

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PULVERİZE KÖMÜR KAZANINDA YAKICI AÇILARININ ALEV YAPISI
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halit Tolga ERKEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı – Akış Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PULVERİZE KÖMÜR KAZANINDA YAKICI AÇILARININ ALEV YAPISI
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Halit Tolga ERKEN
(503121114)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı - Akış Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yakup Erhan BÖKE

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121114 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Halit Tolga ERKEN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “PULVERİZE KÖMÜR KAZANINDA YAKICI AÇILARININ ALEV YAPISI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Yakup Erhan BÖKE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Turgut Yılmaz**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özgür Atayılmaz
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Kasım 2016
Savunma Tarihi : 29 Aralık 2016





Yaseminime ve aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmasında her türlü yardımını esirgemeyen ve katkıda bulunan, hesaplamalı analiz sürecinde beni yönlendiren ve tezi tamamlamamda büyük katkıları olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Yakup Erhan BÖKE'ye içten teşekkürlerimi sunarım.

Bütün eğitim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren ve teşvik eden aileme ve bu zorlu süreçte her zaman yanımda olan, destekleri ve teşvikleriyle tezi hazırlamamda büyük katkısı olan ve tez çalışması sırasında beni çeken kız arkadaşım Yasemin TOKMAK'a teşekkürlerimi sunarım

Kasım 2016

Halit Tolga ERKEN
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	2
2. TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALİ	7
2.1 Tunçbilek Termik Santralinin Tarihçesi	7
2.2 Tunçbilek Termik Santrali 5 Numaralı Ünitesi	7
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ METODOLOJİSİ	11
3.1 Korunum Denklemleri	11
3.2 Enerji Denklemleri	12
3.3 Çalkantı Modelleme	13
3.3.1 Realizable $k - \epsilon$ modeli	14
3.3.2 Duvar kenarı yaklaşımları (near wall treatment)	16
3.4 Önkarişimsız Yanma Modeli	17
3.4.1 Kirlletici modelleri NO_x	19
3.5 P1 Işınım Modeli	20
3.6 Ayrık Faz Modelleri	21
4. PROBLEMİN TANIMI VE AYRIK UZAY OLUŞTURMA	23
4.1 Ayrık Uzay Oluşturma	27
4.2 Sınır Şartları Ve Modelleme	29
4.3 Analiz Doğrulama Çalışması	31
5. SONUÇLAR	35
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	65
7. KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

AIC	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
PDF	: Probability Density Function
DO	: Discrete Ordinates
RANS	: Reynolds Averaged Navier Stokes
LES	: Large Eddy Simulation





SEMBOLLER

ρ	: Akışkanın yoğunluğu
v	: Akışkanın hızı
S_m	: Kaynak terimi
v_x	: Eksenel Hız
v_r	: Radyal Hız
p	: Statik basınç
τ	: Gerilme tensörü
g	: Yerçekimi kuvveti
F	: Dış kuvvet
μ	: Moleküler vizkozite
I	: Birim tensör
v_z	: Girdap hızı
c	: Ses hızı
γ	: Özgül ısıların oranı
p_0	: Toplam basınç
T_0	: Toplam sıcaklık
p_{op}	: İşletme basıncı
R	: Evrensel gaz sabiti
M_w	: Moleküler ağırlık
k	: Çalkantı kinetik enerji
ε	: Disipasyon oranı
σ_k	: Çalkantı kinetik enerji prandtl sayısı
σ_ε	: Disipasyon oranı prandtl sayısı
H	: Toplam entalpi
Y_j	: J maddesinin kütle oranı
$T_{ref,j}$	: J maddesinin referans sıcaklığı
$h_j^0(T_{ref,j})$	: J maddesinin referans sıcaklığındaki oluşum entalpisi
r	: Pozisyon vektörü
s'	: Saçılma yön vektörü
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti
f	: Karışım oranı
Z_i	: İ elementinin kütle oranı
f'^2	: Karışım oranı varyansı
$p(f)$	: Olasılık fonksiyonu



