabul edilmiş, endüstriyel, sosyal ve ekonomik kalkınmanın temsili olmuştur.

Dünyadaki enerjinin, % 87'si kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlardan elde edilirken kalanı ise güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle, vs. gibi alternatif enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Kömür, dünyada en büyük rezerve sahip olan fosil kaynaktır. Ülkemizde ise dünyada bulunan kömür rezervinin % 2'si mevcuttur.

Kömür, 1960 yılları sonrasında yarattığı hava kirliliği nedeniyle dikkatleri üzerine toplamış ve özellikle endüstri de daha dikkatli kullanımı için çalışmalar hız kazanmıştır. Kömürün yanması ile ortaya çıkan SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, HC, aldehit, ince toz başta olmak üzere ortaya çıkan kirleticiler, asit yağmurları ve atmosferde artan CO<sub>2</sub> artışı gibi negatif etkilerle geri dönmekte, insan sağlığını ve doğanın doğal dengesini bozmaktadır. Bu sebeple akademisyenler kömürü düşük emisyon ve yüksek verimle yakan yakıcılar üzerine yoğunlaşmışlardır.

Sanayinin birçok alanında kullanılan kömür endüstriyel kazanlarda yakılmaktadır. Bu kazanlar ısıtma, pişirme, sterilizasyon, elektrik üretimi gibi birçok amaca hizmet ederler. Kömür yakma sistemleri parçacık boyutu, hava fazlalık katsayısı, yanma verimleri, emisyon değerleri vb. gibi farklılıklarla birbirlerinden ayrılan özelleşmiş sistemlerdir. Bu sistemler kömürün tane büyüklüğüne ve yanma sırasında yakıtı bağlı olarak, yüzeyde yakma, akışkanlaştırılmış ortamda yakma ve hacimde yakma olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Kömür, sabit yataklarda; parçalar halinde, akışkan yataklarda; kırılarak küçültülmüş parçalarla, pülverize yakma sistemlerinde ise toz halinde yakılmaktadır.

Çalışmada incelenen ızgara da (sabit yatakta) yakma, 1970' li yıllardaki petrol krizi döneminde kömür kullanımının öne çıkması ile birlikte, özellikle küçük kapasiteli alanlarda, geniş kullanım alanına sahip olan kömür yakma sistemlerinden biridir. Kazanda yakıt olarak, linyit, ağaç talaşı, fındikkabuğu gibi yakacaklar kullanılır. Bahsi geçen

yakıtların ergime derecesi düşüktür. Bu sebeple yandıkları zaman bir cüruf tabakası oluşur. Oluşan tabaka hava geçişini engeller. Kötüleşen hava sirkülasyonuna paralel olarak yanma kötüleşir, verim düşer. Bu sorunun üstesinden gelmek adına hareketli ızgaralı kazan sistemleri geliştirilmiştir. İleri itmeli diye de adlandırılan hareketli ızgaralı kazanların bir sırası sabit bir sırası hareketlidir. Hareketli kısım hareketini yaparken cüruf tabakasını kırdığı gibi kömürü de ileriye doğru sürükler. Hareket ile oluşan tabaka varsa kırılır, hava sirkülasyonu iyileşir ve daha iyi bir yanma sağlanır. Aksi takdirde cüruf, ızgaraya yapışır, hava deliklerini kapatır. Yanma kötüleşmekle kalmaz kazana da zarar vererek ömrünü kısaltır. Geliştirilen hareketli ızgaralı kazan yatakları bağımsız parçalardan oluşmuşsa da, ahenkli gözenekli bir blok gibi davranarak daha iyi bir yanma olanağı sağlarlar.

Bilim insanları kömür yakan kazanlarda, kirleticileri azaltmak ve yüksek verim elde etmek adına çalışmalarına durmaksızın devam etmektedirler. Bu problemler, deneysel ve sayısal olarak çözülebilmektedir. Deneysel çalışmaları yapmak için geliştirilen kazan tasarımları kısıtlı geometrilere imkân verir. Hızlı değişim ve denemelere kapalıdır. Ayrıca yanma işlemlerinin kontrol edilmesi ve kazan içi görüntü alma zorlayıcıdır. Sayısal çalışmalar deneysel çalışmalara göre kısa zamanda gerçekleştirilebilen daha ucuz ve hızlı çalışmalardır. Her geçen gün artan teknoloji sayesinde mühendislik yazılım programları, yüksek performanslı bilgisayarlarla çözülebilmektedir. Bu programlar sayesinde karışık kazan geometrileri çizilebilir, geometri üzerinde farklılıklar hızlıca yaratılabilir. Akış ve ısı transferi incelenebilir, görüntü alınabilir. ANSYS Fluent, CFX, Fire, StarCD bu programlardan bazılarıdır. Bu programlar, gerek bilimsel çalışmalarda, gerekse endüstriyel çalışmalarda kazan performans incelemeleri adına sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu doktora çalışmasında dünyaca kabul görmüş, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics - CFD) yazılımlarından biri olan ANSYS Fluent kullanılmıştır. Çalışma da öncelikle Mimsan A.Ş. de kullanılan bir hareketli ızgaralı kazan gerçek boyutlara bağlı kalınarak üç boyutlu modellenmiştir. Linyit, turba, antrasit kömürleri kazanda yakılarak yanma davranışları ve emisyon sonuçları incelenmiştir.

## **1.1. Literatür Araştırması**

Fosil yakıtlar içerisinde en büyük paya sahip olan kömürün, kullanılabilir rezervinin 300 yıldan daha uzun bir zaman olduğunu öngörülmektedir. Bu da gösteriyor ki kömür, dünya enerji dengesinin kilit yakıtı olmaya devam edecektir. Ancak sebep olduğu hava

kirliliği canlı yaşamı için önemli bir tehdittir. Bu nedenle araştırmacılar kömürü, düşük emisyon, yüksek verim ile yakan yakıcılar üzerinde durmaksızın çalışmaktadırlar.

Kopuz [1], kömür ve biyokütle karışımlarını birlikte yakarak yanma davranışlarını incelemiştir. Kömür olarak; Tekirdağ Malkara ve Çorum Bayat linyitlerini kullanmıştır. Biyokütle olarak ise şeftali ve vişne çekirdeğini seçmiştir. Yanma deneylerini Termogravimetik analiz cihazında gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda kömürler arasında önemli bir fark olmadığını ancak sinerjik bir etkileşimleri olduğunu görmüştür.

Kemal [2], kömürleşme ve kömür özelliklerinin kömür kullanımına etkisini incelemiş, çalışmasında ayrıntılı olarak yer vermiştir. Kömür kalitesini belirleyen empüritelerin yani kömür mineral madde içeriği, nem oranı ve kükürt oranının kömür yanmasına etkisine değinmiştir. Zonguldak, Tunçbilek, Amasra ve Soma kömürleri karşılaştırmıştır.

Yılmaz [3], biyokütle yarıkoku ve kömür karışımlarının yanma davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında kömür olarak, Tekirdağ, Malkara ve Çorum Bayat kömürlerini, biyokütle olarak da vişne ve şeftali çekirdeğini kullanmıştır. Biyokütlelerden düşük sıcaklık karbonizasyonu ile elde ettiği yarıkokları kullanarak bir karışım hazırlamış, yanma davranışları ve kinetiklerini incelemiştir. Tekirdağ Malkara kömürü ile hazırladıkları karışımlara biyokütleler eklendiğinde yanma davranışlarında ciddi bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Dike [4], yüksek fırın çalışmasında pülverize kömür enjeksiyonunun yanmaya etkilerini incelemiştir. İsdemir A.Ş. de mevcut olan yüksek fırında, pülverize kömür enjeksiyonunun kullanılmasının öncesi ve sonrasını karşılaştırmıştır. Pülverize kömür enjeksiyonu kullanımının, fırın veriminde artışa, kükürt salınımında azalmaya neden olduğunu görmüştür.

Özel [5], Kahramanmaraş Kâğıt Sanayi ve Ticaret A.Ş. fabrikasında kullanılan kömürlerden aldığı numunelerin standart testlerini yaptırmış, yıl boyunca fabrikanın elektrik üretimi için kullandığı kömürü belirlemiş, bu verileri yapay sinir ağında kullanabileceği şekilde düzenleyerek elektrik enerji performansını hesaplamıştır. Matlab paket programı ile farklı ağ yapıları denediği çalışmasında, minimum hata veren programı oluşturmuştur.

Selçuk [6], çalışmasında akışkan yatakta yakma teknolojilerini ve uygulamalarını özetlemiş devamında akışkan yatakların Türk linyitleri ile adaptasyonu ile ilgili deneylerini sunmuştur.

Gündoğdu [7], sıcak su kazanında, uçucu gaz içeriği yüksek olan bir kömürün ısıtılmasıyla yükselen uçucuların yakılması ve ikinci yanma havasının verim üzerine etkilerini incelemiştir. Deneylede dört yanma haznesi yapmış, ikincil yanma havasının haneye ne zaman, ne kadar sürede ve ne kadar debide verilmesi gerektiğini araştırmıştır. Kazanın verimliliği için ikincil havanın birincil havanın % 30' u kadar gönderilmesi gerektiğini tespit etmiştir.

Kartal [8], hazırladığı çalışmasında yanma kimyasını, yanmaya etki eden faktörleri ve yanma optimizasyonunu ele almış, ayrıntılı olarak anlatmıştır.

Özçelik [9], kabarcıklı bir akışkan yatağın tasarımını yapmıştır. Çalışmasında, SolidWorks Flow Simulation programını kullanmıştır. Devamında tasarladığı kazanı imal etmiş ve teste tabi tutmuştur. Kabarcıklı akışkan yatağın hidrodinamiğini, yanma davranışlarını ve ısı dağılımlarını incelemiştir.

Duranay ve Pehlivan [10], yaptıkları deneylede Zonguldak taşkömürü, Cizre ve Tunçbilek linyitlerini incelemiştir. Bu kömürlerin, cinslerinin, başlangıç sıcaklıklarının ve tane büyüklüğü gibi özelliklerinin yanmaya etkisini gözlemlemiştir. Yanma da hava konveksiyon hızının kömürlerin tutuşması ve uçucu madde yanması periyodunda etkili olduğunu ayrıca kimyasal kinetik ve difüzyonun yanmaya olan etkisini gözlemlemiştir.

Deveci [11], akışkan yatakta kömür yanmasını incelemiştir. Tezinde 1,70 - 15 mm boyutlarında, farklı kömürler (Şırnak Cizre linyiti, Tunçbilek linyiti ve Zonguldak taşkömürü) kullanmış, bu kömürlerin akışkan yatakta uçucu madde ve karbon yanma sürelerinin tanecik boyutu ile değişimini ve karbon yanma süresinin yatak sıcaklığı, hava hızı ile değişimini incelemiştir. Kömürün içerdiği kül miktarının yanma süresini büyük ölçüde etkilediğini, linyit char tanelerinin yanma süresinin artan kül miktarı ile arttığını tespit etmiştir.

Demirbilek [12], yaptığı çalışmada, kömür yakma yöntemlerini, üretilen çevre kirletici elemanları ve şartlarının yönetmeliklerce konan standartlar dâhilinde tutulabilmesi için kullanılan kontrol yöntemlerini özetlemiştir.

Bıykoğlu [13], sabit yataklarda kömür yakma işlemini modellemiştir. Sabit yatakta var olan kömür yığınını pseudo - kararlı durum yanması ile incelemiştir. Kömürün, kül, su, sabit karbon ve uçucu maddeden olduğunu varsaymıştır. Kömürü, heterojen reaksiyonlar kurarak çözdürmüştür. Katı akışının, geçiş zamanına ve dönüşüm oranına etki ettiğini görmüştür.

Düzcan [14], pülverize kömür yakan santrallerde kazan verimini ve verime etki eden parametreleri incelemiştir. Tezinde kömür olarak Türkiye de bolca bulunan, düşük kaliteli linyit kömürünü kullanmıştır. Kömür yakma sistemlerini incelemiş ve yanma öncesi, sırası ve sonrası emisyon değerlerini izlemiştir. Kıyaslamayı Orhaneli Termik Santrali' ndeki değerler ile gerçekleştirmiştir. Pülverize kömür kazanlarında, baca gazı çıkış sıcaklığının düşmesiyle verimde artış olduğunu görmüştür.

Güldoğan ve arkadaşları [15], Tunçbilek linyiti ile Denizli turbasının kinetik pirolizini incelemiştir. Tunçbilek linyiti, Denizli turbası ve birkaç turba linyit karışımını atmosferik şartlar altında termobalans aparatı kullanarak pirolizini gerçekleştirmişlerdir. Deneyle Argon atmosferinde, dakika da 20 °C ısıtılma oranıyla 25 °C 'den 900 °C' e sıcaklık artışıyla dinamik olarak uygulamışlardır. Farklı termogravmetik verileri, birinci dereceden kinetikleri varsayarak reaksiyon hızı modeli ile analiz etmişlerdir. Piroliz kinetiklerinde turba ve linyit kömürlerinin karışım oranlarının etkisini incelemiş, turbanın linyite göre içerdiği kül değerlerinin yüksek olmasından dolayı kinetik değerlerinin de değiştiğini görmüşlerdir.

Özdemir [16], pülverize kömür yakan bir kazanı sayısal olarak modellemiştir. Sayısal modelleme için bir mühendislik programı olan ANSYS Fluent'i kullanmıştır. Hava ve kömür değerlerini santralden birebir almış, kazanı ise sadeleştirerek modellemiştir. Çalışmada, türbülans modeli olarak k-ε modeli, radyasyon modeli olarak P1 ışınım modeli ve ön karışimsız PDF modülü kullanmıştır. Seyitömer termik santrali ile Tunçbilek termik santralini ele almış, karşılaştırdığı verilerde her iki santralin de alev bölgesinin kazanın merkezinde oluştuğunu ve kendi içinde tutarlı sonuçlar verdiğini görmüştür.

Shen ve arkadaşları [17], pülverize halde olan antrasit kömürünün yanması sonucunda oluşan NO<sub>x</sub> emisyon karakteristiklerini incelemiştir. Deneyle, elektrikle ısıtılan boru tipi bir kazanda pülverize antrasit kömürünün yakılmasıyla gerçekleştirmişlerdir. Kazana birden fazla aşama ile hava gönderildiğinde tek seferde gönderilen havaya göre NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığını görmüşlerdir.

Duranay ve Pehlivan [18], çan linyitini ele alarak linyit kömürünün hareketli koşullar içerisinde yanmasını deneysel olarak incelemiştir. Deneyle, 0,5 gr, 1 gr, 2,5 gr ve 5 gr ağırlıkta tekil taneler kullanmışlardır. Kömürlerin, döner başlıklı bir yakıcı ile hareket ettirilmesiyle iri tanelerin yanma hızında hissedilir bir artış görmüşlerdir. Ayrıca verilen hareketin, yüzeyde ki külü hareket ettirmesiyle linyit char'ının daha kısa zamanda ve hızda yandığını izlemiştir.

Varol [19], akışkan yataklı bir yakıcı da prina, kömür, prina - kömür karışımlarını yakmış, yanma ve emisyon davranışlarını incelemiştir. Yanmanın iyileştirilmesi için kazana ikincil hava girişleri eklemiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> emisyonlarının en aza indiği koşulların, % 75 prina ve % 25 kömür içeren karışım da elde edildiğini görmüştür.

İnanlı [20], akışkan bir yatak içerisinde biyokütle parçacıklarının silis kumu ile karıştırarak kabarcıklı akışkan yataktaki akışkanlaşma ve karışım karakteristiklerini incelemiştir. Üç farklı parçacık boyu ve beş farklı biyokütle ile çalışmasını gerçekleştirmiştir. Biyokütle olarak pirinç kabuğu, talaş, buğday sapı, fındikkabuğu ve zeytin posasını kullanmıştır. Yapılan deneylerde, pirinç kabuğu, buğday sapı ve talaşın karışımdaki kütleli yüzdesi arttıkça minimum akışkanlaşma hızında artış yarattığını, zeytin posası ve fındikkabuğunun ise önemli bir değişime sebep olmadığını gözlemlemiştir.

Keçebaş [21], evsel ısınmada (sobalarda) kömür yanmasını incelemiştir. Çalışmasında, alt yandan beslemeli bir soba tasarlamıştır. Yakıt olarak 30-50 mm aralığında değişen linyit kömürlerini kullanmıştır. Tasarladığı sobayı klasik bir soba düzeni ile karşılaştırarak emisyon salınımını kaydetmiştir. Çalıştığı sobada, klasik bir sobaya göre CO salınımının % 19 azaldığını, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> salınımlarının ise değişmediğini görmüştür.

Güngör [22], düşük kaliteli bir kömür olan linyit kömürünü sirkülasyonlu akışkan yataklarda yakarak düşük emisyon ve iyi bir yanma elde etmeyi hedeflemiştir. Yakıcılarda ki hidrodinamik parametreleri, yatak basıncını, gaz ve taneciklerin yatak içerisinde ki lokal sıcaklıklarını - hızlarını ayrıca ikinci kanun verimini incelemiştir. İkinci kanun veriminin, artan entropi nedeniyle yatak boyunca azalan bir eğilim sergilediğini görmüştür.

Scharler ve diğerleri [23], daha önce deneysel olarak incelenmiş bir hareketli ızgaralı kazandan alınan verileri değerlendirerek problemin sınır şartlarını hesaplamalı akışkanlar dinamiğine uyarlamış ve çözüm almışlardır. Ayrıca ikincil hava girişleri ve kazan geometrisini de incelemiştir. Yanma odalarındaki toplam basınç kayıplarının, baca gazlarının ve hava fan boyutlarının CO emisyonları üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Scharler ve Obernberger [24], çalışmalarında yanma odasında türbülanslı reaktif akış, ızgarada katı biyokütle (ağaç kabuğu, odun) yanmasını simüle etmiş, deneysel modelde katı yakıtın ısı ayrışmasını incelemiştir. ANSYS Fluent ile modelleyip, meshledikleri çalışmada, yanma için Eddy Dissipation model, türbülans için Realizable k-ε model ve



radyasyon için Discrete Ordinates model kullanmışlardır. Kazanda düşük NO<sub>x</sub> emisyonu azaltmak için baca gaz resirkülasyonu ile sıcaklığı kontrol edilen ilk yanma alanı ve hava giriş kanallarını dizayn etmişlerdir. İkinci hava girişi ve kazan dizayn değişikliğiyle zararlı emisyonların azaldığını görmüşlerdir. Yaptıkları bir başka çalışmada [25], bir önceki çalışmada olduğu gibi ANSYS Fluent ile modelleme ve yüklemeler yaparak düşük NO<sub>x</sub> emisyonunu hedeflemiş, kazan geometrisinin yanma üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışma neticesinde CO emisyonların da azalma, sıcaklık piklerinde artma görmüşlerdir.

Lin ve arkadaşları [26], hareketli ızgaralı bir kazan da kömür yanmasını çözmek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Hazırladıkları modeli, kazan modeli ve yatak modeli olarak ikiye ayırıp incelemişlerdir. Yatak modeli, non-isotermal partikül modeli sıcaklık gradyanlarını ve yanma partiküllerini karşılaştırmak için, kazan modelini ise devamında entegre edilen gridin birleştirilmesiyle oluşturmuşlardır. Yatak yüzeyindeki gaz tür konsantrasyonlarını ölçmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçların, deneysel çalışmalar ile örtüştüğünü görmüşlerdir. Çalışmada, hava fazlalık katsayısı ve partikül çapının yanmayı direkt etkilediğini tespit etmişlerdir.

Ceneteno-Gonzalez ve arkadaşları [27], endüstriyel bir kazanda şeker kamışı posasının yanmasını hesaplı akışkanlar dinamiği (CFD) ile incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, hem ızgarada yanma hem de devolatilizasyon olgusunu “C” dili ile tanımlayarak, ticari bir program olan ANSYS Fluent’ e aktarmış ve modellemişlerdir. Çalışmanın simülasyon sonuçlarında, devolatilizasyonun en büyük bölümünün partikül trajektörleri vasıtasıyla gerçekleştiğini görmüşlerdir.

Frey ve arkadaşları [28], ızgaralı kazanda katı şehir atıklarının yanmasını hem sayısal hem de deneysel olarak çalışmışlardır. Ölçümleri, pilot bir tesisin yanma odasının içinden, yatak yüzeyi boyunca, monitörden izlenen verilerden almışlardır. ANSYS Fluent ile modellenen baca gaz yanmasını, yanma odası içindeki yüksek sıcaklıklardan, baca gazının direnç zamanı verimliliğinden ve etkili karışımından dolayı ilk baca girişinden önce neredeyse tamamlandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca sayısal çalışma sonuçları ile deneysel çalışmanın örtüştüğünü görmüşlerdir.

Yang ve arkadaşları [29], hareketli ızgaralı bir kazanda, gaz haline getirilmiş atığın, yanma karakteristiklerini, yanma oranlarının içerdiği gaz bileşenini, sıcaklık ve yanma verimliliğini incelemişlerdir. Sayısal çalışmayı ANSYS Fluent ile iki boyutlu olarak çalışmışlardır. Sayısal çalışma ile deneysel çalışmanın örtüştüğünü görmüşlerdir. Ayrıca,

ikincil hava akış hızları değiştirildiğinde hızlı akışın, kazanın ön ve arka duvarlarında türbülansa neden olduğunu görmüşlerdir.

Yang ve arkadaşları [30], ızgaralı kazanlarda atık yanmasını incelemiştir. ANSYS Flic kod kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında devolitalizasyonu, char yanmasını ve yanma davranışlarını incelemiştir. Ayrıca ikincil yanma havasının yanmayı iyileştirdiğini ve emisyon oranında azalma yarattığını görmüşlerdir.

Eghlimi ve arkadaşları [31], char partiküllerinin yapısında char yanma temellerinin hesaplamalı modelini çalışmışlardır. Kömür tiplerini, kimyasal analiz, fiziksel özellikler, mekanik özellikler, ısıl özellikler, elektriksel özellikler, kül analizi ve petrograf yansıması olmak üzere yedi farklı grupta incelemiştir. Problemden kullanılan kömürün analizlerini yaptıktan sonra elektrikle ısıtılmış, aşağı yönlü bir boru kazanıyla ısıl çiftlerle ölçümler almış, deneysel çalışma ile karşılaştırarak teyit etmişlerdir.

Zhang ve arkadaşları [32], teğet ateşlenen kömür kazanlarında düşük  $NO_x$  yanma stratejilerini araştırmışlardır. ANSYS Fluent de gerçekleştirilen çalışmada, kazan içerisinde yatay meyilli yakma, aşırı yanma havası, ikisinin birlikte kullanıldığı ve kullanılmadığı dört farklı şekli kullanmışlardır. Kömür kazanlarında, yatay meyilli yanma ve aşırı yanma havasının düşük  $NO_x$  emisyonları elde edilmesinde başarılı olduğunu görmüşlerdir.

Smedberg [33], çalışmasında şehir atıklarının yakılmasını incelemiştir. Büyük ve küçük ölçekli iki tesis ele almış, hem akışkan yataklı kazanda hem de hareketli ızgaralı kazanda şehir atıklarını yakarak karşılaştırma yapmıştır. Akışkan yataklı kazanda hareketli ızgaralı kazana göre daha fazla elektrik elde edilebildiğini tespit etmiştir.

Eriksson ve Golriz [34], sirkülasyonlu akışkan yataklarda radyasyonla ısı transferini incelemek için yeni bir model geliştirmişlerdir. Radyasyonla ısı transferinde farklı yatakların etkisini incelemiştir. Radyasyonla ısı transferine, süspansiyon sıcaklığının, duvar sıcaklığının, duvar yayıcılığının, partikül yayıcılığının ve süspansiyon yoğunluğunun büyük etkisi olduğunu görmüşlerdir.

Magel ve arkadaşları [35], türbülanslı yanma akışını detaylı kimyasal reaksiyon mekanizmalarıyla incelemiştir. Türbülans ve kimyasal reaksiyon etkileşimlerini, Eddy Dissipation Concept metodunu kullanarak modellemiştir. Çalışma sonucunda, sayısal çalışmaları ile deneysel çalışmalarının örtüştüğünü görmüşlerdir.

Razmjoo ve arkadaşları [36], 4 MW'lık hareketli ızgaralı bir kazanda ıslak odun kalıntılarının gaz bileşimini ve sıcaklık ölçümlerini incelemiştir. Sıcaklık ölçümlerini kazan duvarından ısıl çiftlerle elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda, birincil hava akış

oranının, diğer hava akış oranlarına göre, yüksek CO, düşük CO<sub>2</sub> ve düşük NO konsantrasyonları içerdiğini görmüşlerdir.

Holkar ve Hebbal [37], bir kazanda pülverize kömür yanmasını CFD ile modelleyerek farklı radyasyon modellerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, ANSYS Fluent' i kullanmışlardır. Radyasyon modelleri olan, Discrete Ordinates model (DO), P1 model ve Discrete Transfer modelini (DTRM) aynı şartlarda çözdürerek karşılaştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, P1 model ile elde edilen sıcaklık profillerinin Discrete Ordinates modelle elde edilenlere göre oldukça düşük olduğunu ayrıca P1 Radyasyon modelinden alınan çözümün, Discrete Ordinates model ve Discrete Transfer modeline göre daha kısa sürdüğünü görmüşlerdir.

Wang ve arkadaşları [38], ANSYS Fluent kullanarak iki boyutlu tasarladıkları, ızgaralı bir kazan da yanmış kömürü tekrar yakarak NO<sub>x</sub> emisyonunu düşürmeye çalışmışlardır. Sayısal çalışmayı deneysel çalışma ile karşılaştırarak sonuçları teyit etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmanın sonucunda, kömürün tekrar yanmasının, salınan NO<sub>x</sub> emisyon miktarını azalttığını görmüşlerdir. Ayrıca, yanma alanında; kömür-hava oranının, karışım alanında; piroliz ölçüsünün ve ana akımın, NO<sub>x</sub> emisyon salınımlarında etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Mehrabian ve arkadaşları [39], biyokütle yakan ızgaralı kazanlarda Ansys Fluent kullanarak biyokütle partiküllerinin ısıl dönüşümünü ve multifaz akışını çalışmışlardır. Multifaz için Euler-Granular model, türbülans için Relizable k-ε model, yanma için Eddy Dissipation model (EDM), Radyasyon için ise Discrete Ordicates model kullanmışlardır. Çalışmalarını, 20 kW' lık deneysel bir kazanla karşılaştırmış, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub> ve uçucu sonuçlarını irdelemişlerdir.

Yin ve arkadaşları [40], 88 MW' lık bir ızgaralı kazanda buğday sapının yanmasını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında char oksidasyonu, devolatilizasyon ve emisyonlar başta olmak üzere yanma davranışlarının incelenmişlerdir. Yatak girişinden başlayarak ızgara boyunca değişen emisyon sonuçlarını grafiklendirmiş, kütle fraksiyonlarını, hız ve sıcaklık kontürlerini ortaya koymuşlardır.

Zhang ve arkadaşları [41], küçük ölçekli bir hareketli ızgaralı kazanda biyokütle yanma davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmayı ANSYS Fluent programı ile gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve sayısal çalışmalarını karşılaştırarak teyit etmiş, baca gazı sıcaklığıyla ilgili olarak CO salınımlarının azaldığını görmüşlerdir.

Collazo ve arkadaşları [42], küçük ölçekli bir biyokütle kazanında ev atıklarının yanma davranışlarını incelemişlerdir. Sayısal çalışmalarında program olarak ANSYS Fluent kullanmışlardır. Çalışmalarında, Finite Rate / Eddy Dissipation yanma modelini kullanmış, kazan içerisinde su borularının pozisyonlarının, hava giriş dağılımlarının ve hava infiltrasyonlarının emisyon salınımlarında önemli bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir.

Erbaş ve arkadaşları [43], dolaşımli bir akışkan yatakta tanecik boyutunun etkilerini incelemişlerdir. Deneysel olarak hazırladıkları çalışmalarında, partikül çapı küçüldükçe daha iyi bir karışımın oluştuğunu, yanmanın iyileştiğini ve böylece ısı transferinin arttığını izlemişlerdir.

Güngör [44], sirkülasyonlu akışkan yatakların hava fazlalık katsayısını, yatak işlem hızını, kömür partikül çapını ve kazan geometrisini incelemiştir. Küçük ölçekli ve iki boyutlu tasarlanan kazanda hava fazlalık katsayısının ve kömür besleme oranının artmasıyla yanma verimliliğini düşüğünü fark etmiştir.

Sahajwalla ve arkadaşları [45], pülverize kömür yanmasını ANSYS Fluent ile iki boyutlu olarak modellemişlerdir. Magnussen model olarak bilinen Finite Rate Formulation ve karışım fonksiyonu olarak bilinen PDF formülasyonu çözerek iki yanma modeli arasında karşılaştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda PDF yanma modelinin Finite Rate Formulation yanma modeline göre üstün yanlarının olduğunu ancak detaylı CFD analizlerinde baskın bir fark olmadığını görmüşlerdir.

Ateşok ve arkadaşları [46], yaptıkları çalışmalarında kirletici emisyonları azaltan ve verimi iyileştiren kömür teknolojilerini derlemişlerdir. Kömür yakan kazanları kısaca ele aldıktan sonra, aktif karbon enjeksiyonu, elektrostatik tutucular, baca gazı sülfür giderme, yaş tanecik gaz temizleyiciler v.b. gibi zararlıları azaltacak, verimi yükseltecek cihazları ele almışlardır.

## **1.2. Kömür**

Dünyanın ve Türkiye'nin en önemli enerji kaynaklarından biri olan kömür, heterojen bir içeriğe sahiptir. Bünyesinde organik (yanabilen) ve inorganik (yanmayan) maddeleri içerir. Kömürlerin özellikleri, zaman, sıcaklık, basınç gibi etkenlerle değişim gösterir [1].

### 1.2.1. Kömürün Oluşumu ve Kömürleşme Süreci

Kömür, bitki kalıntılarının zaman içerisinde fiziksel ve kimyasal etkileşimleri sonucunda oluşur. Fosil bir enerji kaynağı olan kömür, organik ve inorganik tortul kayalar içeren, yanabilen organik bir kayadır. Başlıca C, H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>'nin bileşiminden oluşur. Kömürün ana bileşeni olan hidrokarbonların oluşumu ise karbon çevrimi ile ilgilidir. Genelleyecek olursak, su ve havada ki CO<sub>2</sub>' in büyük kısmını bitkiler özümleyip, kalan kısmı suya ve havaya döndürür ve doğal denge korunur.

Kömür oluşumunu açıklayan, allohton, otokton, lagün ve selüloz teorisi gibi birçok teori olmakla birlikte en yaygın iki teori allohton ve otokton teorileridir. Allohton teorisi, bitki atıklarının suyun bataklık kısımlarında çökme sonucu kömürün oluştuğunu varsayarken, otokton teorisi, bitki atıklarının var olduğu yerlerde kömürün oluştuğunu varsayar [1].



Şekil 1.1. Kömür oluşumu [2]

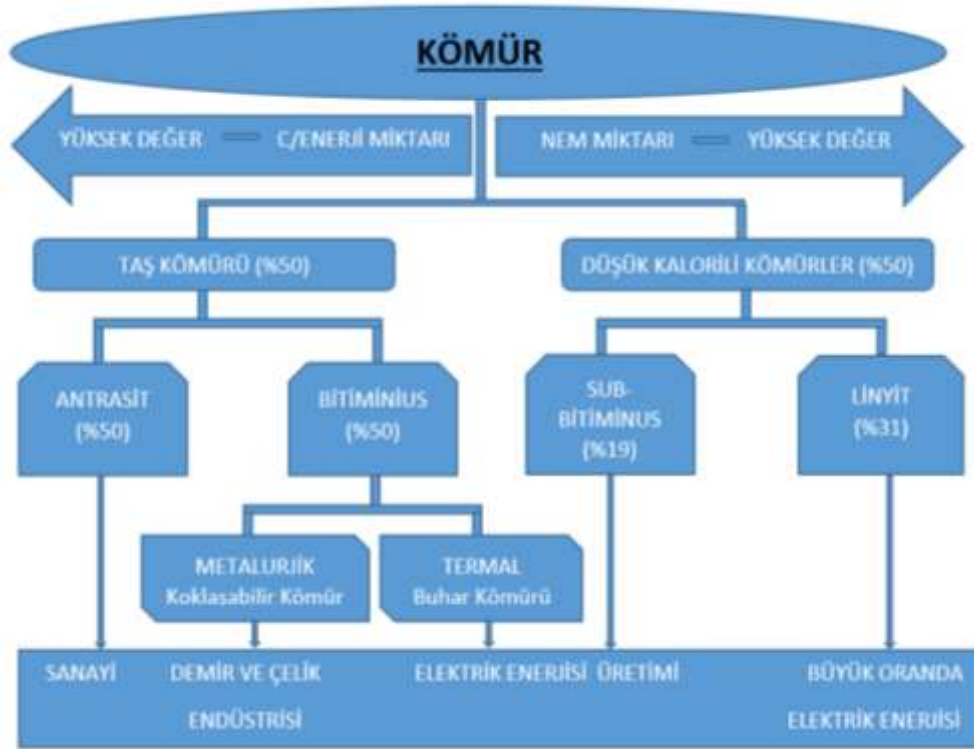
Şekil 1.1.' de kömür oluşum süreci görülmektedir. Kömürleşme süreci bitki parçalarının organik madde yapılarında, ortamın sıcaklığı ve basıncıyla meydana gelen kimyasal ve fiziksel değişimlerdir. Bitki kütlelerine etkiyen sıcaklık ve basınç ile bitki kütlelerinden öncelikle su ve su buharı sonra da CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> uzaklaşır [3, 4].

Zaman, basınç, tektonik olaylar, faylar ve radyoaktiviteler kömürleşmeyi etkileyen temel unsurlardır. Bunun yanında kömürleşmeyi etkileyen en önemli unsur sıcaklıktır.

Çünkü sıcaklık kömürleşmeyi hızlandırır. Bu da magmasal etkinliğin yoğun olduğu yerlerde kömürleşmenin yoğun olmasını açıklar [1, 3 - 5].

Kömürleşmenin ilerlemesiyle, karbon miktarında, özgül ağırlıkta, koklaşma özelliğinde, renk koyuluğunda ve parlaklığında artma, uçucu madde miktarında ve erime derecesinde ise azalma görülür [3].

Kömürlerin yaşları yaklaşık olarak 15 milyon yıldır. Zaman ile kıymetlenen kömürler eski oldukları oranda değerlidirler [1, 3].

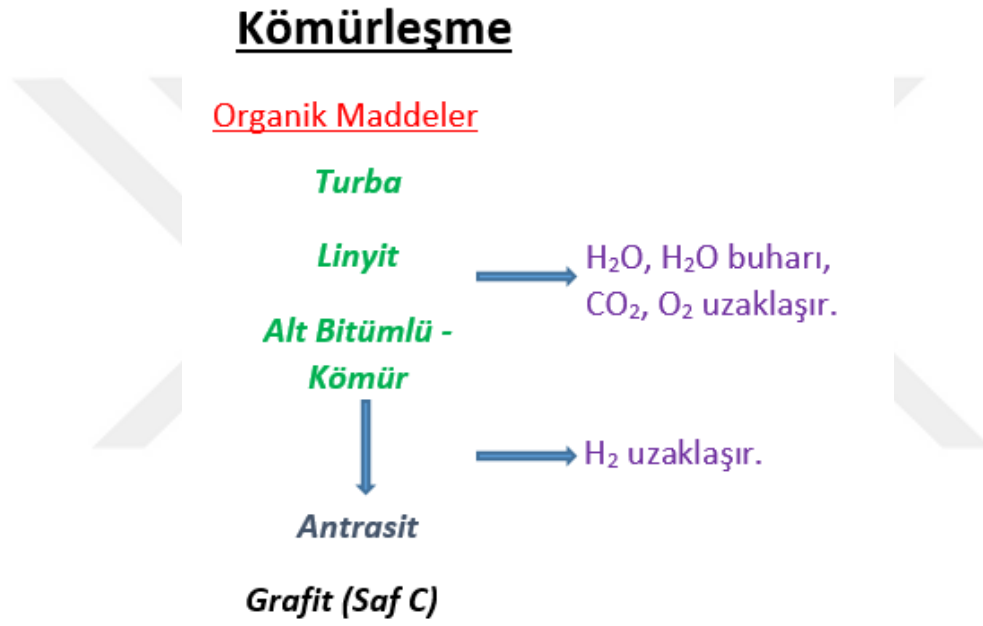


Şekil 1.2. Kömür türleri, rezerv oranları ve kullanım alanları [5]

Şekil 1.2.' de kömürün dünya üzerindeki rezerv yüzdeleri ile yoğun olarak kullanıldığı alanlar verilmiştir. Kömür; yaygın, emniyetli, güvenilir ve ucuz bir fosil yakıttır. Ayrıca dünya da 50' den fazla ülke de işlenmekte ve dünyanın neredeyse her yerinde kullanılmaktadır [5].

## 1.2.2. Kömürün Sınıflandırılması

Kömürlerin sınıflandırılmasında; sıcaklık, basınç ve zaman etkilidir. Kömürü kimyasal ve biyolojik olarak sınıflandıracak olursak, biyolojik sınıflandırma; kömür oluşum önderliğini yapan bitkinin botanik özellikleri ile yapılır. Kimyasal sınıflandırma ise kömürleşme derecesi ile saptanan, kömürün içerdiği başta C olmak üzere H, O ve N bileşimine bağlı olarak yapılır. Kömürler, Şekil 1.3.' de gösterildiği gibi aldıkları yol ile birlikte temelde C içeriklerine göre sınıflandırılır [1].



Şekil 1.3. Kömürleşme [1]

### 1.2.2.1. Peat (Turba, Genç Kömür)

Bitki kalıntılarında, zaman, sıcaklık ve basıncın etkisiyle oluşan en genç kömür türü turbadır. Diğer kömürlere nazaran su ve oksijen içeriği yüksek karbon oranı ise en düşük olan kömürdür. Türkiye de çok bulunan bir kömür türü değildir.

### 1.2.2.2. Linyit (Kahverengi) Kömür

Turbadan sonra oluşan kömür çeşidi linyit kömürüdür. Büyük oranlarda kükürt, nem ve kül içermektedir ayrıca su emilimi yüksek, kolayca kırılan bir yapıya sahiptir. Kendi içinde

sarı, kahverengi, siyah ve yağlı olmak üzere çeşitleri vardır. İçerdiği yoğun kükürt nedeniyle yandığında pis koku çıkar. Linyit kömürü özel tasarımı yakıcılarla yakılmadığı zaman SO<sub>2</sub>, NO gibi kirleticileri yüksek oranda salmaktadır.

Türkiye de 8 milyar ton rezervi olduğu bilinen linyit kömürü, önemli bir ülke değeridir. Şekil 1.4.' de Türkiye de bulunan linyit kömürlerinin genel durumu görülmektedir [6, 7].



Şekil 1.4. Türkiye linyitleri [6]

### 1.2.2.3. Bitümlü Kömür

Bitümlü kömürde yüksek oranda karbon bulunmaktadır. Linyit kömürüne göre daha az uçucu madde oranına sahiptir. Diğer kömürlerde görülmeyen yapışkanlık özelliği sebebiyle kömür koklaştırmada hammadde olarak kullanılırlar [6].

### 1.2.2.4. Antrasit

Antrasitler tam karbonizasyona uğramışlardır. Ayrıca en eski kömür cinsi olan antrasit yüksek karbon içeriği, düşük uçucu maddesi, sıkı yapısı, sert oluşu ve zayıf su emilimi ile diğer kömürlerden farklıdır [6].

### 1.2.3. Kömürleşme Derecesinin Kömür Özellikleri ve Kullanımına Etkisi

Bitki ve bitki artıklarının doğal veya yapay yollarla zaman içerisinde kömüre dönüşmesi sürecine kömürleşme denir. Kömürler zaman içerisinde, genelde C, H, O ve bir miktarda S



ve N<sub>2</sub> içeren bitki yapısından bileşiklerin parçalanması ve ayrılması sonucu oluşur. Kömürleşme derecesi C oranı arttıkça O<sub>2</sub> oranı ise azaldıkça artar [2].

#### **1.2.4. Kömür Analizi**

Kömürün kısa analizi ile nem, kül, uçucu madde, sabit karbon içeriği saptanırken, elemental analiz ile de karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt içerikleri saptanır. Ayrıca kömürün ısı değeri, mineral maddesi, kül içeriği de büyük önem arz eder. Kömürün özelliklerinin saptanmasında en yaygın kullanılan standartlardan biri American Society Testing and Materials (ASTM), diğeri ise International Organization Standardization (ISO)'dur. Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından yayınlanmış olan kömür analiz yöntemleri ISO standartları dikkate alınarak hazırlanır. Kömür analiz numunelerinin hazırlanmasında ise ASTM-D 2013 standardına başvurulur [5].

##### **1.2.4.1. Kömürün Kısa Analizi**

###### **1.2.4.1.1. Nem**

Kömürde bulunan nem, yüzey nem, bağıl nem ve kombine nem olarak sınıflandırılır. Yüzey nem, kömüre geçici olarak dışarıdan karışan nemdir. Normal atmosferik koşullar altında buharlaşır. Nem miktarı genel olarak % 2-3 arasındadır. Bağıl nem, kömürün kılcallığına ve madeni kısmının bileşimine bağlıdır. Kılcallık etkisi sebebi ile kömürün içerisine nüfuz etmesiyle oluşur. Kombine nem ise, kimyasal olarak kömüre bağlanmış olan sudur. Kömürden bu nem çeşidini kimyasal yol haricinde ayırmak mümkün değildir [1, 6].

Nem miktarı, kömürün kalitesi açısından oldukça önemlidir. Kömürün içeriğindeki nemin kömüre bağlanma şekline göre mekanik ve fiziksel özellikleri değişir. Kömürün, kömürleşme derecesi ne kadar yüksek ise içeriğinde bulunan nem oranı o kadar düşük olur. Bazı kömürlerin ocak çıkışındaki nem miktarları şöyle; taşkömürü; % 1-3, yumuşak linyitler; % 40-60, turbalar ise % 60' ın üzerindedir [1, 9].

Kömürün nem içeriğini saptamak amacıyla geliştirilmiş birçok yöntem vardır. Bunlardan bazıları; desikatör yöntemi, destilasyon yöntemi, ekstraksiyon yöntemi, ısı ve elektriksel yöntemlerdir. Yaygın olarak tercih edilen ve en pratik yöntem, havada kuru kömür numunesinin 0,25 mm'nin altında öğütüldükten sonra kuru hava sirkülasyonlu bir

etüvde yaklaşık 380 – 400 K' e kadar 60 dk süreyle bekletilmesi ve uğradığı ağırlık kaybından nem miktarının saptanmasıdır [1, 6].

Yanma işlemi sadece gaz fazında gerçekleştiğinden katı yakıtların yanmaya başlaması için faz değiştirmeleri gerekir. Kömürün yanması için verilen ısı öncelikle bünyesindeki nemin uzaklaştırılmasında kullanılır. Dolayısıyla nem miktarının fazlalığı kömürün ısıl değerini düşürür, tutuşma süresini geciktirir. Bunun yanında, yanma sırasında ısıl şoku (parçalanmayı), kok gazlaşmasını ve karbonmonoksit tutuşma hızını artırır. Bu nedenle nem, kömür içerisinde belirli oranlarda istenir [9].

#### **1.2.4.1.2. Kül**

Kül, yanmadan arta kalan, (yanıcı olmayan) inorganik bir kalıntıdır. Gri renkli bir maddedir ve aslında kömürün içerdiği minerallerin yanmasından geriye kalanlardır. Kömür doğasında direkt kül içeren bir yapıya sahip değildir [4, 5].

Kömür yakıldığında içerdiği minerallerin, hidrat suyu kaybı, sülfürlerin parçalanması, silikatlar, oksitler ve serbest silikanın tepkimeye girerek yeni birleşikler oluşturması, karbonatların parçalanması, vs. gibi tepkimeler oluşursa kül oluşur. Temelde kül oluşumu kömürün içerdiği mineral madde sebebiyle olduğundan içerdiği mineral madde miktarı ve bileşimine ayrıca oksidasyonun gerçekleştiği şartlara göre de farklılık gösterir. ISO 1016' a standardına göre 1 gr kömür, 30 dakikada 250 °C' a, 250 °C' dan 500 °C' a yine 30 dakikada, 500 °C' dan 815 °C' a ise 60 dakikada ısıtılır ve ağırlığı sabit ( $\pm 0,001$  g) kalana kadar fırında bekletilir. Böylece içerdiği kül miktarı saptanır [5, 6].

Kömür içerisinde bulunan kül miktarının fazlalığı kömür öğütölmek istendiğinde harcanan enerjiyi de artırır. Ayrıca kül, kazanlarda kömür - gaz kanallarında aşınmaya sebebiyet verir. Yanma sürerken oksijen difüzyonuna ve tutuşmaya engel olur. Kül fazlalığı ile ergiyen kömür yapışıp, ısı transferini engeller, verimi düşürür. Bu sebeple kazan tasarımlarında yakılacak kömür içerisinde kül miktarı önem arz eder [9, 47].

#### **1.2.4.1.3. Mineral Madde**

Kömürün mineral bileşenleri, kömürün organik olarak içerisinde bulunmayan (inorganik) bileşiklerin toplamıdır. Kömürün içerisinde bulunan mineral madde, kömürün üretiminde, hazırlanmasında ve yakılmasında etkilidir. Kömürde istenmeyen mineral madde, kömür zenginleştirme işlemleri ile uzaklaştırılır [1].

#### **1.2.4.1.4. Uçucu Madde**

Uçucu madde, kömürün tutuşması işlevini gören, hacimde doğal gaz, karbondioksit, karbonmonksit, hidrojen, su, hidrokarbon türevlerinden oluşan ve homojen yanma özelliği taşıyan kömür içeriğidir. İçerisinde bulunan bu maddeler kömürden kömüre değişiklik gösterirler ve yanma profilini etkilerler. Yine kömürün yapısına göre 500 °C'den 1000 °C' e değişen aralıkta salınırlar [9].

Kömürü uçucu madde analizi yaygın olarak ISO 562 standardı ile gerçekleştirilir. Bu standartta kömürün ısıtma işlemi 900 °C' da 7 dakika süreyle gerçekleştirilir. Bütün ağırlık kaybından kömür numunesinin rutubet içeriği çıkarılarak uçucu madde yüzdesi saptanır [5]. Kömürün uçucu madde analizi, koklaşabilirliği ile karbonizasyon sırasında oluşan gaz ve katı ürünlerin miktarı hakkında bilgi verdiği için önemlidir [5, 9].

Uçucu madde oluşumu, oksijensiz ortamda ısıtılan kömürün kimyasal tepkimeye girmesiyle başlar. Tepkimeye giren kömürden çoğu hidrojen olmak üzere, karbon monoksit, diğer hidrokarbonlar ve metan gibi yanıcı gazlardan oluşan ayrıca su buharı, katran gibi yanıcı olmayan uçucu madde çıkışı olur. Kömürün yaşına bağlı olarak uçucu madde miktarı çıkışı değişiklik gösterir. Kömürün yaşı büyüdükçe uçucu madde miktarında azalma görülür [9, 47].

Kömüre verilen ısı ile nem uzaklaştırıldıktan sonra kömürün yanmasında ki önemli rol uçucu maddeye geçmiş olur. Kömürde bulunan uçucu madde miktarı tutuşma sıcaklığı ve hızı ile direkt bağlantılıdır. Kömürün içerisinde ki uçucu madde oranı arttıkça alev boyu, dolayısıyla, yanma odası boyutları artar. Uygun yanma açısından, uçucu maddenin, kömürü tutuşturabilecek ve kömür yatağında veya alev içinde yanmasını tamamlayabilecek boyutta olması istenir. Bu nedenle, kömürdeki uçucu madde miktarı yanma hâkimiyeti açısından oldukça önemlidir [47].

#### **1.2.4.1.5. Sabit Karbon İçeriği**

Kömür içerisinde bulunan sabit karbon oranı kömürün cinsine bağlı olarak kok gazlaşması ile birlikte karbon monoksit oluşturur. Sabit karbon yanma sonrası gazları, yakıtın ısı değerini ve karbondioksit oluşumunu yükseltir. Karbondioksit, su, uçucu kok, is gibi üç atomlu gazlar büyük miktarda ışık ortaya çıkarır ve alevin soğumasını hızlandırır [9].

Sabit karbon içeriği rutubetsiz kömürde, kül yüzdeleri ve uçucu madde toplamının 100' den çıkarılmasıyla bulunur [5].

Bir kömürde bulunan sabit karbon miktarı;

$$(\%) = [ 100 - (\% \text{ Uçucu Madde} + \% \text{ Nem} + \% \text{ Kül} ) ]$$

$$\text{Kok Miktarı} (\%) = (\% \text{ Sabit Karbon} + \% \text{ Kok} )$$

#### **1.2.4.2. Kömürün Elemental Analizi**

Kömürün ana bileşiminde organik ve inorganik madde mevcuttur. Kömürün içerdiği organik (yanabilen) miktarı işe yararken inorganik (yanmayan) miktarı işe yaramamaktadır. İnorganik maddeler kömür zenginleştirme yöntemleri ile kömürden uzaklaştırılarak organik madde artışı sağlarlar ve böylece daha iyi bir yanma ve verim elde edilir [1].

##### **1.2.4.2.1. Karbon**

Bir kömür de karbon içeriği % 65 ila % 95 arasında değişir. Karbon kömür için en önemli element olup, içerdiği oran kadar kendisine değer katar. Kömürün kalorifik gücü karbon içeriği ile ilişkilidir [1].

##### **1.2.4.2.2. Hidrojen**

Kömürde hidrojen içeriği % 2 ila % 7 arasında değişir. Hidrojen kömürde yanabilen ana bileşiklerden biridir. Kömürün yanması sırasında patlamalara sebep olabilir. Yüksek derecede karbonizasyona sahip olan kömürde, hidrojen oranı az bulunur [1].

##### **1.2.4.2.3. Oksijen**

Kömürde bulunan oksijen % 3 ila % 5 arasındadır. Oksijen kömürde yanmayan bir elementtir. Çünkü karbon ve hidrojen ile yaptığı oksit formlarda yanması mümkün değildir [1].

#### 1.2.4.2.4. Azot

Kömürdeki azot, bitkisel ve hayvansal proteinlerden, azotça zengin bitkilerden kaynaklanmaktadır [1].

Kömür içeriğinde ki moleküler azot ( $N_2$ ), çevreyi olumsuz yönde hiç etkilemezken, azotlu bileşiklerin hemen hepsinin çevreye zararlı etkileri vardır. Kömür yandığında içeriğindeki azot, su ile birlikte NO formuna dönüşür. Kömür yakma sistemlerinde atmosfere atılan azot oksitlerin büyük çoğunluğu NO, çok azı ise  $NO_2$  formundadır [1].

#### 1.2.4.2.5. Kükürt

Kömür yapısına göre içeriğinde farklı oranlarda kükürt bulundurur. Yanma ile reaksiyona giren kükürt  $SO_2$ ' e dönüşür. Atmosferde bulunan  $H_2O$  ile birlikte reaksiyona girerek  $H_2SO_4$ ' e dönüşmesiyle de korozif etkilere sebep olur [9].

#### 1.2.5. Isıl Değer

Bir yakıtın ısı değeri, birim ağırlıktaki (veya hacimdeki) yakıtın tamamen yanması sonucu açığa çıkan ısı biriminin sayısıdır. Spesifik enerji diye de bilinen ısı değeri, MJ/kg olarak ifade edilir. İngiliz standartlarında ise kcal/kg veya cal/gr olarak ifade edilir [9].

Bir kömürün ısı değeri, kömürleşme derecesine ve organik yapısına karışmış olan yanmayan maddelerin miktarına bağlıdır. Genç kömürlerin oksijen ve nem içeriklerinin fazla olmasından dolayı ısı değerleri düşüktür [9].

Isıl değer analizi, kömürün enerji içeriğinin doğrudan ölçülmesi ile gerçekleştiği için yakıt değerini saptamak amacıyla uygulanan en önemli analizdir. Kömürün ısı değerinin saptanması amacıyla geliştirilen yöntemler iki gruba ayrılır;

- Isıl değerini deneysel olarak saptanması,
- Isıl değerini hesap yoluyla bulunması.

Kömürün ısı değerini deneysel olarak saptanması için günümüzde en çok kullanılan yöntem kömürün, oksijen kalorimetre bombasında yakılmasıdır. İşlemler şöyledir; öncelikle kömür bir bomba içinde, basınç altında, oksijen ile sabit hacimde yakılarak açığa çıkan ısı ölçülür. Sonra kalorimetre bombasıyla saptanan ısı değerleri yanma ürünlerinin (karbondioksit ve su gibi) oda sıcaklığına soğutulması ile değerler elde edilir. Esasen bu değerlerin pratik bir anlamı yoktur. Çünkü bir yakıt yakılırken yanma ürünleri oda sıcaklığına soğutulmuş olarak dışarı atılmaz. Pratikte sıcak baca gazlarıyla kaybolan sadece

duyulur ısı değildir. İçerdiği su buharının buharlaşma gizli ısısı da kaybedilir. Kalorimetre bombasında gerçekleştirilen yanma sırasında nem önce buharlaşır, sonra da sıvı su halinde yoğunlaşır ve yoğunlaşma ısısını verir. Bu nedenlerle, kalorimetre bombasında yakma yöntemi ile saptanan yanma ısısına “üst ısıl değer” denir. “Alt ısıl değer” ise tüm suyun yoğunlaşma ısısının üst ısıl değerden çıkarılması yoluyla bulunur. Alt ısıl değer gerçeğe daha yakın bir büyüklüktür ve saptanabilmesi için yakıtın içeriğinin bilinmesi gerekmektedir [9].

### 1.2.6. Isıl Test

Isıl test; kömürün yanma sırasında açığa çıkaracağı enerji miktarını (kömürün kalorifik değerini) belirlemek için yapılan testtir.

Kömürün laboratuvar şartlarında, kapalı bir fırında belirlendiği ısıl değerine, üst ısıl değer denir. Kapalı olmayan bir fırında yanma sonucu alınan ölçümlerden alınan değerlere ise alt ısıl değer denir. Kapalı şartlarda gazlar test cihazından kaçırdıklarından üst ısıl değer alt ısıl değere göre her zaman daha büyük bir değerdedir [9].

### 1.3. Yakıtlar ve Yanma

Yandığında ısı enerjisi veren maddeye yakıt denir. İyi diye tabir edilen yakıtlar bünyesinde hidrojen ve karbon gibi yanabilen bileşenler bulundurlar. Bunlara hidrokarbonlar denir ve  $C_mH_n$  ile gösterilirler [8, 48].

Bir yakıtın büyük miktarda enerji vererek oksitlenme tepkimesine ise *yanma* denir. Yanma işleminde hava, ulaşılabilirliği ve serbest halde bulunabilirliği nedeniyle oksitleyici olarak kullanılır. Kuru hava, mol ve hacimce; % 20,9 oksijen, % 78,1 azot, % 0,9 argon, az miktarda da karbon dioksit, helyum, neon ve hidrojenden meydana gelir. Eser miktarda bulunan gazlar göz ardı edildiğinde ise yaklaşık olarak % 21 oksijen ve % 79 azottan oluşur [55].

Fosil yakıtlar, karbon ve hidrojenin havadaki oksijenle birleşmesi sonucu reaksiyona girerler ve su buharı, karbon dioksit gibi yanma atığı gazlar ve ısı, ışık ortaya çıkarılırlar (Fosil yakıt sahip olduğu kimyasal enerjisi yanma reaksiyonları ile ısı enerjisine dönüştürür).

Hava miktarının, gerekenden az olması, gerekenden çok olması ya da gerektiği kadar olması yanmanın özelliklerini belirler. Oluşan ısı miktarının ve diğer yanma ürünlerinin cins ve miktarını belirler.

Yakıtın tam yanması için gerekli olan minimum hava miktarına stokiometrik (kuramsal hava) denir. Bu yanma şeklinde, yanma sonunda yanıcı madde kalmaz. En ideal yanma işlemidir. Tam yanma işleminde, karbon  $CO_2$ ' e, hidrojen  $H_2O$ ' e, kükürt  $SO_2$ ' e dönüşür. Baca gazından karbondioksit ve azot gazı çıkar, karbon monoksit ise oluşmaz. Kömür tam yanma şartlarında yanıyorsa alev rengi açık sarı-portakal renginde olur.

Yeterli havanın bulunmaması, dolayısıyla eksik yanmanın oluşumunda ürünler içerisinde yanmamış yakıt veya C,  $H_2$ , CO ve OH gibi bileşenler vardır. Yanma alanında ısı ve kurum birikir, ısı geçiş yüzeyleri kapanır. Yakıt tam yanmadığından yanma verimi düşer. Eksik yanma gerçekleştiğinde ortaya çıkan enerji tam yanma enerjisinin % 30' u kadardır. Ayrıca salınan emisyonların artması ile de hava kirliliği de artar. Bir yakıtın az hava ile yakılması ile açığa çıkan gaz çok koyu ve isli olur [7, 55].

Fazla hava ile yanmada ortamda, yanma reaksiyonunun tamamlanmasından daha çok hava bulunur. Bu durum yanma haznesini soğutur, baca gazı sıcaklığını artırır, yanma verimi düşer. Aynı miktardaki enerji eldesi için daha fazla yakıt yakmak durumunda kalınır. Daha fazla yakıt daha fazla baca gazı çıkışına neden olur. Çevre de daha çok kirlenmiş olur. Fazla hava ile yanma durumunda alev rengi çok açık ve parlaktır. Baca gazı hemen hemen gözle görülmez.

Kimyasal tepkimeler kütle korunumu ilkesine göre (kimyasal tepkime sırasında her bir elementin kütlesi sabit kalır ilkesine göre) oluşur. Yanmanın başlaması için yakıtın yanma sıcaklığına erişmesi gerekir bu sıcaklığa *tutuşma sıcaklığı* denir. Yanma işleminde tepkimeden önce var olan bileşenlere *girdiler*, tepkime sonrasında oluşan bileşenlere ise *ürünler* denir. Yanma neticesinde ısı enerjisi, yanma artığı gazlar ve ışık oluşur.

İyi bir yanma; cihazların korunması, toplam verimin artması, en önemlisi daha az emisyon ve hava kirliliği demektir.

Bir yakıtın yanması için, sıcaklık (Temperature), türbülans (Turbulence) ve zaman (Time) gereklidir. Bu üç şart iyi bir yanma için aynı oranda önem arz eder.

1-Sıcaklık, reaksiyonun başlaması ve devam etmesi için gereklidir.

2-Türbülans, yakıt ile havanın karışması için gereklidir.

3-Zaman, yakıtın tamamen yanması için gereklidir [7, 8, 48].

Yakıtın yanma reaksiyonuna başlaması için tutuşma sıcaklığına erişmesi ve yanmayı sürdürecektir optimum sıcaklığa ihtiyacı vardır. Düşük sıcaklıklarda ki yanmalar yanmayı bozarak, eksik yanmalara, alev bozulmalarına, alevin sönmeye sebep olur. Ayrıca yanma çok yüksek sıcaklıklara çıkarsa da istenmeyen azot oksitler ( $\text{NO}_x$ ) oluşur. Yanma, yakıt ve yakıcı cinsine bağlı olarak istenen sıcaklıkta olmalıdır. Ocak ebatları, ısıtılan akışkan sıcaklıkları, ocak içi kaplama refrakterler yanma sıcaklığına etkileyen ana faktörlerdir [8, 48].

Türbülans, yanma için gereken en önemli ana faktörlerden biridir. Çünkü yakıt ile hava ne kadar iyi karışmış ise yanma o kadar iyi gerçekleşir. Bu da türbülans yoluyla olur. İyi bir türbülans yaratmak için, yakıcı hava ve yakıt püskürtme ağızlarının iyi tasarlanmış olması, yakıt ve hava püskürtme basınçlarının yüksek tutulması, kazanda kör noktaların oluşmaması, yanma akışına izin verecek şekilde olması gerekmektedir. İyi türbülans sağlanan ortamlarda alev ebatları ufak olur buna bağlı olarak da ocak ve yanma hacimleri küçük olur [8, 48].

Zaman, yakıtın oksijen ile karşılaşarak yanma tamamlayıncaya kadar gerekli olan sürenin var olması manasına gelir. Ayrıca verimli bir yanmanın temelidir. Yanma tamamlanmadan önce alev kesilir veya soğuk yüzeylere maruz kalırsa yanma hızla bozulur, verimi düşer, emisyon oranının da artış yaşanır. Yakıcı ağız tasarımları yanma zamanlanması bakımından önemlidir [8, 48].

İyi bir yanma, enerjinin tasarruflu kullanılmasına, toplam verimin artmasına, daha az çevre ve cihaz kirliliğine, cihazların kullanım ömürlerinin artmasına olanak sağlar.

#### **1.4. Kömürün Yanması**

Kömür de, değişen miktarlarda karbon, oksijen, hidrojen, azot, kükürt, nem, kül ayrıca yanmayan (inorganik) kil, silt, iz elementleri gibi maddeler mevcuttur. Bu bileşim içeriği aynı coğrafi bölge içerisinde hatta aynı damar üzerinde bile değişiklik gösterebilir [7, 55].

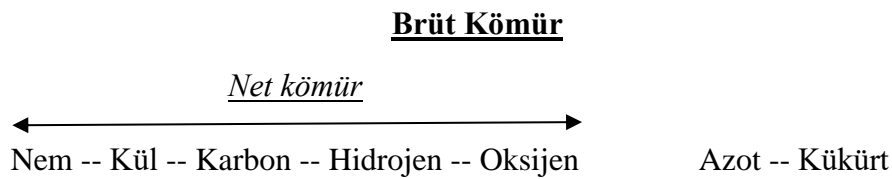
Kömür içerisinde yanabilir elementler karbon, hidrojen, kükürt ve bunların bileşenleridir. Yanma işleminde bu yanabilen elementler ve bileşikler karbondioksit, su buharına ve kükürdioksit dönüşürler. Kömürdeki karbon miktarı yakıtın ısı değerini artırdığından kömür bileşiminde en çok istenen değerdir. Kükürt yandığında ısı değere katkı sağlasa da korozif etkileri ve aşındırmaya sebebiyet vermesi gibi nedenlerle istenmez.



Kömürdeki hidrojen su buharına dönüşür, zararsızdır fakat yanma alanında dolgu oluşturur ve ısıyı düşürür [5, 7].

Kömürün nasıl yandığını anlamak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, baca gazı analizlerine dayanan çalışmalar, yanma odasını alev detektörleri ile izleyerek alev yapısını inceleyen çalışmalar ve kontrol esaslı tasarım çalışmalar olarak genellenebilir. Kömürün, aynı yöre de çıkan ürünlerinde bile farklılık barındırmasından (bileşim yapısı) dolayı yanması oldukça karmaşık bir olaydır. Bu karmaşıklık, kömürün yanması için ön görülen yakıt/hava oranını ve kazanın ideal modellenmesi gibi noktalarda zorluklar barındırır. Dolayısıyla kömürün yanmasının sayısal incelenmesi ve hesabı da bugün için tam teorik olarak yapılamamaktadır. Ancak bazı basitleştirici kabuller altında yanmanın modellenmesi ve çözümü mümkün olabilmektedir. Yakıt ısı değerinin, yanma için gerekli hava miktarının ve yanma sonucu oluşan sıcak gaz veya duman miktarının belirlenmesi bir kazan hesabının temelini oluşturur. Bu temel büyüklükler stokiyometriye dayanan basit bir hesap tarzı ile pratik amaçlara uygun yaklaşıklıkla bulunabilmektedir. Böyle bir hesabın yapılabilmesi için yakıtın elemental analizinin bilinmesi gereklidir [5].

Elemental analizde kömür içerisindeki nem, karbon, hidrojen, kükürt, azot, oksijen ve kül miktarları kütle oran olarak tayin edilir. Nem ve kül dahil toplam yakacağa, “*brüt yakacak*” adı verilir. Nem ve kül dışındaki yakacağın yanabilen kısımlarına ise “*net yakacak*” denir. Brüt ve net yakacağın analizi şematik olarak, Şekil 1.5.’ de gösterilmiştir [5, 7].

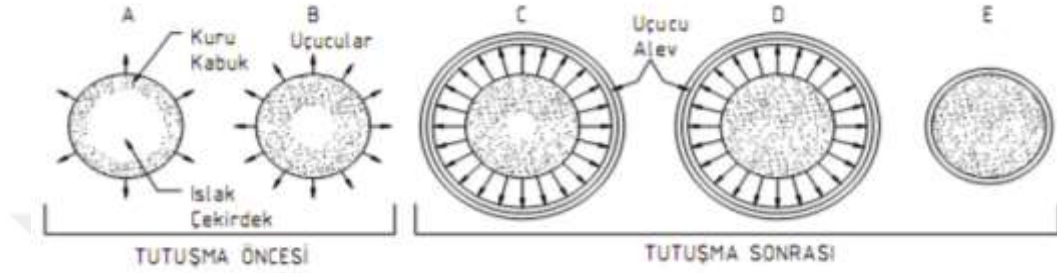


Şekil 1.5. Kömür analizi [5]

Fazlarına göre yakıtlar; katı yakıtlar, sıvı yakıtlar, gaz yakıtlar olarak sınıflandırılırlar. Bu yakıtlar içerisinde en zor yanma katı yakıtlara, kömüre aittir. Çünkü yanmanın gerçekleşebilmesi için önce yakıtın gaz fazına geçmesi gerekmektedir. Gaz fazına geçerken ki işlemler katı yakıt yanmasını karmaşıklaştırmaktadır [55].

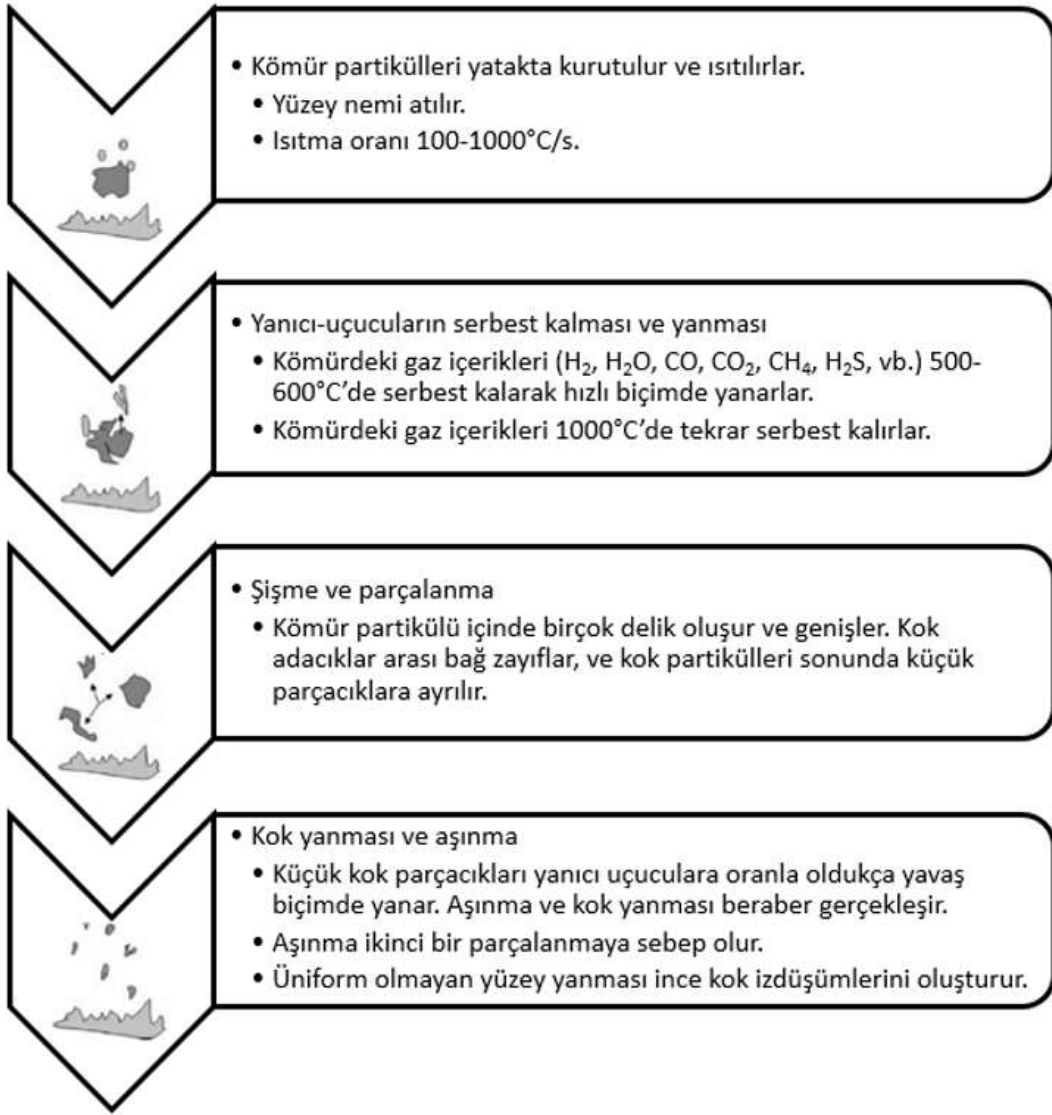
Yanmanın başlaması için ısı verilen kömür 100 °C’e eriştikten sonra içeriğinde mevcut olan nemi bırakmaya başlar. Yaklaşık 600 °C civarında ise yanıcı uçucu maddeleri, HC’leri, katran gibi bir buhar halinde salar ve bu sırada kok da açığa çıkar. Açığa çıkan kok,

oksijen, su ve karbondioksit'in indirgemesiyle karbon monoksite dönüşür. Uçucu maddenin açığa çıkması, parçacık boyutu, başlangıç-bitiş sıcaklıkları, kömürün cinsi, ısıtılma oranı gibi birçok faktörden etkilenir ve değişiklik gösterir. Açığa çıkan kokun yanmaya başlaması için yakıcı (O<sub>2</sub>) ile bir araya gelmesi önemlidir. Kokun yanması uçucuların ayrılmasından sonra olabileceği gibi denk de yürüyebilir. Şekil 1. 6.' da bu basamaklar açıkça görülmektedir [9].



Şekil 1.6. Bir kömür taneciğinin yanma basamakları [9]

Kömür yanarken senkronize iki olay gerçekleşir. İlki, sıcak yatağa giren kömür taneciğinin pirolize uğraması ile ortaya çıkan uçucu maddelerin tane çevresinde yanması diğeri ise pirolizden sonraya kalan ve neredeyse saf karbon ve külden oluşan artığın yani char' ın oksijen ile heterojen olarak girdiği reaksiyonudur. Burada ki uçucu maddenin yanması, hızlıca gerçekleşir ve geçen zaman kömürün cinsine, tane büyüklüğüne ve sıcaklık şartlarına göre mili saniyelerden dakikalara kadar bir aralıkta değişiklik gösterir. Devamında gerçekleşen heterojen yanma ise daha yavaştır. Bu basamak ise kömür tipi, sıcaklık, basınç, char' ın durumu ve oksitleyici konsantrasyonuna göre değişiklik gösterir. Char ve uçucu maddelerin yanma süreleri yakıcıların belirlenmesinde en önemli parametrelerdendir [10]. Şekil 1.7.' de kömürün yanma aşamaları görülmektedir.



Şekil 1.7. Kömürün yanma aşamaları [9]

Kömürün tane boyutu kömür yanmasını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Yanma şartlarını, alev hareketlerini, yanma hızını, yakıcı ısı kapasitesini, emisyonları, yakma sisteminin yapısını etkiler [9].

Verimli bir yanmanın en önemli koşullarından biri de kazan tasarımıdır. Kömürün sürekli ve uygun şartlarda gönderilmesi, yeterli hava ile birleşmesi- karışması önemlidir. Ayrıca alevin tasarlanan yakıcının cidarlarını sarması, ısıtma yüzeylerini yalaması, çıkış sıcaklığının kül ergime sıcaklıklarının altında gerçekleşmesi, külün ergimesinin önlenmesi yüksek ısı transferi sağlayabilmesi açısından önemlidir [9].

## 1.5. Kazanlar

Fosil yakıt da var olan kimyasal enerjiyi yanma suretiyle ısı enerjisine dönüştüren ve bunu akışkana ileten makinelere kazan denir [11].

Kazanlar, ısıtma, soğutma, pişirme, buhar elde etme, kızdırma, ergitme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Endüstriyel amaçlı ısı transfer makineleri olan kazanlar, fosil yakıtları yakarak etrafındaki akışkana ısıveren sistemlerdir. Kazan da yanma sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin fazlalığı kazanın verimliliğini gösteren en önemli parametredir. Ayrıca iyi yanma CO gibi zararlıların salınımını azalttığı için çevre dostudur [11].

Kazanlarda, gaz ve sıvı yakıtlar kullanıldığında brülörler kullanılır. Brülörler sıvı ve gaz yakıtı kendi yapısı içinde karıştırıp, tutuşturarak, basınçlı bir şekilde yanma haznesine püskürtür. Katı yakıtlar kullanıldığında ise elle beslemeli veya otomatik beslemeli sistemler kullanılmaktadır. Elle beslemeli sistemlerde, adından da anlaşılacağı gibi yakıt elle yanma haznesine dökülür ve doğal-zorlanmış hava beslemesiyle birlikte yakılır. Otomatik beslemede ise katı yakıt yanma haznesine bir redüktör motoru ile dökülür. Yanma için kazana gönderilen hava zorlanmış akış ile sağlanır [7].

Kazanlar, kullanım alanlarına, akışkan türüne, konstrüksiyon türüne, yakıt tipine, vb. göre sınıflandırılabilir.

Kullanım alanlarına göre kazanlar, ev tipi ve endüstriyel amaçlı olmak üzere sınıflandırılabilir. Ev tipi kazanlar, ticari amaçlı olmayan, bireysel kullanımların ve küçük toplulukların ısınma veya sıcak su ihtiyaçları için kullanılırlar [7].

Kullanılan akışkan türüne göre kazanlar, buhar kazanı, sıcak su kazanı ve kızgın akışkan kazanı olarak sınıflandırılabilir. Buhar kazanları; ticari alanlarda ısıtma, pişirme, sterilizasyon, ergitme, vb. amacıyla, sıcak su kazanları; evlerde ve ticari alanlarda ısıtma ve sıcak su amacıyla, kızgın akışkan kazanları; ticari alanlarda ısıtma, ısınma, kızartma, vb. amacıyla kullanılırlar [7].

Konstrüksiyon türüne göre kazanlar temel olarak, alev-duman borulu, su borulu, borusuz, döküm dilimli, paket tip, akışkan yataklı kazanlar olarak sınıflandırılabilirler. Alev-duman borulu kazanlar, katı-sıvı-gaz yakıtlar için uygundur, ekonomiktir ve düşük kapasiteli sıcak su, buhar üretimi gibi küçük çaplı işlerde küçük işletmelerde kullanılırlar. Su borulu kazanlar, alev-duman borulu kazanlar gibi katı-sıvı-gaz yakıtı yakabilirler ancak daha yüksek kapasiteye sahiptirler. Borusuz kazanlar ve döküm dilim kazanlar düşük basınçlı su kazanı olarak kullanılırlar. Paket tip kazanlar ise piyasada en çok tercih edilen sisteme buhar, sıcak su ve kızgın yağ temin edebilecek kazanlardır [7, 69].

### **1.5.1. Kazanlarda Kömürün Yakılması**

Kömür, 1960 yılları sonrasında yarattığı hava kirliliği nedeniyle dikkatleri üzerine toplamış ve özellikle endüstri de daha dikkatli kullanımı için çalışmalar hız kazanmıştır. Kömürün yanması ile ortaya çıkan SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, HC, aldehit, ince toz başta olmak üzere ortaya çıkan kirleticiler, asit yağmurları ve atmosferde artan CO<sub>2</sub> artışı gibi negatif etkilerle geri dönmekte, insan sağlığını ve doğanın doğal dengesini bozmaktadır. Bu sebeple araştırmacılar, çalışmalarında kömürü düşük emisyon ve yüksek verimle yakan yakıcılar üzerinde yoğunlaştırmıştır [11, 12].

Kömür yakma sistemleri parçacık boyutu, hava fazlalık katsayısı, yanma verimleri, emisyon değerleri vb. gibi farklılıklarla birbirlerinden ayrılan özelleşmiş sistemlerdir. Bu sistemler kömürün tane büyüklüğüne ve yanma sırasında yakıtla bağlı olarak yüzeyde yakma, akışkanlaştırılmış ortamda yakma ve hacimde yakma olmak üzere üç gruba ayrılabilir [14]. Kömür, sabit yataklarda; parçalar halinde, akışkan yataklarda; kırılarak küçültülmüş parçalarla, pülverize yakma sistemlerinde ise toz halinde (0,2 mm' den küçük) yakılmaktadır [11, 13].

#### **1.5.1.1. Izgaralı (Sabit Yatakta) Yakma**

Ekonomide yaşanan belirsizlikler direk enerji piyasasını etkiler ve bu etki petrol ve doğalgaz fiyatlarında kendini gösterir. Bu sebeple ülkemizde bolca çıkan düşük kaloriye sahip linyit kömürlerinin, ağaç talaşı, fındık kabuğu, prina gibi biyokütlelerin, daha az emisyon miktarlarıyla endüstride yakılması, değerlendirilmesi önemlidir. Bu sistemlerden biri olan ızgaralı kömür yakma sistemleri, 1970' li yıllardaki petrol krizi döneminde kömür kullanımının öne çıkması ile birlikte, özellikle küçük kapasiteli alanlarda, geniş kullanım alanına sahip olan sistemlerden biridir. Döküm ve çelikten üretilen ızgaralar elle beslenen ızgaralı ocaklar ve mekanik ızgaralar olmak üzere ikiye ayrılır [11, 14, 71].

Kömür olarak çokça linyitin tercih edildiği ızgaralı kazanlar, yanmaya başladığı zaman linyitin kül ergime derecesinin düşük olması sebebiyle yatak üzerinde hava geçişini dolayısıyla yanmayı engelleyen bir tabaka oluşturur. Bu tabakanın kırılması ve iyi bir yanma için hareketli ızgaralı kazanlar mevcuttur. İleri itmeli diye de adlandırılan hareketli ızgaralı kazanların bir sırası sabit, bir sırası hareketlidir. Hareketli kısım hareketini yaparken cüruf tabakasını kırar ayrıca kömürü de ileri doğru sürükler. Böylece oluşan tabaka varsa kırılır, iyi bir yanma sağlanır. Aksi takdir de cüruf, ızgaraya yapışır, hava

deliklerini kapatır dolayısıyla iyi yanmayı engeller. Cüruf kırılmazsa kazan, Cr-Si alaşımlı temper dökümden yapılan sıcaklığa dayanıklı alaşımlı çelik de olsa ulaşılan sıcaklık ızgara elemanlarına zarar verir ve tahribat oluşturur. Bununla birlikte yanma havası hidrolik bir sistem ile ızgaranın altından verilerek ızgara elemanlarının da korunması hedeflenir. Otomatik bir kumanda tertibatı ile kömürün ızgaraya giriş debisi, hareketli parçaların çalıştırılma hızı ayarlanır. Bu şekilde kazanın basınç ve sıcaklık dengesi korunur. Izgaranın altında bulunan kül ve cüruf bunkerlerinde, açılan kül kapakları ile kül toplanır, cüruf bunkerleri altında bulunan cüruf bunkerleri ile de kırıcılardan akan kül helezon ile tahliye edilir [14, 71].

Hareketli ızgaralı kazan yatakları bağımsız parçalardan oluşmuşsa da, ahenkli gözenekli bir blok gibi davranırlar. Genellikle parçalar halinde kömürlerin yakıldığı sabit yataklarda tercih edilen kömür büyüklüğü 5-50 mm aralığındadır. Sabit yataklarda yanma süresi tanecik büyüklüğüne bağlı olarak dakikalardan başlayıp saatler alabilir. Yanma reaksiyonlarının difüzyon kontrollüdür ve ızgaranın üst kısmından alt kısmına doğru ilerleyen linyit kuruma, gazlaşma, tutuşma ve yanma bölgelerinden geçerek kül bölgesine ulaşır [71].

#### **1.5.1.2. Pülverize (Toz) Kömürün Yanması**

Güç üretim tesislerinde kullanılan, aşırı derecede fazla kömür yakılan kazanlarda, kömürün kazana yakma havasının bir kısmı ile taşındığı, sürüklemeli sistemler kullanılır. Bu şekildeki yakma pülverize edilmiş yakıt olarak adlandırılır. Kömür çok küçük boyutlara öğütülür (taneciklerin % 80' i 200  $\mu\text{m}$ ' den küçüktür) sonra primer hava akımı ile yakma başlığına sürüklenir [11, 12].

Diğer sistemlerden farklı olarak, pülverize yakma sistemi kömürün cinsine bağlı değildir. Yani her cins kömür pülverize hale getirilerek yakılabilir. Ancak belirli bir cins kömür için kurulacak bir tesiste artık sadece bu kömür yakılabilir. Uygun önlemler almak şartı ile pülverize yakıt yakma sistemleri ile her türlü kömür, kok veya yanabilir katı endüstri atıkları yakılabilir. Pülverize kömür yakma sistemi çok ince öğütülmüş kömürün hava içinde süspansiyon halde yakılması ile tarif edilirse, bu günkü veya gelecekteki uygulamaları ikiye ayırmak mümkündür [11, 12].

1.Kömür, kömür artığı veya diğer maddelerin öğütülmesi ile elde edilen tozun hava ile taşınarak ocağa üflenmesi şeklinde alışılmış uygulamalar.

2. Pülverize hale getirilmiş kömürün fuel-oil, metanol veya diğer yanabilir sıvılarla karıştırılarak bir emülsiyon haline getirilmesi ve bu yakıtın ocağa sıvı yakıt gibi sprey halinde püskürtülmesi şeklindeki uygulamalar.

Tanecik boyutu çok küçük olduğundan 1400 °C'ye kadar alev sıcaklığının olduğu yakma kamarasına girdiğinde uçucu maddelere kömürden çok çabuk ayrıldığı için taneciğin içine doğru ısınma hızı artar. Pülverize kömür yakma ile fuel-oil yakma arasındaki fark, geri kalan karbon taneciklerinin yanma sürelerinin fuel-oil damlacıklarından daha uzun olmasıdır [11].

Bu yakma metodunun dezavantajı, sıcaklığın 1400 °C'ye yükselmesi sonucu kömürdeki külde bulunan bazı minerallerin eriyerek bir tabaka oluşturmasıdır. Şayet kül tanecikleri kazanın konvektif ısı transfer bölümüne girdiğinde hala erimiş halde ise soğutma tüpleri üzerinde tutkal gibi yapışkan tortular oluşturur ve yüksek sıcaklıklarda korozif bir etki gösterir [11].

### **1.5.1.3. Akışkan Yataklı Kazanlar**

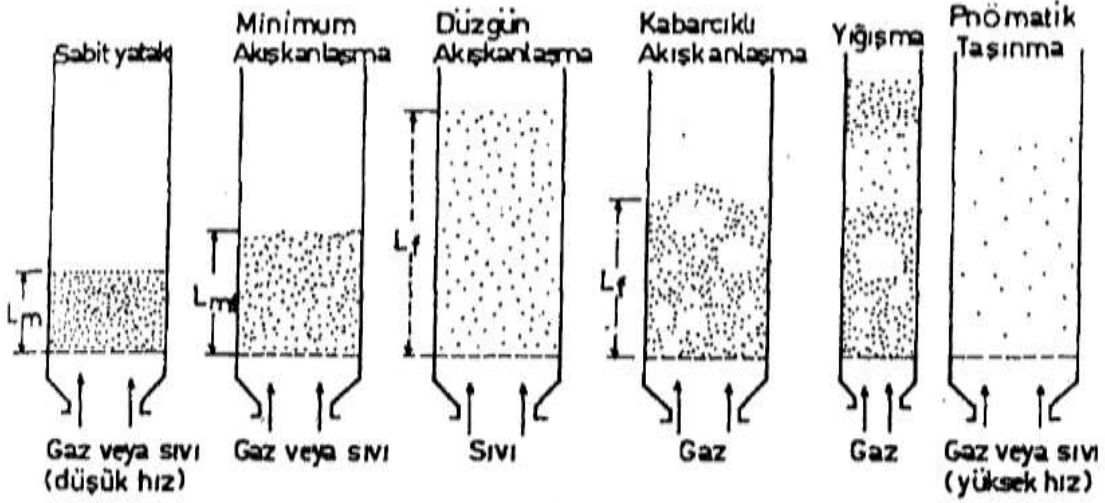
Akışkan yataklar, 1940' larda petrokimya endüstrisine çözüm olmasıyla birlikte dikkatleri üzerine çekmiş, ardından endüstrinin kimya, metalürji ve petrokimya başta olmak üzere birçok alanında kullanılmıştır [11, 12].

Akışkan yataklı sistemlerde kömür tanecikleri, serbestçe hareket eder ve yanması için gerekli oksijen ile yeterli teması kurabilir. Ayrıca kömür taneciklerinin serbest hareketi yanmanın homojen bir şekilde olmasını da sağlar. Akışkan yataklarda yatak içerisinde yüksek ısı transfer katsayısına ulaşılması nedeniyle ısı transfer yüzeyleri % 30-40 daha az olup, yanma odası hacmi küçültülmüş ve yatırım masrafları azaltılmıştır. Yanma sıcaklığı 800-900 °C aralığındadır. Bu değer konvansiyonel sistemlere göre çok düşüktür böylece buhar boruları üzerindeki korozyon azaltılmıştır. Akışkan yataklarda SO<sub>2</sub> yayılımı yatağa kireç taşı eklenerek kontrol altına alınmıştır. Pülverize kömür yakma sistemlerine göre ulaştığı maksimum sıcaklık daha küçük olduğundan NO<sub>x</sub> salınımları da daha azdır ve daha çevrecidir [11].

Sıvı veya gaz halindeki bir akışkan vasıtasıyla bir yatak içerisindeki katı taneciklere akışkan özellik kazandırılmasına "akışkanlaşma" denir. Küçük katı taneciklerden oluşan bir yatak içinden aşağıdan yukarıya doğru düşük hızlı bir akışkan, örneğin hava geçirildiğinde, hava hızı yavaş yavaş artırılırsa yatak boyunca görülen basınç düşüşü, hava akış hızı ile üstel olarak artar. Yatağı oluşturan katı tanelerin toplam ağırlığından doğan ve

aşağıya doğru olan kuvvet aşağıdan yukarıya doğru olan havanın sağladığı kaldırma kuvvetine eşit oluncaya kadar hava tanecikler arasındaki boşluklardan geçer. Bu davranıştaki yatağa “sabit yatak” denir. Akışkan hızının biraz daha artması katı tanelerin hareket etmelerine neden olur; katı tanecikler akışkan yatak içinde asılı duruma gelirler ve yatak genişlemeye başlar. Bu durumda yatak minimum akışkanlaşma noktasına erişmiştir. Bu noktadan sonra hızın artırılmasıyla basınç düşüşü değişmez, sabit kalır. Ancak bu esnada ilk akışkanlaşma sırasında tanecikler arasındaki sürtünme kuvvetlerinin yenilenmesi gerektiğinden tipik bir histerisis olayı görülür ve basınç düşmesi ile beraber hız da bir miktar azalır. Akışkanlaşma hızı artırılmaya devam edilirse akışkanın sıvı olması halinde yatak genellikle düzgün bir genişleme gösterir, kabarcık oluşmaz. Bu tür yataklar “homojen” veya “sıvı akışkan” olarak adlandırılır. Akışkanın gaz olması durumunda ise hızın artması ile yatak yüksekliği değişmemekle beraber kabarcıklar oluşmaya başlar. Bu tip yataklara “heterojen” veya “kabarcıklı akışkan” yatak denir. Derin yataklarda, gaz kabarcıkları sonunda tüm kesiti kaplayacak büyüklüğe erişebilir. Kabarcığın üstündeki tanecikler sanki bir pistonla itiliyormuş gibi diğer taneciklerden ayrılırlar ve yatağın alt bölümüne yağmurlama şeklinde düşerler. Bu tipteki akışkan yatağa “pistonlamalı akışkan yatak” denir. Bu tip yataklarda verim ve ısı transferi düşer. Gaz kabarcıklarının yatak üst düzeyinde patlaması sonucu katı tanecikler şiddetle yukarı fırlatılırlar. Hava hızı artırılmaya devam edilirse önce küçükler sonra da iri tanecikler yataktan dışarıya taşınırlar. Tanecikleri dışarıya taşımaya başlayan akışkan hızına taşınım hızı (terminal hız) denir Şekil 1.8.’ de akışkanlaşma olayı görülmektedir [11].





Şekil 1.8. Akışkanlaşma [11]

Akışkan yataklarda akışkanlaşmanın kalitesi, katı taneciklerin ve akışkanın özelliklerine büyük ölçüde bağlı olmakla birlikte, yatak geometrisi, akışkan hızı, dağıtıcı plaka, yatak içindeki ısı değiştiriciler de akışkanlaşmayı etkiler [11].

Akışkanlaşmış bir yatak kaynayan bir sıvının özelliğini gösterir. Yataktaki tanecikler birbirleri ile sürekli temas halinde olmadıkları için kayma gerilmelerine karşı koyamazlar ve yataklar bir yana eğildiği zaman yatağın üst yüzeyi yatay kalır. Farklı derinlikte iki yatak birleştirilirse bileşik kaplar kanununa uygun olarak iki yatak boyu eşit oluncaya kadar yüksek yataktan alçak yatağa tanecik akışı devam etmektedir. Akışkan yatağı içeren kabın bir noktasından delik açılırsa katı ve gaz fazı bu delikten dışarı fışkırır [11].

## 1.6. Emisyon Kontrolü

Hem endüstri de hem de evsel kullanım da kullanılan yakıtların yanması sonucu saldıkları emisyonlarla, bitki, hayvan ve insan yaşamını ayrıca doğanın dengesini tehdit etmektedirler. Kömür yakma sistemlerinde de durum farkısızdır. Yanması sonucu istenmeyen  $SO_x$  ve  $NO_x$  gibi kirleticiler salması sebebiyle kirli yakıt sınıfına girmektedir. Ancak yapılan çalışmalarla kömür yakıcıları çokça geliştirilmiş hatta kül oranı yüksek olan düşük kaliteli olanlarında bile daha düşük emisyon ve yüksek verimle sonuçlar alınmıştır [13].

## 1.7. Partikül Kontrolü

Kömürün yanması sonucu ortaya çıkan zararlıları olabildiğine azaltmak için bazı önlemler alınır. Bunlar, partikül kontrolü için; siklonlar, elektrostatik çözücüler (ESP), filtreler (baghouse) ve yağ temizlemedir.

**Siklonlar:** Kirleticiler siklona girdiğinde bir vorteks oluşturur. Parçacıklar kenarlara doğru uçuşturular, yer çekimi etkisiyle tozların çıkış noktasına doğru ilerler. Partikül boyutlarının büyükçe olduğu kazanlarda rahatça kullanılır.

**Elektrostatik Çözücüler:** Parçacıklar farklı elektrik yüküne sahip elektrotlar arasından geçerken yüklenir ve plakalar üzerinde toplarlar. Bu plakalar silkelenerek parçacıklar uzaklaştırılırlar.

**Filtreler:** Filtreler genellikle küçük kapasiteye sahip elektrik santrallerinde kullanılırlar. Gazlar içerisinde bulunan partiküller filtreden geçerken tutulurlar. Filtre kullanımında filtrelerin düzenli bakımı, değişimi ve nem faktörü önemlidir.

**Yağ Temizleyiciler:** Yağ temizleyicilerin en büyük farkı  $SO_2$ ' i temizlenmesinde ki başarısıdır. Ancak suya duyduğu ihtiyaçla birlikte gelen ek maliyet, çevrede sis yaratması ve yüksek enerji gereksinimi negatif yönleridir [12].

## 1.8. Kükürt Gazlarının Kontrolü

Kükürt gazlarını kontrol altına almak için yapılan yaygın uygulamaların başında kükürdü başka maddeler ile reaksiyona sokarak zararlılığını azaltmaktır. Örneğin; kireç taşı kullanılarak,  $CaSO_3$  ya da  $CaSO_4$ ' e dönüştürülmesi gibi.

**Yağ Temizleme:** 50 °C civarı bir sıcaklıkta ve atmosfer basıncında çalışan bir sistem ile reaktiflere sahip su gazlarla birlikte tanka gönderilir. Kristalleşme ile  $CaSO_3$  ve  $CaSO_4$ ' ler oluşur.

**Eriyik Temizleme:** Yağ temizlemenin geliştirilmiş halidir. Sodyum bisülfatın kalsiyum oksit ile reaksiyona sokularak  $CaSO_3$  oluşturması prensibine dayanır.

**Kuru Temizleme:** Gazların içerisine  $Na_2CO_3$  gönderilir. Kuruma sırasında  $SO_2$  emilir ve kuruyan parçacıklar ESP ya da filtre ile toplanırlar [12].

## 1.9. Azot Gazlarının Kontrolü

Azot oksitler; azot monoksit (NO), azot dioksit ( $NO_2$ ), diazot oksit ( $N_2O$ ), diazot trioksit ( $N_2O_3$ ), diazot tetraoksit ( $N_2O_4$ ), diazot pentoksit ( $N_2O_5$ ) olmak üzere altı farklı gazın

karışımdan oluşmaktadır. İçlerinde en önemlileri NO ve NO<sub>2</sub> olup birlikte NO<sub>x</sub> ismini alırlar. Yüksek derecede oksitleyicidirler ve korozyona sebep olurlar. Ayrıca atmosferde su buharı ile birleşerek sülfirik asiti oluştururlar. Bu durum asit yağmurlarına sebebiyet vermesi açısından istenmez. Bu nedenle azot gazlarının kontrolü önemlidir [12].

**Yanma Ayarlamaları:** Yakıt hava karışım oranlarının değiştirilmesi ile daha iyi yanma ve düşük NO hedeflenir. Bu ayarlar:

**Yük Azaltması:** Yakıcıya gönderilen kömür miktarının azaltılması ile açığa çıkan ısıyı düşürür ve ısıl NO oluşumunu sağlar.

**Düşük Hava Şartları:** Tam yanmanın gerçekleşmesi için gerekli olan hava miktarının (stokiyometri) üzerinde hava göndererek NO kirleticisini kontrol altına almayı hedefleyen sistemdir.

**İki Aşamalı Yanma:** Yanma gerçekleştikten sonra belirli bir yükseklikte ikincil hava girişleri ile yanmanın dolayısıyla ısıl kontrolün sağlanarak NO değerlerinin düşürülmesidir.

**Gaz sirkülasyonu:** Yakıcıya gönderilen hava ile baca gazlarını harmanlayarak alev ısısının ve NO oluşumunun azaltılmasıdır [12].

## 2. MATERYAL ve METOT

### 2.1. Sayısal Çalışma

Büyüyen dünya ve artan enerji ihtiyacı insanları yeni arayışlara iterken eldeki kaynakları verimli kullanma zorunluluğunu doğurmaktadır. Fosil kaynakların bilinçsiz kullanımı başta hava olmak üzere çevreyi kirletir. Geliştirilen yakma sistemleri, verimi artırmayı ve zararlıları azaltmayı hedefler. Bu mesnette yapılan çalışmalarda, deney setinin boyutları, kurulum zorlukları ve masrafları, uygulamada yaşana bilecek aksaklıklar, uzun zaman istemesi bakımından hayata geçirilmesi oldukça zordur. Bu zorlukların giderilmesi adına geliştirilen mühendislik programları sayesinde, problemin parametreleri hızlıca değiştirilebilmekte, farklı geometrik çalışmalara izin vermekte ve gerçeğe yakın sonuçlar deneysel sistemlerden çok daha hızlı ve ucuz alınabilmektedir.

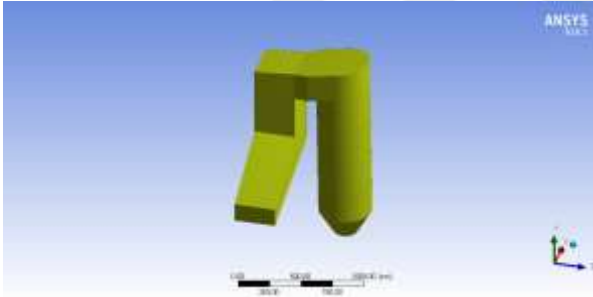
Çalışmada kullanılan mühendislik programı, sonlu hacimler yöntemini kullanan bir hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) yazılımıdır. Sonlu hacimler yöntemi problemi kabul edilebilir yaklaşıklıkla çözen bir yöntemdir. Bu yöntem, kısmi diferansiyel denklemlerin cebirsel denklemler ile çözülmesidir.

Sonlu hacimler yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerde sapma terimi içeren hacim integralleri, sapma teoremi (divergence theorem) ile yüzey integrallerine dönüşmektedir. Bu terimler her bir sonlu hacmin yüzeylerindeki akışlar olarak değerlendirilmektedir. Sonlu hacimler yöntemi ile öncelikle bir çözüm bölgesi ele alınır. Bu bölge ayrık kontrol hücrelerine-hacimlerine bölünür. Bölgede belirlenen noktalar arasındaki çeşitli kontrol noktaları alındıktan sonra, kontrol hacmi denilen alan sınırlarında artarda gelen noktaların arasından ortak nokta alınarak her bir kontrol noktası bir kontrol hacmi ile çevrelenerek çözüm alınır.

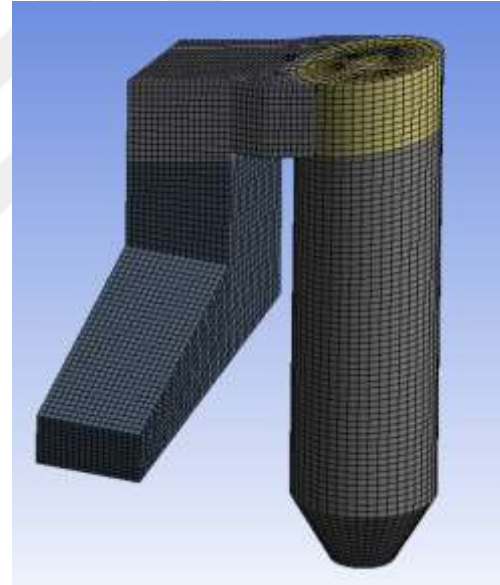
Bu çalışmada, geniş fiziksel modelleme kapasitesi ile dünyaca kabul görmüş, akıştan ısı transferine, yanma modellerinden uçak kanadına kadar birçok alanda kullanılan ANSYS Fluent programı kullanılmıştır. Bu program ile öncelikle problemin üç boyutlu modeli oluşturularak uygun mesh yapısı ile örülmüş, temel denklemler kurularak matematiksel bir model oluşturulmuş ve sınır şartları girilerek çözüm alınmıştır. Sonuçlar, son işlemci (post process) kısmı ile değerlendirilmiştir.

### 2.1.1. Problem Geometrisi ve Sınır Şartları

Problem geometrisi gerçek boyutlara riayet edilerek hazırlanmıştır. Şekil 2.1.' de ANSYS programı içerisindeki Fluent modülü kullanılarak oluşturulan kazan geometrisi görülmektedir. Problem üç boyutlu olarak modellenmiştir. Kazan girişi  $4,6 \text{ m}^2$  alan ile toplamda 15 m yüksekliğe sahiptir. Kömür ve hava girişi aynı yerden yüzeysel olarak yapılmıştır. Hava, 10 m/s hız 300 K sıcaklık ile verilmiştir. Kömürler kazan girişinde, 0,002 - 0,25 m çap, 300 K sıcaklık ve 1,1 kg/s toplam akış oranıyla hareketsiz olarak gönderilmiştir. Kazan duvarlarına, sabit sıcaklık sınır şartı uygulanarak 660 K verilmiştir. Bu değer, literatürde var olan çalışmalar baz alınarak suyun doyma sıcaklığından 50 K fazla alınarak belirlenmiştir. Son olarak kazan çıkış yüzeyine ise basınç sınır şartı verilmiştir.