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: 5 numaralı kazan karakteristiği.....	9
Çizelge 2.2: Beş numaralı ünite karakteristiği.	10
Çizelge 4.1: Kömür tanecikleri püskürtme koşulları.	30
Çizelge 4.2: Kullanılan kömür çubuk analizinden elde edilen değerler.	30
Çizelge 4.3: Kullanılan kömürün elemental analizinden elde edilen değerler.....	30
Çizelge 4.4: Kullanılan kömürün özellikleri.....	30
Çizelge 4.5: Test veri sıraları yükseklikleri.	31
Çizelge 4.6: Hesaplanan ve ölçülen sıcaklıkların karşılaştırılması.....	31
Çizelge 5.1: Farklı durumların karşılaştırılması.....	35
Çizelge 5.2: Farklı durumlar için hesaplanan en yüksek sıcaklık değerleri.....	41
Çizelge 5.3: Kömür taneciklerinin kazanda en kısa, en uzun ve ortalama kalma süreleri.	56



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Üretilen elektrik enerjisinin gruplara göre dağılımı.	2
Şekil 1.2: Kazanın dik kesitteki sıcaklık profilleri.	3
Şekil 1.3: Oksijen oranına bağlı olarak Stefan akışının ihmal edildiği ve edilmediği durumlardaki çözümlerin karşılaştırılması.	5
Şekil 2.1: Tunçbilek termik santralinin yıllara göre elektrik üretimi.	8
Şekil 2.2: 5 numaralı kazan yapısı şematik görünümü.	8
Şekil 3.1: Homojen olarak akışa yayılmış çalkantı.	14
Şekil 3.2: Sınır tabakada oluşan çalkantı.	14
Şekil 3.3: Duvar kenarında akış rejimleri.	17
Şekil 4.1: Kazan kesit geometrisi.	23
Şekil 4.2: Modellenen kazan geometrisinin a) önden görünüşü, b) yandan görünüşü ve c) izometrik görünüşü.	24
Şekil 4.3: Kömür yakıcılarının (a) yatay, (b) düşey düzlemdeki yerleşimi ve konumları.	25
Şekil 4.4: Kömür yakıcıları yakından önden görünüşü.	26
Şekil 4.5: Kömür yakıcıları kesit görünüşü	26
Şekil 4.6: Yakıcı kömür ve hava girişleri.	26
Şekil 4.7: Oluşturulan ağ yapısı.	27
Şekil 4.8: Sık ağ yapısı bölgesi kesit görüntüsü.	28
Şekil 4.9: Yakıcılar ağ yapısı.	28
Şekil 4.10: Yakıcı ağ yapısı kesit görüntüsü.	29
Şekil 4.11: Deneysel sıcaklık ölçüm noktaları.	32
Şekil 4.12: Sıcaklık dağılımı.	33
Şekil 4.13: Kazan çıkışı sıcaklık dağılımı.	33
Şekil 5.1: Farklı durumlar için YZ eksenindeki sıcaklık dağılımları.	36
Şekil 5.2: Farklı durumlar için YZ eksenindeki karışım oranları.	37
Şekil 5.3: Farklı durumlar için XY düzleminde ki hız dağılımları.	38
Şekil 5.4: Farklı durumlar için alt sıra yakıcıları sıcaklık dağılımı.	39
Şekil 5.5: Orta sıra yakıcılar sıcaklık dağılımı.	40
Şekil 5.6: Üst sıra yakıcılar sıcaklık dağılımı.	40
Şekil 5.7: Durum 1 için hacim sıcaklık dağılımı.	41
Şekil 5.8: Durum 2 için hacim sıcaklık dağılımı.	42
Şekil 5.9: Durum 3 için hacim sıcaklık dağılımı.	42
Şekil 5.10: Durum 4 için hacim sıcaklık dağılımı.	43
Şekil 5.11: Değerlerin alındığı eksen çizgisi.	44
Şekil 5.12: Çizgi üzerindeki sıcaklık dağılım grafiği.	44
Şekil 5.13: Çizgi üzerindeki hız dağılımı grafiği.	45
Şekil 5.14: Karbon kütle oranları.	46
Şekil 5.15: Karbonmonoksit (CO) kütle oranları.	47
Şekil 5.16: Karbondioksit (CO ₂) kütle oranları.	48