Şekil 2.1. Fiziksel model



Şekil 2.2. Hareketli ızgaralı kazanın mesh yapısı

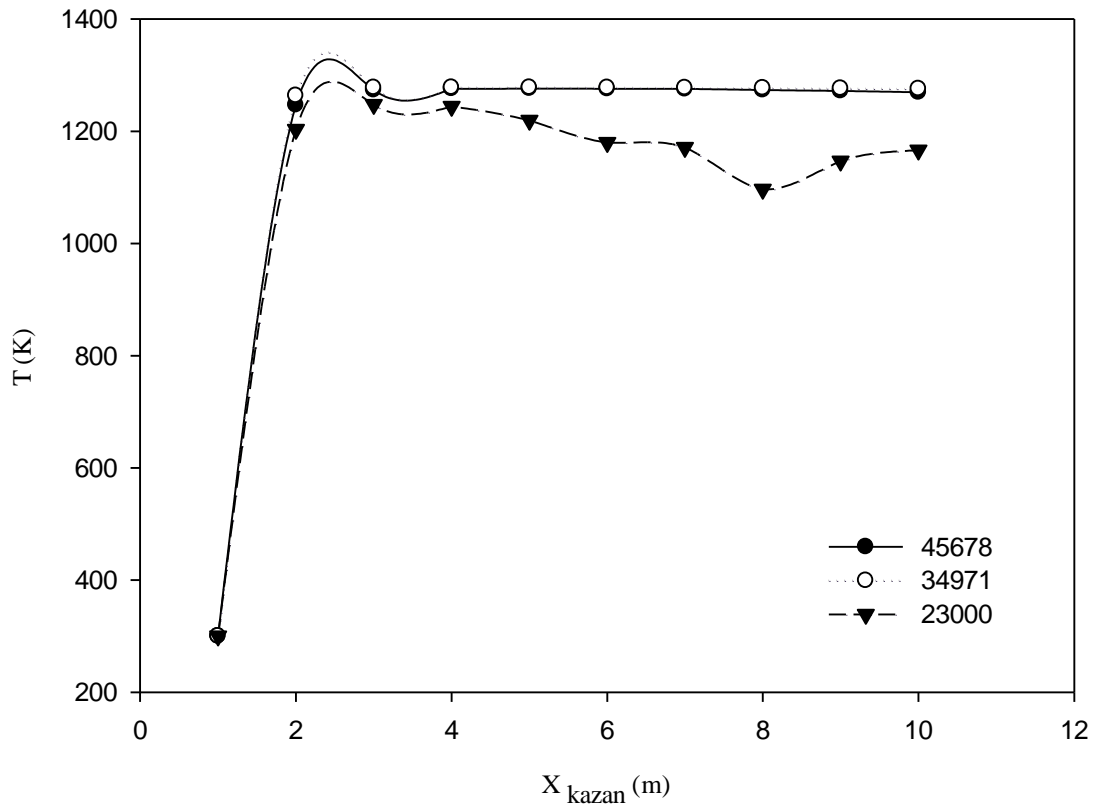
### 2.1.2. Ağ Yapısının (Mesh) Test Edilmesi

Akademik araştırmalarda, deney kurulumlarının zorluğu, masrafı, zaman alması, zor geometrilere sahip olması, analiz programlarının tercih edilmesindeki öncelikli sebeplere dendir.

Problemin mesh yapısı, tasarlanan geometriden doğru çözümler alınmasında öncelikli etkindir. Ağ yapısında ki eleman dağılımı, homojenliği, düzgünlüğü en önemli parametrelerdendir. Problem üzerinde önemli görülen yerlerde mesh yapısı sıklaştırılarak

daha hassas sonuçlar alınabilir. Ancak özellikle komşu ağ yapıları arasındaki boyut değişimine dikkat edilmelidir. Ağ yapıları arasındaki ani büyümeler hataya neden olmaktadır. Bu sebeple düzgün bir ağ akışı gözetilerek oluşturulan örgüden hassas sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen noktalar göz önüne alınarak ANSYS Fluent programı yardımıyla mesh oluşturulmuştur. Şekil 2.2.' de, oluşturulan mesh yapısı görülmektedir.



Şekil 2.3. Mesh testi

Mesh yapısını doğrulamak için, farklı meshler ile çözümler yapılmıştır. Farklı mesh sayıları ile hareketli ızgaralı kazanın giriş parçasından elde edilen sıcaklık değişimleri Şekil 2.3.' de görülmektedir. Oluşturulan mesh, 50530 node, 45000 elemandan oluşmaktadır.

### 2.1.3. Yönetici Denklemler

Kazanın sayısal modellenmesi ve mesh yapısı ANSYS Fluent programı ile yapılmıştır. Literatür taramasında geçerliliği kanıtlanmış ve yoğun kullanılmış modeller seçilerek problem çözülmüştür.

Problemin çözümünde, akış için kütle - momentum denklemleri, ısı transferi ve sıkıştırılabilirlik için enerji denklemi, karışım için de tür denklemleri çözdürülmüştür. Çalışma, üç boyutlu olarak modellenmiştir ve çözümler zamandan bağımsız olarak elde edilmiştir. Kazan içerisindeki türbülanslı akışı modellemek için Standart k-ε modeli, ışıınım çözümü için kabul edilebilir doğrulukla hızlı çözüm sağlayan P1 ışıınım modeli kullanılmıştır. Yanma, Species Transport yoluyla Eddy Dissipation model kullanılarak çözülmüştür. Ayrıca ayrık faz (Discrete phase) modeli kullanılarak gaz fazında gerçekleşen türbülansın katı (kömür) parçacıkları ile çevresinde oluşan etkileşim incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan, linyit, turba ve antrasit için programa kısa ve nihai analizleri girilerek kömür tanımları yapılmış, her bir kömür için uygun denklemler kurulmuştur. Tablo 2.1.' de antrasit, linyit, turba kömürlerinin nihai ve kısa analizleri verilmektedir.

**Tablo 2.1.** Antrasit, linyit, turba kömürlerinin nihai ve kısa analizleri [15, 16, 17]

<b><u>NİHAİ ANALİZ</u></b>			
	<b>Antrasit</b>	<b>Linyit</b>	<b>Turba</b>
<b>Uçucu</b>	7,98	23,8	73,5
<b>Sabit C</b>	78,53	20,4	9,2
<b>Kül</b>	12,43	40,2	10,4
<b>Nem</b>	1,06	15,6	6,9
<b><u>KISA ANALİZ</u></b>			
	<b>Antrasit</b>	<b>Linyit</b>	<b>Turba</b>
<b>C</b>	91,4	72	50,5
<b>H</b>	4,01	5	5,4
<b>O</b>	1,17	16,2	41,2
<b>N</b>	1,32	2,7	2,4
<b>S</b>	2,1	4,1	0,5
	<b>Antrasit</b>	<b>Linyit</b>	<b>Turba</b>
<b>H<sub>u</sub></b>	37,6 MJ/kg	13,3 MJ/kg	21 MJ/kg

Reaktif, difüzyon ve konvektif olan bir akış alanı içerisinde kütle, momentum, enerji ve kimyasal bileşenlerin korunum denklemleri aşağıdaki bölümlerde tensörel notasyonda verilmiştir.

### 2.1.3.1. Enerji Denklemi

Problemde yanma ön karışimsız olarak (non-premixed) gerçekleşmiştir. Ön karışimsız yanma modeli için yapılan hesaplamalarında enerji denklemlerinin toplam entalpi formu çözdürülür.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho H \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\nabla H) + S_h \quad (2.1)$$

Burada H toplam entalpiyi gösterir.

$$H = \sum_j Y_j H_j \quad (2.2)$$

$Y_j$ , J maddesi kütle fraksiyonunu ifade etmektedir.

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T C_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \quad (2.3)$$

$h_j^0(T_{ref,j})$ , j maddesinin  $T_{ref,j}$  referans sıcaklığındaki oluşum entalpisini göstermektedir [63].

### 2.1.3.2. Momentumun Korunumu Denklemi

Momentumun korunumu denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.4)$$

Bu denklemde; P; statik basınç,  $u_i$ ; hız vektörü,  $\rho$ ; yoğunluk,  $\tau_{ij}$  ise viskoz kuvvet tensörüdür [63].

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \delta_{ij} \quad (2.5)$$



### 2.1.3.3. Kütlenin Korunumu Denklemi

Kütlenin korunumu denklemi ısı kaynağının olmaması ve zamandan bağımsız olması nedeniyle aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.6)$$

(i = 1, 2, 3) Burada " $\rho$ " akışkanın yoğunluğunu, " $\vec{v}$ " akışkan hızını göstermektedir [63].

### 2.1.3.4. Tür Korunumu (Kimyasal Bileşenlerin Korunumu)

Reaktif için gerekli olan ek korunum denklemleri, enerji ve kimyasal bileşenlerin taşınımını şeklinde şöyle ifade edilir.

$$\frac{\partial \rho u_i Y_k}{\partial x_i} = -\frac{\partial J_i^k}{\partial x_i} + R \quad (2.7)$$

Denklemden,  $J_i^k$ ; Fick kanuna göre tanımlanan ve k kimyasal bileşeni için konsantrasyon gradyanları nedeniyle meydana gelen difüzyon akısını, R; birim hacimde k kimyasal bileşeninin oluşum oranını,  $Y_k$ ; k kimyasal bileşeninin kütle kesrini göstermektedir [63].

### 2.1.3.5. İdeal Gaz Denklemi- Sıkıştırılabilir Akışlar

Yanma işlemlerinde gazlar için durum denklemi, gazın sıcaklık, basınç ve yoğunluğuyla ilişkili olan mükemmel gaz denklemidir.

Bu denklem;  $PV = nRT$  dir. (2.8)

Denklemden; P, basınç; V, hacim; n, mol sayısı; T, mutlak sıcaklık; R, universal gaz sabitidir.

Gaz akışlarında, yüksek hızların ve-veya basınç değişimlerinin olduğunda sıkıştırılabilirlik etkileriyle karşılaşılır. Akış ses hızını aştığında, ses hızına yaklaştığında veya sistem de ki basınç değişimi ( $\Delta p/p$ ) çok büyük olduğunda gaz yoğunluğunun basınçla değişimi akışın hızı, basıncı ve sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olur.

Sıkıştırılabilir akışları karakterize eden Mach sayısı;

$$Ma = u/c \text{ dir.} \quad (2.9)$$

Ses hızı olan “c” ise;

$$c = \sqrt{\gamma RT} \text{ dir.} \quad (2.10)$$

Özgül ısıların oranı olan “ $\gamma$ ” ise; ( $c_p/c_v$ )’dir.

Mach sayısı akış karakteristiğini belirleyicidir. Mach sayısı, 1’den küçük olduğunda subsonic, 1’ i geçtiğinde ise süpersonik olarak adlandırılır. Mach sayısının  $Ma < 0.1$  olduğunda sıkıştırılabilirlik etkileri ihmal edilirken, Mach sayısı 1’e yaklaştıkça sıkıştırılabilirlik önem arz etmeye başlar.

Sıkıştırılabilir akışlar toplam sıcaklık ve toplam basınç ( $P_o$ ) ile karakterize edilirler. İdeal gaz için büyüklükler statik basınç ve sıcaklıkla ilişkilendirilebilir.

$$\frac{P_o}{P} = \exp \left[ \frac{\int_T^{T_o} \frac{c_p}{T} dT}{R} \right] \quad (2.11)$$

Sıkıştırılabilir akışlarda ideal gaz denklemi;

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{\frac{R}{M_w} T} \quad (2.12)$$

şeklinde. Bu denklemde  $p_{op}$  işletme basıncını,  $p$  işletme basıncına göre bağıl yersel statik basıncı,  $R$  evrensel gaz sabitini ve  $M_w$  ise moleküler ağırlığı göstermektedir [63].

### 2.1.3.6. Türbülans Modelleme - Standart k- $\epsilon$ Türbülans Modeli

RNG, Realizable ve Standart olmak üzere üç farklı türbülans modeli bulunmaktadır. Temel farklılıkları, türbülans viskozitesinin hesabı, k- $\epsilon$  türbülans yayılımıyla ilgili olan Prandtl sayıları,  $\epsilon$  denklemindeki üretim-tüketim terimleridir. Zaman bakımından ekonomik olması, makul sonuçlar vermesi, akış-ısı transfer problemlerinde sıkça seçilmesi, ayrıca yanma problemlerinde sıkça kullanılması sebebiyle türbülans modellemesinde Standart k- $\epsilon$  denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.13)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} S_\varepsilon \quad (2.14)$$

Bu eşitliklerde  $G_k$  ortalama hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini,  $G_b$  kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini,  $Y_M$  sıkıştırılabilir türbülans dalgalanan genişlemenin toplam disipasyon oranına katkısını temsil etmektedir.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$  sabit sayıları göstermektedir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  sırasıyla  $k$  ve  $\varepsilon$  için Prandtl sayılarıdır.  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  ise kullanıcı tarafından tanımlanan üretim terimlerini göstermektedir.

Türbülans viskozitesinin bulunmasında aşağıdaki eşitlikten yararlanılır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

Burada  $C_\mu$  bir sabittir.  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$

Bu başlangıç değerleri, sıkça karşılaşılan temel türbülanslı akış deneylerinden elde edilmiştir. Bu değerlerin duvarla sınırlanmış akışların ve serbest akışların çoğu için iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [63].

### 2.1.3.7. Species Transport Denklemleri

ANSYS Fluent,  $i$ ' inci türleri konveksiyon - difüzyon denklemi çözüm yoluyla her bir türün yerel kütle fraksiyonunu " $Y_i$ " tahmin ederek kimyasal türler için koruyucu denklemleri çözer. Bu denklem en genel haliyle aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (2.16)$$

Burada  $R_i$  kimyasal reaksiyonla türlerin net üretim oranıdır.  $S_i$ , dağınık faz veya kullanıcı tanımlı kaynaktır [63].

### 2.1.3.8. Eddy Dissipation Model

Hjertager ve Magnussen tarafından geliştirilen Eddy Dissipation model, kimyasal reaksiyon oranı üzerine türbülansın etkisini hesaplamak için girdap kırılma modelini kullanır. Bahsi geçen modelde, reaksiyon oranları türbülanslı karışım tarafından yönetilir.

Eddy Dissipation model, kimyasal olayların son derece hızlı geliştiği varsayımına dayanır. Güçlü ve sayısal bir model olarak bilinir. Bu sebeple yanma simülasyonlarında kullanımı oldukça yaygındır.

Birçok yakıt hızlıca yanar ve türbülans ile kontrol edilir. Ön karışimsız (non-premixed) yanmalarda, türbülans, soğuk reaktanların konvekt karışımlarından dolayı yavaşça gerçekleşirken, tepkime hızla gerçekleşir, reaksiyon bölgelerinde sıcak alanlar oluşur. ANSYS Fluent de tanımlı kimya - türbülans etkileşim modeli olan ve Magnussen ve Hjertager' in çalışmalarına dayanan ve Eddy Dissipation modeli aşağıdaki gibidir.

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (2.17)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum^P Y_P}{\sum^N v'_{j,r} M_{w,j}} \quad (2.18)$$

Burada,

$Y_P$ ; herhangi bir ürünün kütle fraksiyonudur, P

$Y_R$ ; belirli bir reaktanın kütle fraksiyonudur, R

A 4,0'a eşit ampirik bir sabittir.

B, 0,5' eşit ampirik bir sabittir.

Denklemlerde kimyasal reaksiyon oranları, Spalding' in Eddy Break Up modelinde,  $k/\varepsilon$  large – eddy karışım skalası ile yönetilmiştir. Türbülanslı yanmalarda  $k/\varepsilon > 0$ 'dır [63].

### 2.1.3.9. Işınım ile Isı Geçişi - P1 Işınım Modeli

$\vec{s}$  Yönünde ve  $\vec{r}$  pozisyonunda absorbe eden, yayan ve saçan bir ortam için ışınlımla ısı geçiş denklemi;

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (2.19)$$

Bu denklemde  $\vec{r}$  pozisyon vektörünü,  $\vec{s}$  yön vektörünü,  $\vec{s}'$  saçılma yön vektörünü, s yol uzunluğuna, a absorpsiyon katsayısını, n yansıtma indeksini,  $\sigma_s$  saçılma katsayısını,  $\sigma$  Stefan -Boltzmann sabitini, I radyasyon şiddetini, T yerel sıcaklığı,  $\Phi$  faz fonksiyonunu,  $\Omega'$  katı açısını,  $(a+\sigma_s)s$  ise optik kalınlığı veya ortamın saydamlığını göstermektedir.

P1 modelinde ısı akısı;

$$q_r = -\frac{1}{3(a+\sigma_s)-C\sigma_s} \nabla G \quad (2.20)$$

şeklindedir. Bu denklemde G anlık radyasyon ve C lineer- anizotropik faz fonksiyonu katsayısıdır. G için transport denklemi;

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = S_G \quad (2.21)$$

şeklindedir.  $S_G$  tanımlanan ışınım kaynağını göstermektedir [63].

### 2.1.3.10. Ayrık Faz Modeli

Ayrık faz modeli, sayısal hesaplamalarda iki farklı yaklaşımdan faydalanılır. Bunlardan biri Euler - Lagrange diğeri Euler - Euler yaklaşımıdır. Euler - Lagrange yaklaşımı olan Lagrange ayrıklaştırma modelinde akışkan faz Navier Stokes denklemlerini çözmesiyle sürekli ortam davranışı gösterirken, dağılmış olan faz hesaplanan akış alanı boyunca çok sayıdaki kabarcık, partikül veya damlacıkları izleyerek çözüm alır. Dağılmış faz, akışkan fazı ile kütle, momentum, enerji transferinde bulunabilir. Şayet partikül partikül etkileşimi ihmal edilebilir boyutlarda ise bu yaklaşım daha da basitleşebilir. Akışkan fazdaki hesaplamalar sırasında belirli aralıklarla partiküller ayrı ayrı hesaplanır. Ansys Fluent programının yazılımı, partikülün üzerinde oluşan kuvvet dengesini integre eder. Partikülün yörüngesini tahmin ederek, partiküle etkiyen kuvvetler ile parçacık ataletini eşitlenir.

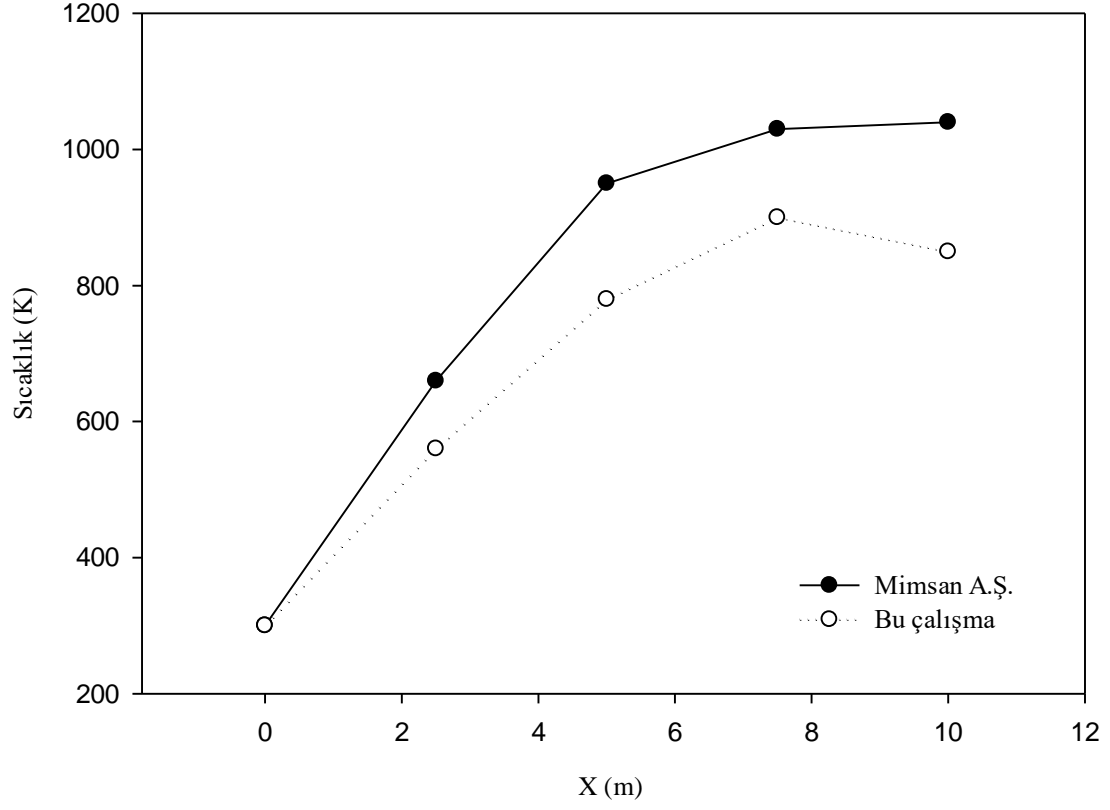
$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_x \quad (2.22)$$

Bu denklemde,  $u_p$ ; partikül hızını,  $u$ ; akışkan faz hızını,  $F_D$ ; birim partikül için sürükleme kuvvetini,  $F$ ; kuvvet/birim partikül kütlelerini,  $\rho$ ; akışkan yoğunluğunu,  $\rho_p$ ; partikül yoğunluğunu göstermektedir [63].

### 2.1.4. Çözümün Geçerliliği

Mimsan A.Ş. [67] tarafından üretilen, hareketli ızgaralı bir kazanın giriş parçasından elde edilen sıcaklık değerleri ile bu çalışmadan elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 2.4.' de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için linyit kömürü kullanılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere üretimi yapılan hareketli ızgaralı kazan ile bu çalışmada gerçekleştirilmiş olan sayısal model yakın bir eğilim göstermektedir. Bu karşılaştırma dikkate alınıp, çözümün

geçerli olduğu test edilmiştir. Aynı şartlarda antrasit ve turba kömürleri ile çalışmaya devam edilmiştir.



Şekil 2.4. Elde edilen sonuçların Mimsan A.Ş. ile karşılaştırılması

### 3. BULGULAR

Gelişen ve büyüyen dünya varlığını sürdürebilmek için enerji kaynaklarını tasarruflu ve doğaya zarar vermeden kullanmak durumundadır. Dünyada yaygın şekilde var olan ve birçok alanda kullanılan kömür kalitesinde ki değişiklikler düşük kaliteli kömürlere uygun sistemlerin geliştirilmesine sebebiyet vermiştir. Çalışmada ele alınan hareketli ızgaralı kazan da endüstride kullanılan düşük kaliteli kömürlerin yüksek verim ve düşük emisyonla kullanılmasını hedefleyen bir kazandır.

Tez de, Mimsan A.Ş. tarafından imal edilmiş bir hareketli ızgaralı kazanın sayısal çalışması gerçekleştirilmiştir. Program olarak literatür de bir çok çalışmada kullanıldığı görülen, dünyaca kabul görmüş bir mühendislik programı olan ANSYS Fluent kullanılmıştır. Çalışmada, hareketli ızgaralı kazan üç boyutlu olarak modellenmiştir. Uygun mesh yapısı ile örülen modele, akış için kütle - momentum denklemleri, ısı transferi ve sıkıştırılabilirlik için enerji denklemi, karışım için de tür denklemleri çözdürülmüştür. Kazan içerisindeki türbülanslı akışı modellemek için Standart k-ε modeli, ışıınım çözümü için kabul edilebilir doğrulukla hızlı çözüm sağlayan P1 ışıınım modeli kullanılmıştır. Yanma, Species Transport yoluyla Eddy Dissipation model kullanılarak çözülmüştür. Ayrıca ayrık faz (Discrete phase) modeli kullanılarak gaz fazında gerçekleşen türbülansın katı (kömür) parçacıkları ile çevresinde oluşan etkileşim incelenmiştir. Yakıt olarak linyit, antrasit ve turba çalışmaya tanımlanmış problem zamandan bağımsız olarak çözdürülmüştür. Çözümün sonuçları ANSYS Fluent programında var olan son işlemciden (post process) alınmıştır. Çalışmanın görüntüleri karşılaştırma için yan yana verilirken sayısal sonuçlar grafiklere dökülmüştür.

Çalışma da ANSYS Fluent ile üç boyutlu olarak çözülmüş, kömür yakan hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan hız sonuçları verilmektedir. Vektörel sonuçlar, üç boyutlu genel bir görünüş ve XY-YZ kesitleri ile verilmektedir. Hız eş eğrileri, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri ile akım çizgileri ise önden, yandan ve arkadan olmak üzere üç farklı açı ile sunulmaktadır. Grafikler gösterim için programa kazanın merkezinden geçen bir çizgi tanımlanmış, bu çizgi üzerinden hız sonuçları elde edilmiş, grafiğe dökülmüştür. Sonuçların daha iyi görünebilmesi için silindirik parçadan alınan sonuçlar ayrı bir grafik halinde tekrar verilmiştir.

### 3.1. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen Hız Sonuçları

Çalışma için ANSYS Fluent programında hareketli ızgaralı bir kazan modellenmiş, modellenen kazan da antrasit, linyit, turba kömürleri yakılmıştır. Şekil 3.1.' de karşılaştırmada kullanılan linyit kömürünün yanması sonucu oluşan hız vektörleri genel bir görünüm için üç boyutlu olarak (Şekil 3.1.-a), ayrıntılı görünüm için ise XY-YZ kesitleri (Şekil 3.1.-b, Şekil 3.1.-c) ile verilmektedir. Şekil 3.1. incelendiğinde, hareketli ızgaralı kazan da oluşan akışın, keskin ve dar köşelerden geçerken yavaşlayarak neredeyse sıfırladığını, kazan duvarlarını ise yalayarak ilerlediğini görülmektedir. Kazanın geçiş parçasının daralmasıyla hızlanarak ilerleyen akışkan, silindir duvarına çarpıp, silindirin sağ köşesinden, tekrar hızlanarak ilerlerken, silindirin sol tarafında da döngüler oluşturmaktadır. XY-YZ kesitlerinde ki hız vektörlerine bakıldığında bu döngüler daha iyi görülmektedir.

Şekil 3.2.'de hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan hız eş eğrileri parçalı kesitler halinde verilmektedir. Parçalı kesitler incelendiğinde kazan girişinde antrasit, linyit ve turba kömürlerinin (Şekil 3.2-a, Şekil 3.2-b, Şekil 3.2-c) yanması sonucunda oluşan hız dağılımlarının benzer geliştiği görülmektedir. Keskin köşeleri olan modelde köşelerin olduğu yerlerde hızın sıfırlandığı görülmektedir. Geçiş parçasında ki köşe ise bir engel etkisiyle akışı hızlandırmaktadır. Hızlanan akışkan silindirik parçaya çarparak duvar boyunca etkisini sürdürmektedir. Silindirik parçada engelin önünde kalan kısımda ise döngü oluşarak hızı düşürmektedir.

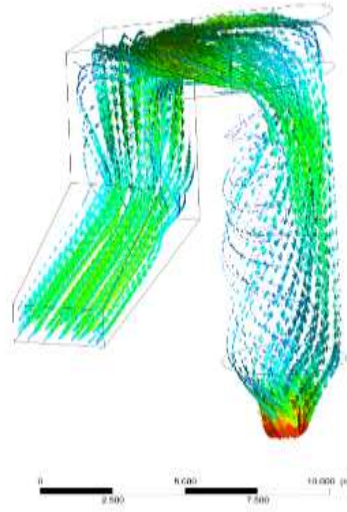
Hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan hız eş eğrileri, Şekil 3.3.' de XY kesitleri şeklinde, Şekil 3.4.' de de YZ kesitleri şeklinde verilmektedir. Kesitlere bakıldığında kömürlerin yanması sonucunda oluşan hız eş eğrileri birbirine benzer davranışlar göstermektedir. Hareketli ızgaralı kazanın duvarlarına duvar sınır şartı tanımlanmış olduğundan duvar cidarlarında akışkan hızının sıfır olduğu görülmektedir. Gerçek ölçüleriyle modellenen hareketli ızgaralı kazanın tasarımı akışı etkileyen keskin ve dar kenarlara sahiptir. XY-YZ kesitlerinden alınan sonuçlara bakıldığında bu köşelerin akışa etkisi daha iyi izlenmektedir. Keskin köşelerin olduğu yerlerde hızların yavaşladığı, tam köşede ise sıfırlandığı görülmektedir. Geçiş parçasında ki köşe ise engel etkisi yaratarak akışı sapıtmakta, debiyi artırarak akışkanı silindir duvarına çarptırmaktadır. Silindirik parçanın ön kısmında döngüler olduğu ve kazan çıkışına kadar sürdüğü görülmektedir.



Şekil 3.5.'de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan hız sonuçları önden, yandan ve arkadan olmak üzere akım çizgileri ile verilmektedir. Akım çizgileri incelendiğinde antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan maksimum hız noktalarının değişmediği ve akışın birbirine paralel geliştiği görülmektedir.

Şekil 3.6.'da hareketli ızgaralı kazan merkezinden geçen bir çizgi üzerinden alınan hız sonuçları, grafik olarak sunulmaktadır. Daha ayrıntılı bir sonuç için Şekil 3.7.'de hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçası üzerinden alınan hız sonuç grafiği verilmektedir. Grafikler incelendiğinde her üç kömüründe yanması sonucunda oluşan hızlarının birbirine paralel seyrettiği görülmektedir.

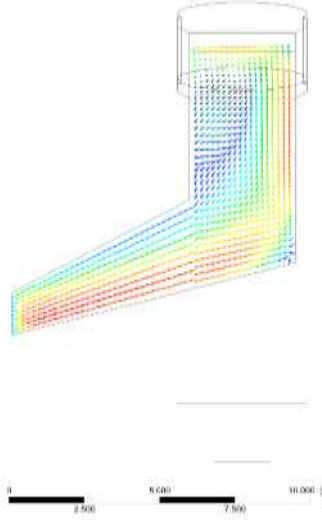




ANSYS  
R18.1



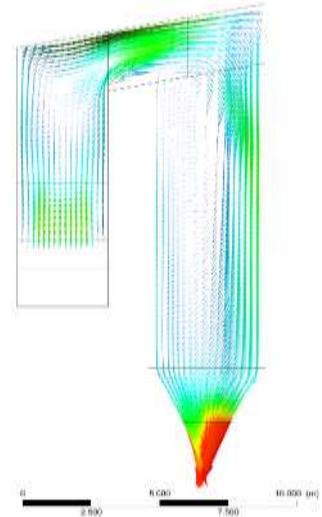
a



ANSYS  
R18.1



b

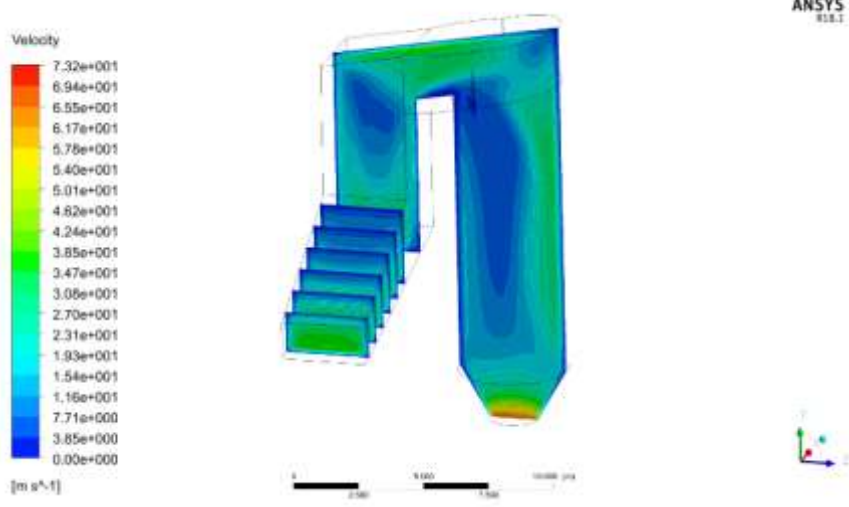


ANSYS  
R18.1

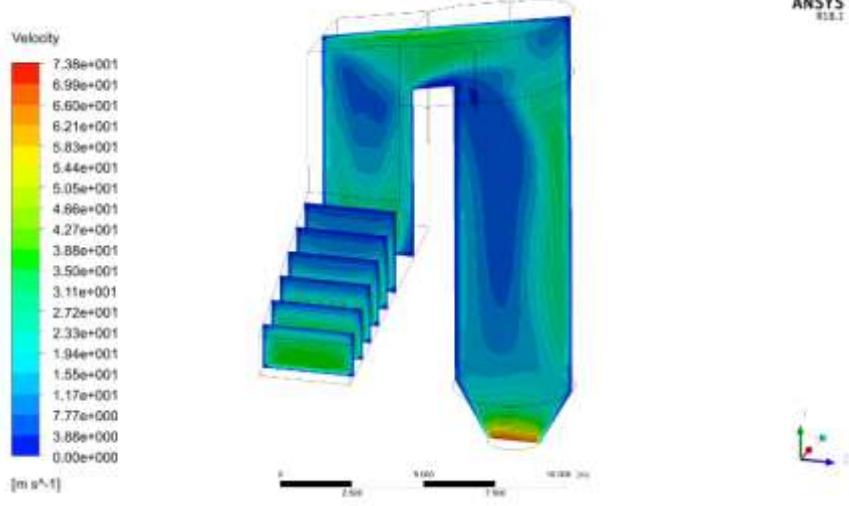


c

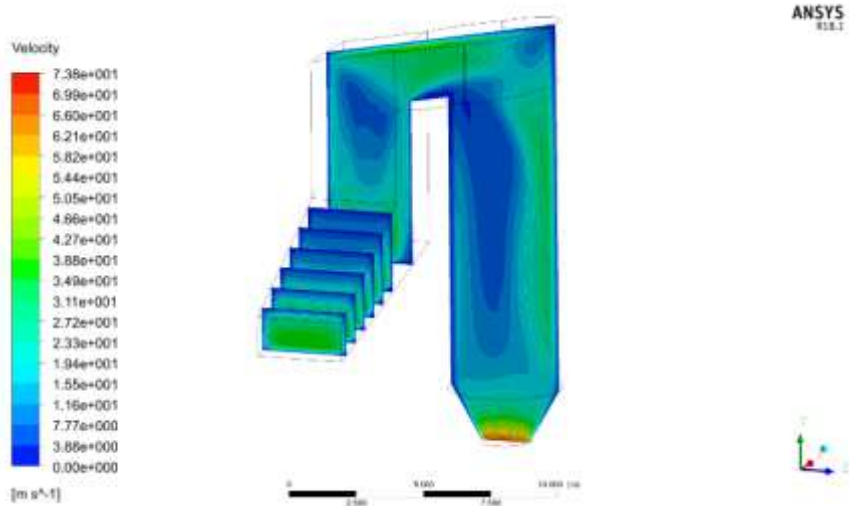
**Şekil 3.1.** Hareketli ızgaralı kazanın üç boyutlu ve XY-YZ kesitlerinden alınan hız vektörlerinin görünüşü a) Üç boyutlu görünüş b) XY kesiti c) YZ kesiti



a

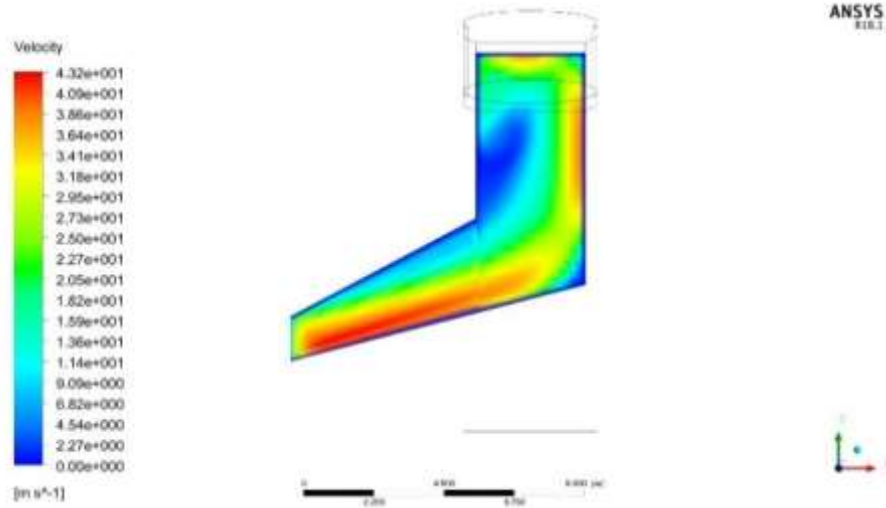


b

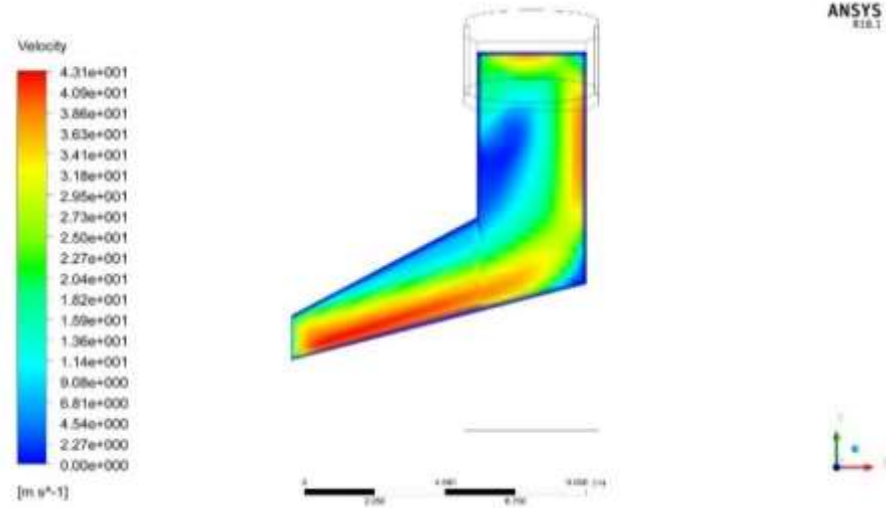


c

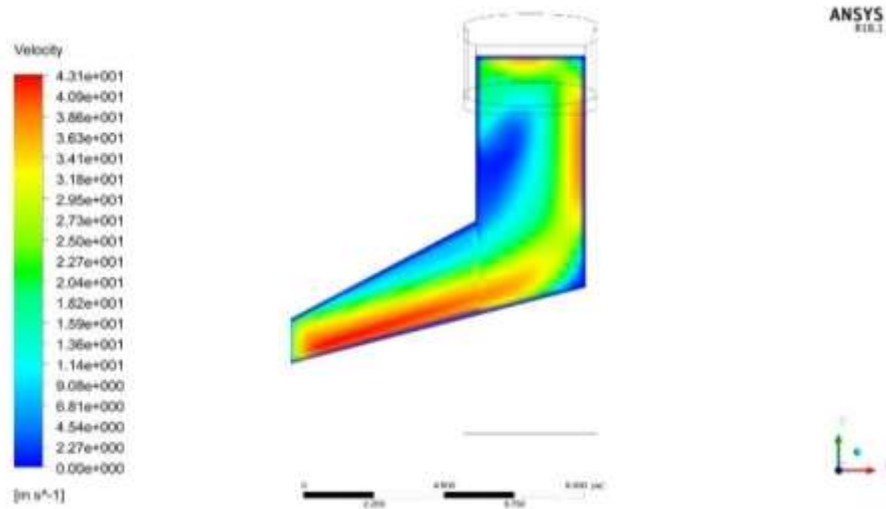
**Şekil 3.2.** Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle hız eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

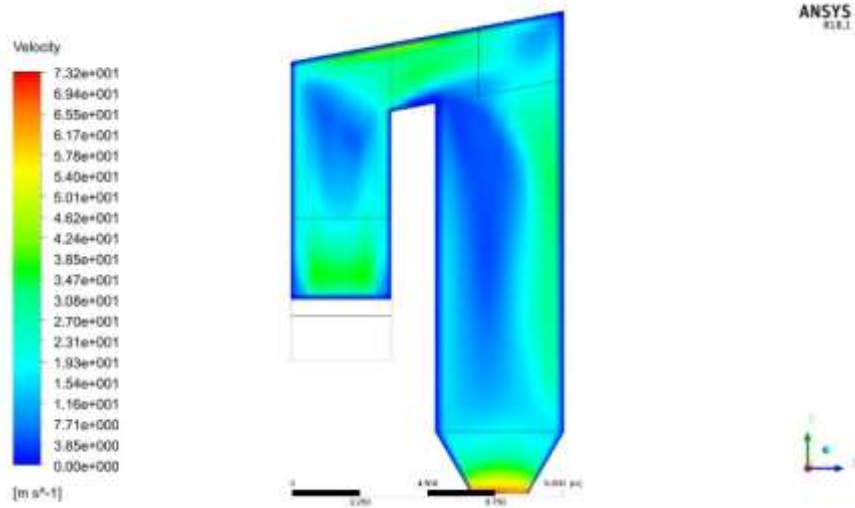


b

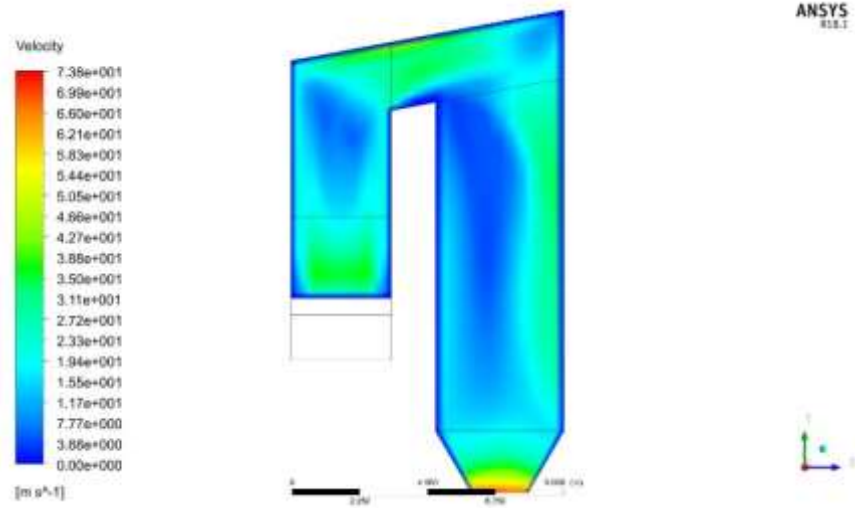


c

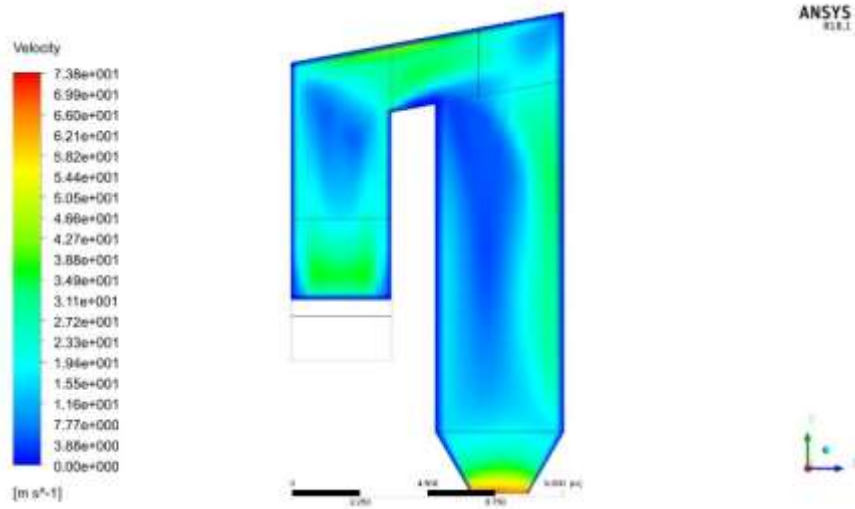
Şekil 3.3. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti hız eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

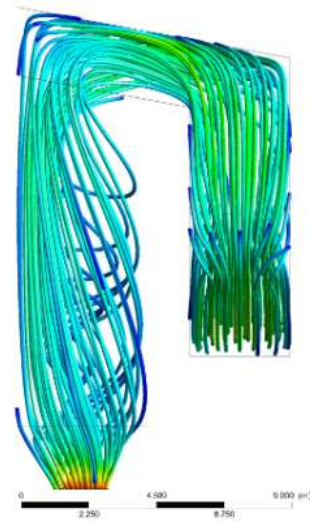
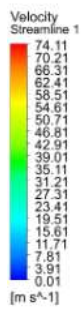
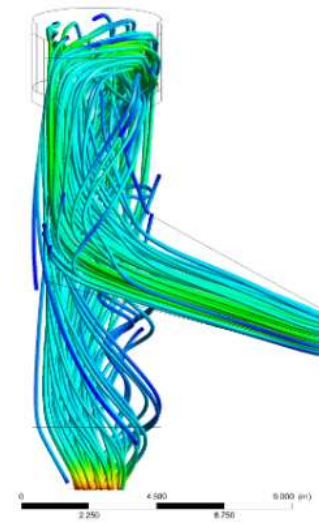
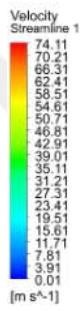
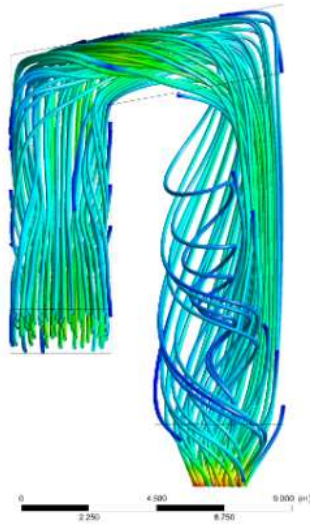
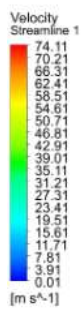


b

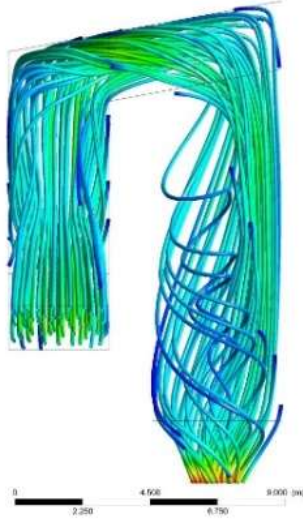
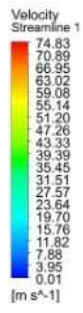


c

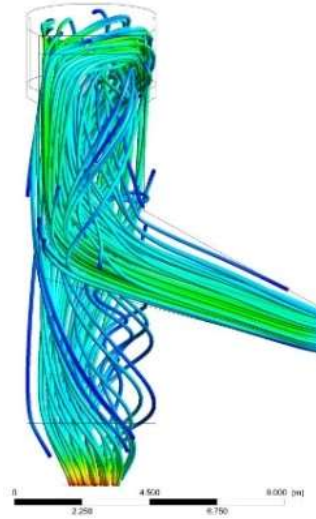
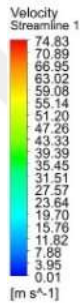
Şekil 3.4. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti hız eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



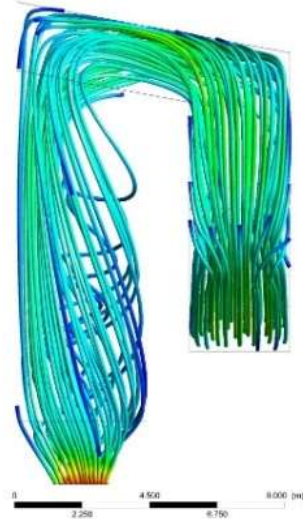
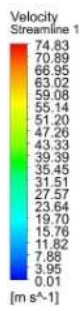
a



ANSYS  
R18.1



ANSYS  
R18.1

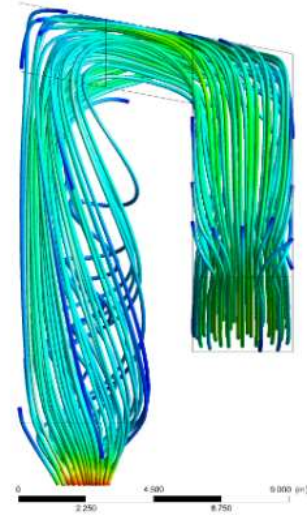
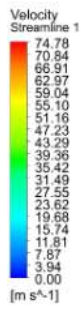
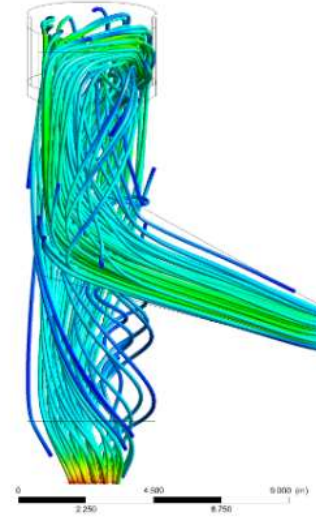
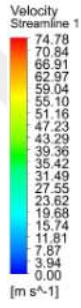
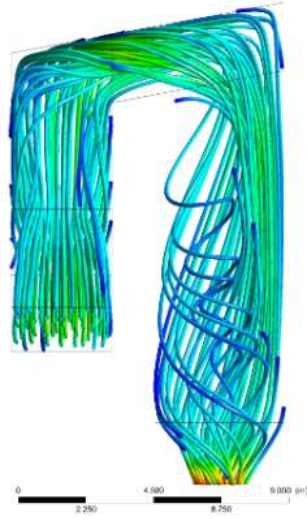
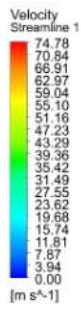


ANSYS  
R18.1



b

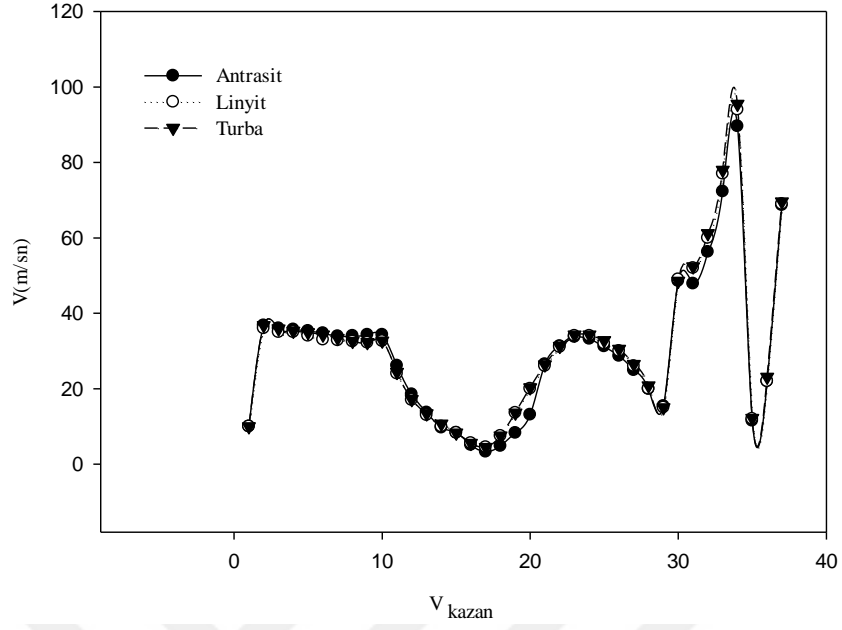




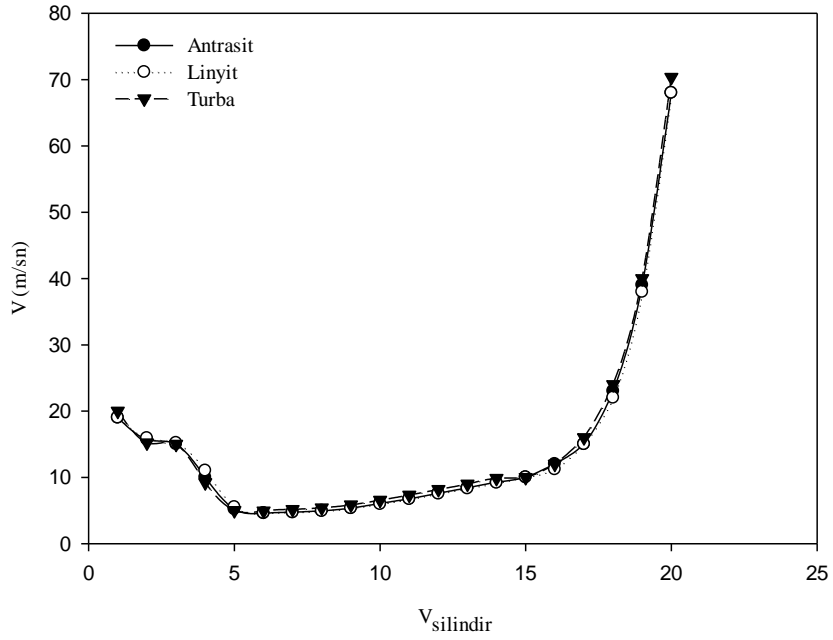
c

Şekil 3.5. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin önden, yandan ve arkadan hız akım çizgileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba





Şekil 3.6. Hareketli ızgaralı kazan merkezinden geçen bir çizgi boyunca alınan hız sonuçları



Şekil 3.7. Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça üzerinden alınan hız sonuçları

### 3.2. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen Sıcaklık Sonuçları

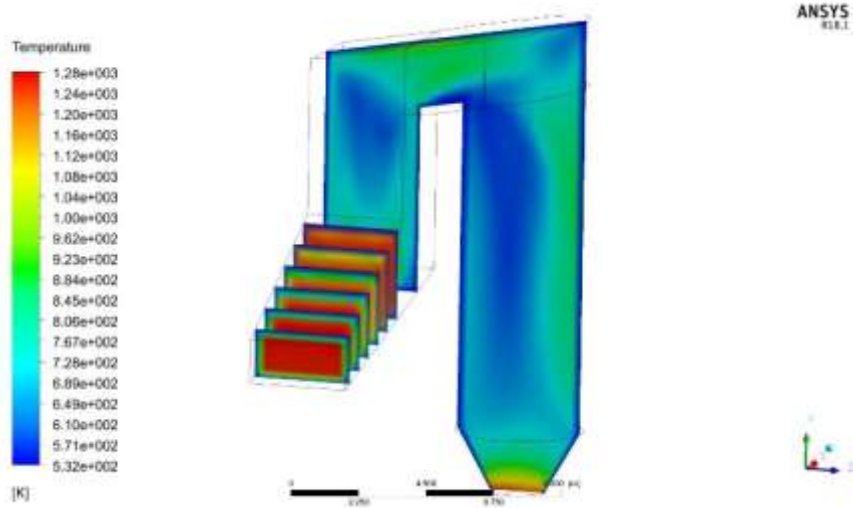
ANSYS Fluent programında modellenen hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yakılmasıyla elde edilen sıcaklık sonuçları aşağıda verilmektedir. Sıcaklık sonuçları, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri halinde iki boyutlu, önden, yandan ve arkadan olmak üzere de üç boyutlu olarak akım çizgileri ile gösterilmektedir. Grafiklerle gösterim için programa, kazanın merkezinden geçen bir çizgi tanımlanmış, bu çizgi üzerinden sıcaklık değerleri elde edilmiş, grafiğe dökülmüştür. Sonuçların daha iyi görülebilmesi için silindirik parçadan alınan sonuçlar ayrı bir grafik ile tekrar verilmektedir.

Şekil 3.8.' de hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması neticesinde ki sıcaklık sonuçları parçalı kesitler halinde görülmektedir. Parçalı kesitler incelendiğinde kazan girişinde antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmasıyla oluşan sıcaklık dağılımlarının benzer geliştiği görülmektedir. Keskin köşeleri olan modelde köşelerin olduğu yerlerde hızın yavaşlamasıyla sıcaklıklarda düşüş izlenmektedir. Geçiş parçasında ki köşe ise bir engel etkisiyle akışı hızlandırmakta ve sıcaklıklarda artış yaratmaktadır. Isınan akışkan silindirik parçaya çarparak duvar boyunca etkisini sürdürmektedir. Silindirik parçada engelin önünde kalan kısımda ise döngüler oluştuğu, bu döngülerin kazan çıkışına kadar sürdüğü ve sıcaklığı düşürdüğü görülmektedir. Yine kesitlerde görüldüğü üzere her üç kömürde de yanma sonucunda ki en yüksek sıcaklıklar kazanın merkezinde oluşmaktadır. Giriş parçasının XY kesitine bakıldığında parçanın sonuna doğru her üç kömürün de yanma sonucu sıcaklığında düşüş olduğu izlenmektedir. Geçiş parçasında ki köşenin, engel etkisiyle artırdığı hızın, sıcaklığı da artırdığını, silindirik duvar boyunca azalarak sürdürdüğü görülmektedir.

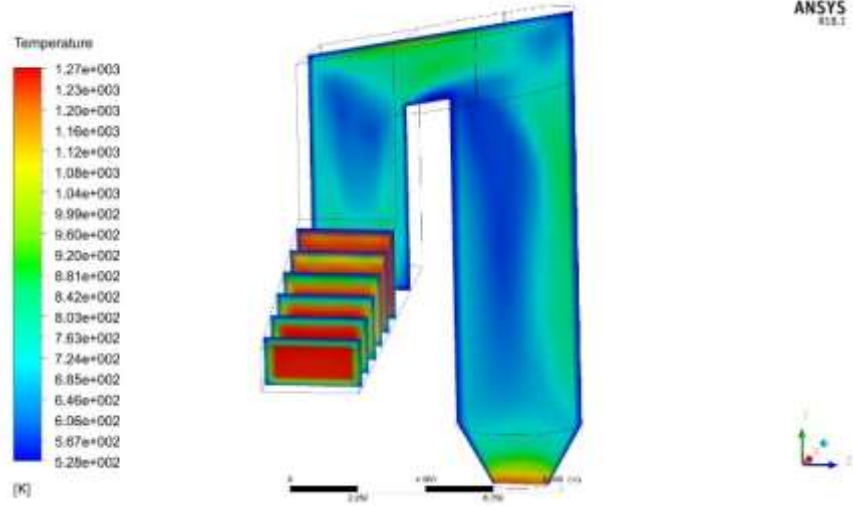
Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan sıcaklık sonuçları, Şekil 3.9.' da XY kesitleri şeklinde, Şekil 3.10.' da da YZ kesitleri şeklinde verilmektedir. Kesitlere bakıldığında kömürlerin yanma sonucunda oluşan sıcaklıkları birbirine benzerdir. Antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmasıyla oluşan sıcaklık sonuçları, benzer maksimum noktalara sahiptir. Dağılımlar kesitler üzerinden incelendiğinde, XY kesitinde linyit kömürünün yanması sonucu soğuyan bölgelerinin sırasıyla turba ve antrasit kömürünün yanması sonucuna göre daha yoğun olduğu, YZ kesitinde ise turba kömürünün yanması sonucu oluşan sıcak bölgelerinin sırasıyla antrasit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan sıcak bölgelerine göre daha çok olduğu izlenmektedir.

Şekil 3.11.' de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan sıcaklık sonuçları önden, yandan ve arkadan olmak üzere akım çizgileri ile verilmektedir. Akım çizgileri incelendiğinde antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan maksimum sıcaklık noktalarının değişmediği ve akışın birbirine paralel geliştiği görülmektedir.

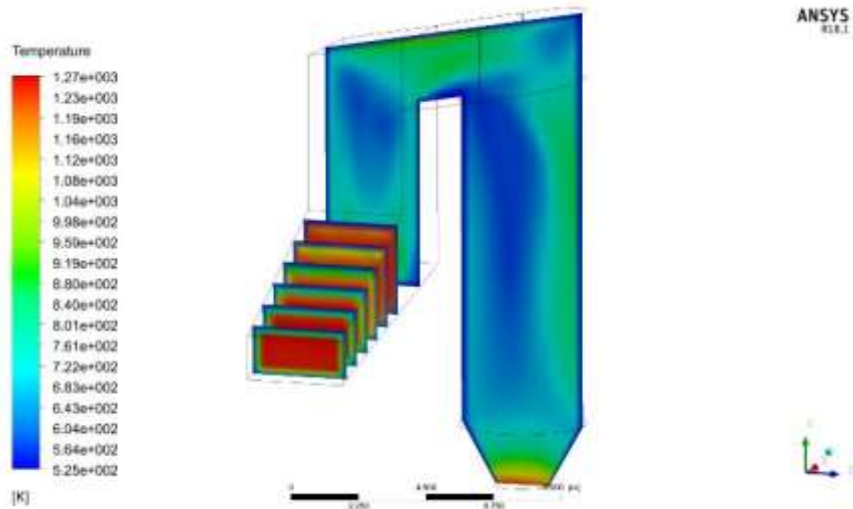
Problemin çözümünde kullanılan ANSYS Fluent programının son işlemci (post process) kısmında, hareketli ızgaralı kazanın tam ortasından geçen bir çizgi tanımlanarak antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan sıcaklık sonuçları alınmış, grafiğe dökülmüştür. Ayrıca daha iyi bir inceleme için çıkış parçası olan silindirin merkezinden geçen çizgi ile tekrar bir grafik çizilmiştir. Şekil 3.12. ve Şekil 3.13' de bahsi geçen grafikler verilmektedir. Grafikler incelendiğinde sıcaklıkların birbirine paralel seyrettiği, en yüksek giriş sıcaklığı ve maksimum sıcaklığın ise antrasit kömürünün yanması sonucunda oluştuğu görülmektedir. Grafiğin devamı incelendiğinde ise turba kömürünün yanması sonucunda oluşan sıcaklık değerlerinin linyit ve antrasit kömürlerinin yanması sonucunda oluşan sıcaklık değerlerine göre daha yüksek bir sıcaklık ile ilerlediği görülmektedir.



a

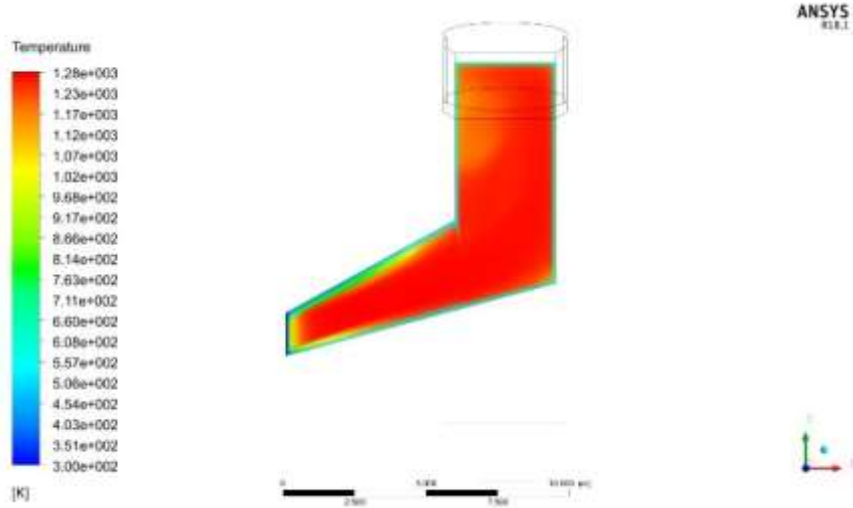


b

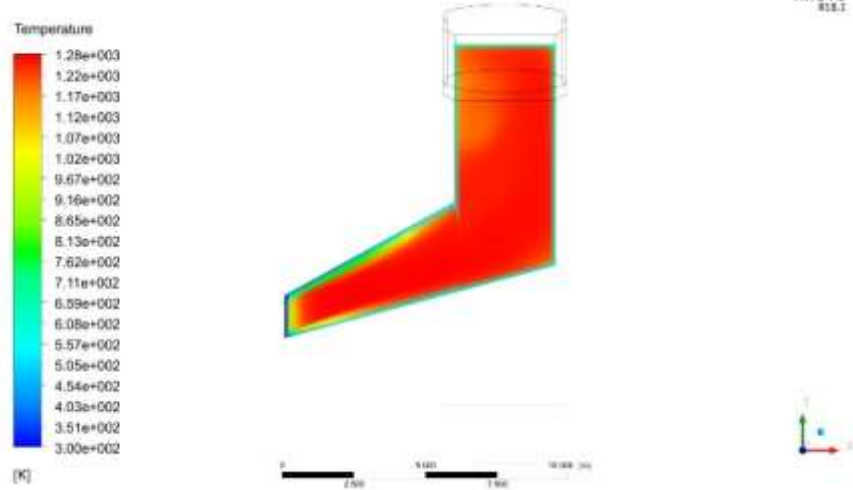


c

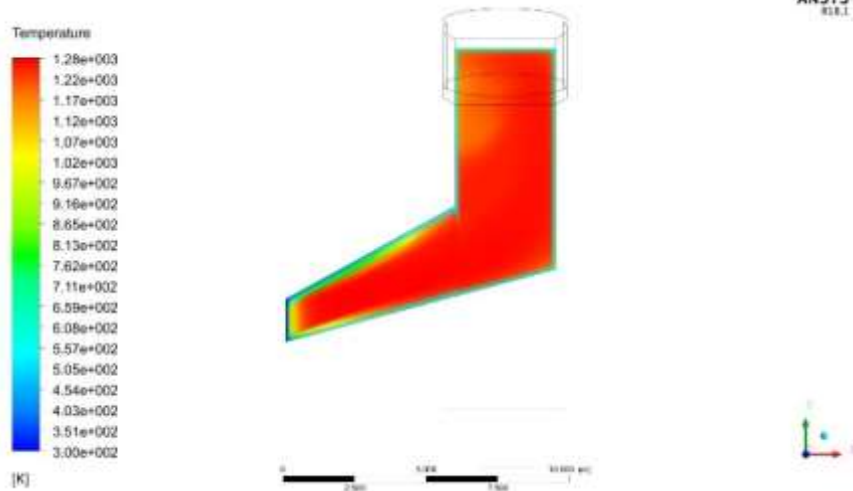
Şekil 3.8. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle sıcaklık eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

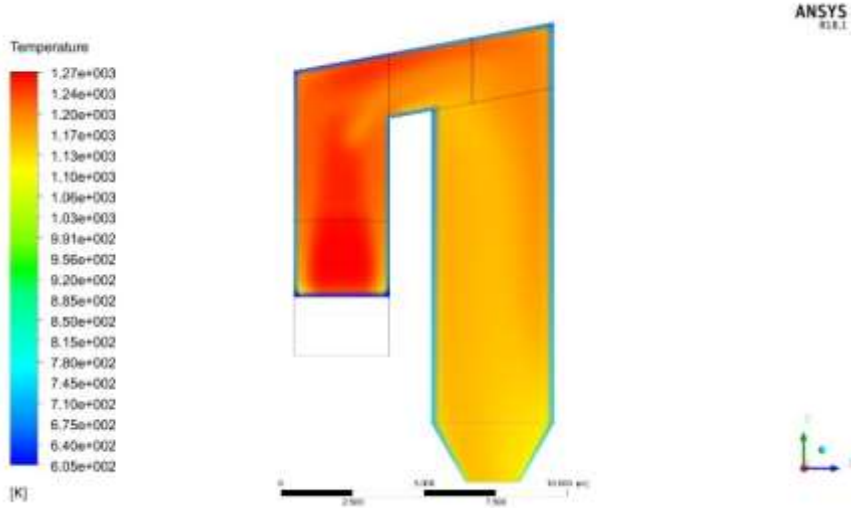


b

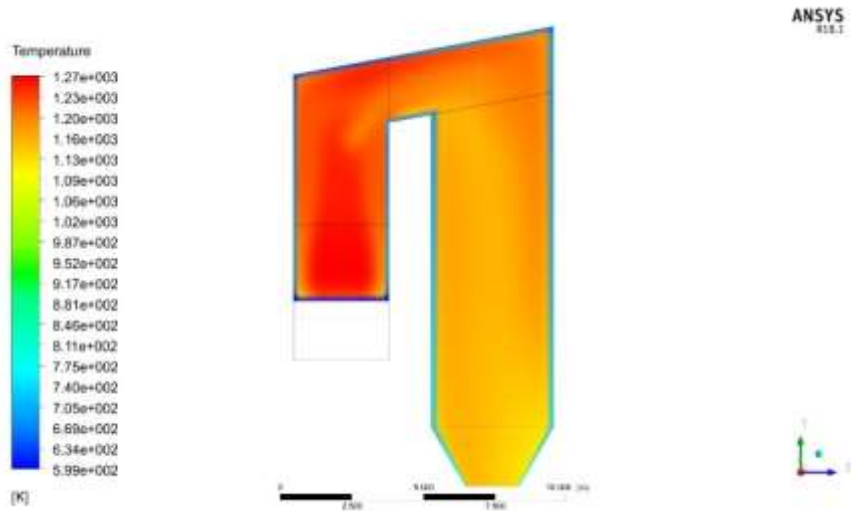


c

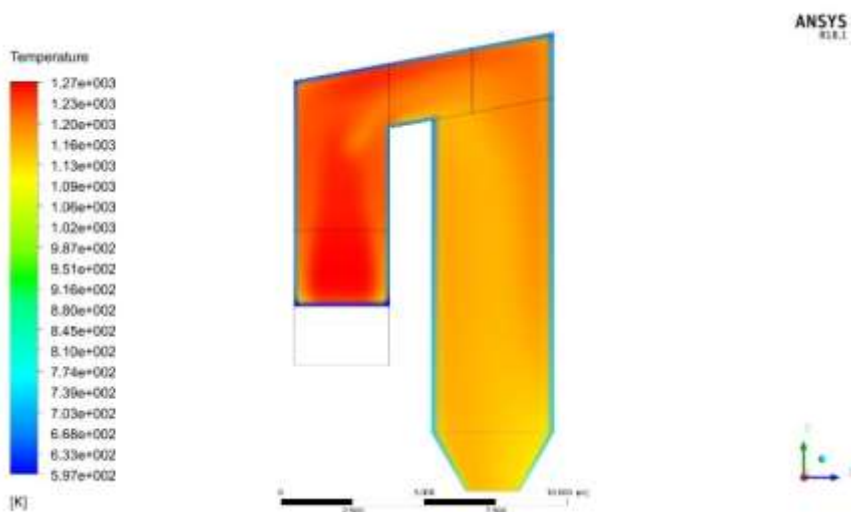
Şekil 3.9. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti sıcaklık eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

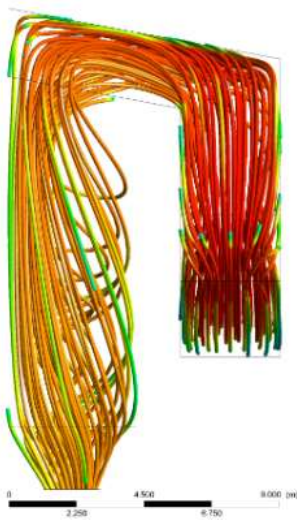
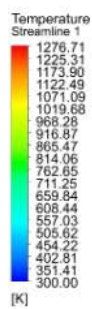
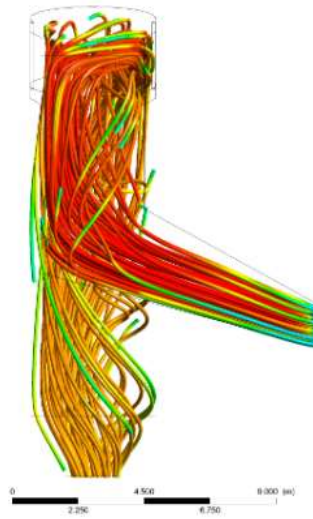
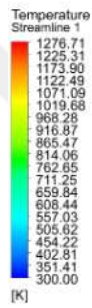
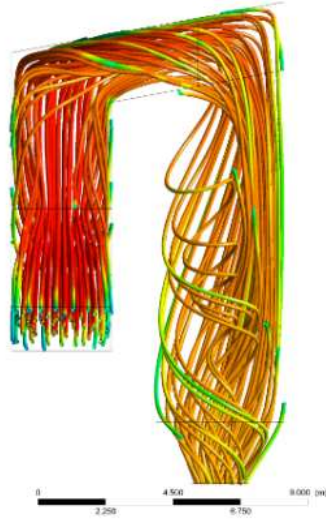
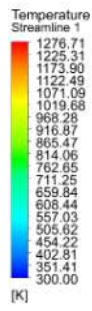


b

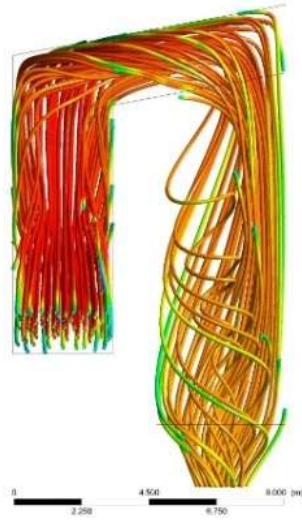
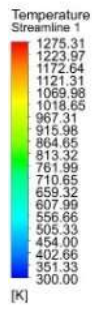


c

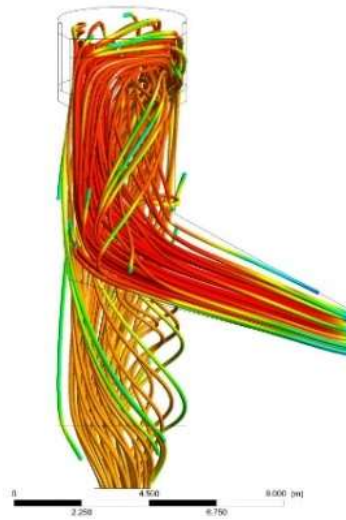
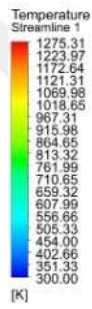
Şekil 3.10. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti sıcaklık eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



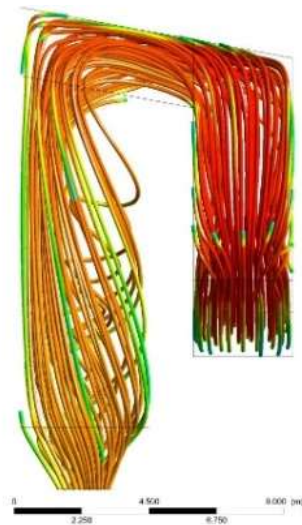
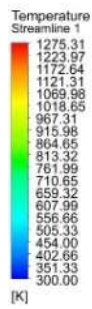
a



ANSYS  
R18.1



ANSYS  
R18.1

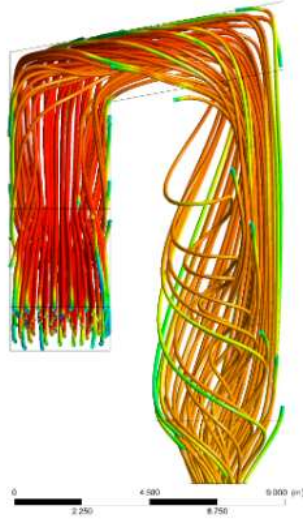
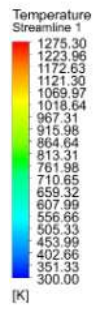


ANSYS  
R18.1

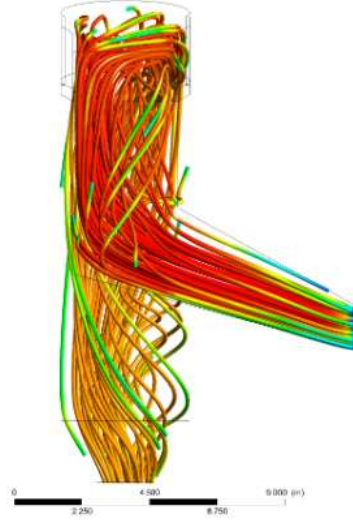
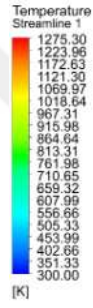


b

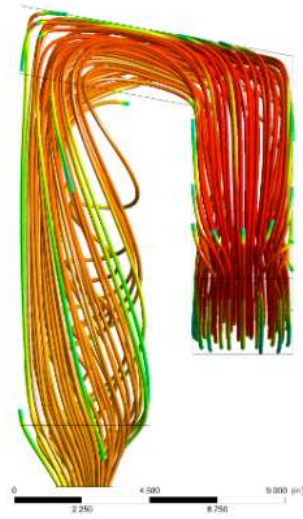
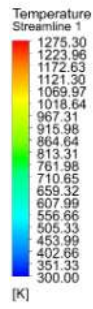




ANSYS  
R18.1



ANSYS  
R18.1

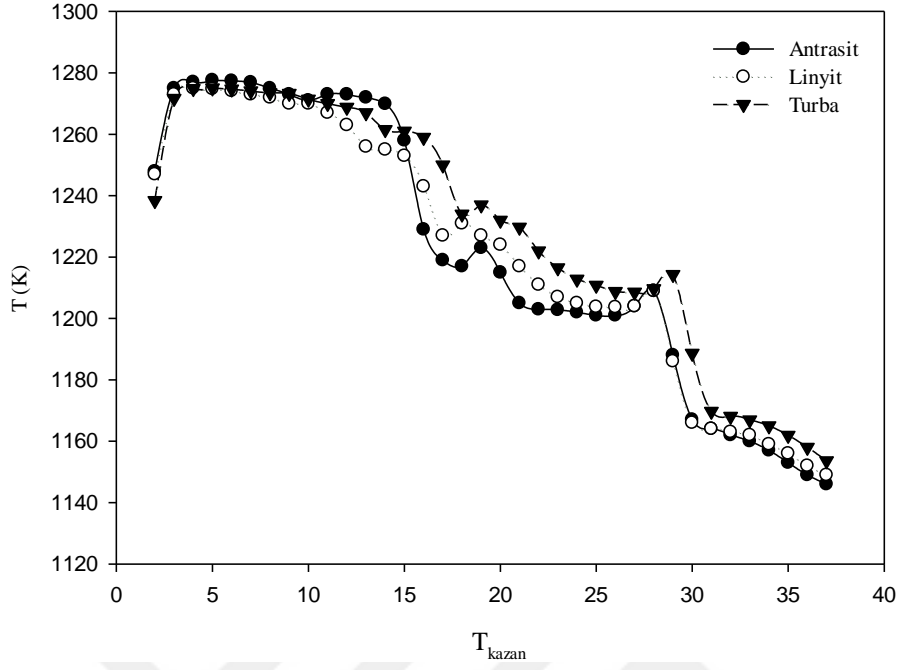


ANSYS  
R18.1

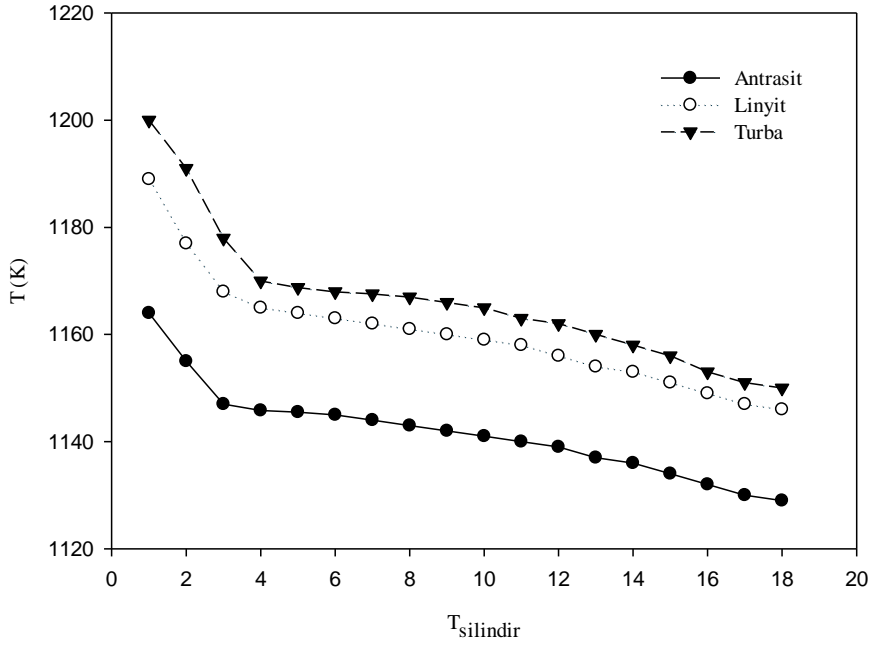


c

Şekil 3.11. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin önden, yandan ve arkadan sıcaklık akım çizgileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



Şekil 3.12. Hareketli ızgaralı kazanın ortasından geçen bir çizgi boyunca alınan sıcaklık sonuçlarının dağılımı



Şekil 3.13. Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçasından geçen bir çizgi boyunca alınan sıcaklık sonuçlarının dağılımı

### 3.3. Hareketli Izgaralı Kazandan Elde Edilen Basınç Sonuçları

ANSYS Fluent programında modellenen hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda elde edilen basınç sonuçları aşağıda verilmektedir. Basınç sonuçları, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri halinde iki boyutlu, önden, yandan ve arkadan olmak üzere de üç boyutlu olarak kontürler yardımıyla gösterilmektedir. Grafiklerle gösterim için kazanın çıkış parçası olan silindir merkezinden bir çizgi tanımlanmış, bu çizgi üzerinden basınç değerleri elde edilmiş, grafikleştirilmiştir.

Şekil 3.14.' de hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan basınç sonuçları parçalı kesitler halinde görülmektedir. Parçalı kesitler incelendiğinde kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan basınç dağılımının benzer geliştiği görülmektedir. Keskin köşeleri olan modelde köşelerin olduğu yerlerde hızın yavaşlamasıyla basınç da yükseliş izlenmektedir. Geçiş parçasından geçen akışkan köşenin etkisiyle hızlanmakta silindir duvarına çarpmaktadır. Bu geçiş sırasında basıncın düştüğü izlenmektedir. Silindir duvarına çarpan akışkan, silindirin üst keskin köşesinin de hızın yavaşlamasıyla yükselmektedir. Köşeden kurtulan akışkanın basıncı düşerek ilerlemektedir. Silindirik parçanın sol kısmında ise oluşan döngülerin etkisiyle basınç artmaktadır.

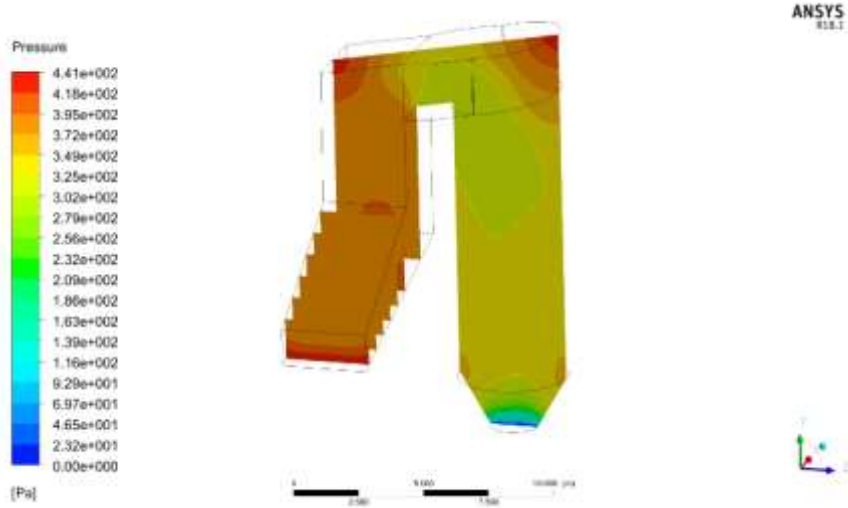
Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan basınç sonuçları, Şekil 3.15.' de XY kesitleri şeklinde, Şekil 3.16.' da da YZ kesitleri şeklinde verilmektedir. Bu kesitlerde basınç sonuçlarının benzerliği daha net görülmektedir. Keskin köşeleri olan hareketli ızgaralı kazan da köşeler hızları yavaşlatıp durdurmuş dolayısıyla bu noktalarda basınç da maksimum noktalara ulaşılmıştır.

Şekil 3.17.' de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan basınç sonuçları önden, yandan ve arkadan olmak üzere kontürler ile verilmektedir. Kömürlerin yanma sonucunda oluşan basınç kontürleri incelendiğinde kazanın keskin kenarlarında basıncın maksimum noktalarına ulaştığı, geçiş parçasında ise köşenin engel etkisi yaratmasıyla düştüğü görülmektedir. Kömürlerin eş basınç eğrileri incelendiğinde köşelerde birbirine benzer tavır sergilerken kesitlere bakıldığında turba kömürünün yanması sonucunda oluşan maksimum basınç noktalarının antrasit ve linyit kömürünün yanması sonucunda oluşan maksimum basınç noktalarına göre daha yüksek olduğu izlenmektedir.

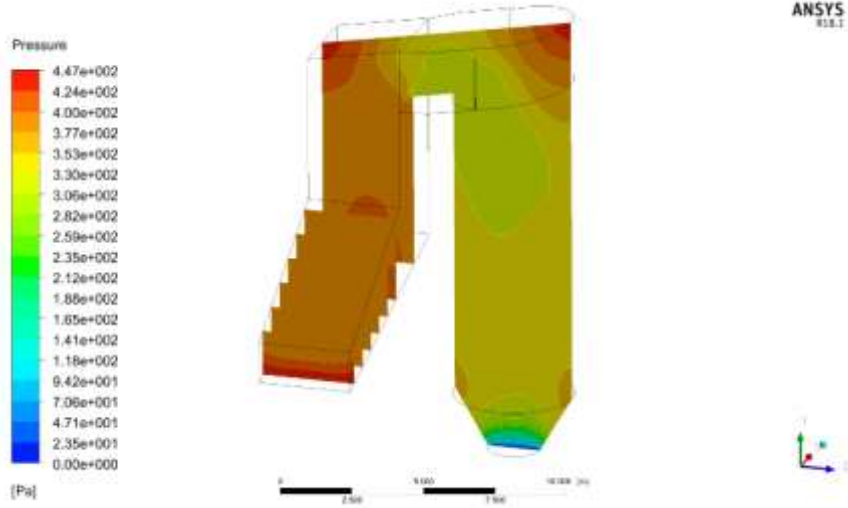
Hareketli ızgaralı kazanın çıkış parçası olan silindir üzerinden alınan basınç sonuçları Şekil 3.18.' de verilmektedir. Grafiğe bakıldığında, linyit ve turba kömürlerinde yanma

sonuçlarının neredeyse birbirini örtecek kadar paralel, antrasit kömürünün yanma sonucunun ise diğeri iki kömüre göre daha düşük basınç değerlerine sahip olduğu izlenmektedir.

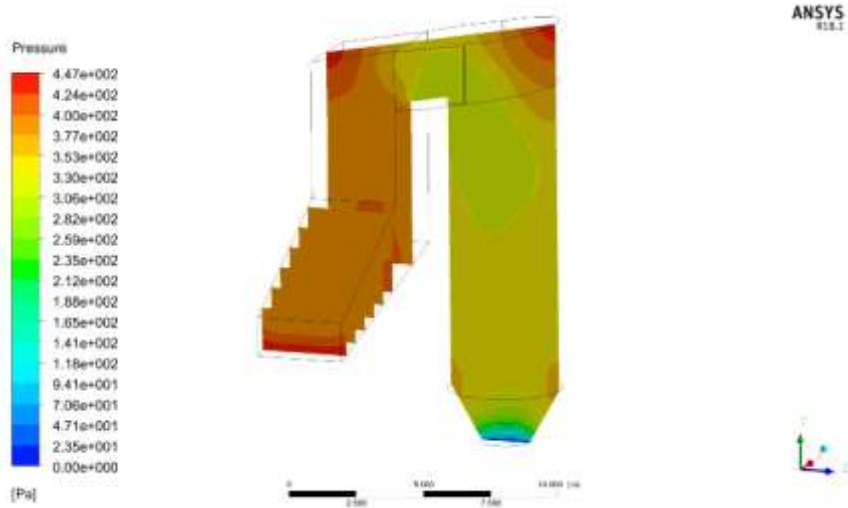




a

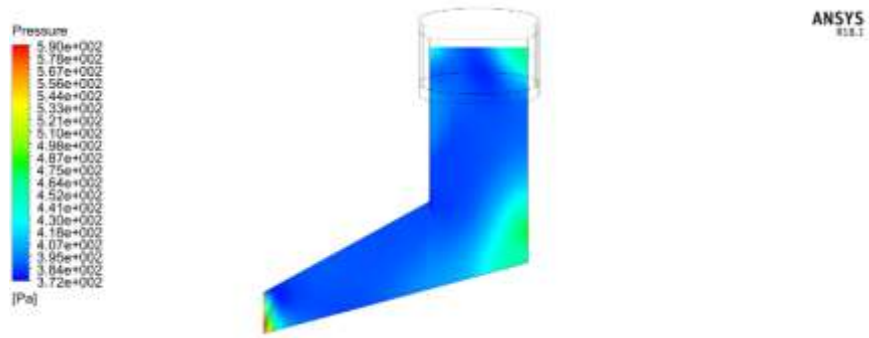


b

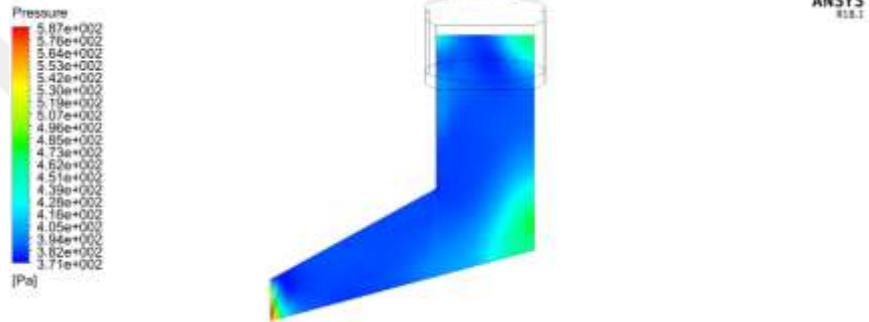


c

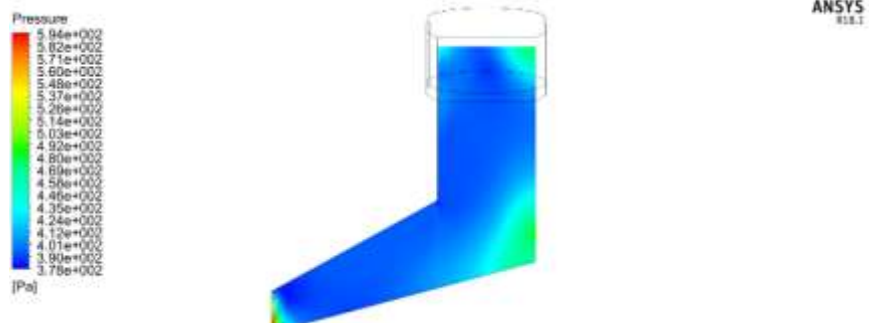
Şekil 3.14. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle basınç eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

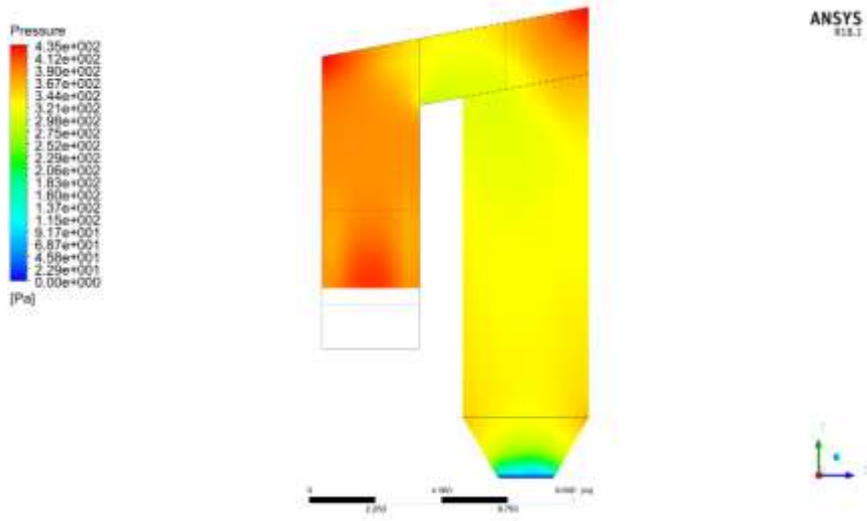


b

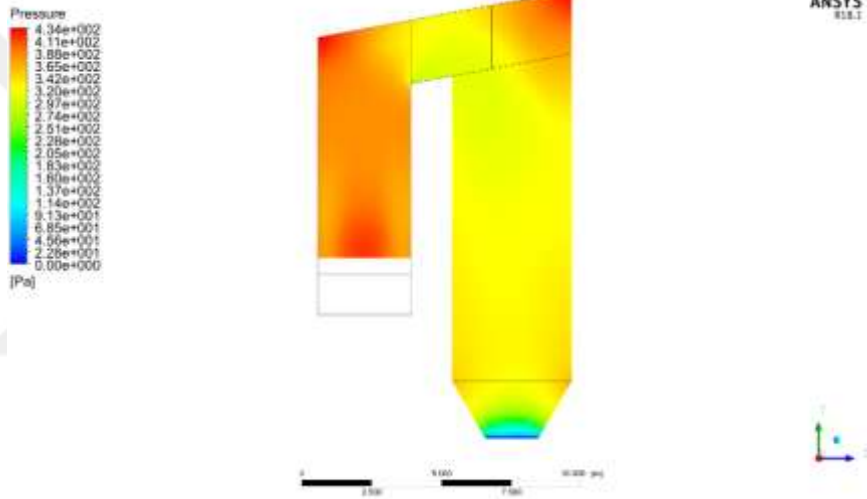


c

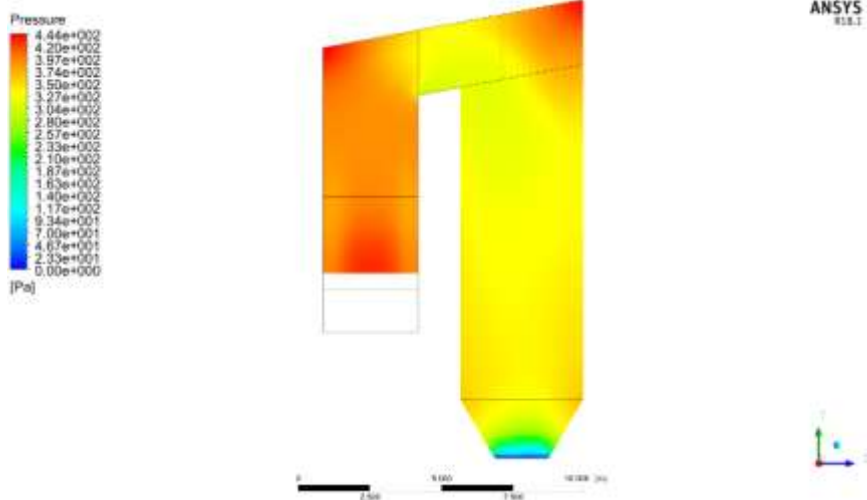
Şekil 3.15. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti basınç eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

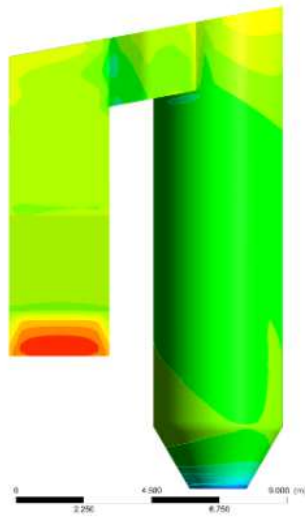
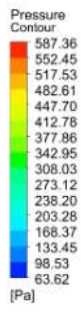


b

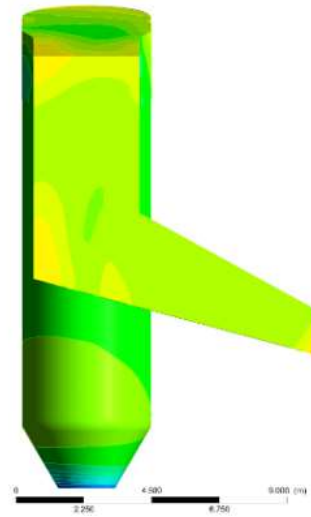
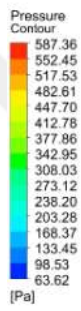


c

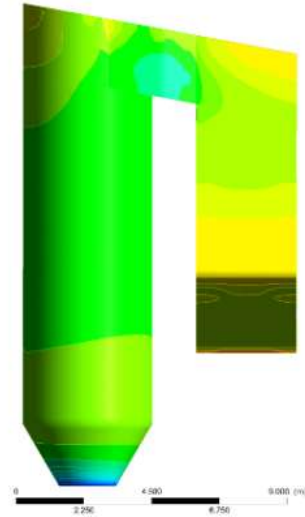
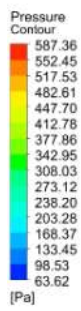
Şekil 3.16. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti basınç eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



ANSYS  
R18.1



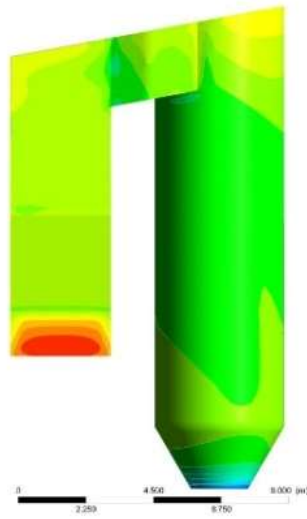
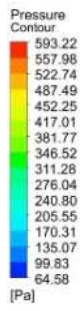
ANSYS  
R18.1



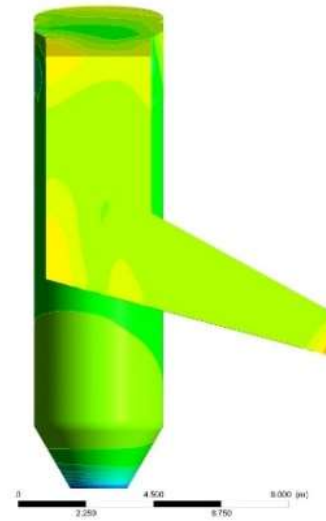
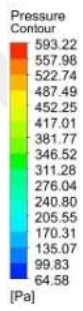
ANSYS  
R18.1

a

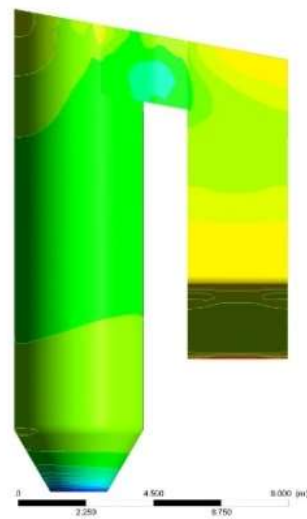
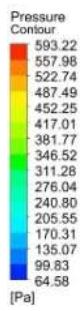




ANSYS R18.1



ANSYS R18.1

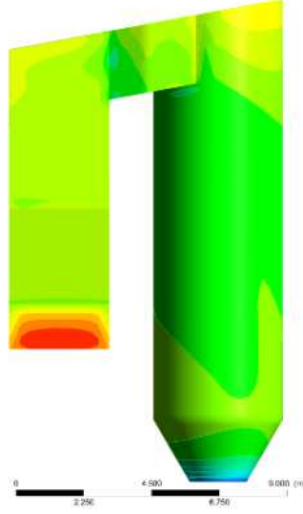


ANSYS R18.1



b

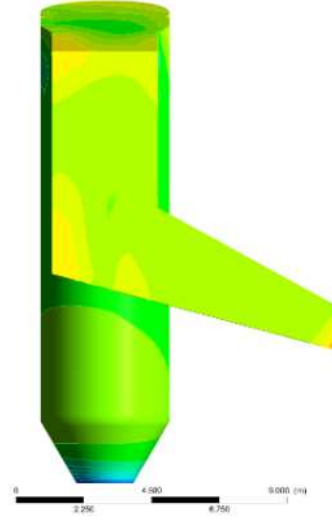
Pressure  
Contour  
593.15  
557.91  
522.68  
487.44  
452.20  
416.96  
381.73  
346.49  
311.25  
276.02  
240.78  
205.54  
170.30  
135.07  
99.83  
64.59  
[Pa]



ANSYS  
R18.1



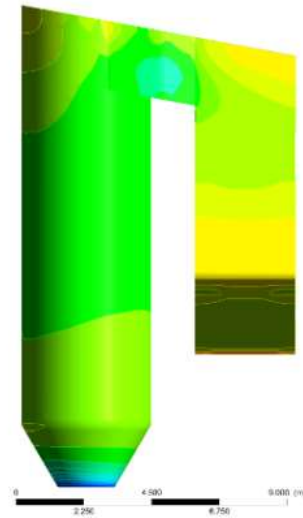
Pressure  
Contour  
593.15  
557.91  
522.68  
487.44  
452.20  
416.96  
381.73  
346.49  
311.25  
276.02  
240.78  
205.54  
170.30  
135.07  
99.83  
64.59  
[Pa]



ANSYS  
R18.1



Pressure  
Contour  
593.15  
557.91  
522.68  
487.44  
452.20  
416.96  
381.73  
346.49  
311.25  
276.02  
240.78  
205.54  
170.30  
135.07  
99.83  
64.59  
[Pa]

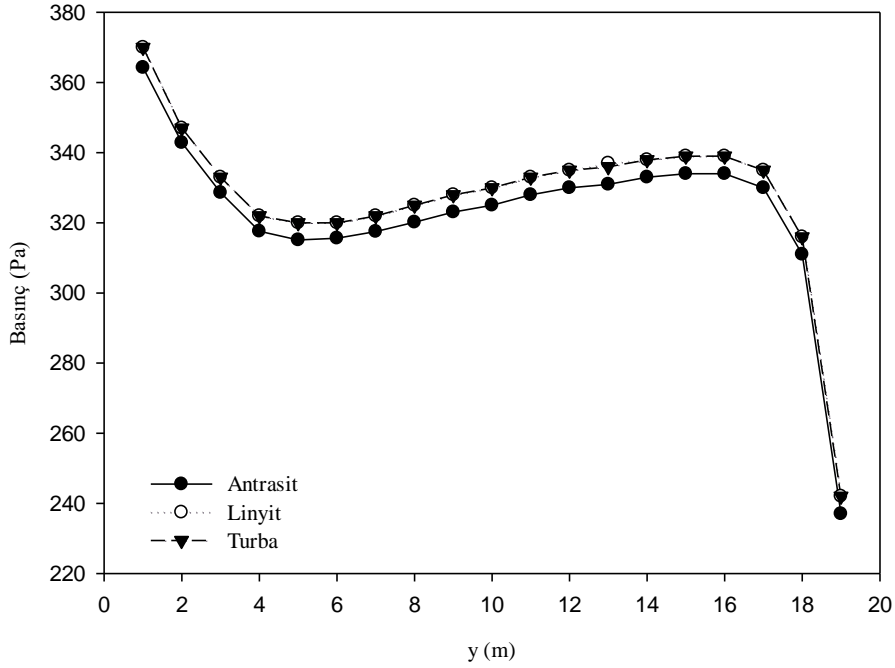


ANSYS  
R18.1



c

Şekil 3.17. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin farklı açılardan basınç kontürleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



**Şekil 3.18.** Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça merkezinden alınan basınç sonuçları

### 3.4. Hareketli Iızgaralı Kazandan Elde Edilen CO Sonuçları

ANSYS Fluent programında modellenen hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO emisyon sonuçları aşağıda verilmektedir. CO emisyon sonuçları, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri halinde iki boyutlu, önden, yandan ve arkadan olmak üzere de üç boyutlu olarak sunulmaktadır. Kazanın çıkış parçası olan silindir merkezinden bir çizgi tanımlanmış, bu çizgi üzerinden alınan CO sonuçları grafiğe dökülmüştür.