Şekil 5.17: Karbon kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.	49
Şekil 5.18: Karbon monoksit kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.....	49
Şekil 5.19: Karbon dioksit kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.....	50
Şekil 5.20: Normalize karbonmonoksit, karbondioksik ve katı karbon salınımları... 51	
Şekil 5.21: Alt sıra yakıcılar akış çizgisi.	52
Şekil 5.22: Orta sıra yakıcılar akış çizgisi.	53
Şekil 5.23: Üst sıra yakıcılar akış çizgisi.	54
Şekil 5.24: Orta sıra yakıcılarından gönderilen kömür taneciklerinin hareketi.	55
Şekil 5.25: Hidrojen siyanür (HCN) kütle oranı.	56
Şekil 5.26: Hidrojen siyanür (HCN) gradyenleri.	57
Şekil 5.27: Azot Oksit (NO) kütle oranı.	58
Şekil 5.28: Azot oksit (NO) gradyenleri.	59
Şekil 5.29: Diazot monoksit (N ₂ O) kütle oranı.	60
Şekil 5.30: Diazot monoksit (N ₂ O) gradyeni.	61
Şekil 5.31: HCN kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.	62
Şekil 5.32: NO kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.....	62
Şekil 5.33: N ₂ O kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.	63
Şekil 5.34: Farklı durumların normalize edilmiş kirletici salınımları.	64

PULVERİZE KÖMÜR KAZANINDA YAKICI AÇILARININ ALEV YAPISI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Kütahya ili sınırları içersinde yer alan Tunçbilek termik santralinin 150 MW kapasiteye sahip olan 5 numaralı kazanı sayısal olarak incelenmiştir. 5 numaralı kazan teğetsel yanma tipi olup, 3 farklı yükseklikte ve her yükseklikte 6 adet olmak üzere toplam 18 yakıcıya sahiptir. Her sıradaki yakıcıların 4 adeti köşelerde ve 2 adeti de karşılıklı yüzeylerde yer almaktadır.

Kazanın katı modellemesi ANSYS Design Modeller R16.2 versiyonu kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan katı modelde Ansys Meshing R16.2 programı kullanılarak ve bölgesel iyileştirme yapılarak ayırık uzay oluşturulmuştur. Oluşturulan ayırık uzayda toplam 4.4 milyon eleman kullanılmaktadır.

Yapılan analizlerde burgaç hareketini daha iyi yakalamak adına realizable k-ε çalkantı modeli ve Menter-Lencher duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Kömür yanma odasına tanecikler halinde yollanmış ve kömür taneciklerinin takip edilmesinde Lagrangian yöntemi kullanılmıştır. Yanma reaksiyonu için ön karışimsız yanma modeli kullanılmış ve PDF tabloları oluşturulmuştur. Işınım modeli olarak P1 modeli seçilmiş ve sayısal analizde yanma odasındaki sıcaklık, katı ve gaz emisyon dağılımı hesaplanmıştır.

PDF tablosu hazırlanırken santralden alınmış olan kömür elemental analizleri kullanılmış ve bu analizin sonuçları Fluent programı altında yer alan kömür hesaplama aracı kullanılarak PDF tablosu oluşturmada kullanılmıştır.