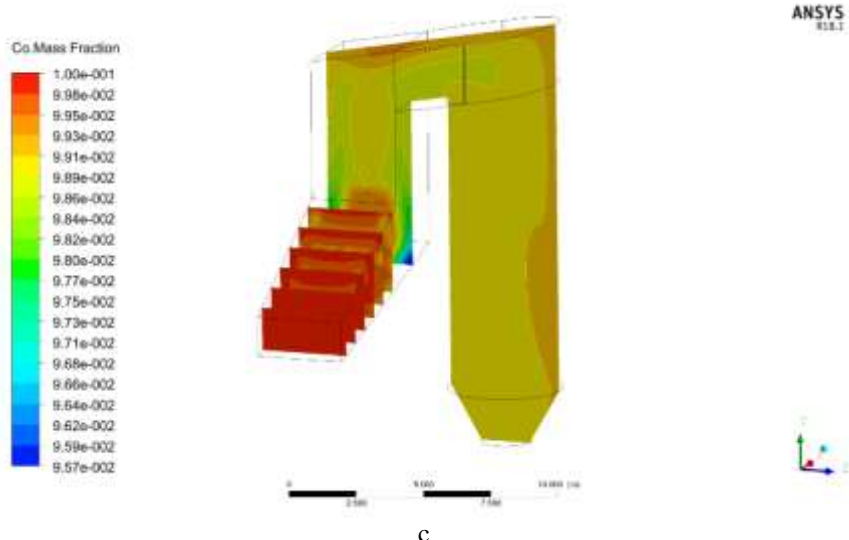
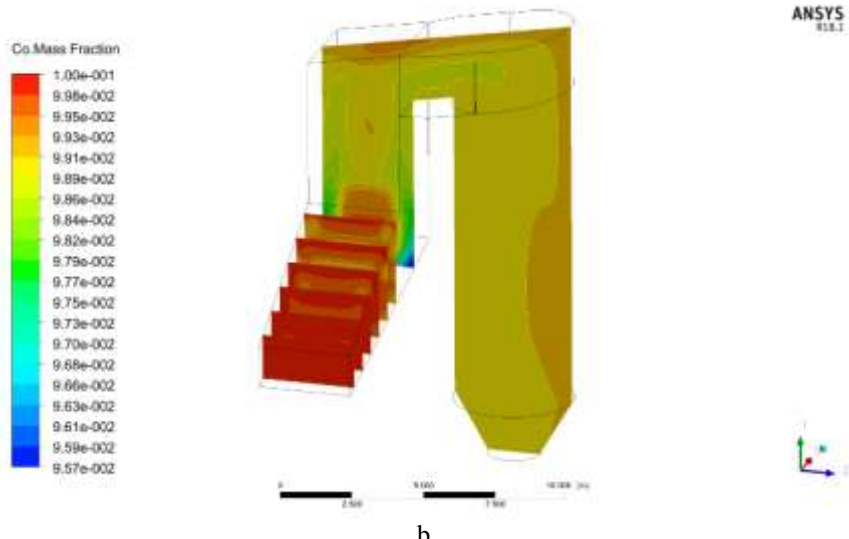
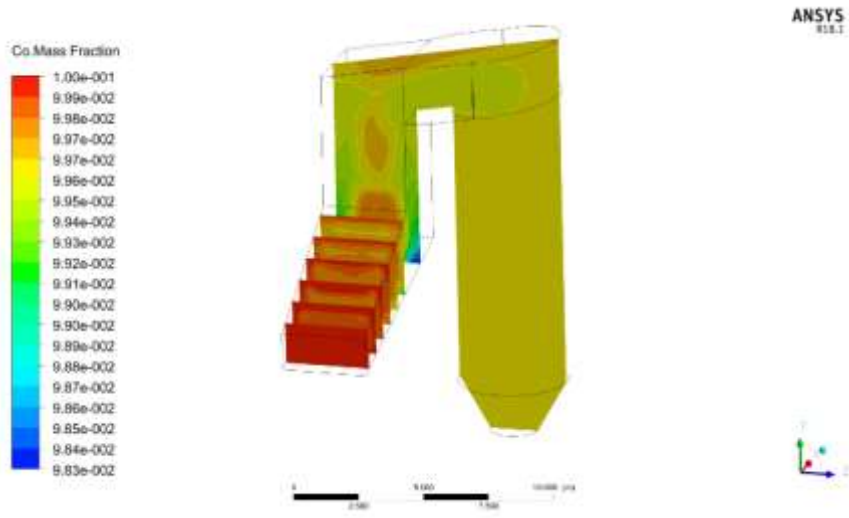
Şekil 3.19.' da hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO emisyon sonuçları parçalı kesitler halinde verilmektedir. Parçalı kesitler incelendiğinde antrasit kömürünün yanması sonucunda oluşan CO salınımının linyit (Şekil 3.19.-a) ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO salınımına göre daha erken başladığı görülmektedir. Skala bakıldığında en yüksek CO salınımı antrasit kömürünün yanması sonucunda oluşurken linyit ve turba kömürlerinin yanma sonucu değerleri benzer seyretmektedir.

Şekil 3.20.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO emisyon sonuçları XY kesitleri halinde verilmektedir. XY kesitleri incelendiğinde linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO emisyonları benzer bir dağılıma sahiptir. Antrasit kömürünün yanması sonucunda oluşan CO emisyonu ise diğer iki kömürün yanması sonucunda oluşan CO emisyonuna göre daha yüksek değerlerdedir. Her üç kömürün yanma sonucunda da, giriş parçası yukarı doğru kıvrılırken oluşan keskin köşe de CO emisyonunda azalma görülmektedir.

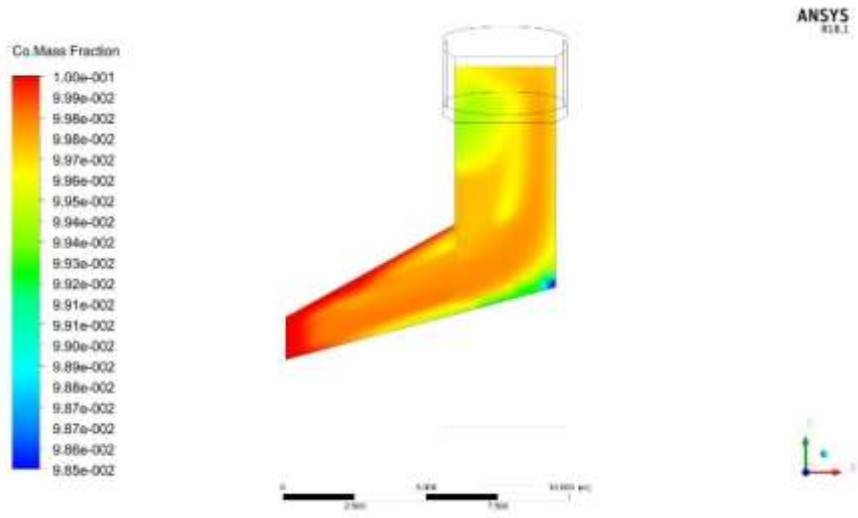
Şekil 3.21.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO emisyon sonuçları YZ kesitleri halinde verilmektedir. YZ kesitleri incelendiğinde kazanın giriş parçasının ortasına doğru, CO emisyonunun arttığı daha sonra azalarak ilerlediği görülmektedir. Antrasit kömürünün yanması sonucunda oluşan CO emisyon salınımı benzer eğilim gösteren linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucunda oluşan CO emisyon salınımlarına göre daha yüksektir.

Şekil 3.22.' de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO emisyon salınımı, önden, yandan ve arkadan olmak üzere üç farklı açı ile verilmektedir. Her üç kömürde de yanma sonucunda oluşan CO emisyonunun en yüksek değerleri giriş parçasındadır. Geçiş parçasının üst kısmına doğru CO emisyonunun artarak ilerlediği ve silindirik parçaya çarpan akışkanla birlikte oluşan döngüyle ilerlediği görülmektedir. En yüksek CO salınımı açık arayla antrasit kömürünün yanması sonucunda oluşmuştur.

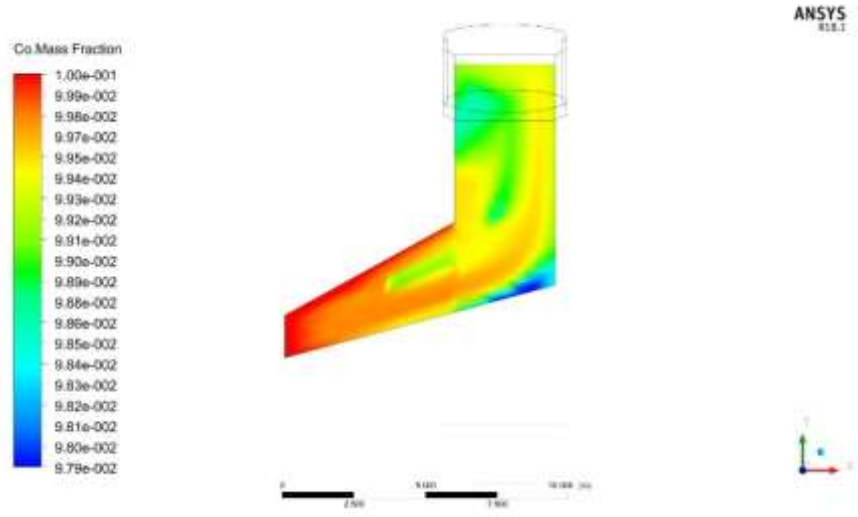
Program da çıkış parçası olan silindirin merkezinden geçen bir çizgi tanımlanarak, bu çizgi üzerinden antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan salınımı CO emisyon değerleri, grafikleştirilmiştir. Şekil 3.23.' de grafik görülmektedir. Grafiğe bakıldığında en yüksek CO değerlerinin antrasit kömürünün yanması sonucunda oluştuğu, sırasıyla linyit ve turba kömürlerinin ise takip ettiği görülmektedir.



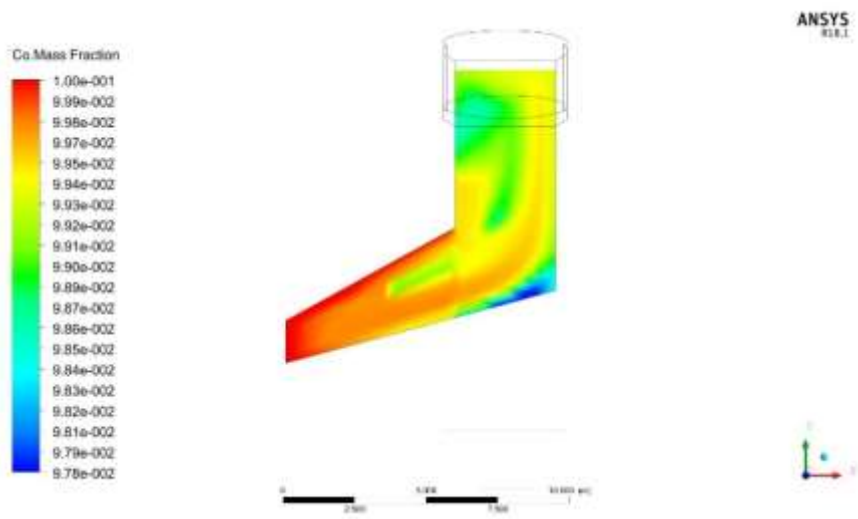
Şekil 3.19. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı CO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

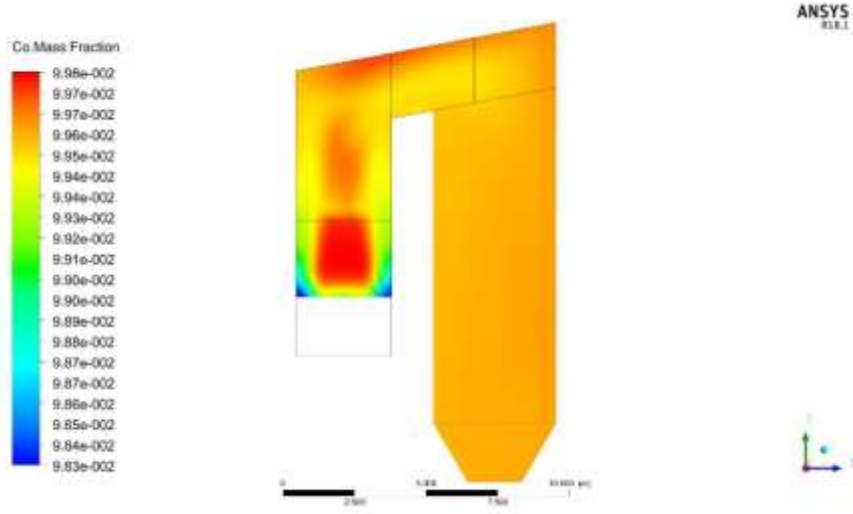


b

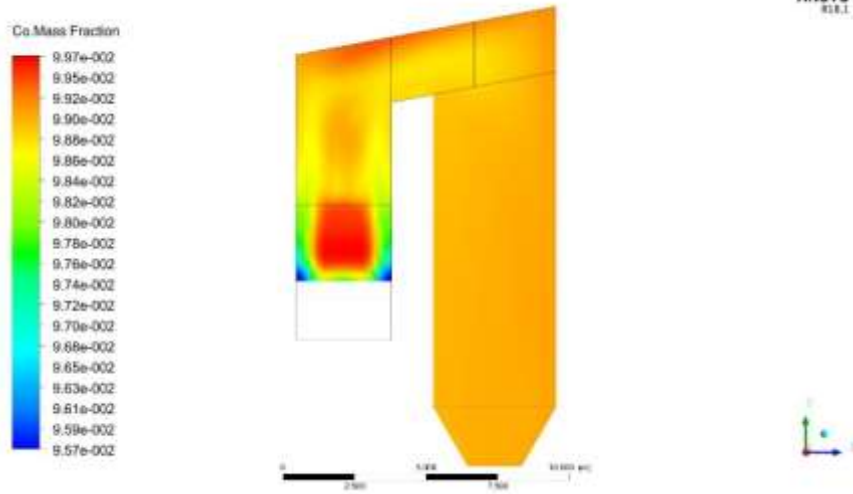


c

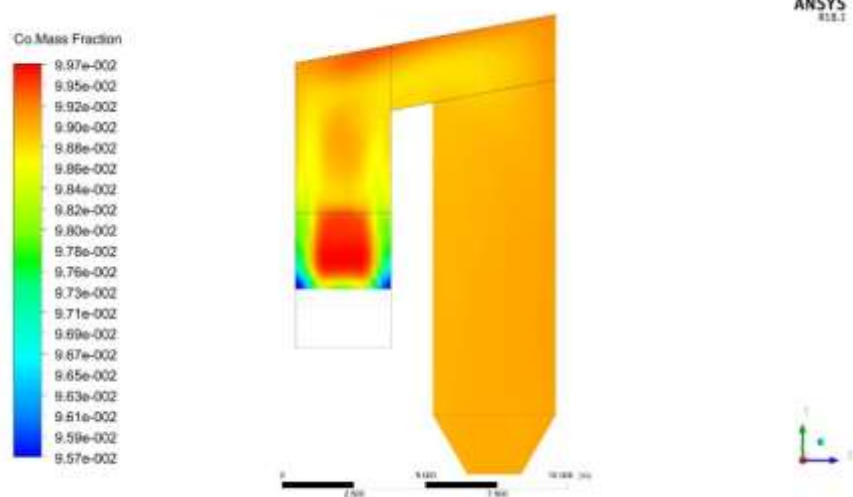
Şekil 3.20. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti CO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

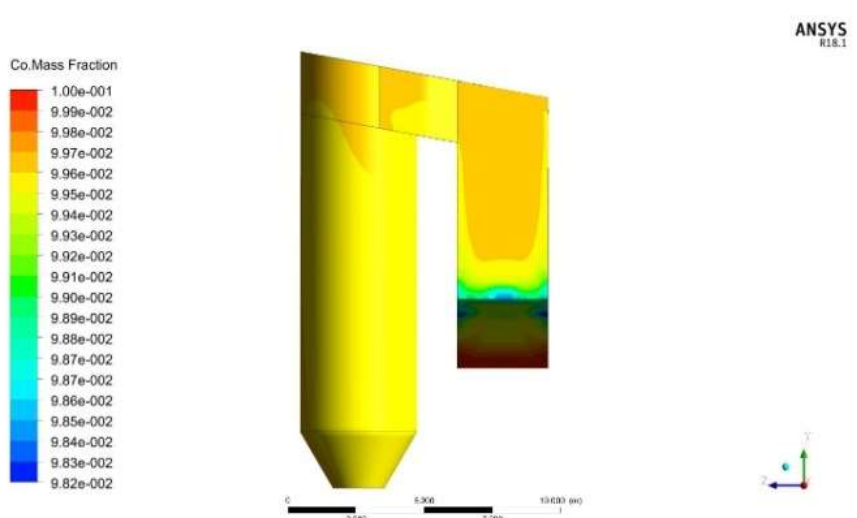
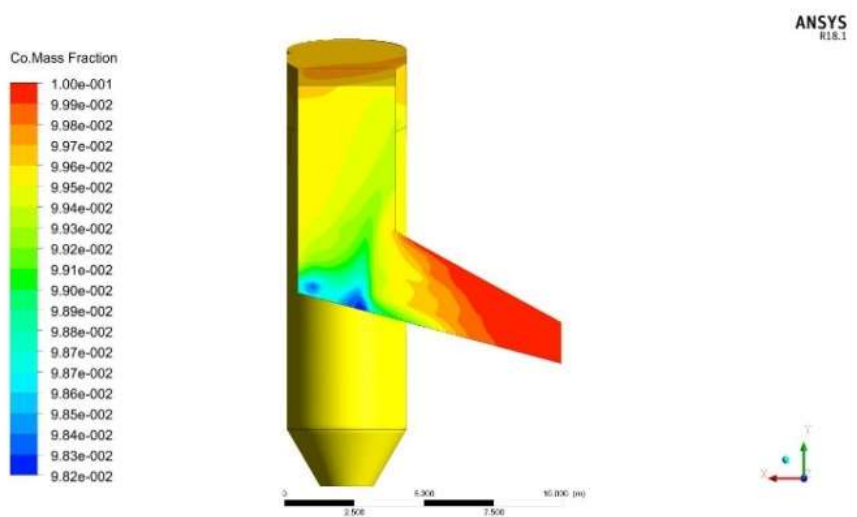
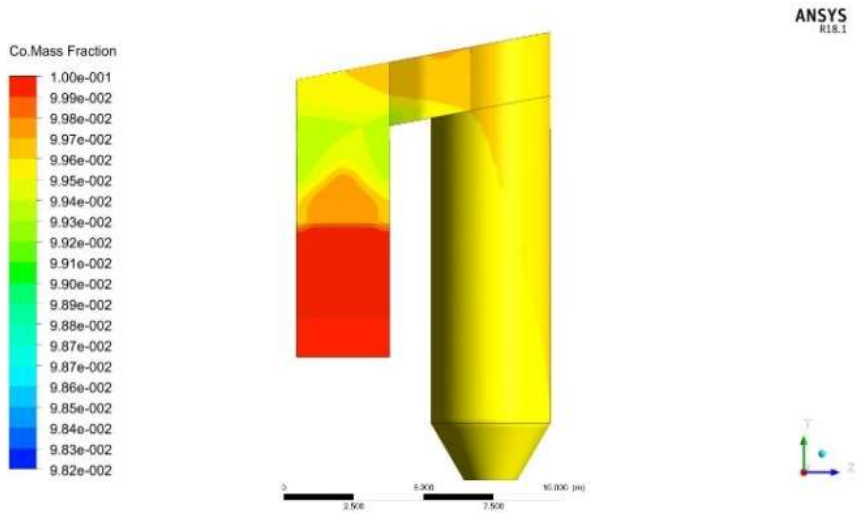


b



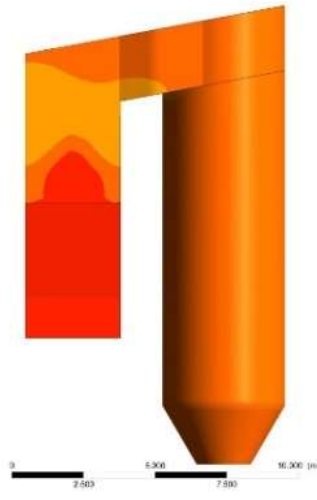
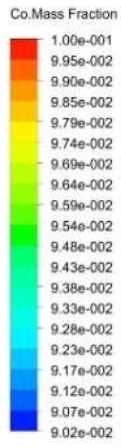
c

Şekil 3.21. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti CO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba

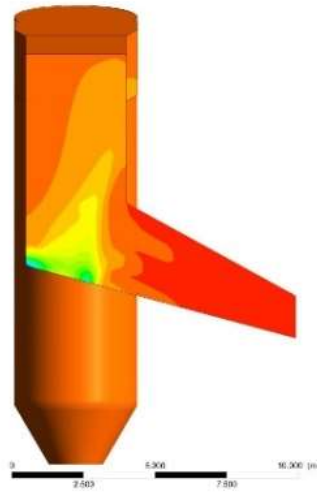
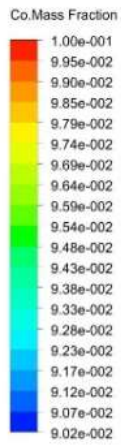


a

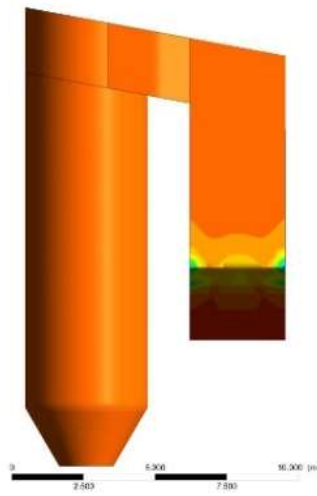
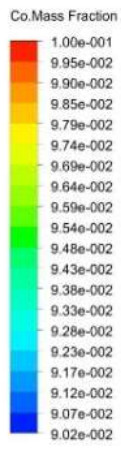




ANSYS R16.1



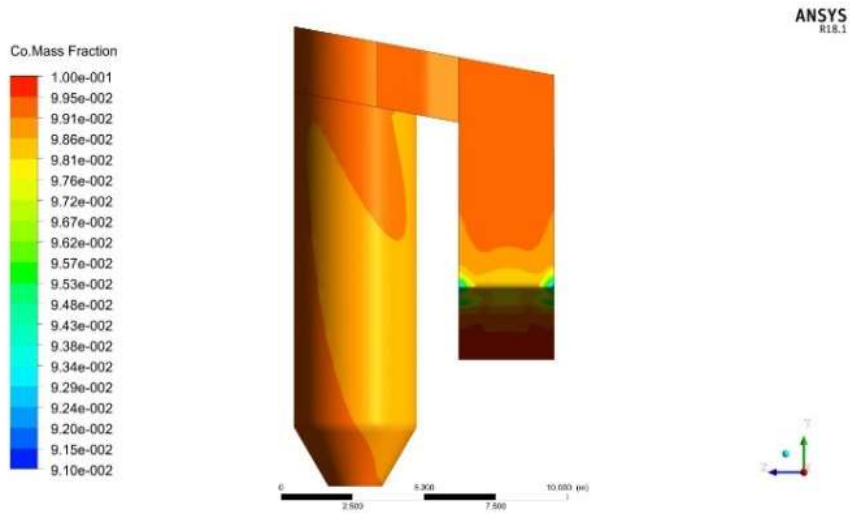
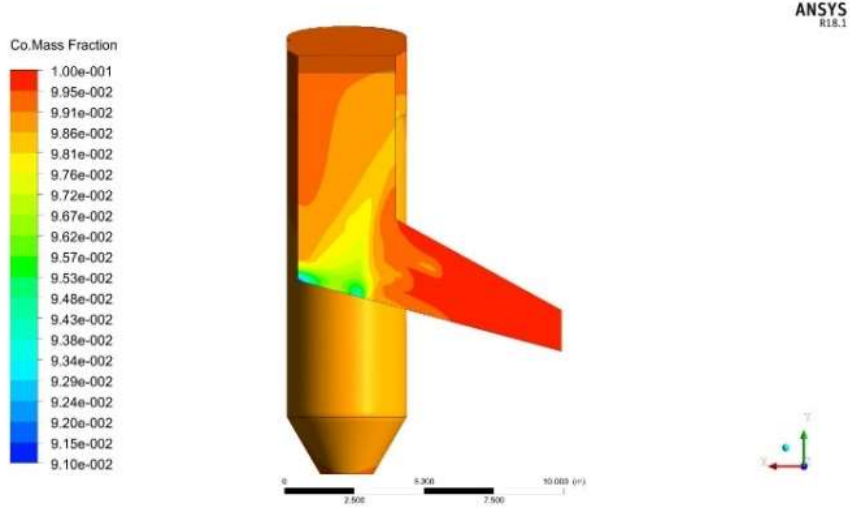
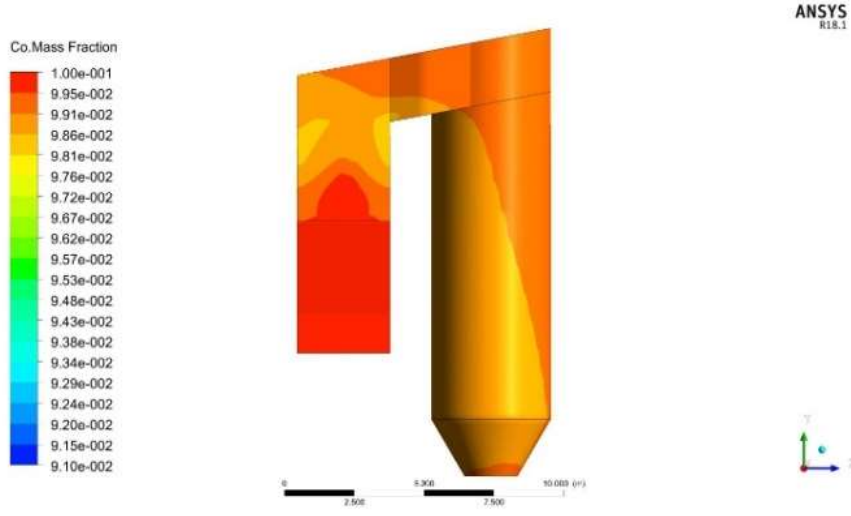
ANSYS R16.1



ANSYS R16.1

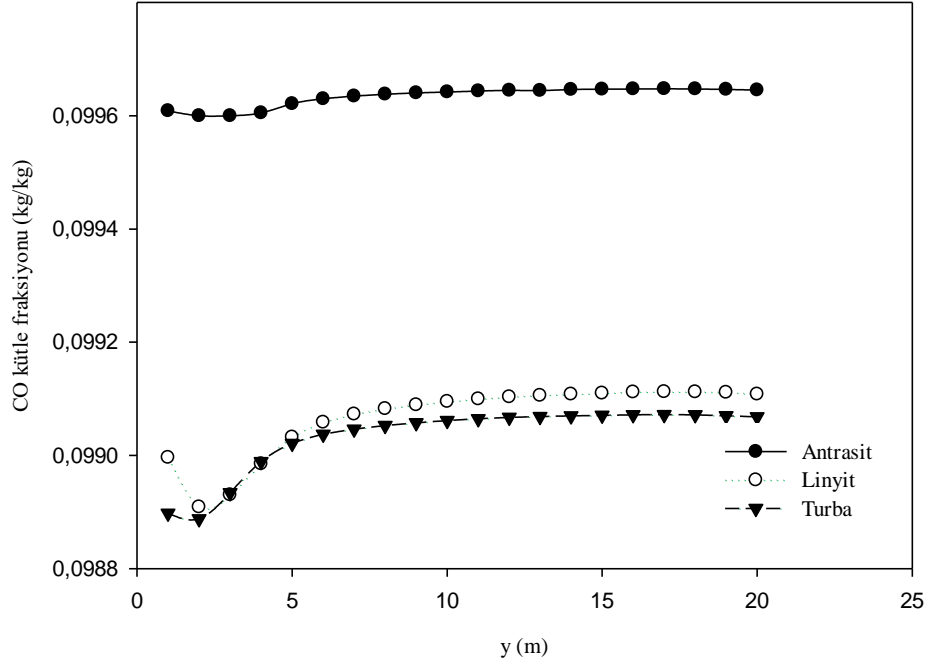


b



c

**Şekil 3.22.** Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin CO emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



**Şekil 3.23.** Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça merkezinden alınan CO sonuçları

### 3.5. Hareketli Iızgaralı Kazandan Elde Edilen CO<sub>2</sub> Sonuçları

ANSYS Fluent programında modellenen hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO<sub>2</sub> emisyon sonuçları aşağıda verilmektedir. CO<sub>2</sub> emisyon sonuçları, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri halinde iki boyutlu, önden, yandan ve arkadan olmak üzere de üç boyutlu olarak sunulmaktadır. Kazanın çıkış parçası olan silindir merkezinden bir çizgi tanımlanmış, bu çizgi üzerinden alınan CO<sub>2</sub> sonuçları grafiğe dökülmüştür.

Şekil 3.24.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO<sub>2</sub> emisyon sonuçları parçalı kesitler halinde verilmektedir. Parçalı kesitler incelendiğinde CO<sub>2</sub> salınımının her üç kömürün yanması sonucunda da benzer seyrettiği görülmektedir. Skala incelendiğinde küçük farklarla, en düşük CO<sub>2</sub> salınımının sırasıyla antrasit, linyit ve turba kömürleri yanması sonucu oluştuğu izlenmektedir.

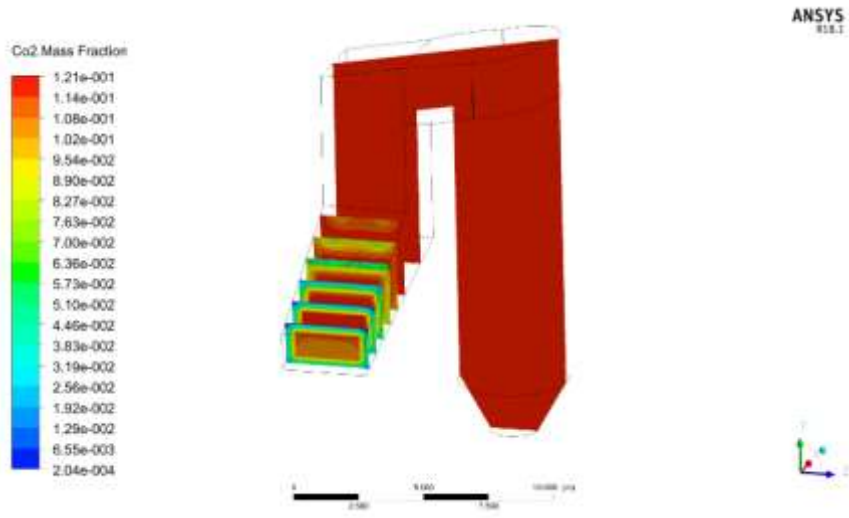
Şekil 3.25.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan CO<sub>2</sub> emisyon sonuçları XY kesitleri halinde verilmektedir. Giriş parçasının ortasından alınan XY kesitleri incelendiğinde üç kömüründe yanma

sonucu oluşan emisyon dağılımının benzerlik gösterdiği, antrasit ve linyit kömürlerinin yanmaları sonucu oluşturdukları emisyon dağılımının sonuçlarının ise neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Her üç kömürün de yanmaları sonucu oluşan emisyon dağılımının, CO<sub>2</sub> salınımı en düşük giriş kısmında oluşmaktadır. CO<sub>2</sub> salınımı kazanın alt ve üst yüzeyini yalayıp artmıştır.

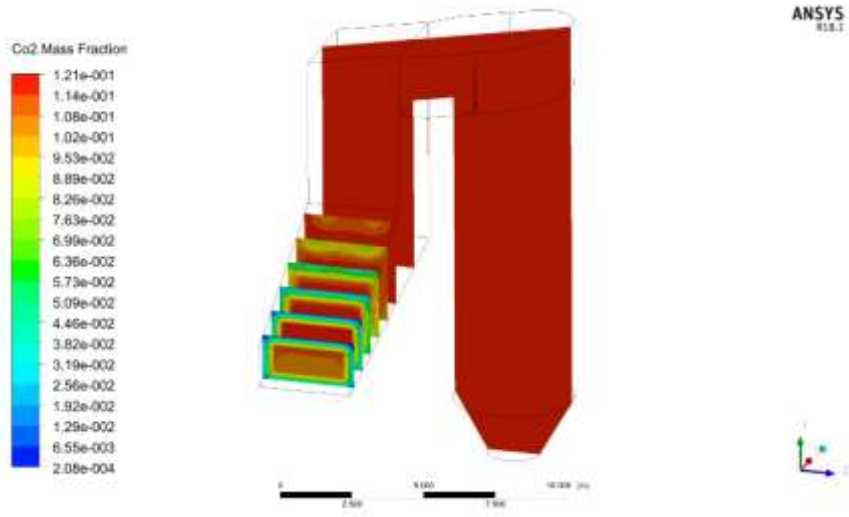
Şekil 3.26.' da hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan CO<sub>2</sub> emisyon sonuçları YZ kesitleri halinde verilmektedir. YZ kesitleri incelendiğinde kazanın giriş parçasının ortasına doğru, CO<sub>2</sub> emisyonunun en yüksek değerlerine ulaştığı, kopuşlarla azalarak ilerlediği, geçiş parçasının üst kısmına doğru yeniden bir artış yaşandığı ve böylece devam ettiği görülmektedir.

Şekil 3.27.' de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan CO<sub>2</sub> kontürleri önden, yandan ve arkadan olmak üzere üç farklı açı ile verilmektedir. Antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan CO<sub>2</sub> emisyonunun en düşük değerleri giriş parçasının ilk yarısındadır. Kazanın giriş parçasının ilk yarısının sonuna doğru CO<sub>2</sub> salınımı başlamış, giriş parçasının ikinci yarısından itibaren artarak devam etmiştir. Emisyon salınımı her üç kömürün yanma sonucunda da aynı değerlerdedir.

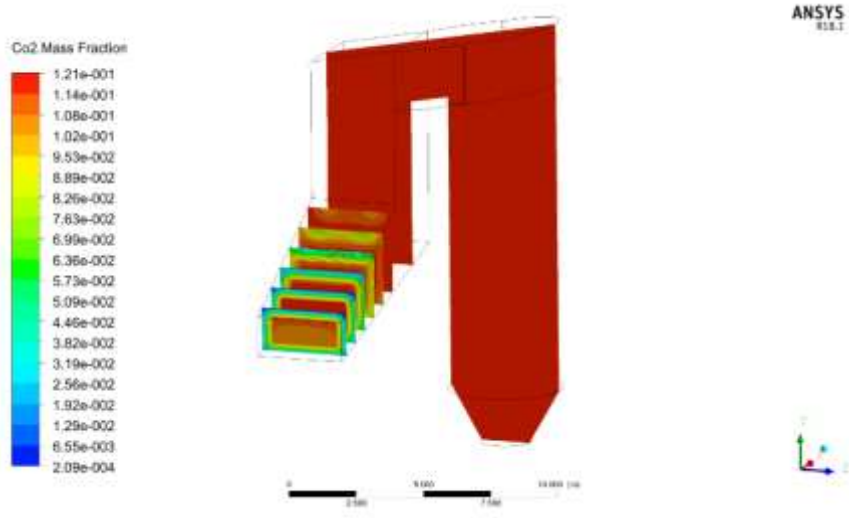
Program da çıkış parçası olan silindirin merkezinden geçen bir çizgi tanımlanarak, bu çizgi üzerinden antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan CO<sub>2</sub> emisyon değerleri elde edilmiş, grafikleştirilmiştir. Şekil 3.28.' de antrasit, linyit, turba kömürlerinin yanma sonucunda oluşan CO<sub>2</sub> değerleri verilmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek CO<sub>2</sub> değerlerinin antrasit kömürünün yanması sonucunda oluştuğu, devamında ise sırasıyla linyit ve turba kömürlerinin yanma sonuçlarının birbirini takip ettiği görülmektedir.



a

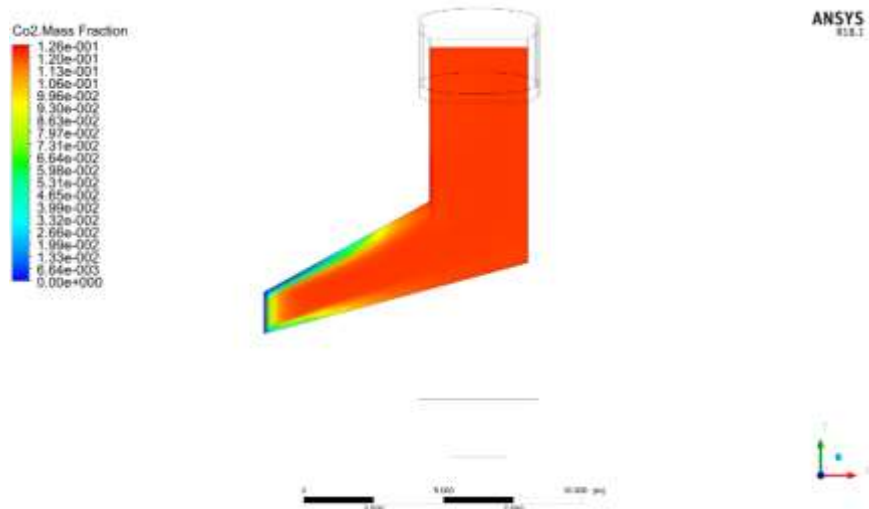


b

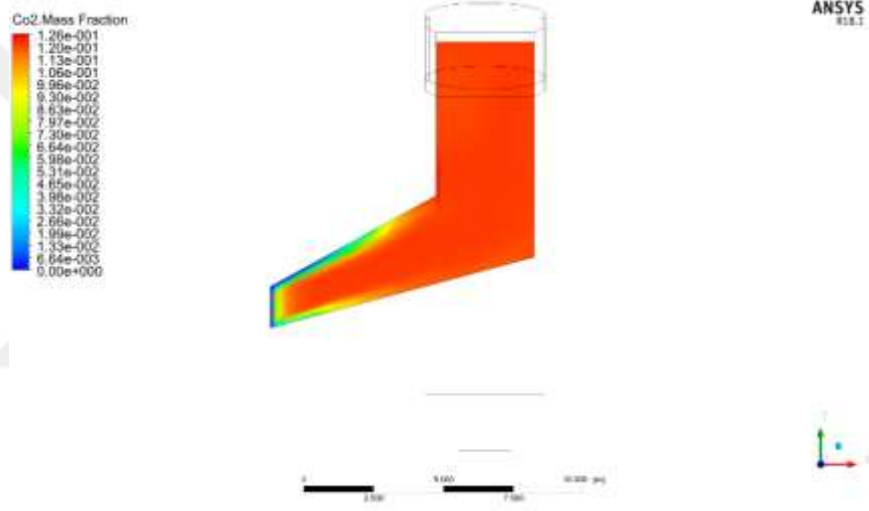


c

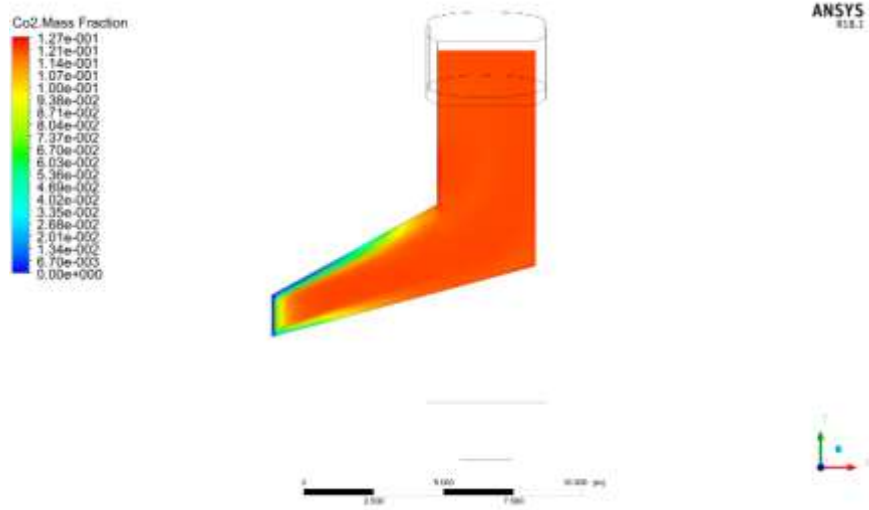
Şekil 3.24. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı CO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

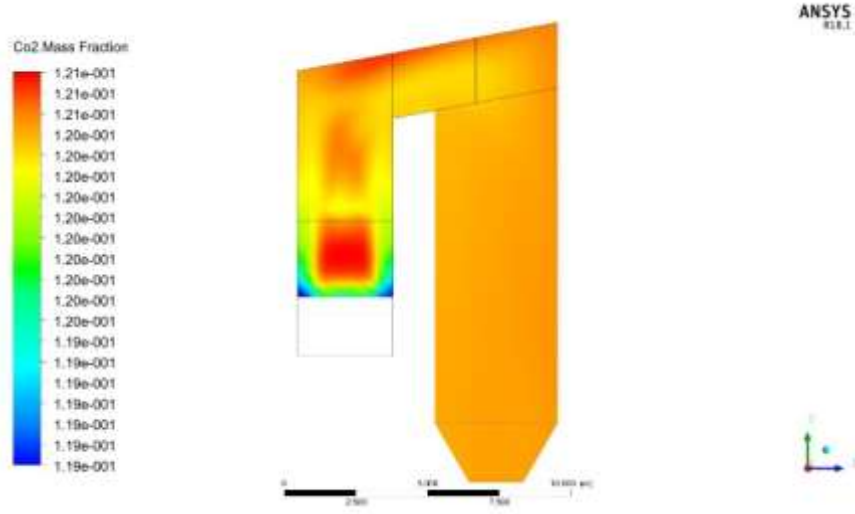


b

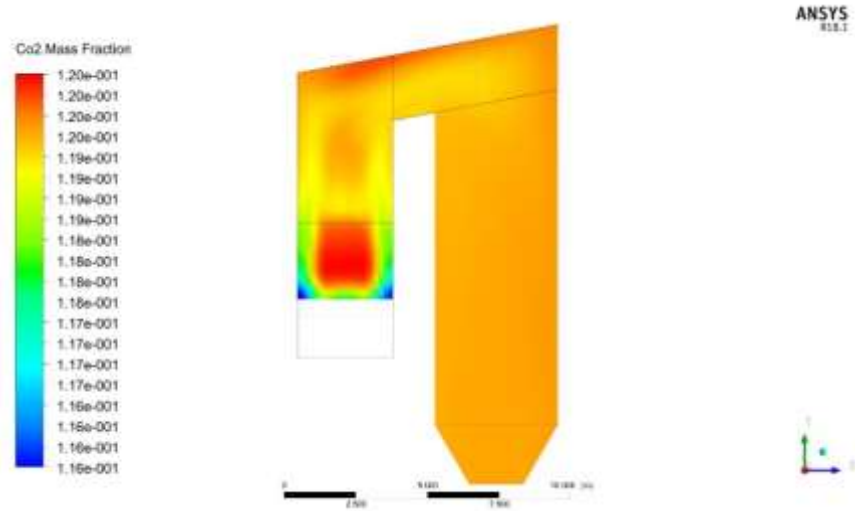


c

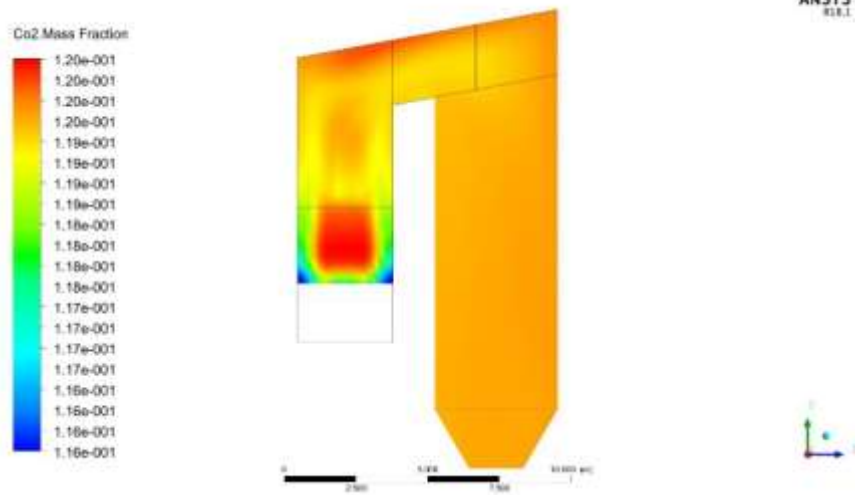
Şekil 3.25. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti CO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

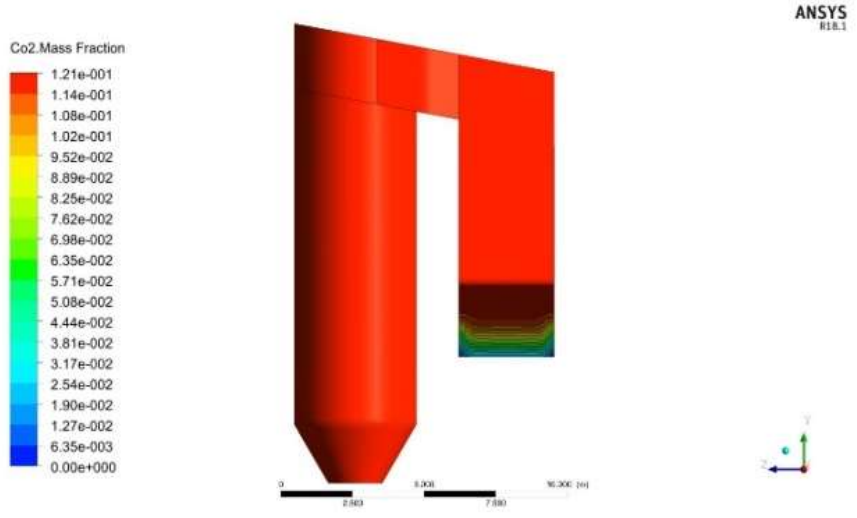
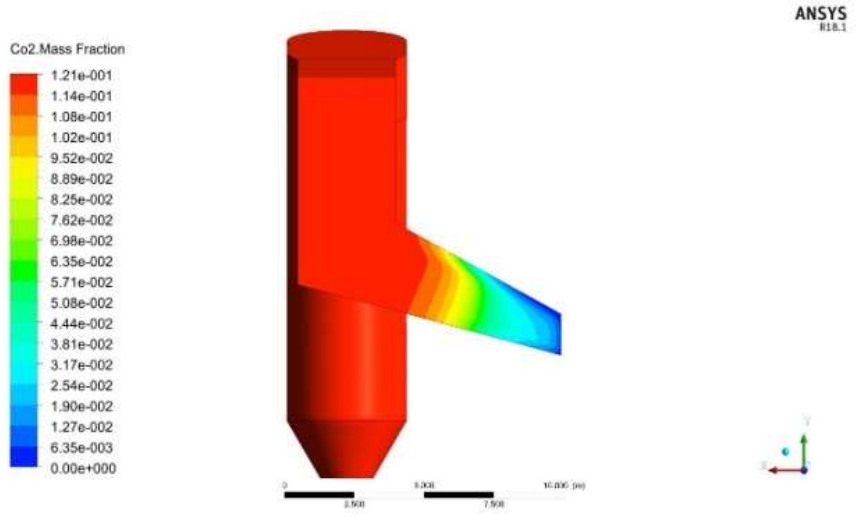
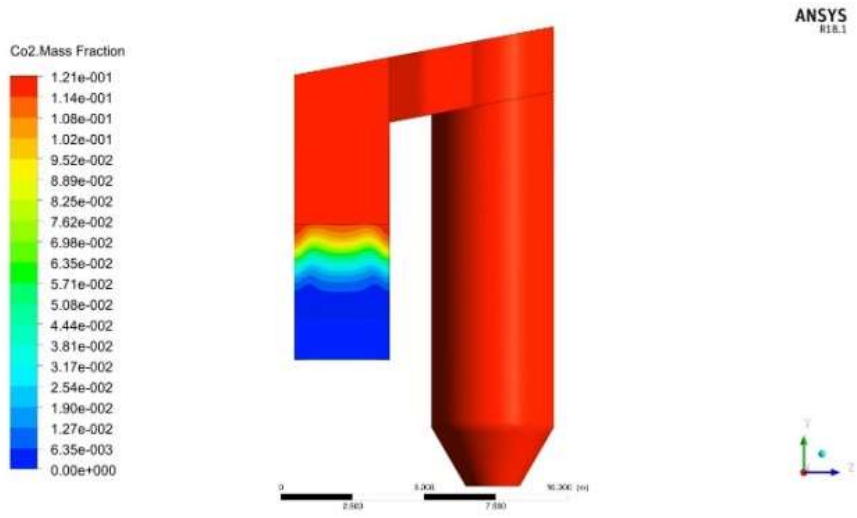


b



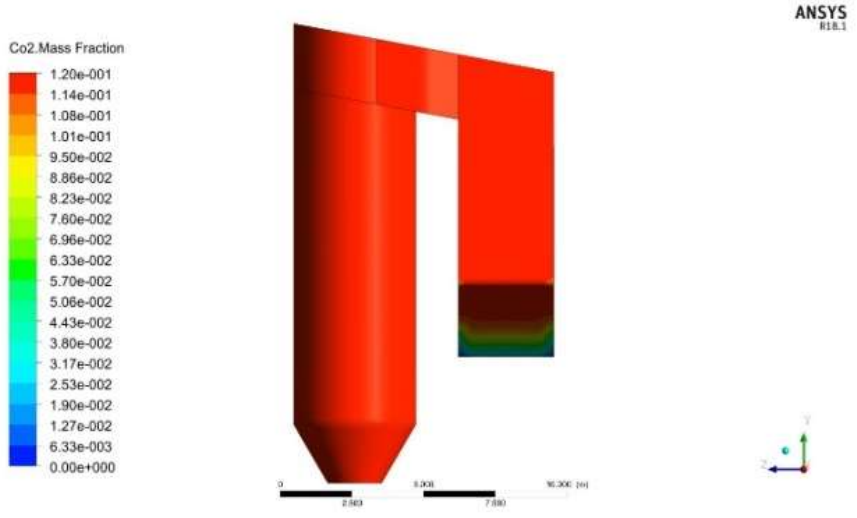
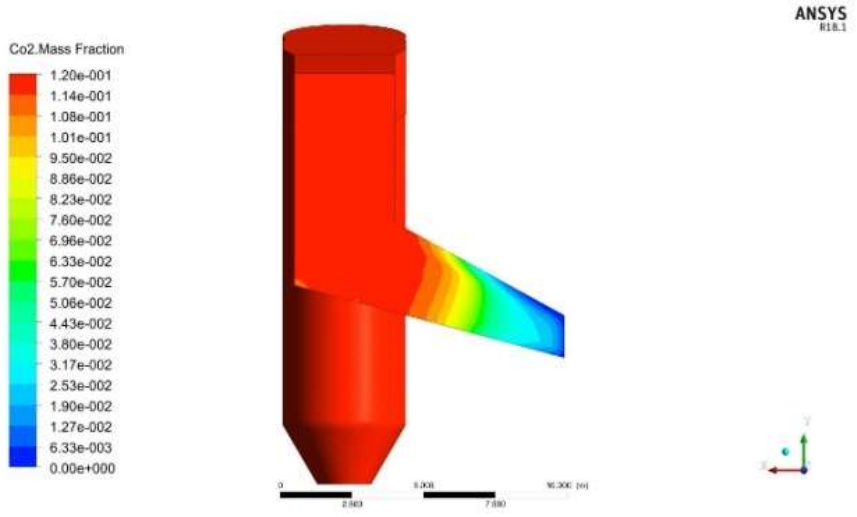
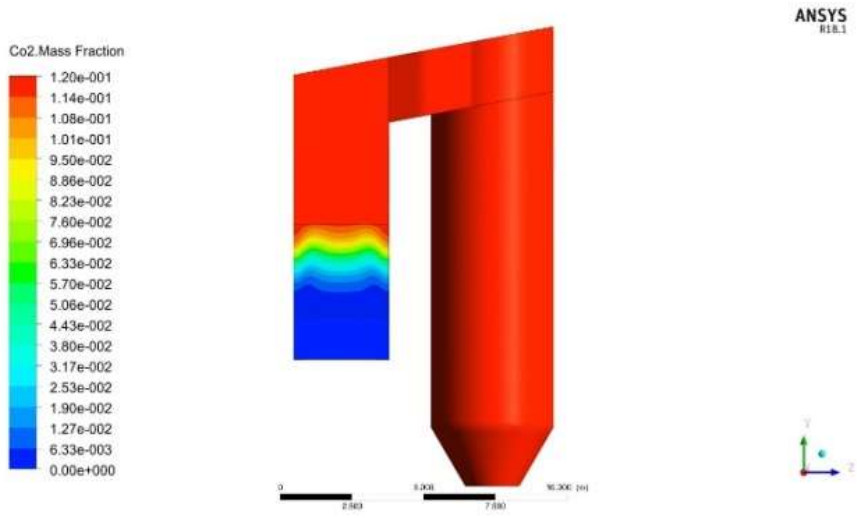
c

Şekil 3.26. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti CO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba

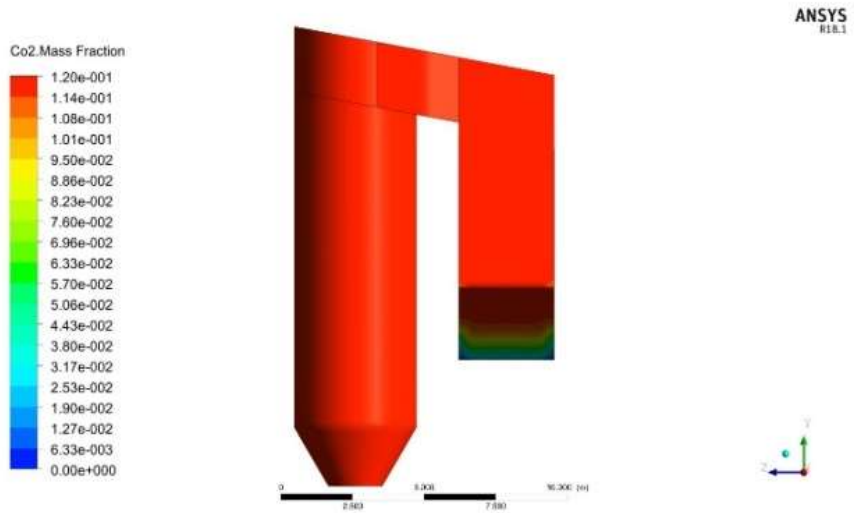
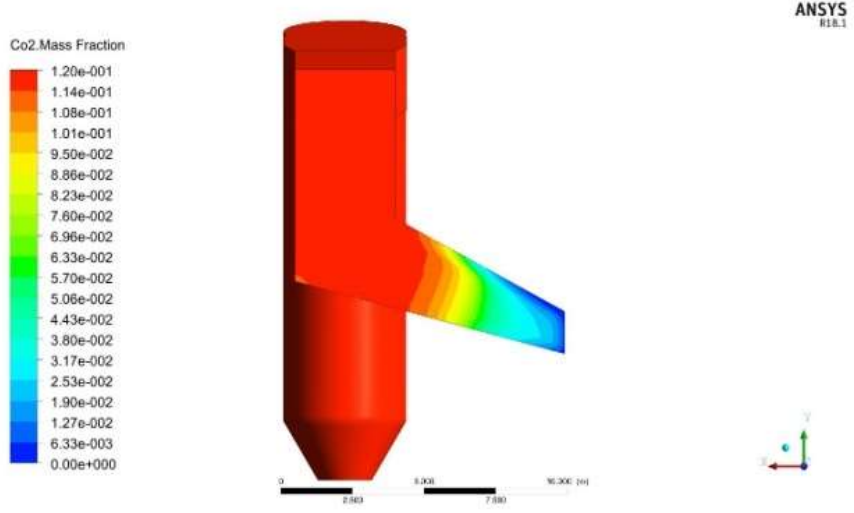
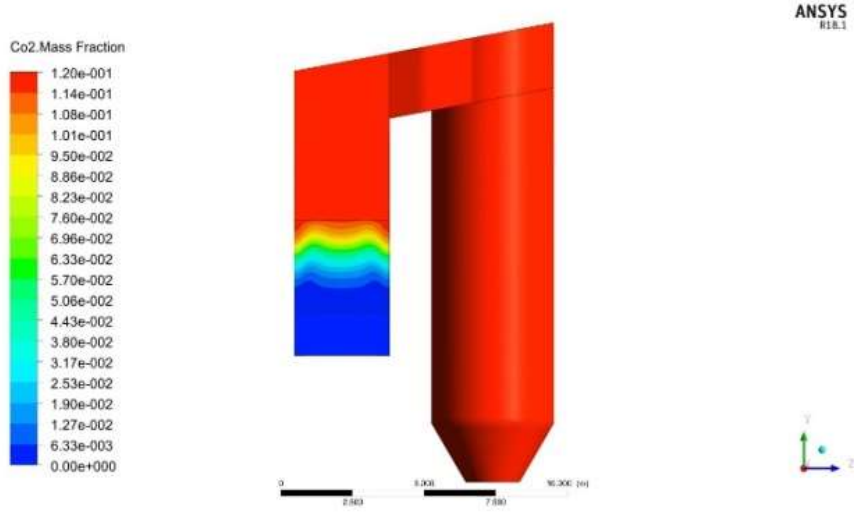


a



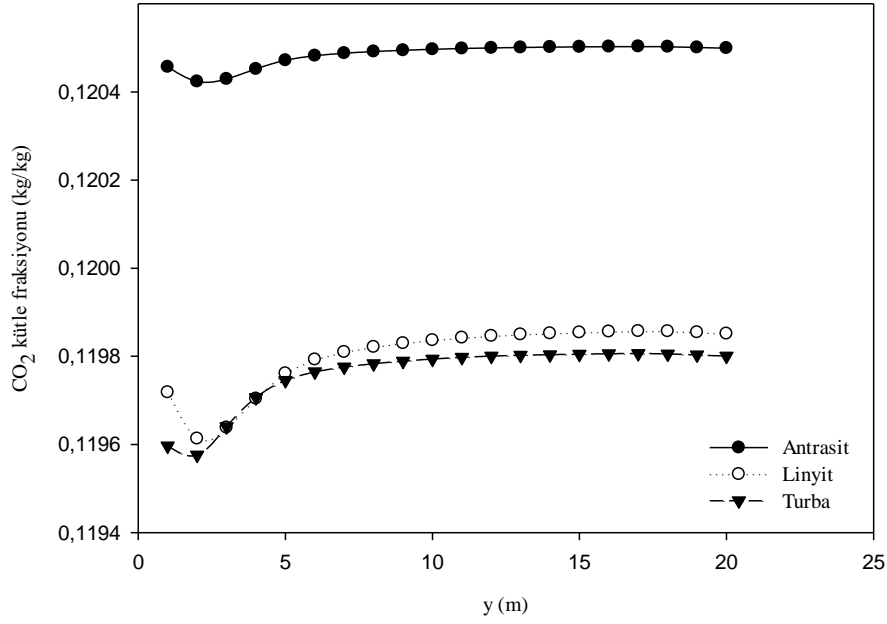


b



c

Şekil 3.27. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin CO<sub>2</sub> emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



**Şekil 3.28.** Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça merkezinden alınan CO<sub>2</sub> sonuçları

### 3.6. Hareketli ızgaralı Kazandan Elde Edilen NO Sonuçları

ANSYS Fluent programında modellenen hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan NO emisyon değerleri aşağıda verilmektedir. NO emisyon sonuçları, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri halinde iki boyutlu, önden, yandan ve arkadan olmak üzere de üç boyutlu olarak sunulmaktadır. Kazanın çıkış parçası olan silindir merkezinden bir çizgi tanımlanmış, bu çizgi üzerinden alınan NO sonuçları grafiğe dökülmüştür.

Şekil 3.29.' da hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan NO emisyon sonuçları parçalı kesitler halinde verilmektedir. Hareketli ızgaralı kazanda NO emisyonu, giriş parçasının ilk yarısında başlamış, ortalara doğru bir artış göstermiş, geçiş parçasının üst kısmını yalayarak ilerlemiş daha sonra azalarak stabilize olmuştur. NO salınımı en yüksek antrasit kömürünün yanması sonucu oluşurken linyit ve turba kömürlerinin yanma sonucu değerleri neredeyse aynıdır.

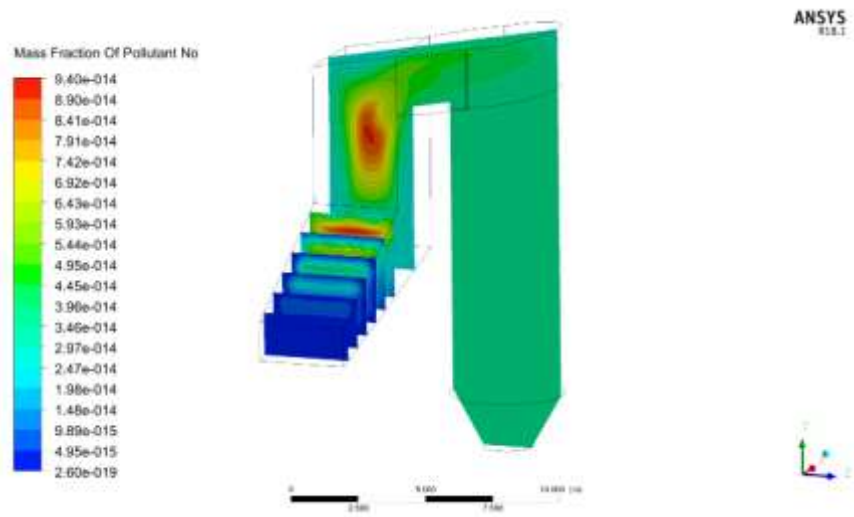
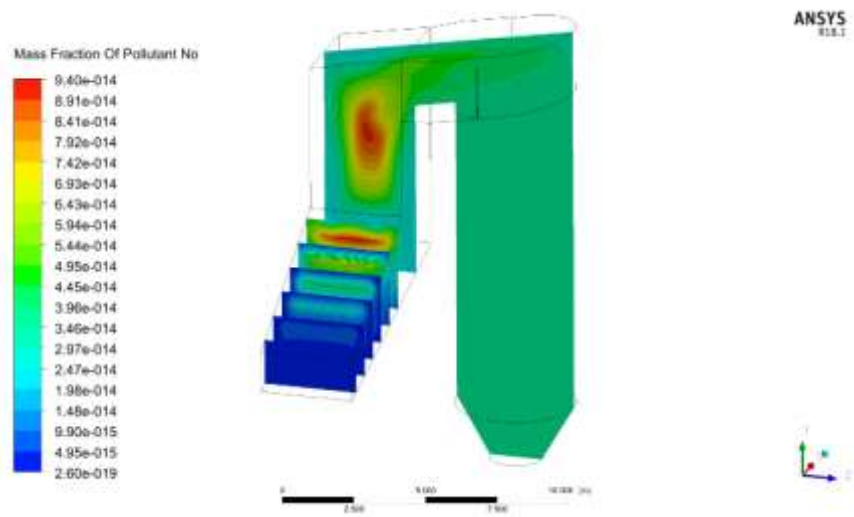
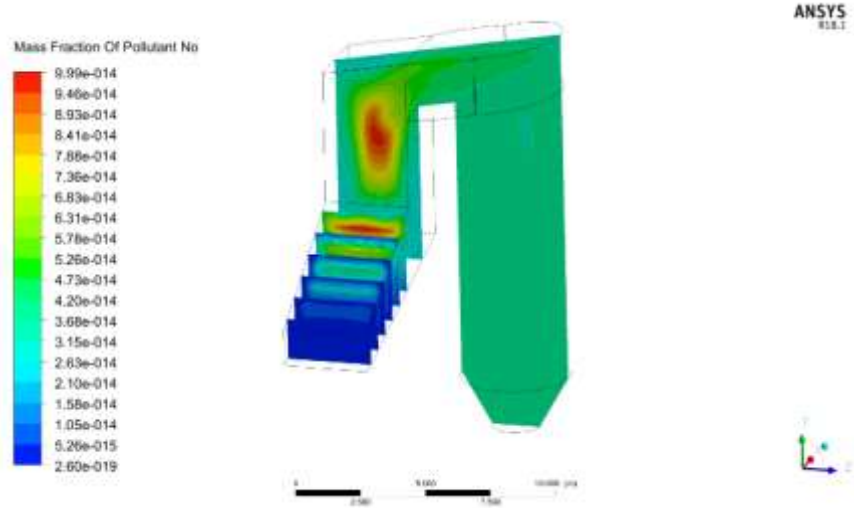
Şekil 3.30.' da hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinde yanması sonucu oluşan NO emisyon sonuçları XY kesitleri halinde verilmektedir. XY kesitleri incelendiğinde antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanma sonuçlarının benzer bir dağılımı olduğu görülmektedir. Her üç kömürün de yanma sonucu NO salınımları, giriş

kısımında en yüksek değerlerdedir. Bu yüksek değerler giriş parçasının üst kısmında devam etmekte, parça yukarı doğru kıvrılırken oluşan alt keskin köşe de azalma görülmektedir. Parçanın orta kısmında ise oluşan döngüyle NO emisyonunun azaldığı izlenmektedir.

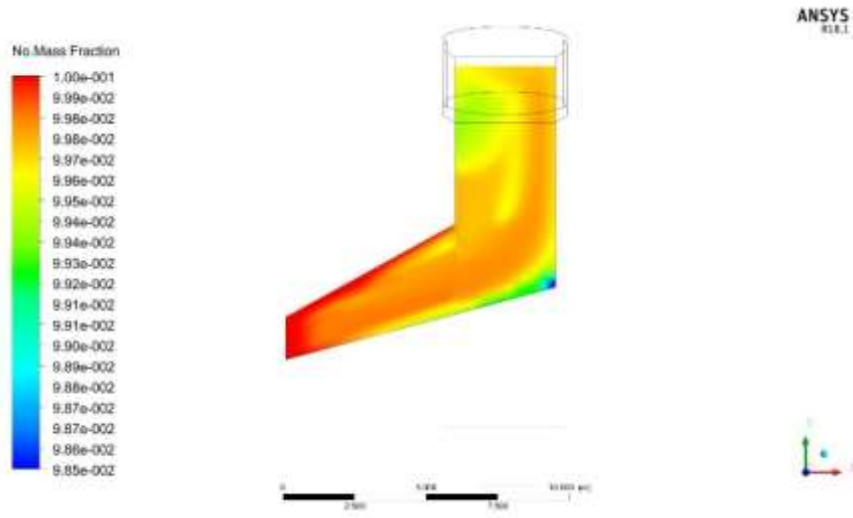
Şekil 3.31.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşturdukları NO emisyon sonuçları, YZ kesitleri halinde verilmektedir. YZ kesitleri incelendiğinde kazanın giriş parçasının ortasına doğru, NO emisyonunun arttığı daha sonra azalarak ilerlediği görülmektedir. Antrasit kömürünün yanma sonucu oluşan NO emisyon salınımının, benzer eğilim gösteren linyit ve turba kömürlerinin yanma sonucu oluşan NO emisyon salınımlarına göre daha yüksektir.

Şekil 3.32.' de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan NO emisyon salınımı, önden, yandan ve arkadan olmak üzere üç farklı açı ile verilmektedir. NO emisyon sonuçları incelendiğinde en yüksek emisyon çıkışının sıcaklığın en yüksek seyrettiği kazanın giriş bölümünde olduğu görülmektedir. Devamında kazan sıcaklığının azalarak ilerlemesi ve yayılımıyla geçiş parçasının üst kısmına doğru NO emisyonunun azalarak ilerlediği, parça daralırken yeniden artış olduğu ve çıkış parçasında oluşan döngüyle azalarak ilerlediği görülmektedir.

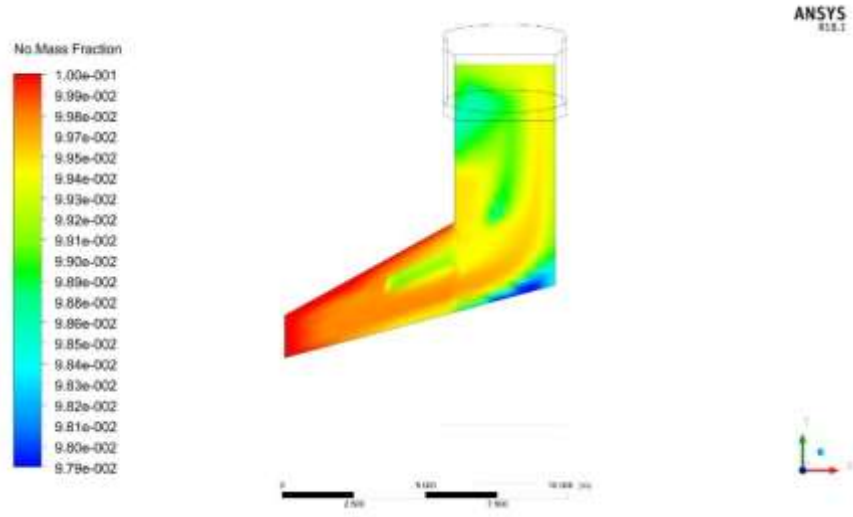
ANSYS Fluent programında çıkış parçası olan silindirin merkezinden geçen bir çizgi tanımlanarak, bu çizgi üzerinden antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanma sonucu oluşan NO emisyon salınımlarının, değerleri elde edilmiş, grafikleştirilmiştir. Şekil 3.33.' de grafik görülmektedir. Grafığe bakıldığında en yüksek NO değerlerinin antrasit kömürünün yanması sonucunda oluştuğu, sırasıyla linyit ve turba kömürlerinin ise takip ettiği görülmektedir.



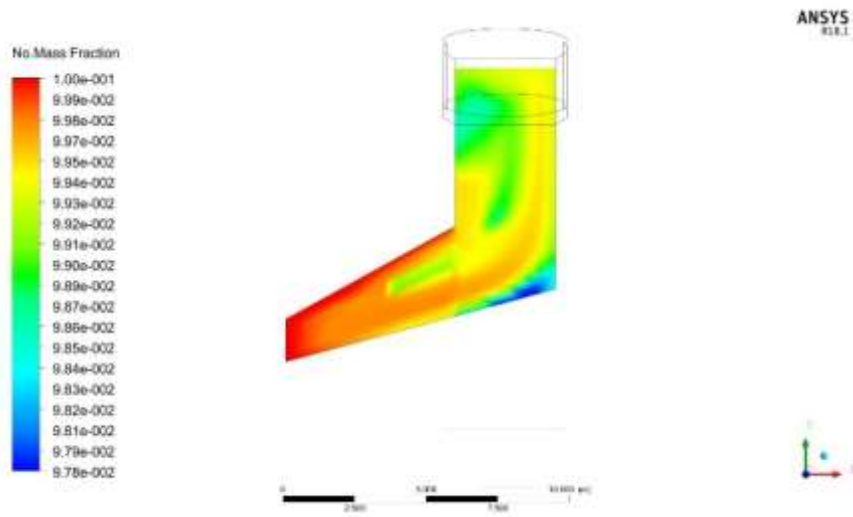
Şekil 3.29. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı NO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

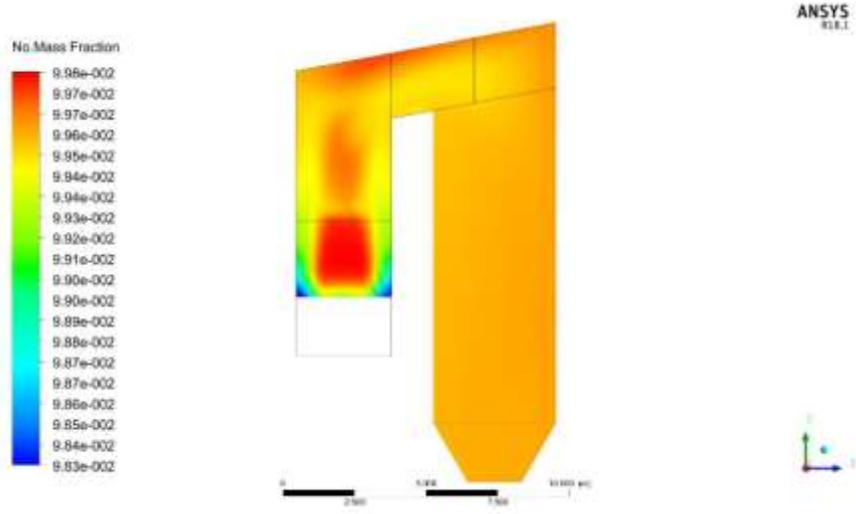


b

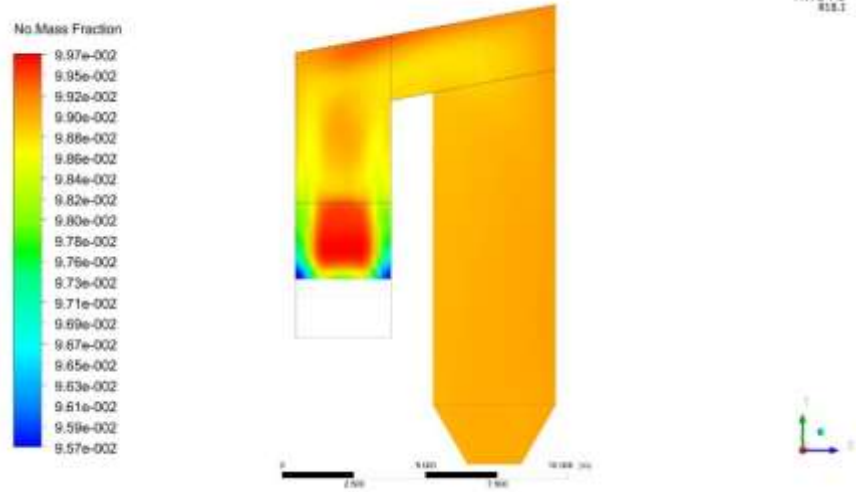


c

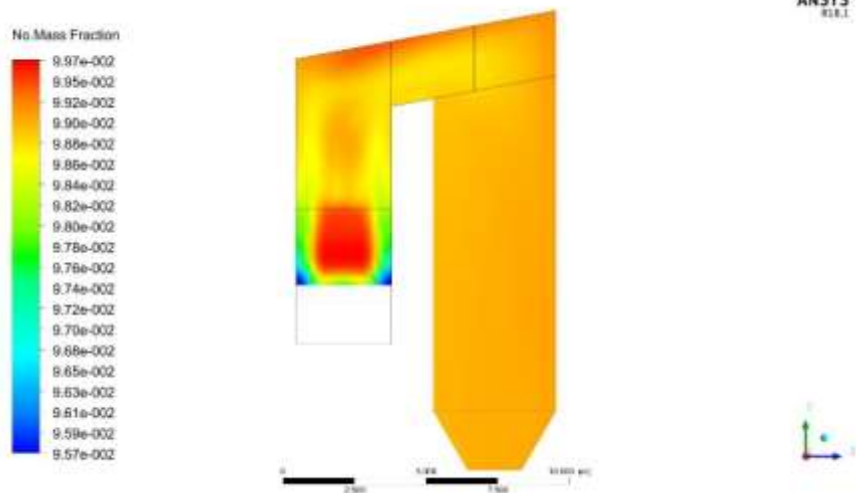
Şekil 3.30. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti NO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

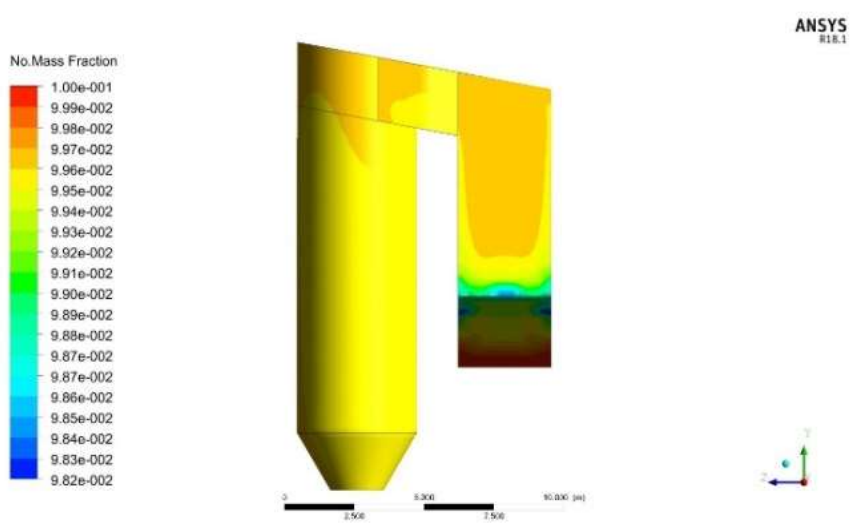
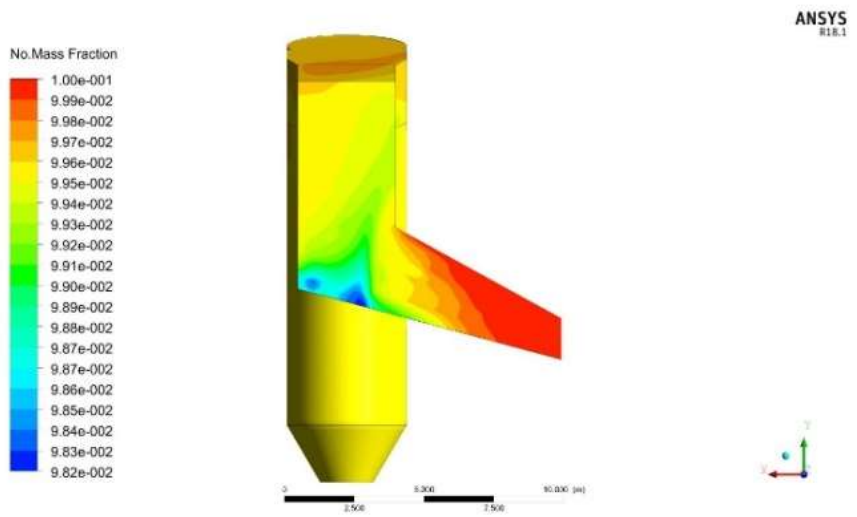
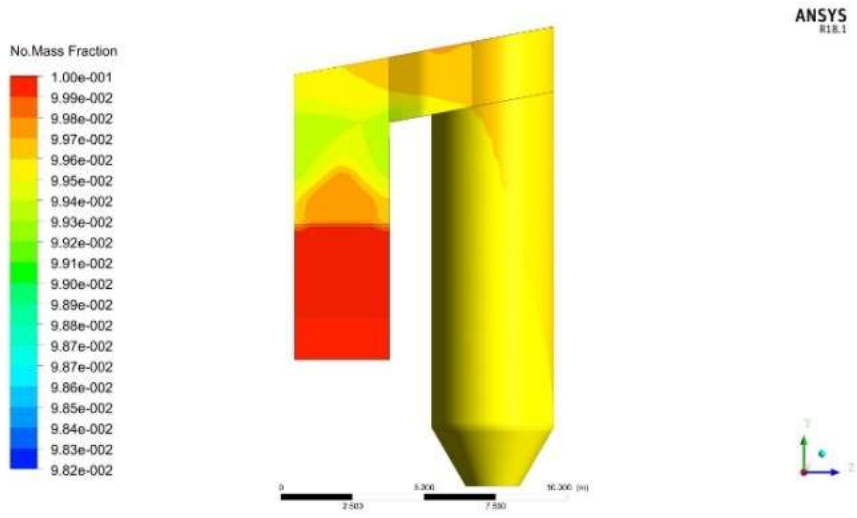


b



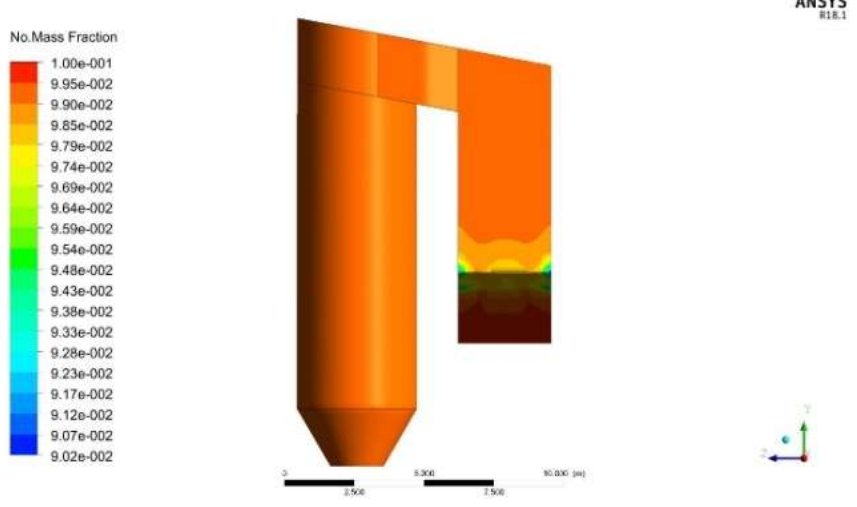
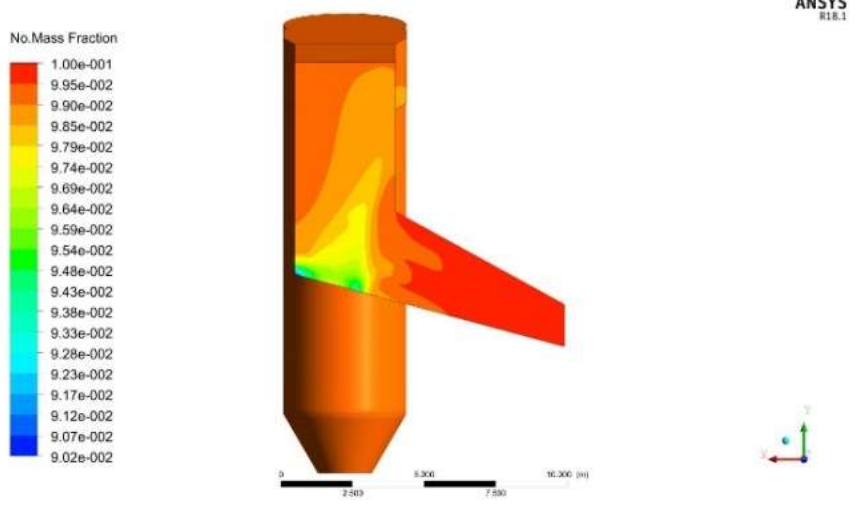
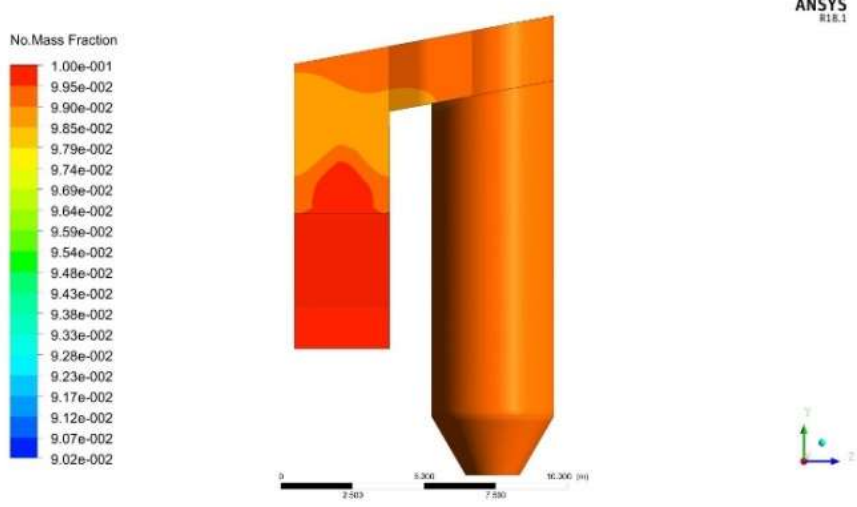
c

Şekil 3.31. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti NO eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba

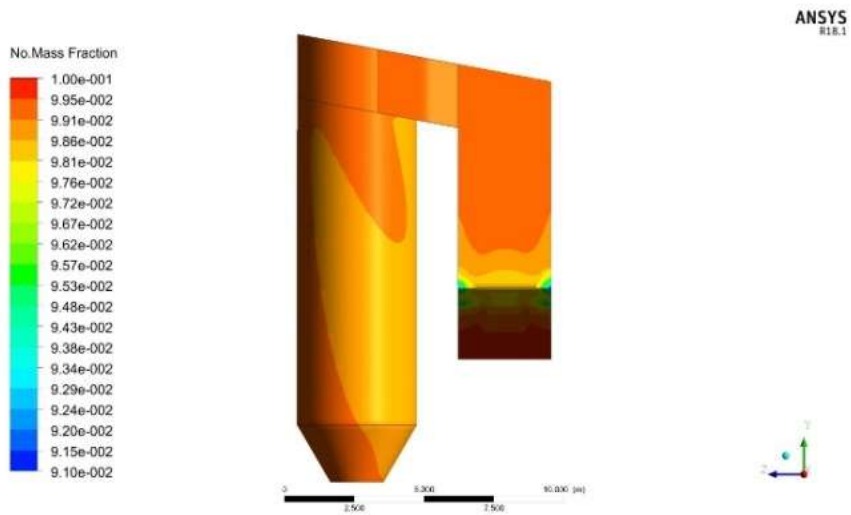
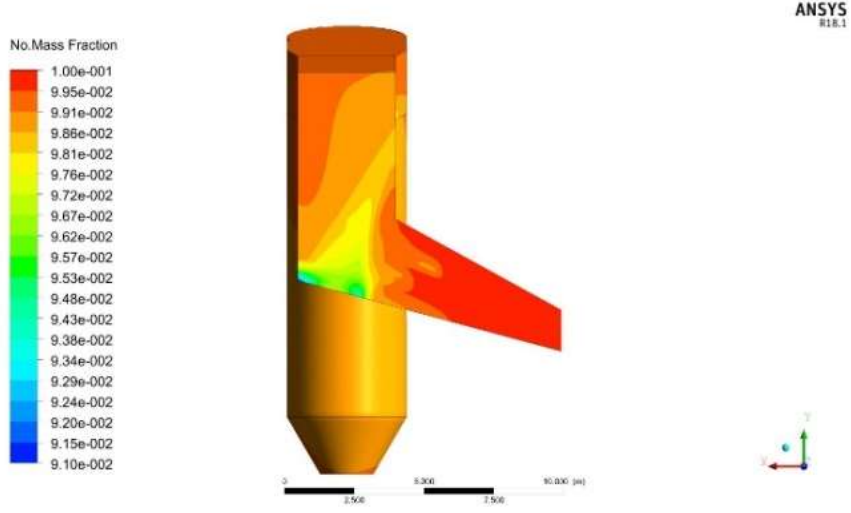
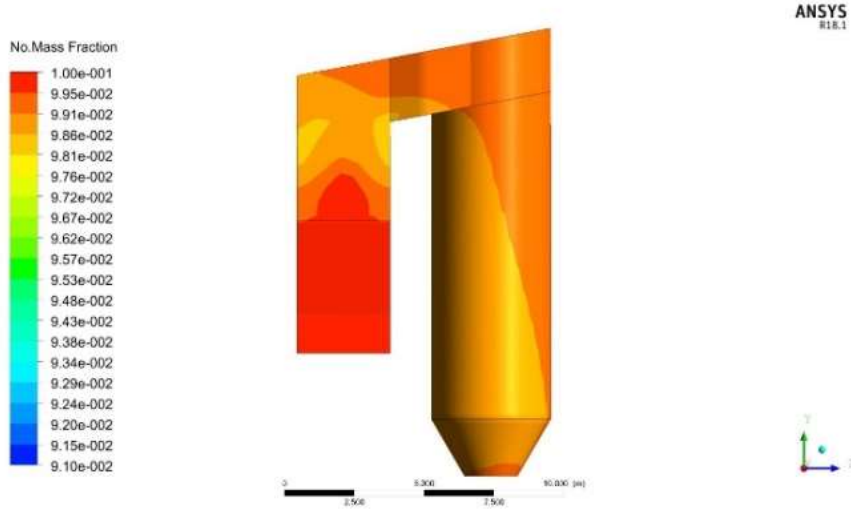


a



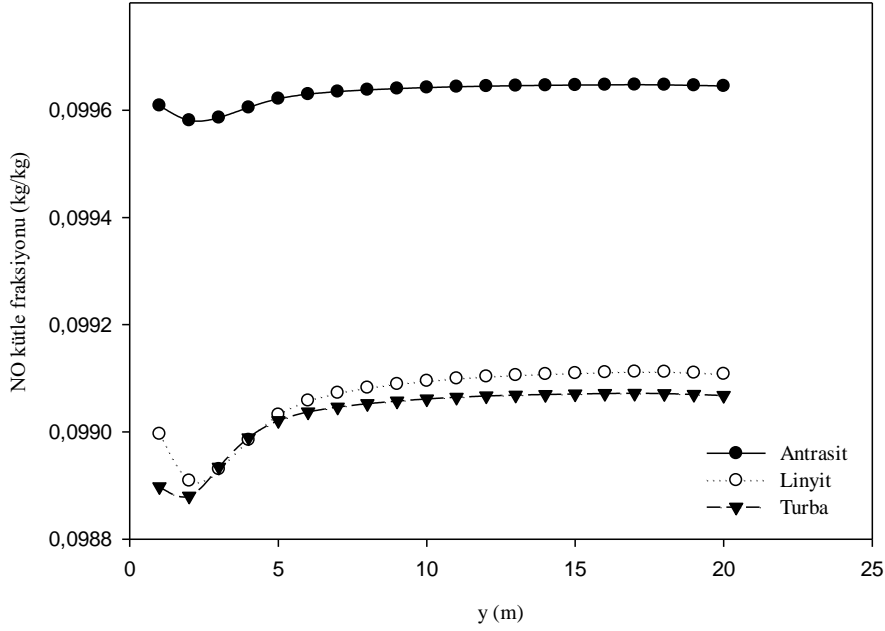


b



c

**Şekil 3.32.** Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin NO emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



Şekil 3.33. Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça merkezinden alınan NO sonuçları

### 3.7. Hareketli ızgaralı Kazandan Elde Edilen NO<sub>2</sub> Sonuçları

ANSYS Fluent programında modellenen hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan NO<sub>2</sub> emisyon değerleri aşağıda verilmektedir. NO<sub>2</sub> emisyon sonuçları, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri halinde iki boyutlu, önden, yandan ve arkadan olmak üzere de üç boyutlu olarak sunulmaktadır. Kazanın çıkış parçası olan silindir merkezinden bir çizgi tanımlanmış, bu çizgi üzerinden alınan NO<sub>2</sub> sonuçları grafiğe dökülmüştür.

Şekil 3.34.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan NO<sub>2</sub> emisyon sonuçları parçalı kesitler halinde verilmektedir. Hareketli ızgaralı kazanda NO<sub>2</sub> emisyonu, yanmanın başlamasıyla başlamış, giriş parçasının ortasından sonra artışı durmuş, stabilleşerek ilerlemiştir. NO<sub>2</sub> emisyonu, benzer bir yayılım gösterirken en yüksek değerler sırasıyla turba, linyit ve antrasit kömürlerinin yanması sonucunda görülmüştür.

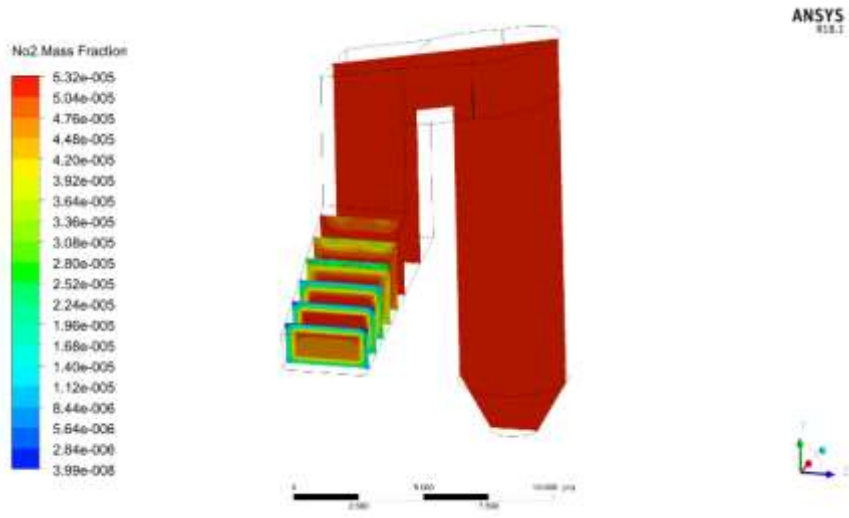
Şekil 3.35.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan NO<sub>2</sub> emisyon sonuçları, XY kesitleri halinde verilmektedir. XY kesitleri incelendiğinde her üç kömür yanması sonucunda da benzer bir yayılım olduğu daha iyi görülmektedir. Hareketli ızgaralı kazanın girişinde ve kazanın alt-üst kısımlarında

en düşük değerlere sahip olan NO<sub>2</sub> emisyonu ortalara doğru artış göstererek ilerlemiştir. En düşük NO<sub>2</sub> emisyonu linyit kömürünün yanması sonucunda salınmaktadır.

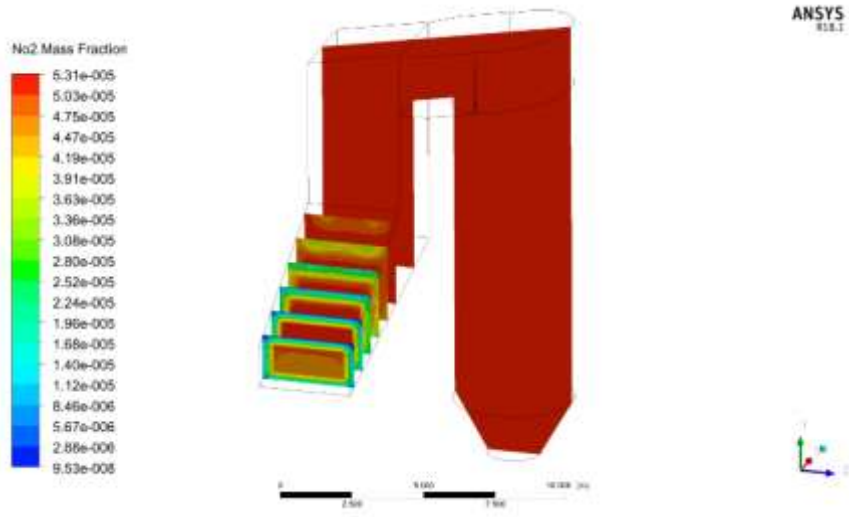
şekil 3.36.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kmrlerinin yanmaları sonucu oluşan NO<sub>2</sub> emisyon sonuçları, YZ kesitleri halinde verilmektedir. YZ kesitleri incelendiğinde kazanın giriş parçasının ortasına doğru, NO<sub>2</sub> emisyonunun arttığı daha sonra azalarak ilerlediği görülmektedir. En yüksek NO<sub>2</sub> emisyonu antrasit kömürünün yanması sonucu oluştuğu görülmektedir.

şekil 3.37.' de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kmrlerinde yanma sonucu oluşan NO<sub>2</sub> kontürleri önden, yandan ve arkadan olmak üzere üç farklı aı ile verilmektedir. NO<sub>2</sub> emisyon sonuçları incelendiğinde en düşük emisyon çıkışının kazanın giriş bölümünde olduğu görülmektedir. Giriş parçasının yarısından yukarıya doğru NO<sub>2</sub> emisyonu artmakta ve böylece devam etmektedir.