Yapılan sayısal analizlerde gerçek boyutlarda kazan kullanılmıştır. Kazan hava ve kömür debileri sınır şartları belirtilirken sahadan alınan gerçek koşul verileri kullanılmıştır. Duvar sıcaklıkları ölçümler sonucunda suyun doyma sıcaklığından 50K yüksek olarak sabit sıcaklıkta tanımlanmıştır. Kazanın içindeki boruları modellemenin zorluğu ve işlem gücünün kısıtlı olması nedeniyle gözenekli ortam yaklaşımı yapılmış ve analizler bu yaklaşım ile tamamlanmıştır.

Bu çalışmada 4 farklı durum üzerinde durulmuştur. Mevcut durum, yakıcı açılarının yukarıya kaldırıldığı ve aşağıya indirildiği durumlarla karşılaştırılmış ve yanma gazları çıkış alanı 2 katına çıkarılmıştır. Yapılan bu incelemelerde öncelikle mevcut durum analizleri test sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar kontrol edilmiştir. Sonuçların doğrulanması sonrasında ise sırasıyla sıcaklık ve hız dağılımları incelenmiş, yanma gazları olan karbonmonoksit ve karbondioksit gazları karşılaştırılmış ve son olarak kirletici gazları olan hidrojen sülfür, azot oksit ve diazot monoksit gazları salınımları karşılaştırılmıştır.



INVESTIGATION OF PULVERIZED COAL BURNER FLAME STRUCTURE REGARDING TO THE INJECTOR ANGLE

SUMMARY

Today's World wealth level measured with the usage and generation of the energy, mostly the electric energy. In Turkey, we have coal beds so the coal-fired power plants became very important. When making a literature survey, you can see that there is lots of new publication about this subject. It also show that coal-fired power plants still very important for electricity producing.

In this thesis, the Tunçbilek coal-fired power plant's number five boiler was investigated. This boiler is tangential boiler and it could provide 150 MW power. It has three level of coal injectors and each level has six injectors, four of them stays on the corners and two of the stay on the opposite sites.

Solid model of the boiler was modelled with Ansys Design Modeller R16.2. The original geometry was modelled for the analysis. The boiler has 69 m length, 12 m width and 12m depth. It is modelled from slag zone to exhaust outlet zone. The tangential boiler has 3 level of burner. First level stays on the 10.4 meter height, second level stays on 13.03 meter and the last one stays on 15.66 meter. First level's burners stay parallel to the ground, but the second and third ones have upper 7° angle regarding to the ground.

Meshing of the geometry was prepared with Ansys Meshing R16.2 program. Tetrahedral mesh method was chosen because of the automatic meshing procedure. Model have 4.4 million elements. On the model, both coarse and fine elements were used. On the fire region, and inlet and outlet boundaries, fine mesh was used. Other sides, of course with the reasonable growth rate, coarse mesh used for the calculation time and required memory.

For computation fluid dynamics analysis, realizable $k-\epsilon$ turbulence model was used. Realizable $k-\epsilon$ turbulence model can be used wide range of application and tested lots of time. Realizable $k-\epsilon$ turbulence model predict better results for the rotational flow compared to the standard $k-\epsilon$ turbulence model so for this problem, rotational flow is dominant. Also two equations models required less computational power and computational time.

For near wall treatment model, Menter-Lencher method was used. According to the Fluent, this model is independent y^+ model. Because of the size of the geometry, boundary layer could not be used results of the computational power. Boundary layer was modelled with Menter Lencher method.

Non-Premixed PDF model was used to mimic combustion reaction. Empirical coal fuel was calculated with coal calculator tool under the Fluent R16.2. The required data for coal calculator was getting from elemental analysis of the coal.

For the radiation, P1 radiation model was used for the analysis. Also radiation from coal particles included to analysis. P1 model can provide reasonable results with less computation power regarding to the other models on the Fluent.

Calculation of the pollutants, NO_x calculation model was used. NO , HCN and N_2O gases investigated for the analysis.

Lagrangian method of particle track was used for coal particles. Injection of the coal was defined for the injectors. %43 of coal injected from bottom injectors, %35 of coal injected from the middle injectors and %22 of coal injected from the upper injectors. Rosin-Rammler method was used to define coal distribution between measured maximum and minimum diameter. Also mass flow, velocity magnitude and temperature was defined for the coil injector boundary condition.

Pipes and economizer of the boiler was not modelled since they have very complex geometries and they need very fine mesh to resolve. Porous zone was used to simulate pressure drop. Porosity ratio was taken as 0.8 to model it.

For the walls, no slip boundary condition was defined. The temperature of the walls are 659 K.

%43 of air was sent to the lower injectors, %43 of the air was sent to the middle injectors and %14 of total air was sent to the upper ones. Mass flow inlet condition used to define.

For the analysis, total 4 different case was prepared. The first one is the standart case. The second case, case 2, injectors have a bigger angle between ground. This case's injectors look up. The third case, case 3, injectors have smaller angle (negative angle for bottom injectors) regarding to the standart case. Its injectors look down. And the forth case, case 4, have a bigger outlet are compared to the standart case. The outlet area was doubled for the analysis.

First of all, case 1 compared to the experimental results. While the results examined, there were temperature value for 8 points and average temperature for outlet. Just one point have %34 uncertainty. This point stays at the top side of the furnace. It could be a result of the porous region approximation. After the verification of the model was completed, parametric studies were done.

While we investigated different cases, It can be seen that the maximum temperature was 1500K. On the case 3 temperature is lower than the other cases below injectors, but its temperature also increase to 1500K slower than others. It is the result of the higher fuel accumulation below to the injectors.

Also when the different cases analysis, It can be easily seen that the bottom injectors create the center of the air-fuel vortex. The middle lines can penetrate a little to the center of the vortex however the top line cannot penetrate the vortex.

Also when the residence time of the coil particules were investigated, case 4, case which has the bigger outlet, had the smallest residence time.

Carbon dioxide emission is the similar for all of the four cases. However carbon monoxide and unburned carbon emissions is the biggest for case 4. It can be the result of small residence time.

Also the poisonous gases, hydrogen cyanide (HCN), nitrogen monoxide (NO), and nitrogen dioxide (N_2O) emissions were analysed. All of the four cases have similar emission for these gases. On the analysis, It can be seen that dross area was the biggest cause of this emissions. On the real life, dross are regularly cleaned. However for the analysis, the boundary condition of the bottom furnace, which is the dross are, used as wall.

All of the cases are examined and it can be seen that the best case is the standart case, case 1. Temperature distribution on the contours are the similar for the cases. However, the emissions are smallest on the case 1.

On the future works, it can be changed air fuel ratio on the injectors. For this study, one group of injectors send only air. Also each line of injectors have different fuel – air ratio.

And as it seen on the analysis, middle and top injectors could not penetrate the vortex. Their speeds and their tangential angle can be changed to investigate the flame characteristic of the furnace.





1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında ülkelerin gelişmişlik düzeyi enerji üretim ve tüketimlerine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Kullanılan enerjilerin içerisinde şüphesiz ki elektrik enerjisi en ön sırayı almaktadır.