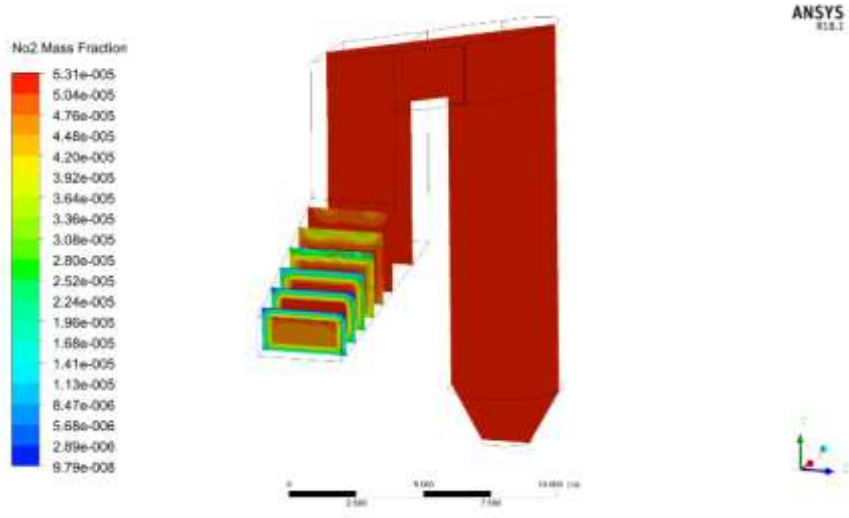
ANSYS Fluent programında, çıkış parçası olan silindirin merkezinden geçen bir çizgi tanımlanarak, bu çizgi üzerinden antrasit, linyit ve turba kmrlerinde yanma sonucu oluşan NO<sub>2</sub> emisyon değerleri elde edilmiş, grafikleştirilmiştir. şekil 3.38.' de grafik görülmektedir. Grafiğe bakıldığında hareketli ızgaralı kazandan çıkan NO<sub>2</sub> emisyonu en yüksek antrasit kömürünün yanması sonucu oluştuğu görülmektedir.



a



b

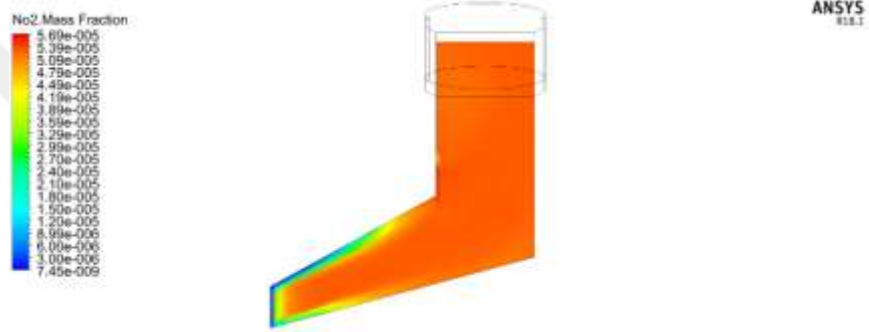


c

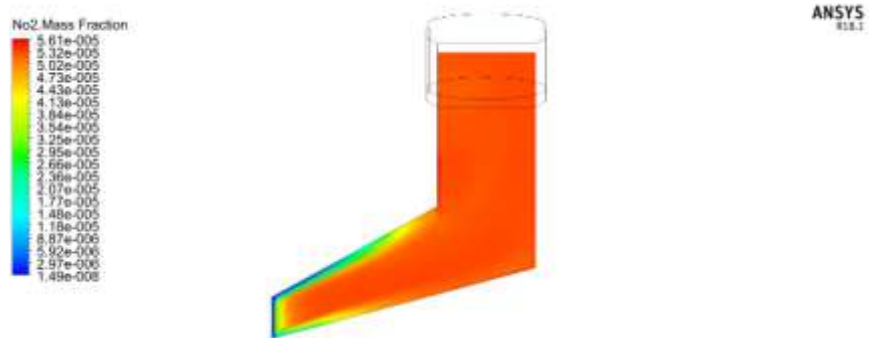
Şekil 3.34. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle NO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

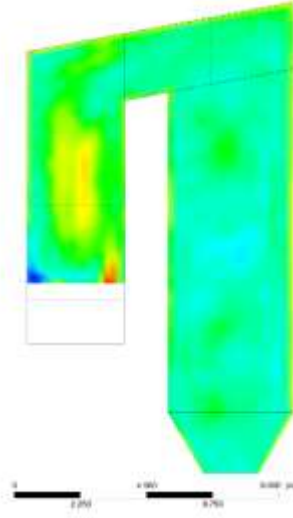
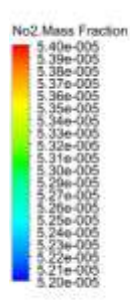


b



c

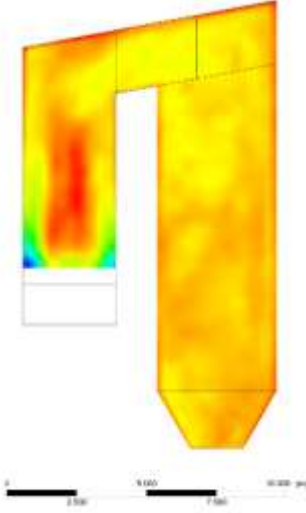
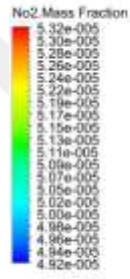
Şekil 3.35. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti NO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



ANSYS  
R18.1



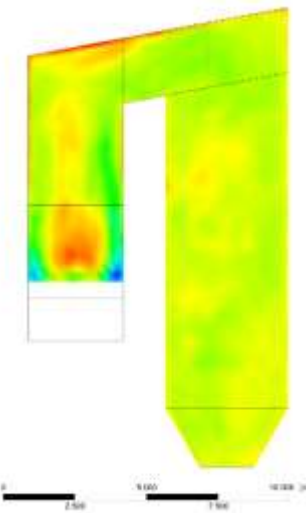
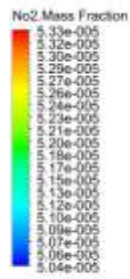
a



ANSYS  
R18.1



b

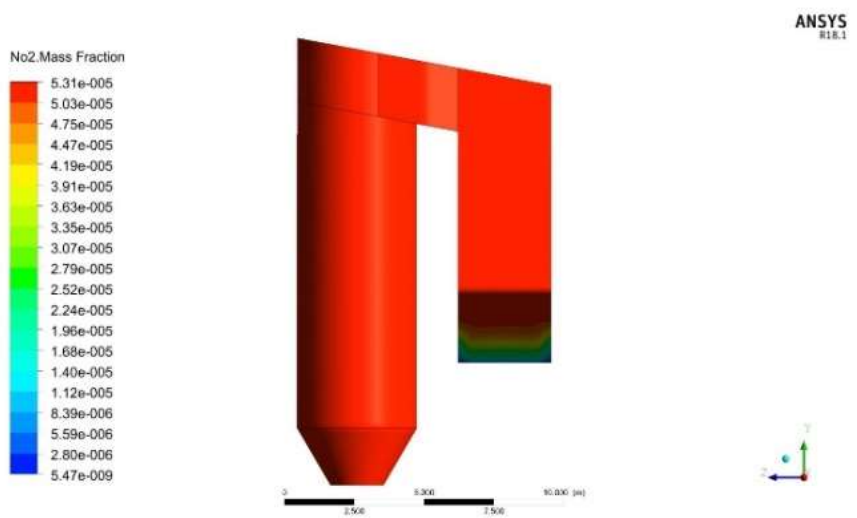
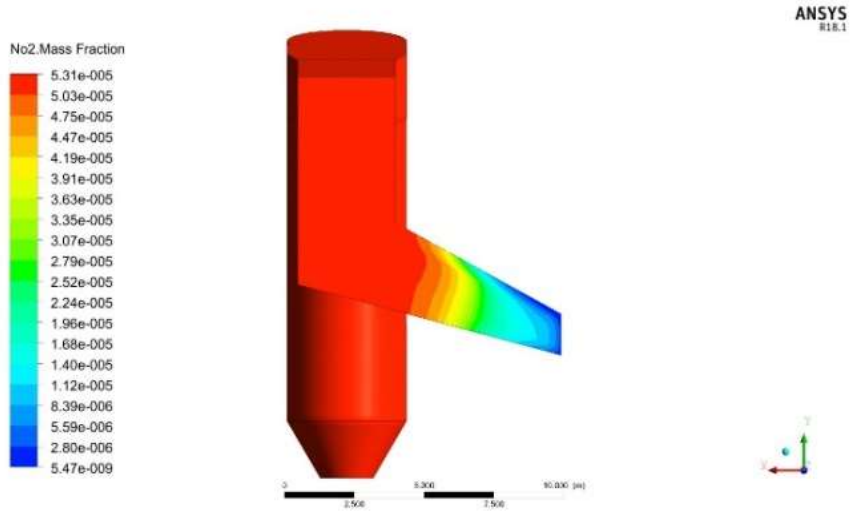
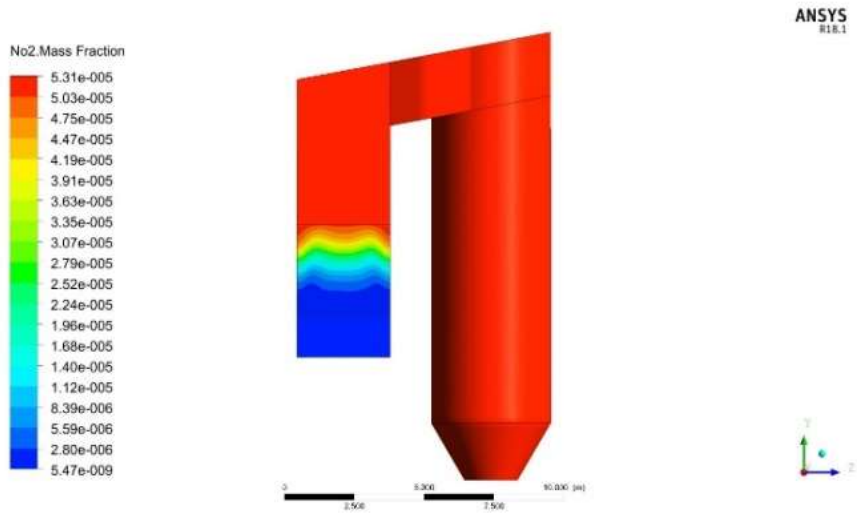


ANSYS  
R18.1



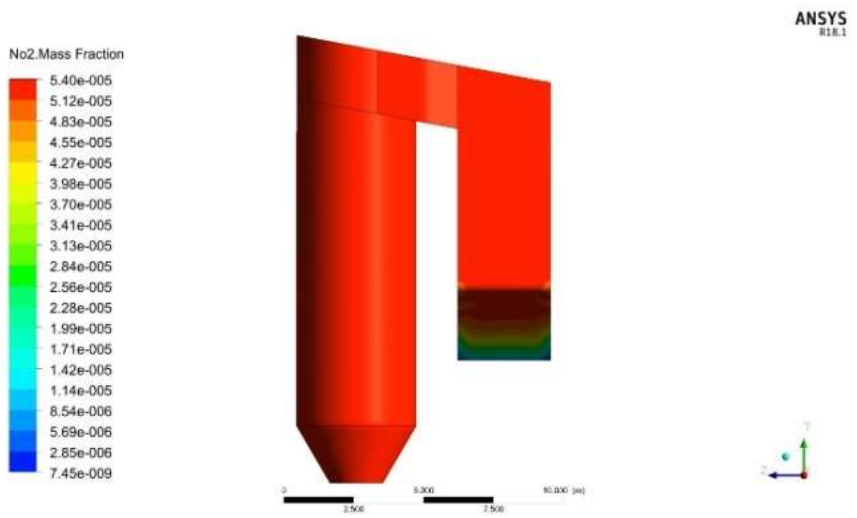
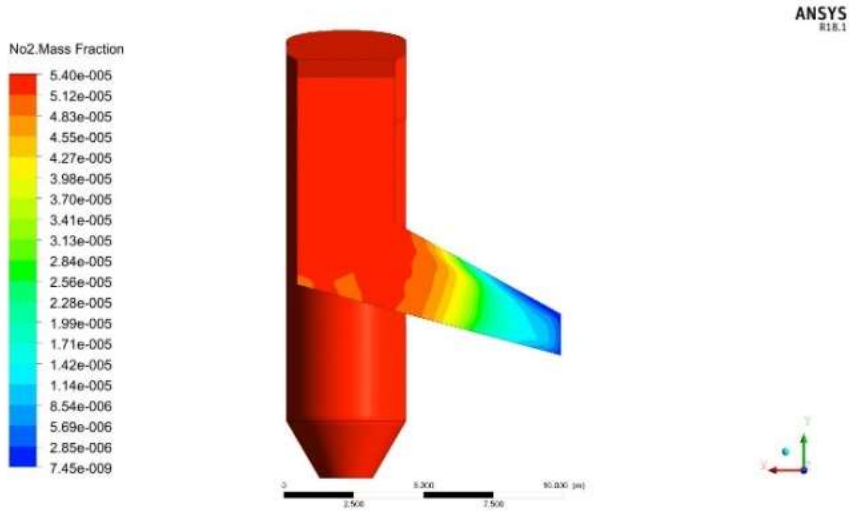
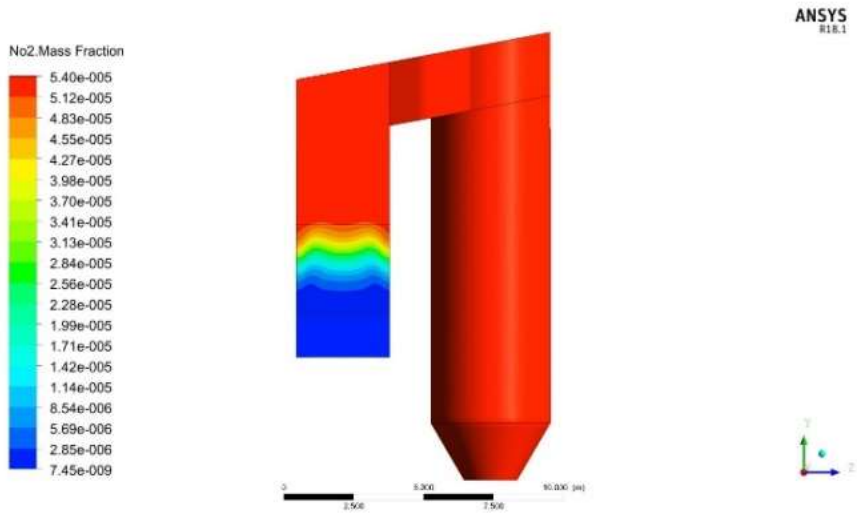
c

Şekil 3.36. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti NO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba

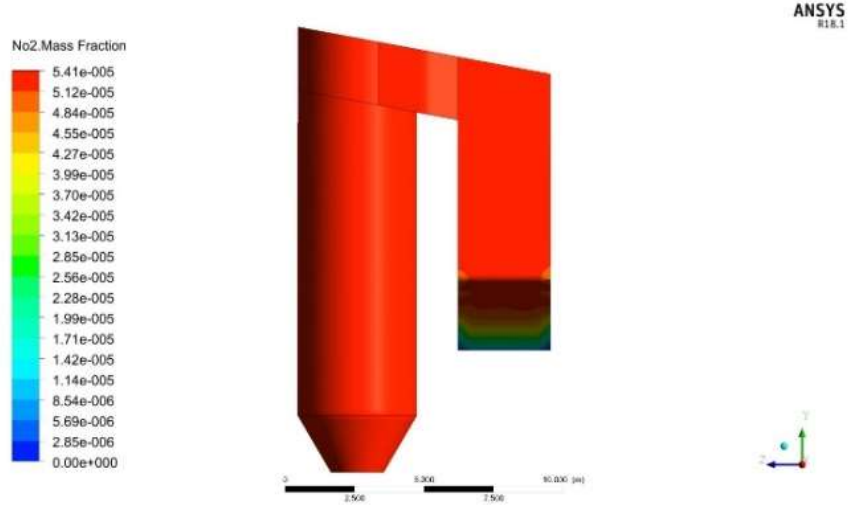
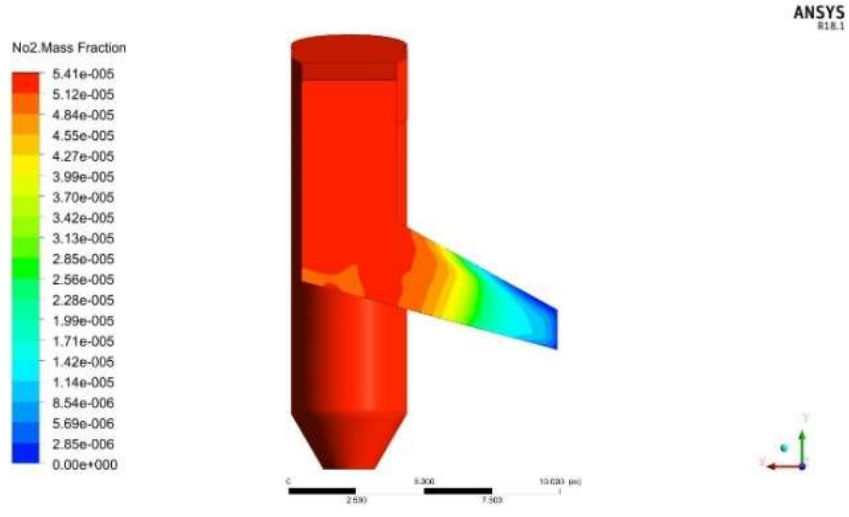
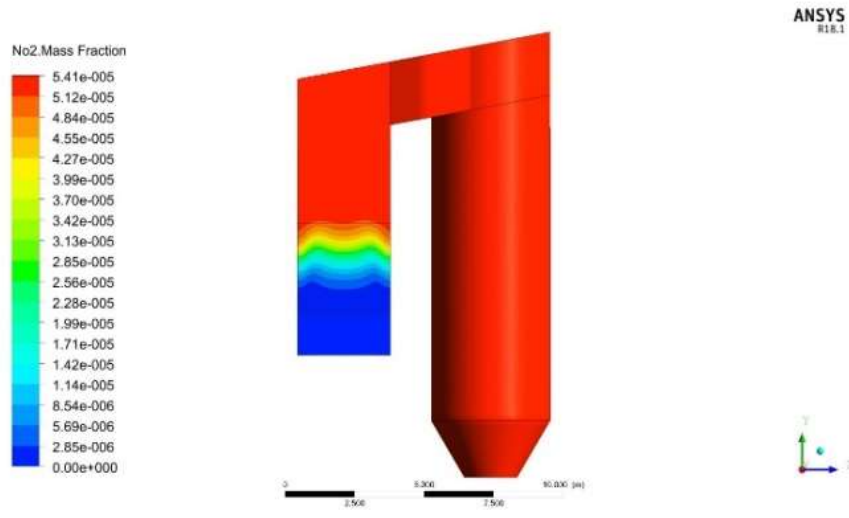


a



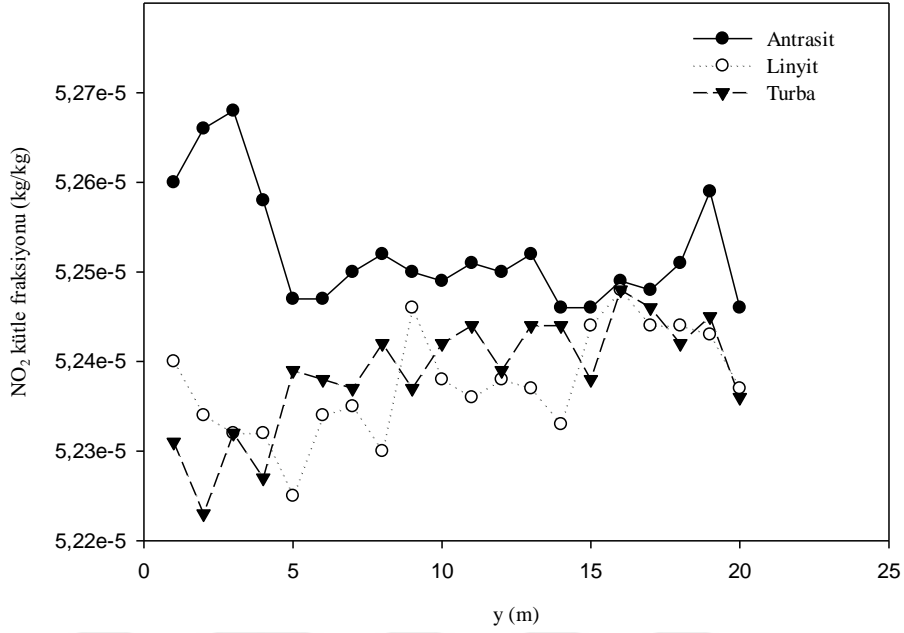


b



c

Şekil 3.37. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin NO<sub>2</sub> emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



Şekil 3.38. Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça merkezinden alınan NO<sub>2</sub> sonuçları

### 3.8. Hareketli ızgaralı Kazandan Elde Edilen H<sub>2</sub>O Sonuçları

ANSYS Fluent programında modellenen hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yakılmasıyla elde edilen H<sub>2</sub>O sonuçları aşağıda verilmektedir. H<sub>2</sub>O sonuçları, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri halinde iki boyutlu, önden, yandan ve arkadan olmak üzere de üç boyutlu olarak sunulmaktadır. Kazanın çıkış parçası olan silindir merkezinden bir çizgi tanımlanmış, bu çizgi üzerinden alınan H<sub>2</sub>O sonuçları grafiğe dökülmüştür.

Şekil 3.39.' da hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan H<sub>2</sub>O sonuçları parçalı kesitler halinde verilmektedir. Hareketli ızgaralı kazandan alınan parçalı kesitler incelendiğinde, girişin ortalarına doğru başlayan salınım, parça yukarıya doğru döndüğü kısımda en yüksek değerine ulaşmış ve böylece devam etmiştir.

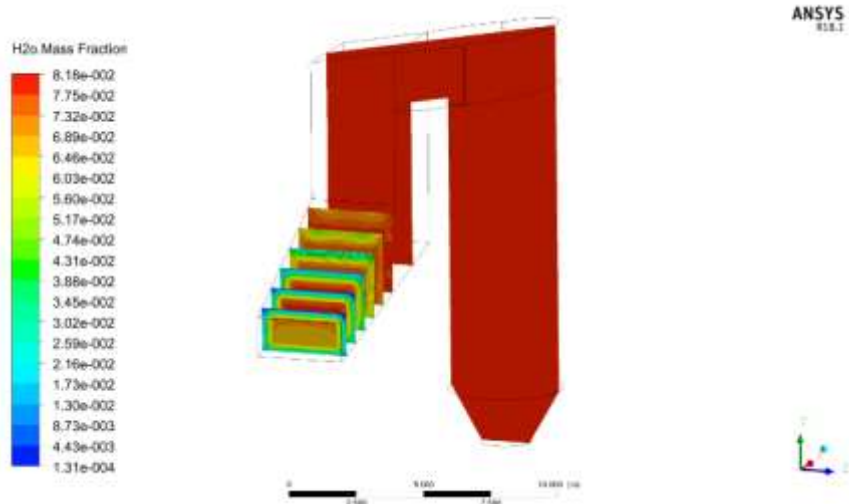
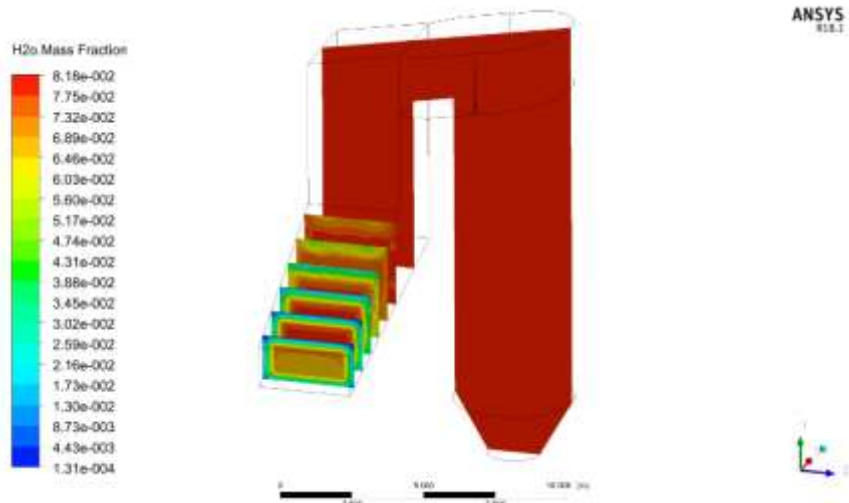
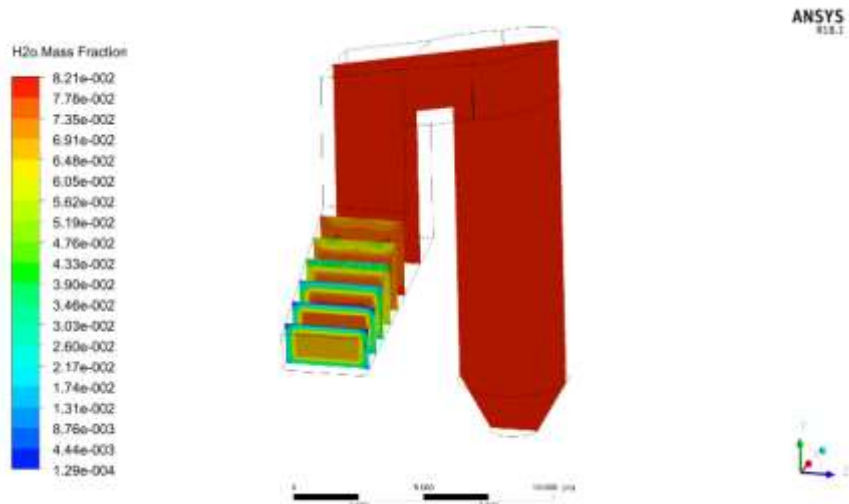
Şekil 3.40.' da hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan H<sub>2</sub>O sonuçları XY kesitleri halinde verilmektedir. Giriş parçasının ortasından alınan XY kesitleri incelendiğinde her üç kömüründe yanma sonucu oluşan H<sub>2</sub>O sonuçlarının aynı dağılıma ve aynı skala değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca

antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan H<sub>2</sub>O sonuçlarının üçünde de giriş ve girişin alt-üst çizgisinde salınımın en düşük olduğu izlenmektedir.

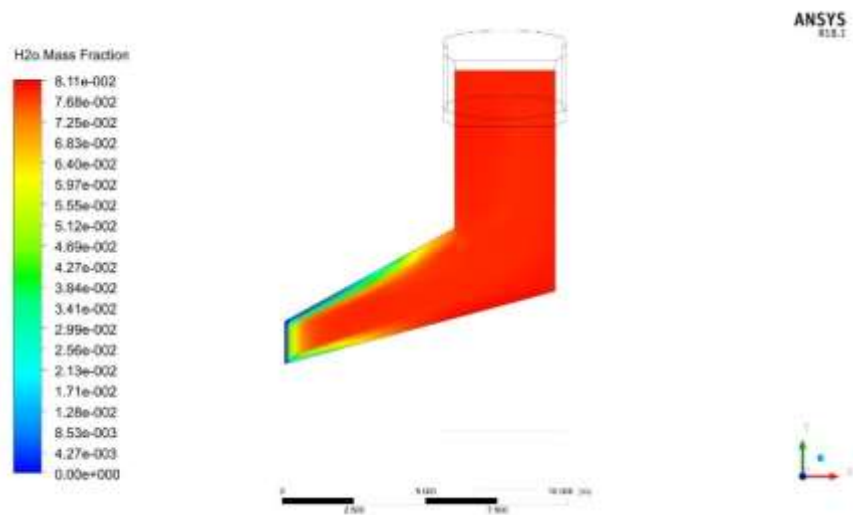
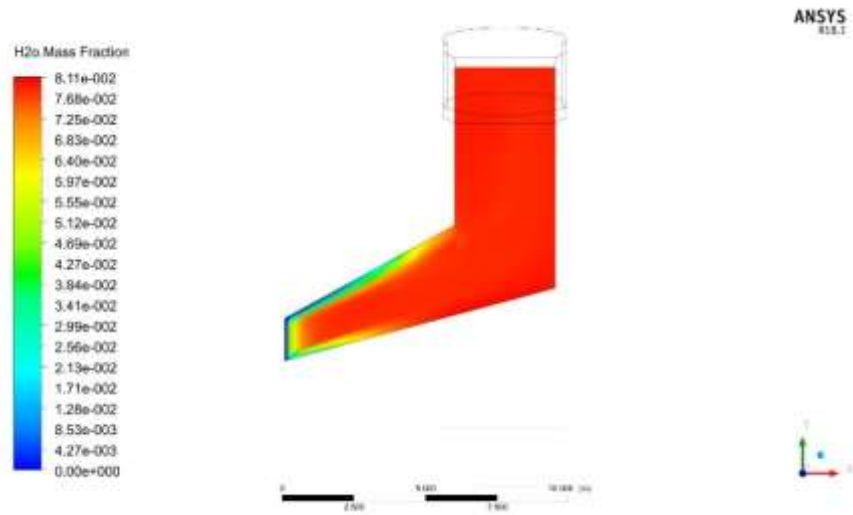
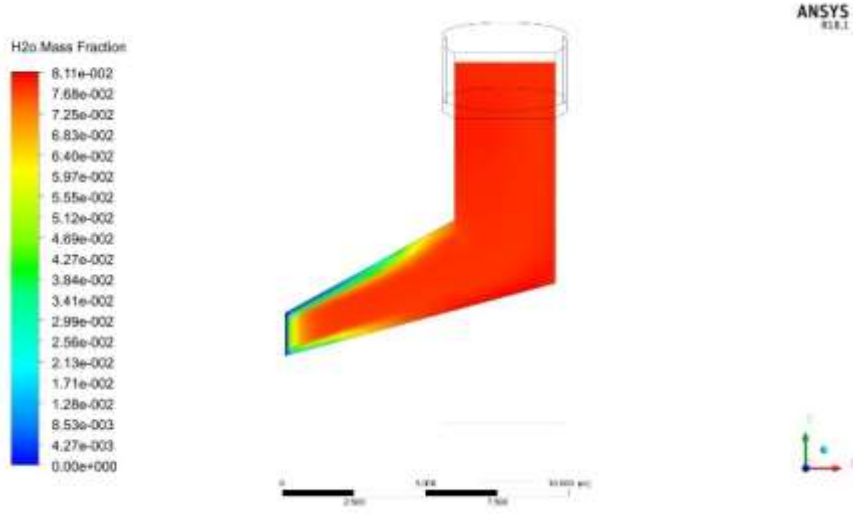
Şekil 3.41.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan H<sub>2</sub>O değerleri, YZ kesitleri halinde verilmektedir. YZ kesitleri incelendiğinde kazanın giriş parçasının ortasına doğru, H<sub>2</sub>O salınımının en düşük değerlerde olduğu, kopuşlarla artarak ilerlediği, geçiş parçasının üst kısmına doğru yeniden bir düşüş yaşadığı ve böylece devam ettiği görülmektedir. Üç kömüründe yanma sonucu oluşan H<sub>2</sub>O salınımı skala değerleri aynıdır.

Şekil 3.42.' de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan H<sub>2</sub>O kontürleri, önden, yandan ve arkadan olmak üzere üç farklı açı ile verilmektedir. Antrasit, linyit ve turba kömürlerinde yanma sonucu oluşan H<sub>2</sub>O salınımı giriş parçasının ilk yarısından sonra başlamaktadır. Kazanın giriş parçasının ilk yarısının sonuna doğru H<sub>2</sub>O salınımı artmış, ikinci yarısından itibaren stabilleşmiştir. H<sub>2</sub>O değerleri neredeyse her üç kömür yanma sonucunda da aynıdır.

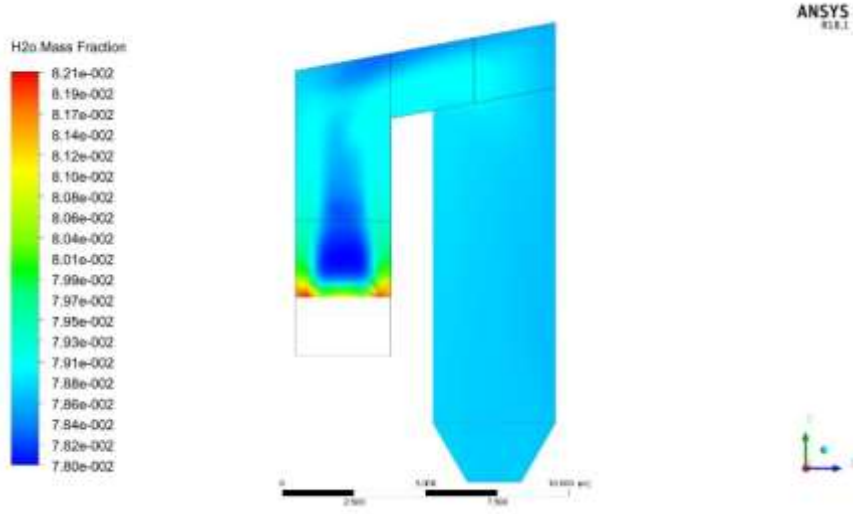
Program da çıkış parçası olan silindirin merkezinden geçen bir çizgi tanımlanarak, bu çizgi üzerinden antrasit, linyit ve turba kömürlerinin H<sub>2</sub>O değerleri elde edilmiş, grafikleştirilmiştir. Şekil 3.43.' de grafik görülmektedir. Grafik incelendiğinde ise en yüksek H<sub>2</sub>O değerlerinin linyit kömürü yanma sonucunda olduğu, eğilimi turba ve antrasit kömürlerinin yanma sonuçlarının takip ettiği görülmektedir.



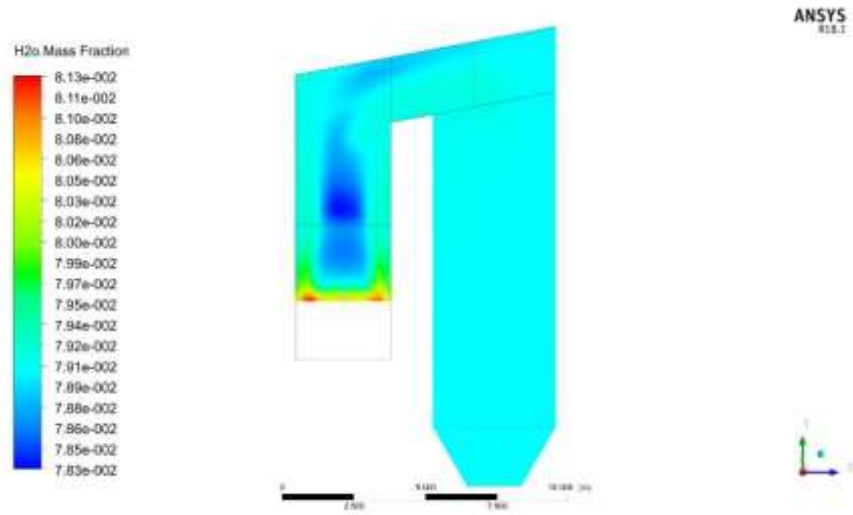
Şekil 3.39. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle H<sub>2</sub>O eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



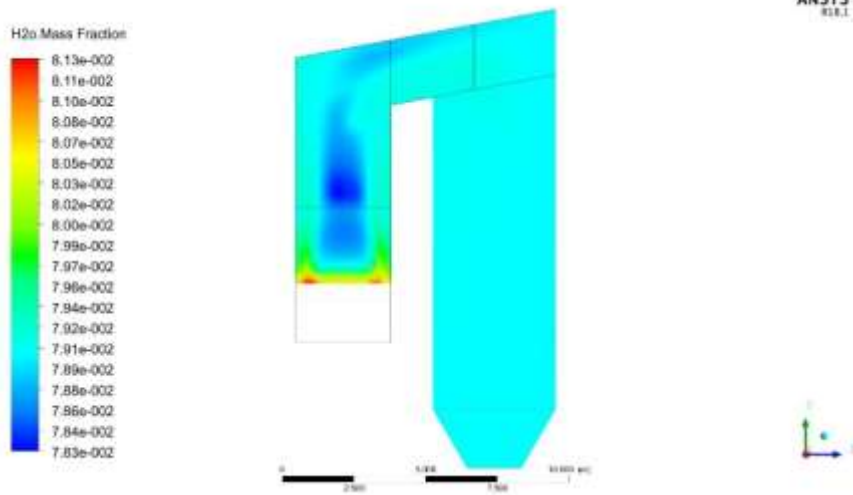
Şekil 3.40. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti H<sub>2</sub>O eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

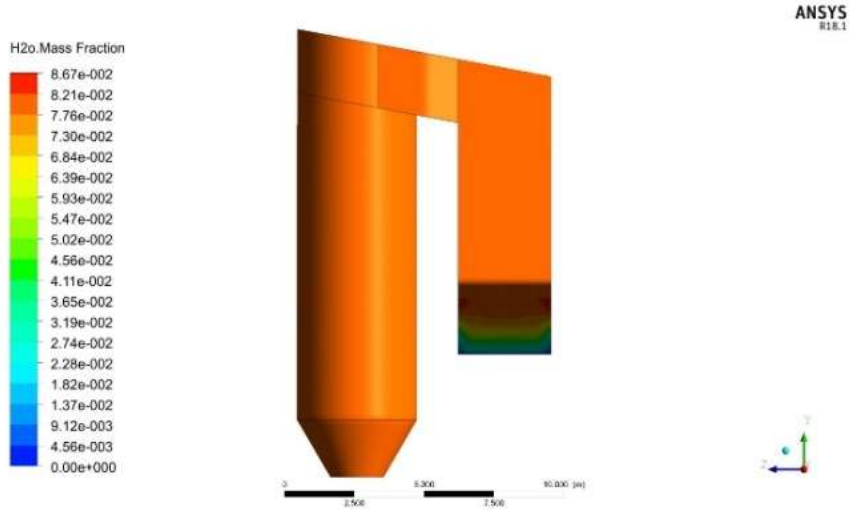
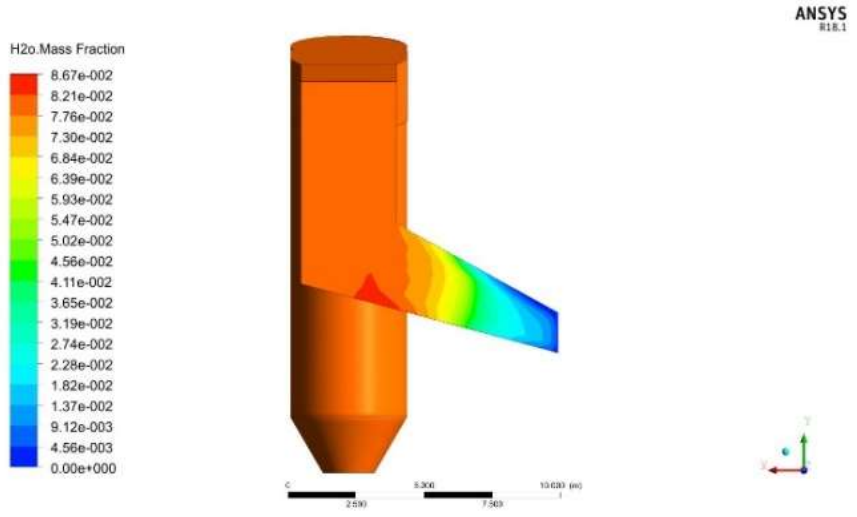
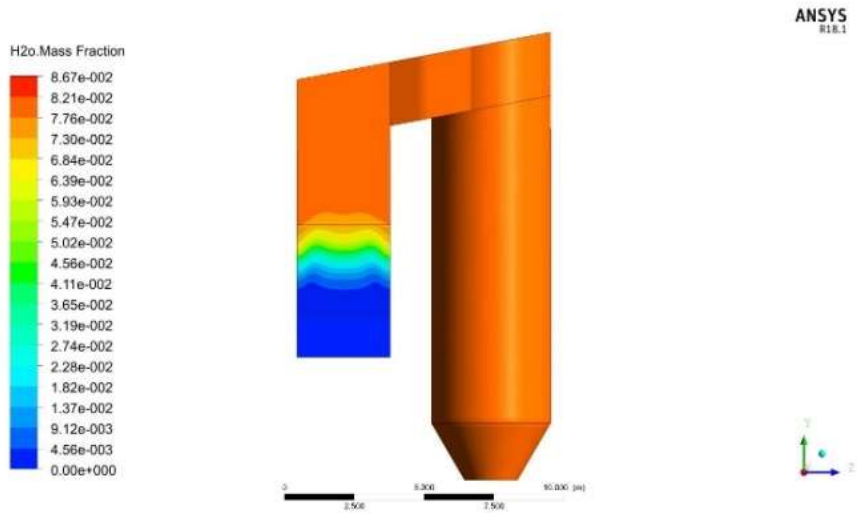


b



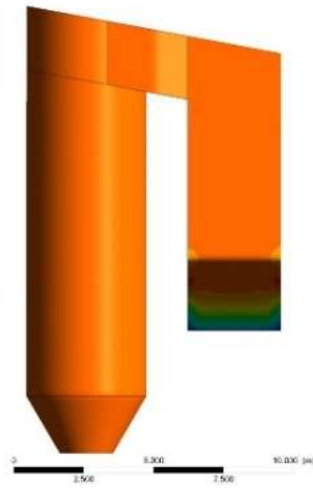
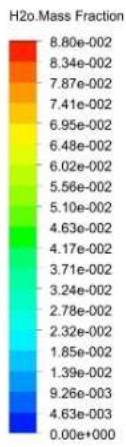
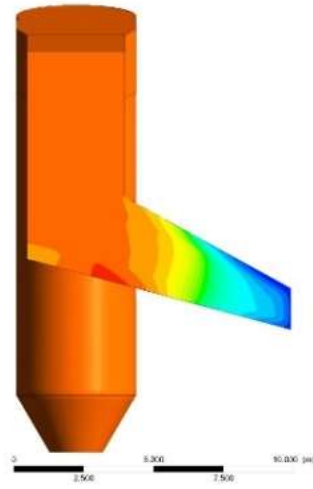
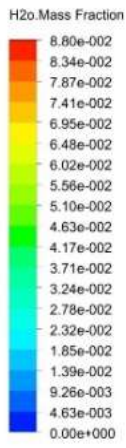
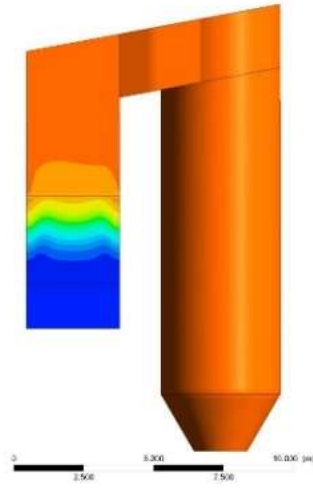
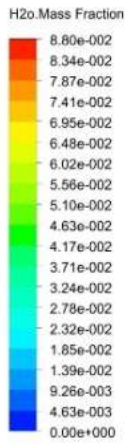
c

Şekil 3.41. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti H<sub>2</sub>O eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba

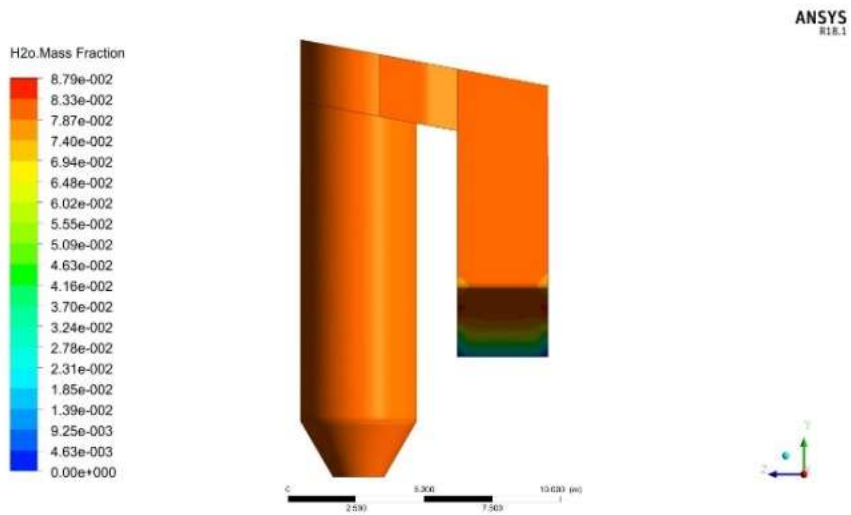
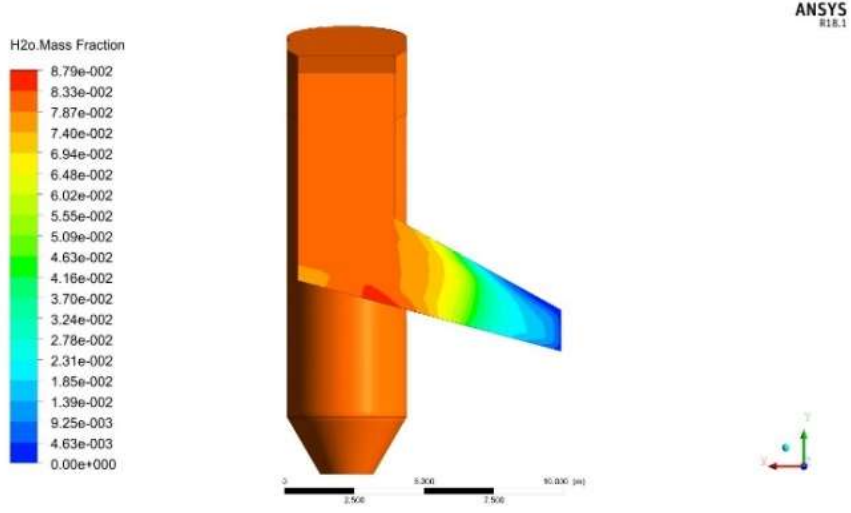
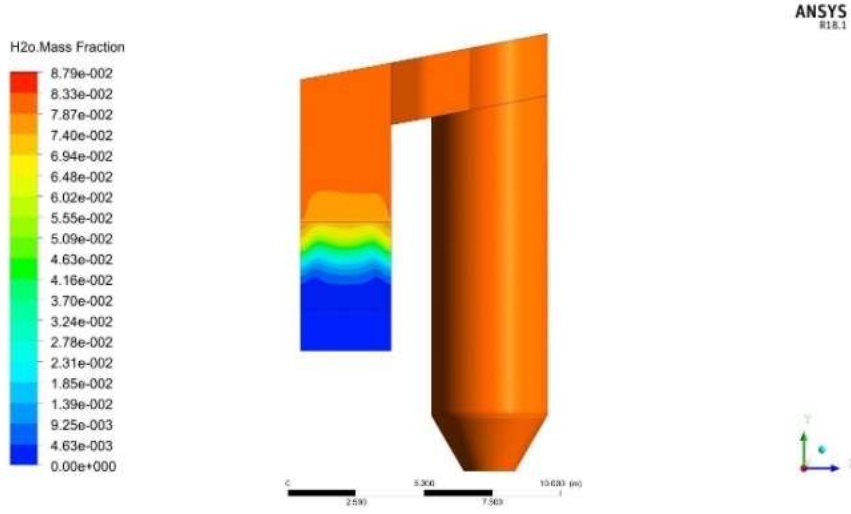


a



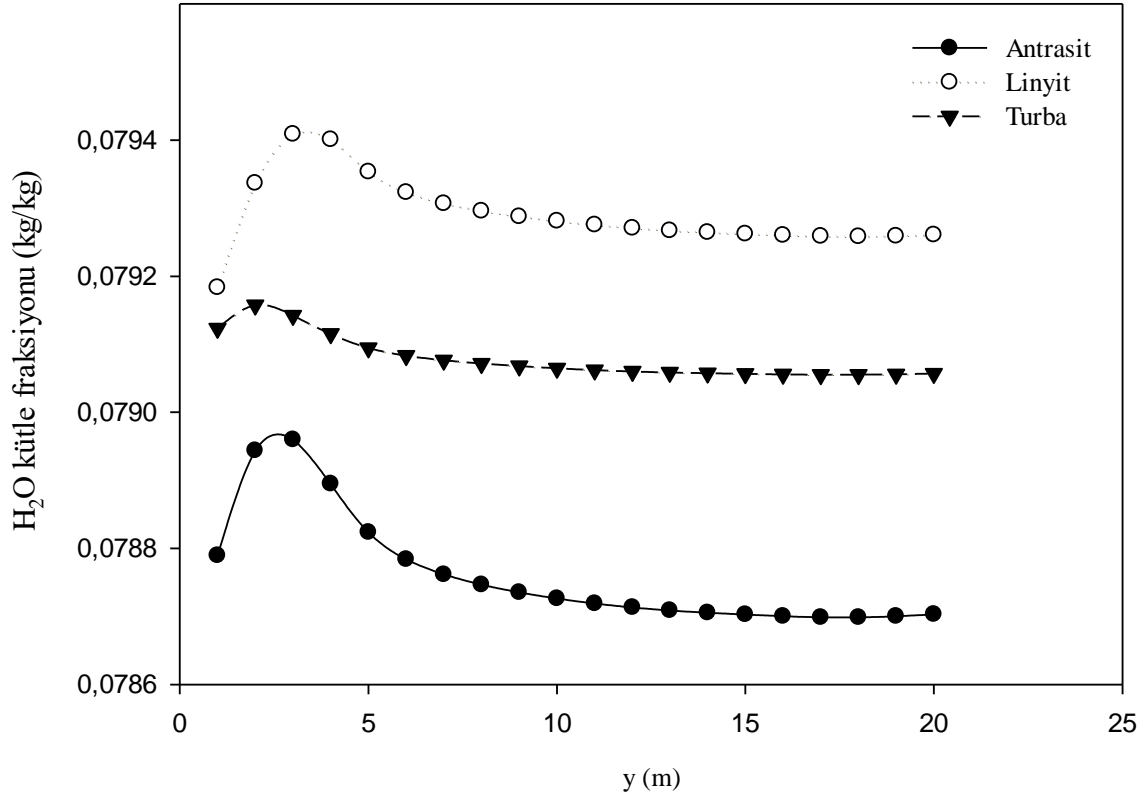


b



c

Şekil 3.42. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin H<sub>2</sub>O emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



Şekil 3.43. Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça merkezinden alınan H<sub>2</sub>O sonuçları

### 3.9. Hareketli ızgaralı Kazandan Elde Edilen SO<sub>2</sub> Sonuçları

ANSYS Fluent de modellenen hareketli ızgaralı bir kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yakılmasıyla elde edilen SO<sub>2</sub> emisyon sonuçları aşağıda verilmektedir. SO<sub>2</sub> emisyon sonuçları, parçalı kesitler ve XY-YZ kesitleri halinde iki boyutlu, önden, yandan ve arkadan olmak üzere de üç boyutlu olarak sunulmaktadır. Ayrıca kazanın çıkış parçası olan silindir merkezinden bir çizgi tanımlanarak SO<sub>2</sub> emisyon sonuçları elde edilmiş, grafiğe dökülmüştür.