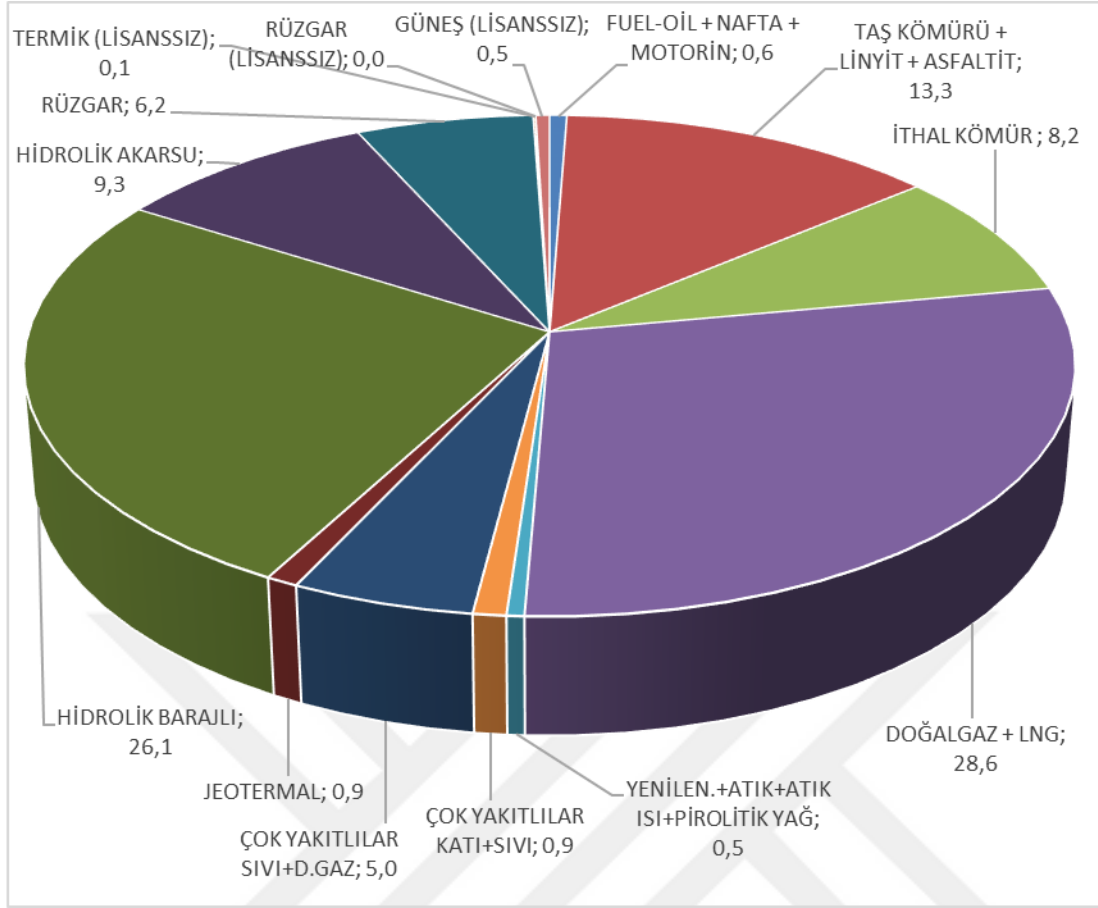
Şu anki teknoloji ile elektrik üretmekte kullanabileceğimiz kısıtlı alternatifler bulunmaktadır. Elektriği üretmek için fosil yakıtlar (doğalgaz, kömür, fuel-oil vs), nükleer enerji, hidrolik enerji (barajlar, akarsular, vs) veya yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgâr, güneş, jeotermal vs.) kullanılabilir.

Enerji üretiminde belirli kıstaslara dikkat edilmesi gerekmektedir. Üretilen enerji güvenilir, sürdürülebilir, çevreye duyarlı ve ucuz olmalıdır. Tüm kıstasları bir arada sağlayan bir kaynağımız olmadığı için en doğru çözüm farklı üretim metotlarını bir arada kullanmaktır. Örnek olarak yenilenebilir enerji kaynakları temiz enerji üretirken güvenilir değildirler. (rüzgâr, güneş vb. bağımlılıkları vardır). Fosil yakıtlar ise güvenilir enerji üretirken sürdürülebilirlikleri ve temizlikleri birer soru işaretidir.

Türkiye’de enerji ihtiyacının [1] %28.6’sı doğalgaz + LNG ile çalışan santrallerden; %13.3’ü ise linyit + taş kömürü + asfaltit ile çalışan santrallerden üretilmektedir. 31 Mart 2016 itibariyle Türkiye’de üretilen elektrik enerjisinin gruplara göre dağılımı aşağıdaki Şekil 1.1’de görülebilir [1].