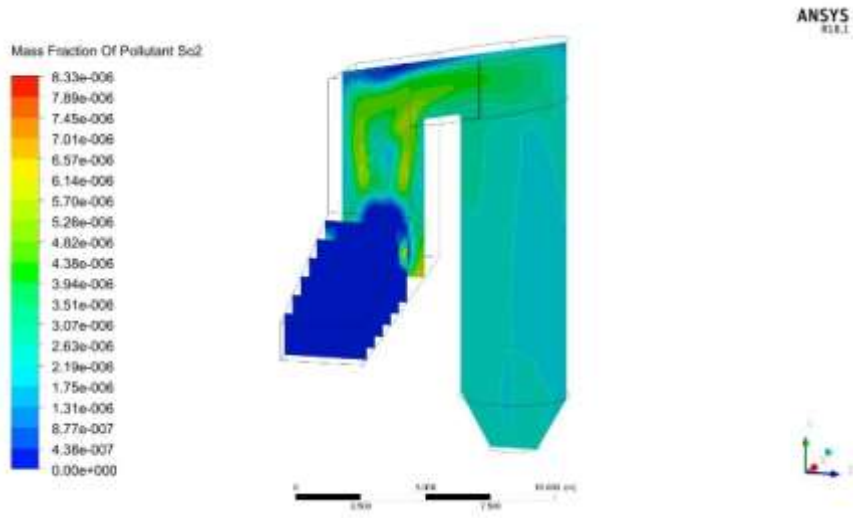
Şekil 3.44.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin SO<sub>2</sub> emisyon sonuçları parçalı kesitler halinde verilmektedir. Sonuçlara bakıldığında linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyonu, antrasit kömürünün yanması sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyonuna göre benzer seyrettiği izlenmektedir. Linyit ve turba kömürlerinde yanma sonucu oluşan SO<sub>2</sub> salınımı, giriş parçasının yarısından sonra başlarken antrasit kömüründe yanma sonucu oluşan SO<sub>2</sub> salınımının daha geç başladığı görülmektedir.

Şekil 3.45.' de hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanma sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyon sonuçları XY kesitleri halinde verilmektedir. XY kesitleri incelendiğinde linyit ve turba kömürlerinin yanmaları sonucu oluşan SO<sub>2</sub> salınımlarının benzer dağılımda olduğu daha net görülmektedir. Antrasit kömüründe yanma sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyon değeri ise diğer iki kömürün yanmaları sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyon değerine göre daha geç başladığı ve daha düşük değerlerde seyrettiği izlenmektedir. Her üç kömürün de yanma sonucu oluşan SO<sub>2</sub> salınımlarında giriş parçasından yukarı doğru kıvrılan akışkanın keskin köşeyi geçerken yavaşladığı ve emisyon biriktirdiği görülmektedir.

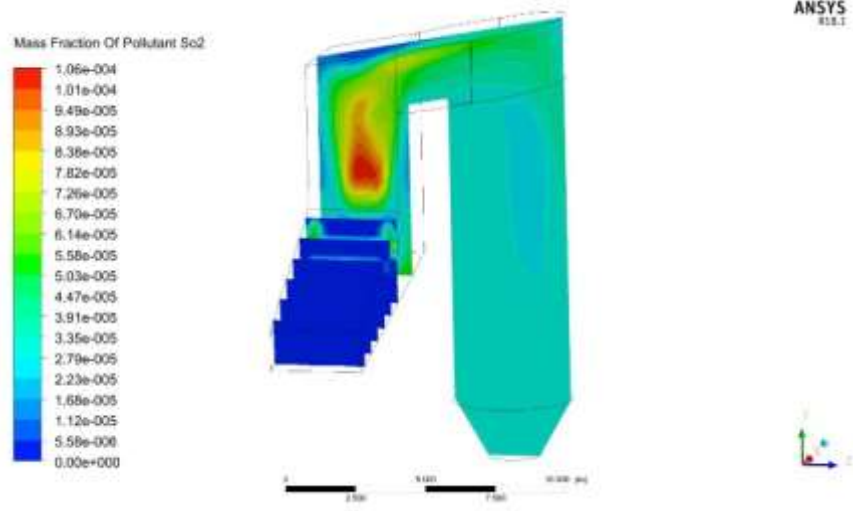
Şekil 3.46.' da hareketli ızgaralı kazanda yakılan antrasit, linyit ve turba kömürlerinin SO<sub>2</sub> emisyon sonuçları YZ kesitleri halinde verilmektedir. YZ kesitleri incelendiğinde kazanın giriş parçasının ortasına doğru, yanmanın yoğunlaştığı bölgede SO<sub>2</sub> emisyonunun arttığı daha sonra azalarak ilerlediği görülmektedir. Antrasit kömüründe SO<sub>2</sub> emisyon salınımı benzer eğilim gösteren linyit ve turba kömürlerine göre daha azdır.

Şekil 3.47.' de hareketli ızgaralı kazandan üç boyutlu olarak alınan antrasit, linyit ve turba kömürlerinde yanma sonucu oluşan, SO<sub>2</sub> emisyonu kontürleri önden, yandan ve arkadan olmak üzere üç farklı açı ile görülmektedir. Her üç kömürde de yanma sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyonunun giriş parçasının ortasına doğru başladığı izlenmektedir. Geçiş parçasının üst kısmına doğru SO<sub>2</sub> emisyonunun azalarak ilerlediği ve silindirik parçaya çarpan akışkanla birlikte oluşan döngüyle ilerlediği görülmektedir.

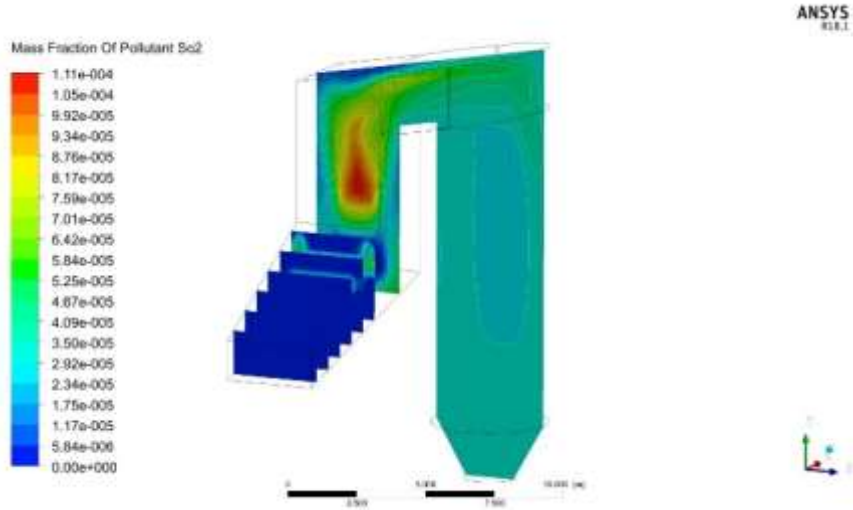
Çıkış parçası olan silindir merkezinden geçen bir çizgi tanımlanarak bu çizgi üzerinden antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan, SO<sub>2</sub> emisyon değerleri alınmış, sonuçlar grafiğe dökülmüştür. Şekil 3.48.' de grafik görülmektedir. Grafiğe bakıldığında linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin birbirini örtecek kadar benzer olduğu, antrasit kömürünün yanması sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin ise daha düşük seviyelerde kaldığı izlenmektedir.



a

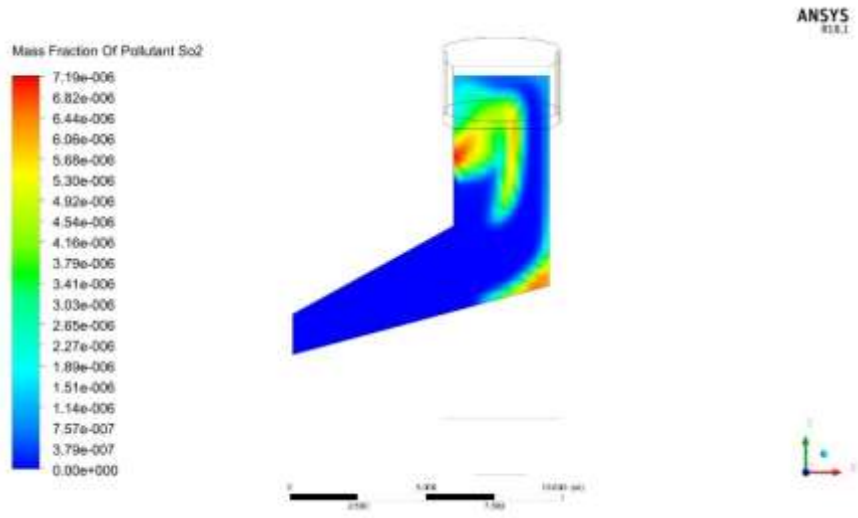


b

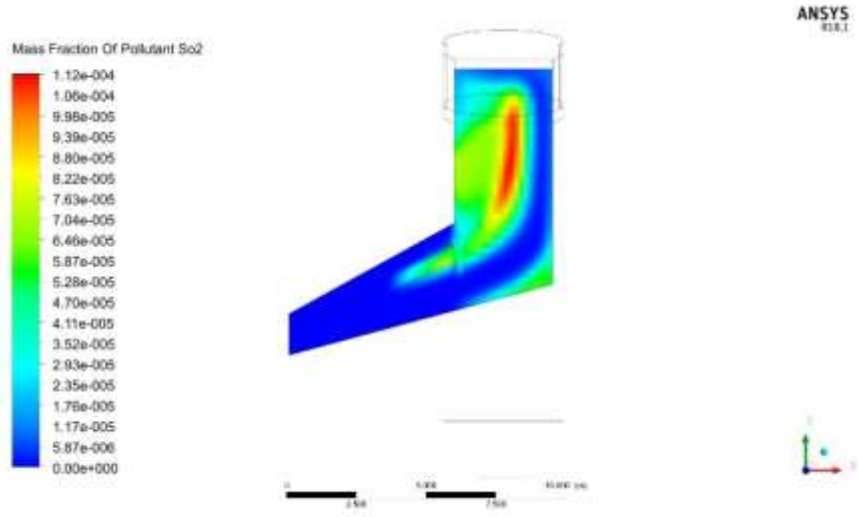


c

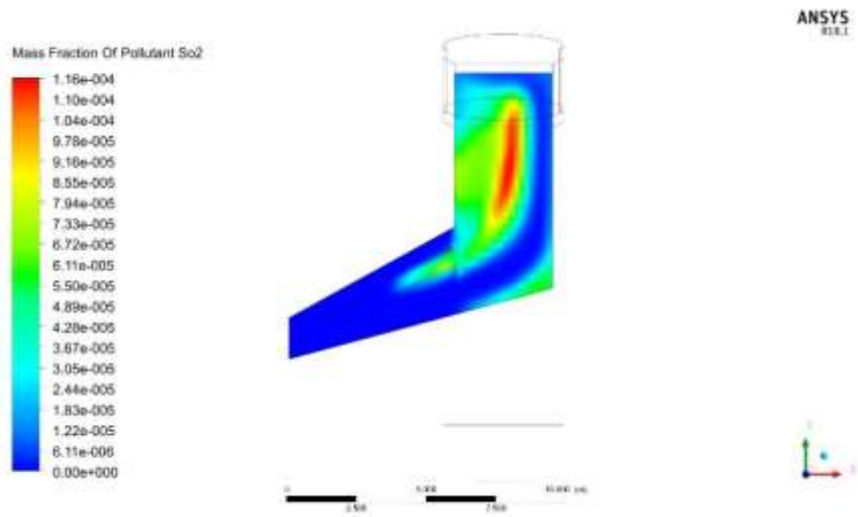
Şekil 3.44. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin parçalı kesitlerle SO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

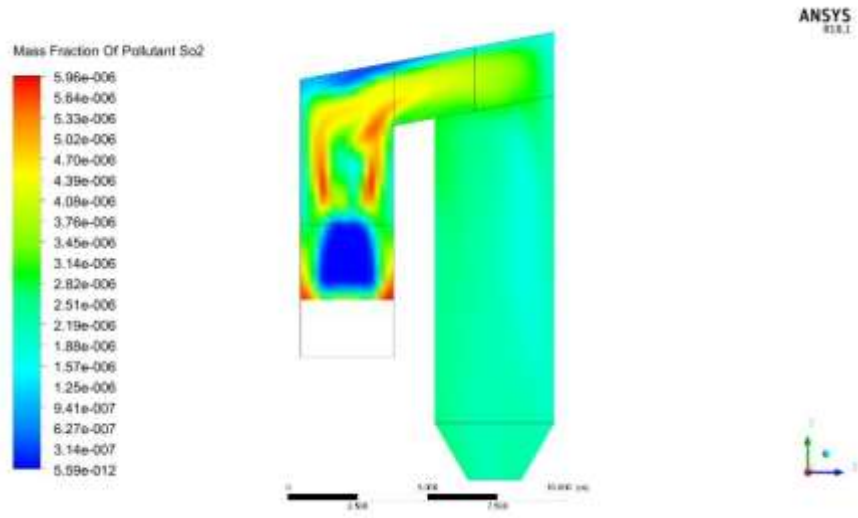


b

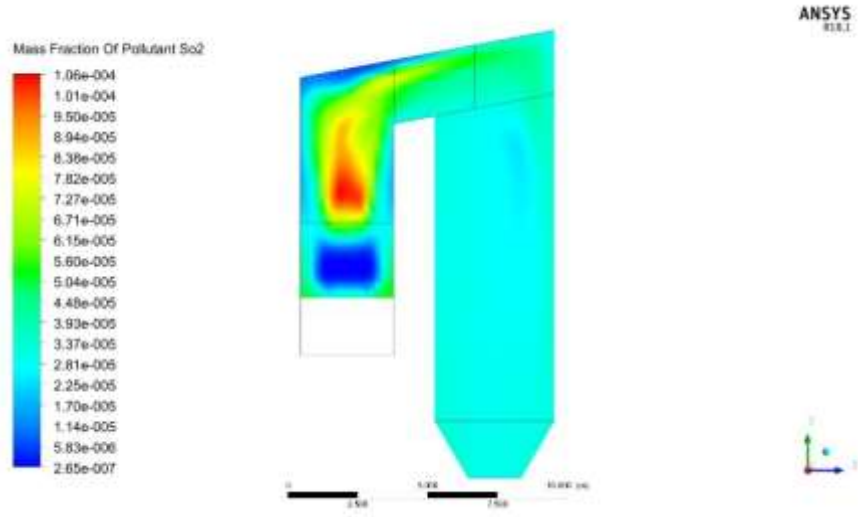


c

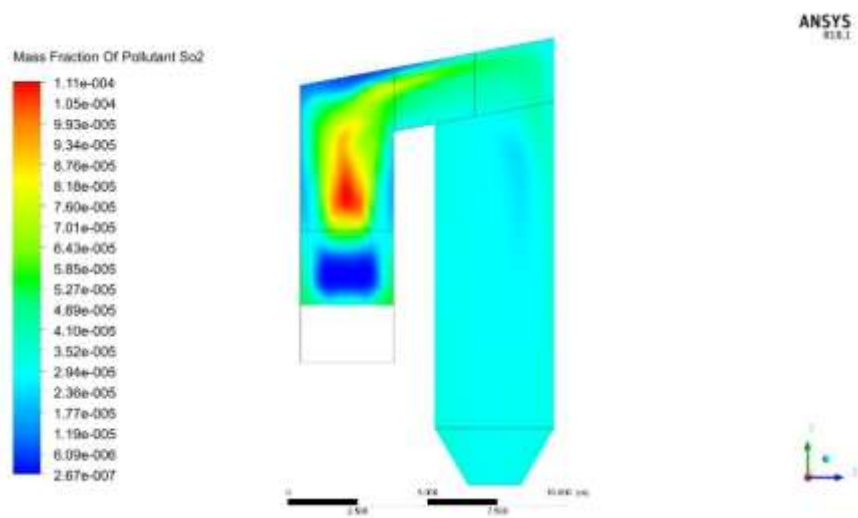
Şekil 3.45. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin XY kesiti SO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

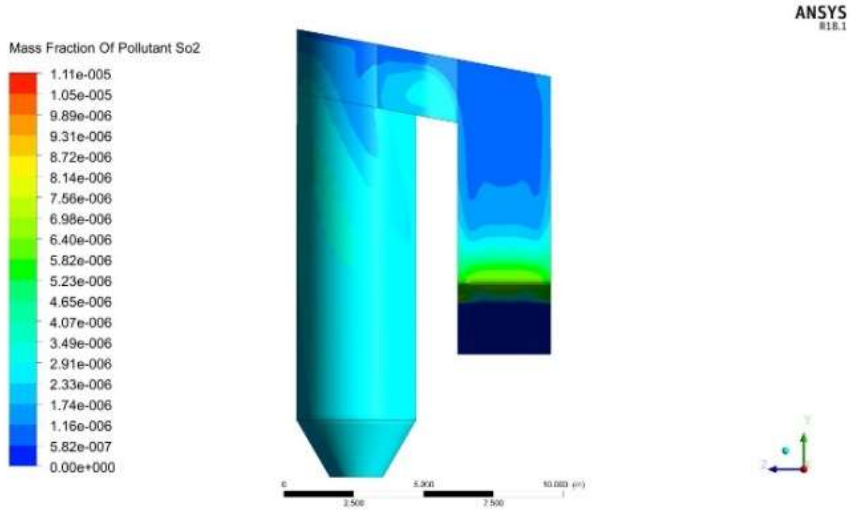
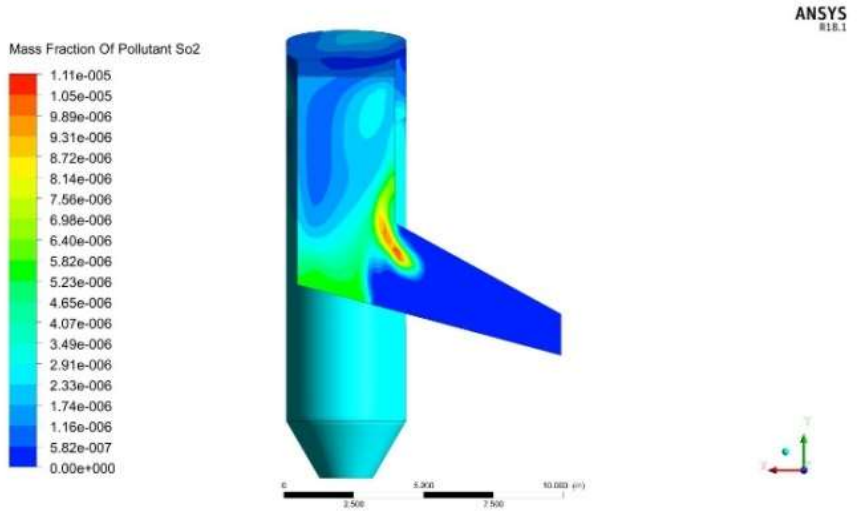
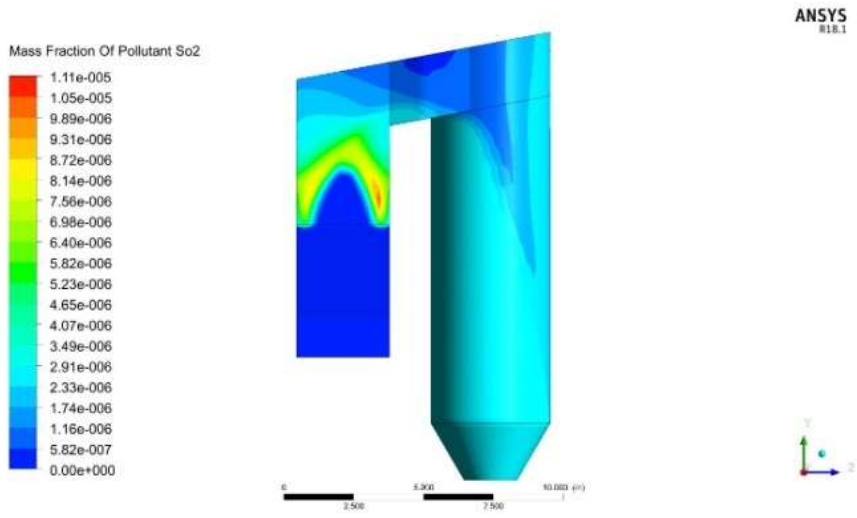


b



c

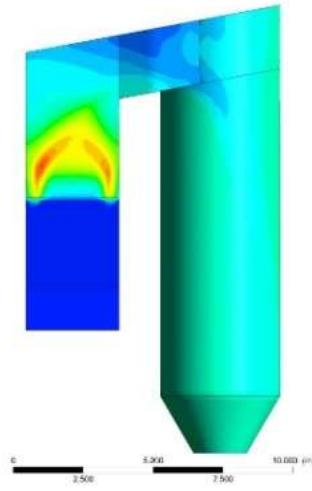
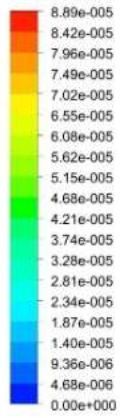
Şekil 3.46. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin YZ kesiti SO<sub>2</sub> eş eğrileri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



a

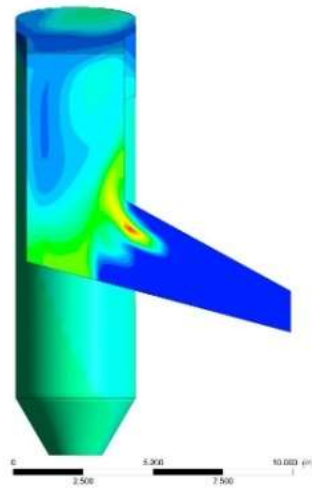
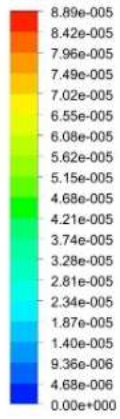


Mass Fraction Of Pollutant So2



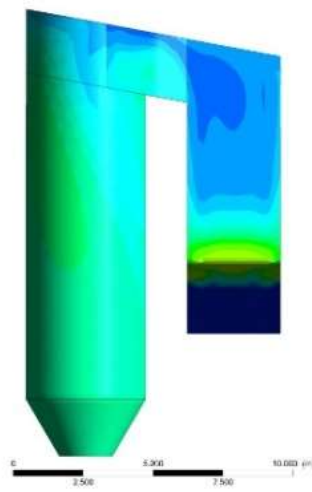
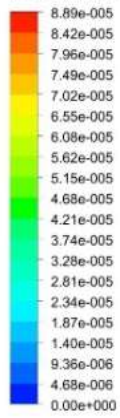
ANSYS  
R18.1

Mass Fraction Of Pollutant So2



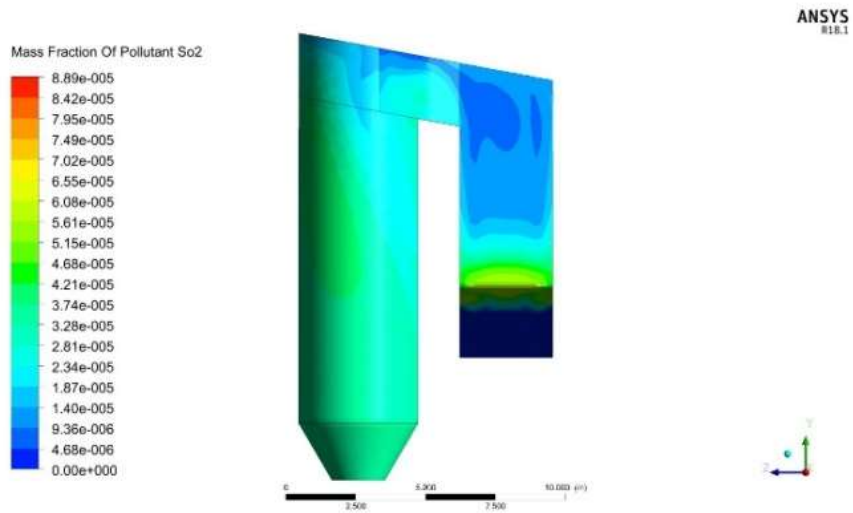
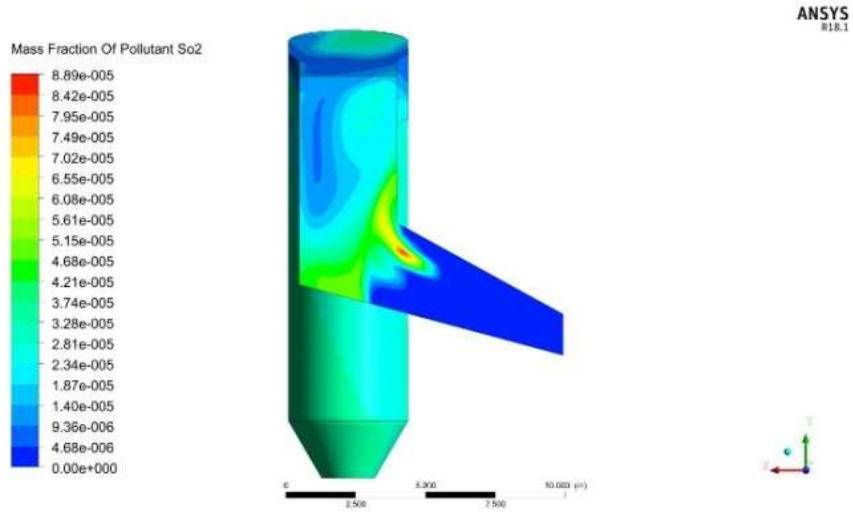
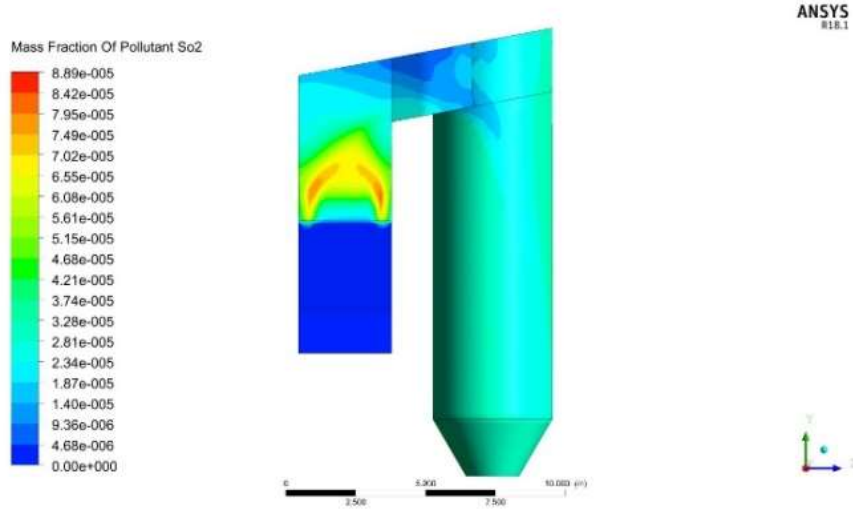
ANSYS  
R18.1

Mass Fraction Of Pollutant So2



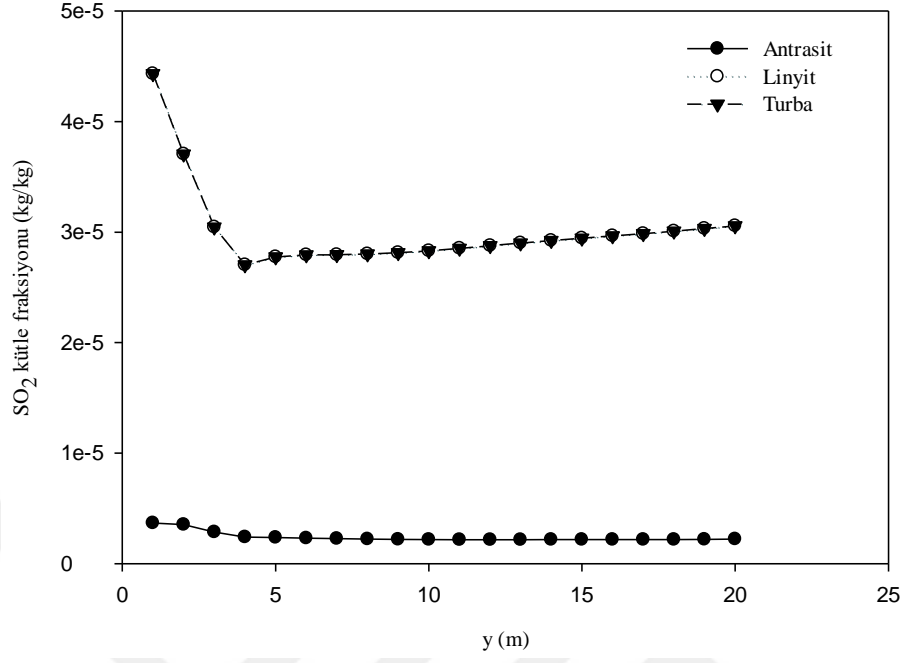
ANSYS  
R18.1

C



b

Şekil 3.47. Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin SO<sub>2</sub> emisyonunun üç boyutlu olarak önden, yandan ve arkadan görüntüleri a) Antrasit b) Linyit c) Turba



**Şekil 3.48.** Hareketli ızgaralı kazanın çıkışında bulunan silindirik parça merkezinden alınan SO<sub>2</sub> sonuçları

#### 4. SONUÇLAR

Kömür, dünyanın gelişmesinde büyük rolü olan, bir fosil yakıttır. Nüfus artışına paralel olarak kullanımı da artmaktadır. Kalitesi değişken olan kömür, doğru şartlarda yakılmadığında saldığı emisyonlar artarken hava kirliliğini tehlikeli boyutlara taşımaktadır. Bu nedenle, kömür kullanımının ana iki hedefinden biri kalite değeri düşük kömürleri de kullanabilmek iken diğeri ise kullanımı sonucu açığa çıkan kirletici seviyesini en aza indirmektir. Bu amaçla araştırmacılar düşük kaliteli kömürleri de yüksek verim ve düşük emisyon ile yakabilecek kazanlar üzerinde çalışmışlardır. Bu kazanlardan biri olan hareketli ızgaralı kazanlar, küçük kapasiteleri ve düşük kaliteli kömür kullanımına verdiği müsaade ile önemli bir yer tutmaktadır.

Bu doktora tezi çalışmasında, hareketli ızgaralı bir kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanma davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal hesaplamalarda, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılımlarından, Dünyaca kabul görmüş bir mühendislik programı olan, ANSYS Fluent programı kullanılmıştır. Mimsan A.Ş.' de üretilen bir hareketli ızgaralı kazan, gerçek boyutlarına bağlı kalınarak üç boyutlu olarak modellenmiş, uygun mesh yapısı ile örülen modele, akış için kütle - momentum denklemleri, ısı transferi ve sıkıştırılabilirlik için enerji denklemi, karışım için de tür denklemleri çözdürülmüştür. Kazan içerisindeki türbülanslı akışı modellemek için Standart k-ε modeli, ışıınım çözümü için P1 ışıınım modeli kullanılmıştır. Yanma, Species Transport yoluyla Eddy Dissipation model kullanılarak çözülmüştür. Ayrıca ayrık faz (Discrete phase) modeli kullanılarak gaz fazında gerçekleşen türbülansın katı (kömür) parçacıkları ile çevresinde oluşan etkileşimi incelenmiştir. Problem zamandan bağımsız olarak çözdürülmüştür. Tez de, ANSYS Fluent programı kullanılarak, antrasit, linyit ve turba kömürlerinin, hareketli ızgaralı kazanda yakılması sonucu akış, ısı transferi ve emisyon sonuçları programın "post process" modülünden alınmış, karşılaştırma için yan yana görüntüler verilirken sayısal sonuçlar ise grafiklere dökülerek sunulmuştur.

Çalışma neticesinde;

- Sayısal olarak gerçekleştirilen çalışma da, hareketli ızgaralı bir kazan da antrasit, linyit ve turba kömürleri, ANSYS Fluent yoluyla yakılmış, yanma sonucunda elde edilen sıcaklık değeri, Mimsan A.Ş.'nin ürettiği hareketli ızgaralı kazanın sıcaklık değeri ile

karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde çıkan grafiğin benzer eğilimle, kabul edilebilir bir doğrulukta olduğu görülmüştür.

- Hareketli ızgaralı kazanın duvarlarına duvar sınır şartı tanımlanmış olduğundan duvar cidarlarında akışkan hızının sıfır olduğu görülmüştür.

-Hareketli ızgaralı kazan tasarımında akışkana yön veren keskin ve dar köşeler bulunmaktadır. Bu köşelerin akışı etkilediği, keskin köşelerin olduğu yerlerde hızların yavaşladığı, uç noktalarda sıfırlandığı görülmüştür.

- Hareketli ızgaralı kazan da antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan hız akım çizgilerinde, maksimum hız noktasının değişmediği (75 m/sn) ve akışın birbirine paralel gelişmiştir.

- Hareketli ızgaralı kazan tasarımında ki keskin ve dar köşelerin sıcaklığa etki ettiği görülmüş, keskin köşelerin olduğu yerlerde hızın yavaşlamasıyla sıcaklıkların düştüğü görülmüştür.

- Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin, yanması sonucunda oluşan maksimum sıcaklık noktasının (1275 K) aynı olduğu görülmüştür.

- Hareketli ızgaralı kazan tasarımında akışkana yön veren keskin ve dar köşelerin basıncı da etkilediği, kazanın keskin kenarlarında basıncın maksimum noktalarına ulaştığı görülmüştür.

- Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan, CO emisyonunun en yüksek değerleri giriş parçasında oluşmuştur. En yüksek CO emisyonu, antrasit kömürünün yanması sonucu oluşurken sıralamayı linyit ve turba kömürleri birbirlerine çok yakın değerlerle takip etmiştir.

- Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan, CO<sub>2</sub> emisyonunun en düşük değerleri giriş parçasının ilk yarısında salınmıştır. En yüksek CO<sub>2</sub> emisyonu, antrasit kömürünün yanması sonucu oluşurken sıralamayı linyit ve turba kömürleri takip etmiştir.

Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan, NO emisyonu kazanın ilk yarısında başlamış, giriş parçasının ortasında artış göstermiştir. Benzer bir yayılımla salınan NO emisyonu en yüksek antrasit kömürünün yanması sonucunda oluşmuştur.

- Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan, NO<sub>2</sub> emisyonunun en düşük değerleri giriş parçasının ilk yarısındadır. En yüksek

NO<sub>2</sub> emisyonu antrasit kömürünün yanması sonucunda oluşmuştur. Linyit kömürünün yanma sonucu açığa çıkan NO<sub>2</sub> emisyon yayılımı daha geniştir.

Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan, H<sub>2</sub>O salınımı kazanın giriş parçasının ikinci yarısında başlamış devamında stabilleşmiştir. En yüksek H<sub>2</sub>O salınımı, linyit kömürünün yanması sonucu oluşurken sıralamayı turba ve antrasit kömürleri takip etmiştir.

Hareketli ızgaralı kazanda antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması sonucunda oluşan, SO<sub>2</sub> salınımı antrasit kömüründe diğer iki kömüre göre daha geç salınmaya başlamıştır. Ayrıca en düşük SO<sub>2</sub> değerleri yine antrasit kömürünün yanması sonucu oluşmuştur.



## 5. ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında, hareketli ızgaralı bir kazanda, antrasit, linyit ve turba kömürlerinin yanması, ANSYS Fluent adlı mühendislik programı kullanılarak, akış, ısı transferi ve emisyon sonuçları incelenmek üzere sayısal olarak çözülmüştür. Aşağıda bu çalışmanın ileriki aşamalarında yapılabilecek çalışma önerileri sıralanmıştır;

- Problem, zamana bağlı olarak tekrar çözdürülerek, belirli zaman aralıklarındaki değişimler incelenebilir.

- Hareketli ızgaralı kazan da farklı kömürler ve ya biyokütle çeşitleri yakılarak sonuçlar irdelenebilir.

- Hareketli ızgaralı kazan tasarımı gözden geçirilerek yanma şartlarına daha uygun bir tasarım çalışılabilir.

- Hareketli ızgaralı kazana farklı hızlarda hava girişi verilerek yanma davranışları incelenebilir.

- Problem farklı yanma modelleri kullanılarak tekrar çözdürülebilir. İki çözüm kıyaslanabilir ve gerçeğe en yakın sonuç değerlendirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Kopuz D.**, 2011. Kömür-biyokütle karışımlarının yanma davranımlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Kemal M.**, 1991. Linyit kömürü değerlendirilmesi ve kullanımında kömür özelliklerinin etkileri, *Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 16-18 Ekim, s. 270-345.
- [3] **Yılmazer E.**, 2012. Biyokütle yarıkoku-kömür karışımlarının yanma davranımlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Dike Ö.S.**, 2008. Pulverize kömür enjeksiyonu kullanımının yüksek fırın çalışmasına etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [5] **Özel Y.**, 2006. Farklı kömür yakıtları ile elektrik enerjisi üretimi ve yakıt performansının yapay zeka yöntemi kullanılarak saptanması, *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Selçuk N.**, 1996. Akışkan yatakta yakma teknolojisi ve Türk linyitlerine adaptasyonu, *TMMOB 1.Enerji Sempozyumu*, Ankara, 12-14 Kasım, s. 83-92.
- [7] **Gündoğdu M.H.**, 2013. İkincil yakma havasının katı yakıtlı kazanın ısı performans ve emisyonuna etkilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [8] **Kartal E.**, 2001. Yanma ve yanma optimizasyonu, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, İzmir, 16, s. 1-5.
- [9] **Özçelik S.A.**, 2014. Kömür yakan kabarcıklı bir akışkan yatağın tasarımı, simülasyonu ve imalatı, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [10] **Duranay N. ve Pehlivan D.**, 2002. Zorlanmış konveksiyonun bazı kömürlerin yanmasına etkisi, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 26, s.75-83.
- [11] **Deveci N.** 1994. Kömürün akışkan yatakta yakılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.



- [12] **Demirbilek A.**, 1987. Kömür kullanımı ve ilgili çevre kirlenmesi, *Madencilik*, Cilt 26, Sayı 3, s. 33-43.
- [13] **Bıyıkoglu A.**, 2002. Sabit yatakta kömür yanma prosesinin modellenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 17, sayı1, 77-96.
- [14] **Düzcan A.**, 2014. Pülverize kömür santrallerinde kazan verimi ve verime etki eden parametrelerin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Güldoğan Y., Durusoy T. and Bozdemir T. Ö.**, 1999. Pyrolysis kinetics of blends of Tunçbilek lignite with Denizli peat, *Thermochimica Acta*, 332, s. 75-81.
- [16] **Özdemir F.**, 2014. Tunçbilek termik santrali'nin 5. ünite kazanındaki alev oluşumunun sayısal incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Shen J., Liu J. and Jiang X.**, 2013. NO<sub>x</sub> emission characteristics of superfine pulverized anthracite coal in air-staged combustion, *Energy Conversion and Management*, 74, s. 454-461.
- [18] **Duranay N. ve Pehlivan D.**, 2005. Çan linyitinin hareketli koşullardaki yanmasının incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, s. 525-532.
- [19] **Varol M.**, 2006. Combustion and co-combustion of olive cake and coal in a fluidized bed, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [20] **İnanlı S.**, 2008. Fluidization and mixing characteristics of biomass particles in a bubbling fluidized bed, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [21] **Keçebaş A.**, 2005. Üstten ve alt yandan beslemeli kömür sobasının hava kirliliğine etkisinin karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [22] **Güngör A.**, 2006. Sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların modellenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **Scharler R., Obernberger I., Langle G. and Heinzle J.**, 2000. CFD analysis of air staging and flue gas recirculation in biomass grate furnaces, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry*, Volume II, s. 1935-1939.

- [24] **Scharler R. and Obernberger I.**, 2000. Numerical modeling of biomass grate furnaces, *5<sup>st</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, s.1-17.
- [25] **Scharler R. and Obernberger I.**, 2001. Deriving guidelines for the design of biomass grate furnaces with CFD analysis- a new Multifuel-Low-NO<sub>x</sub> furnace as example, *6<sup>th</sup> International Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, 1-15.
- [26] **Lin P., Ji J., Luo Y. and Wang Y.**, 2009. A non-isothermal integrated model of coal fired traveling grate boilers, *Applied Thermal Engineering*, 29, s. 3224-3234.
- [27] **Centeno-Gonzalez F.O., Lora E.E.S., Nova H.F.V., Neto L.J.M., Reyes A.M.M., Ratner A. and Ghamari M.**, 2017. CFD modeling of combustion of sugarcane bagasse in an industrial boiler, *Fuel*, 193, s.31-38.
- [28] **Frey H., Peters B., Hunsinger H. and Vehlow J.**, 2003. Characterization of municipal solid waste combustion in a grate furnace, *Waste Management*, 23, 689-701.
- [29] **Yang Y.B., Sharifi V.N. and Swithenbank J.**, 2007. Converting moving grate incineration from combustion to gasification Numerical simulation of the burning characteristics, *Waste Management*, Volume 27, 645-655.
- [30] **Yang Y.B., Ryu C., Goodfellow J. Sharifi V.N. and Swithenbank J.**, 2004. Modelling waste combustion in grate furnaces, *Process Safety and Environmental Protection*, 82, 208-222.
- [31] **Eghlmi A., Lu L., Shajwalla V. and Harris D.**, 1999. Computational modelling of char combustion based on the structure of char particles, *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO*, Melbourne, Australia, 6-8 December, p.141-144.
- [32] **Zhang X., Zhou J., Sun S., Sun R. and Qin M.**, 2015. Numerical investigation of low NO<sub>x</sub> combustion strategies in tangentially-fired coal boilers, *Fuel*, 142, s.215-221.
- [33] **Smedberg M.**, 2009. Evaluation of fluidized bed furnace and moving grate furnace for incineration of municipal waste, *Department of Chemical Engineering Lund Institute of Technology*, April, 1-4.

- [34] **Eriksson M. and Golriz R.M.** 2005. Radiation heat transfer in circulating fluidized bed combustors, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 399-409.
- [35] **Magel H.C., Schnell U. And Hein K.R.G.,** 1996. Simulation of detailed chemistry in a turbulent combustor flow, *Twenty-Sixth Symposium on Combustion*, The combustion Institute, 67-74.
- [36] **Razmjoo N., Sefidari H. and Strand M.,** 2016. Measurements of temperature and gas composition with in the burning bed of wet woody residues in a 4 MW moving grate boiler, *Fuel Processing Techonology*, 152, 438-445.
- [37] **Holkar R. and Hebbal O.D.,** 2013. CFD analysis of Pulverised-coal combustion of burner used in furnace with different radiation models, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 25-34.
- [38] **Wang J., Lou H., Yang F. ve Cheng F.,** 2018. Numerical simulation of a decoupling and Re-burning combinative Low-NO<sub>x</sub> coal grate boiler, *Journal of Cleaner Production*, 188, 977-988.
- [39] **Mehrabian R., Stangl S., Scharler R., Obernberger I. and Weissinger,** 2011. CFD simulation of biomass grate furnaces with a comprehensive 3D packed bed model, *Proceedings of the 25 th German Flame Day*, Germany-Karlsruhe, September, pp. 1-11.
- [40] **Yin C., Rosendahl L., Clausen S., and Hvid S.,** 2012. Characterizing and Modeling of an 88 MW Grate-Fired Boiler Burning Wheat Straw: Experince And Lessons, *Energy*, 41, 473-482.
- [41] **Zhang X., Chen Q., Bradford R., Sharifi V. and Swithenbank J.,** 2010. Experimental investigation and mathematical modelling of wood combustion in a moving grate boiler, *Fuel Processing Technology*, 91, 1491-1499.
- [42] **Collazo J., Porteiro J., Miguez J.L., Granada E. And Gomez M.A.,** 2012. Numerical simulation of a small-scale biomass boiler, *Energy Conversion and Management*, 64, 87-96.
- [43] **Erbaş O., Topal H., ve Durmaz A.,** 2008. Effects of the size distribution of fuel particulate on the heat gate in the inner surface of fluidized bed, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16, 91-96.

- [44] **Gungor A.**, 2007. Analysis of combustion efficiency in a CFB coal combustor, *Fuel*, 87, 1083-1095.
- [45] **Sahajwalla V., Eghlimi A. And Farrell K.**, 1997. Numerical Simulation of Pulverised Coal Combustion, *International Conference on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation CSIRO*, Australia-Sydney, 1-7.
- [46] **Ateşok G., Özer M., Burat F. ve Karakaş F.**, 2006. Teknolojiden yararlanarak bir gelecek kurmak - temiz kömür teknolojilerinde yeni boyutlar, *Türkiye 10. Enerji Kongresi*, İstanbul, 29 Kasım, 1-17.
- [47] **Kural O.**, 1998. Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri, Özgün Yayıncılık, İstanbul.
- [48] **Böke E.**, 2004. Endüstri Kazanları, Doğa Yayınları, İstanbul.
- [49] **Cıvaoglu İ.**, 1963. Yanma Kimyası ve Tabii Katı Yakacaklar, İstanbul Teknik Üniversitesi, Cilt I, İstanbul.
- [50] **Çengel Y.A., and Cimbala J.M.**, 2008. Akışkanlar Mekaniği, Güven Kitabevi, İzmir.
- [51] **Çengel Y.A. and Boles Y.**, 2008. Termodinamik, Güven Kitabevi, İzmir.
- [52] **Acaroglu, M.**, 2003. Alternatif Enerji Kaynakları, Atlas Yayınevi, İstanbul.
- [53] **Soğukoğlu M.**, 2007. Akışkanlar Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [54] **Uralcan Y.**, 2004. Sıcak Su Kazanları, Doğa Yayınları, İstanbul.
- [55] **Pınarbaşı A.**, 2008. Termodinamik, İzmir Güven Kitabevi, İzmir.
- [56] **Şen, Z.**, 2002. Temiz Enerji ve Kaynakları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [57] **Miller B.G.**, 2005. Coal Energy Systems, Elsevier, Amsterdam.
- [58] **Incropera F.P. ve DeWitt D.P.**, 2004. Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [59] **Çengel Y.A.**, 2011. Isı ve Kütle Transferi, Güven Kitabevi, İzmir.
- [60] **Mortimer C.E.**, 1993. Modern Üniversite Kimyası, Cilt 1, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [61] **Bartok W. and Sarofim A.F.**, 1991. Fossil Fuel Combustion: a Source Book, A Wiley-Interscience Publication.
- [62] **Şahin B., Öztop H. F.**, 2018. "A computational analysis of lignite coal combustion in a moving grate boiler: Emission results, International Science and Engineering Congress, 04-06 September, Girne, Kıbrıs.
- [63] <http://www.ansys.com/> 22.05.2018

- [64] <https://www.fire.com/> 22.05.2018
- [65] <https://www.StarCD.com/> 22.05.2018
- [66] <https://www.cfx.com/> 22.05.2018
- [67] <http://www.mimsangrup.com.tr/> 22.05.2018
- [68] <http://www.alfakazan.com.tr/> 22.05.2018
- [69] <http://www.yildizkazan.com.tr/> 22.05.2018
- [70] <http://www.tki.gov.tr/> 22.05.2018
- [71] <http://www.isimek.com.tr/> 22.05.2018
- [72] <http://siterm.com/> 22.05.2018
- [73] <http://www.selnikel.com.tr/> 22.05.2018



## ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Elazığ’ da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ’ da tamamladı. 2008 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Öğretmenliği bölümünden mezun oldu. 2009 yılında Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi İşletme Bölümünden mezun oldu. 2010 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisansını tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Beşikdüzü Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi Beşikdüzü Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

- Turan B., "İçerisine Keskin Uçlu Disk Yerleştirilmiş Borularda Karma Taşınım Isı Transferinin İncelenmesi", BAP Yüksek Lisans, 2021, Araştırmacı, 2010.
- Öztop H.F., Varol Y., Koca A. , Fırat M., Turan B., Metin I., "Experimental investigation of cooling of heated circular disc using inclined circular jet", International Communications in Heat and Mass Transfer, pp.990-1001, 2011.
- Turan B., Öztop H.F., "Analysis of heat transfer in a heated tube with a different shaped disc insertation", 6th Int. Adv. Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- Turan B., Öztop H.F., "Analysis of Heat Transfer in a Heated Tube with a Different Typed Disc Insertion", Thermal Science, vol.16, pp.139-149, 2012.
- Ekserji ve uygulamaları yaz kursu, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Temmuz, 2012.
- Turan B., "Sürdürülebilir Çevre ile Enerji Yönetim Sistemi", T.C. Doğu Karadeniz Kalkınma Ajansı, 2013, Yönetici, 2013.
- Şahin B., Öztop H. F., "A computational analysis of lignite coal combustion in a moving grate boiler: Emission results", International Science and Engineering Congress, 04-06 September 2018, Girne, Kıbrıs.