Grafikten görüleceği gibi Türkiye elektrik üretiminde doğalgaz rezervleri bulunmadığı için yurtdışına bağımlı hale gelmiştir. Bu bağımlılık azaltmak adına güvenilir enerji kaynağı olarak kömür enerjisiyle çalışan termik santraller geliştirilmelidir.

Günümüz teknolojisinde termik santrallerin çevreyi kirletici gaz ve partikül salınımları azaltılmış ve azaltılmaya devam etmektedir. Bu bağlamda kömür kazanlarında yanmayı anlayıp dizayn ve kontrol etmek önem kazanmaktadır.



Şekil 1.1: Üretilen elektrik enerjisinin gruplara göre dağılımı.

Kazanlar yapısı gereği büyük boyutlu imal edilmekte, yanmanın doğası gereği ise yanma bölgelerinde ölçüm yapılması zor olmaktadır. Aynı zamanda deneme yanılma metoduyla kazan geliştirmek hem pahalı hem de üretim açısından emek yoğun bir çalışma olmaktadır. Bu nedenle literatürde kabul gören ve kazan geliştirmekte kullanılan bir yöntem olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak Tunçbilek termik santrali 5 numaralı kazanı analizleri yapılmasına karar verilmiştir.

Yapılan bu analizler sonucu yanmanın karakteristiğini belirlemek, ithal kazanları yerli kömüre uygun hale getirmek için temel oluşturmak ve gelecekte yerli kazan üretimi için bilgi birikimi oluşturmak planlanmaktadır.

1.1 Literatür Araştırması

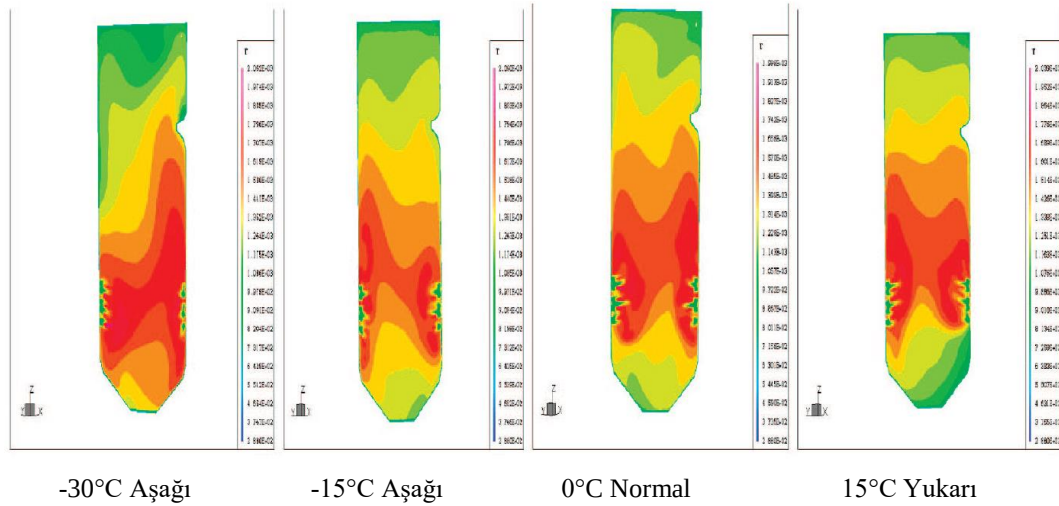
Literatür taraması yapıldığında kömür yanması üzerine fazla sayıda çalışma olduğu görülebilir. Konu üzerine fazla sayıda çalışma olması, kömür yanmasına dünya bilim

adamlarının verdiği önemi göstermektedir. Bu çalışmalar arasında mümkün olduğunca güncel olanlar ve ele aldığımız konu ile bağlantılı olanlar incelenmiştir.

Kumar [2] yaptığı çalışmada Fluent programı kullanarak %40 daha fazla kül içeren Hindistan kömürü için yanma analizleri yapmıştır. Bu analizlerde 210 MW gücündeki tanjant yanmalı kazanlar kullanılmıştır. Kullanılan kazanlarda 6 sıra enjektör bulunmaktadır.

Kumar [2] türbülans modeli için standart k- ϵ türbülans modeli kullanmış; partikülleri takip etmek için Lagrangian yaklaşımından faydalanmış ve yanma modellemesi için de PDF fonksiyonu kullanmıştır.

Analiz sonuçlarında HAD çözümlemesinin kazan yanmasını anlamak ve yapılan değişikliklere karşılık kazan performansını ölçmek için verimli bir yol olduğu belirlenmiştir [2]. Aynı şekilde yakıcı eğimlerini değiştirerek kömürün kazanda kalma süresini ve alev topunun olduğu bölgenin değiştirilebileceğini göstermiştir [2] (Şekil 1.2). Sonuç olarak tanecik boyutlarının yanma süresini etkilediği için geometri seçiminin partikül boyutu ve kömür karakteristiği göz önüne alınarak yapılması gerektiğini belirtmiştir [2].



Şekil 1.2: Kazanın dik kesitteki sıcaklık profilleri [2].

Jun Li [3] yaptığı çalışmada ise daha çok parçacıklar ve kirleticiler üzerine odaklanmıştır. Li'ye göre düşük NO_x teknolojisi kullanıldıkça yanma sonucu oluşan yanmamış karbonların oranı artmakta, bunun sonucu olarak yanma tam gerçekleşmediği için yanma verimi ve toplam verim düşmekte; çevreye ise kül salınımı artmaktadır. Yanmamış karbon oranını azaltmak için ya değirmenden çıkan

partikül boyutunun küçültülmesi gerekmekte ki bu seçenek için kömürün daha temiz olması ve değirmenin revize edilmesi gerekmektedir [3]. Bu konuda yapılan çalışmalar göstermektedir ki böyle bir revizyon ekonomik olarak uygulanabilir çıkmamaktadır. – ya da kömürün karakteristiği değiştirilmektedir ki bu da bölgede çıkarılan kömür sabit olduğu için mümkün değildir [3]. Bundan dolayı kazanın yanma karakteristiği üzerine gidilmelidir. Li bu çalışmasında yanma karakteristiğine odaklanmıştır.

Çalışmada 140 MW, 170 MW ve 200 MWlık 3 ayrı kazan incelenmiş, yapılan analizlerde standart k- ϵ türbülans modeli standart duvar fonksiyonu yaklaşımı ile kullanılmıştır. Radyasyon modeli olarak ise DO modeli kullanılmıştır [3].

Yanmamış karbon oranını azaltmak için kazandaki kömür – hava dağılımı düzenlenerek homojen karışım elde edilmeli, hava – yakıt oranı artırılmalı ve kömürün kazan içerisinde daha uzun süre kalması sağlanarak yanmanın tamamlanması sağlanmalıdır [3].

Yapılan analizlerde her üç kazan için hava – yakıt oranı ve kömürün kazanda kalma süresinin yanmamış hidrokarbon oranına etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre hava – yakıt oranı yanma karakteristiğini doğrudan etkilerken, kazanda kalma süresi sadece yakıcılar düşük seviyede yer alırsa etkili olmaktadır [3]. Verimli bir kazan elde etmek için öncelikle fakir yanma koşulları incelenmeli ve alınan sonuçlar üzerinde hava – yakıt katsayısı ve kalma süresi değiştirilerek en efektif koşullar belirlenmelidir [3].

Naserin [4] yayınladığı çalışmaya göre CO₂, NO_x ve SO_x emisyonlarını azaltmak amacıyla pulverize kömür yakıcılarında reaksiyonu oluşturmak için hava yerine saf oksijen ve bununla birlikte yanma sonucu oluşan gazlar veya CO₂ yollanmaktadır. Buradaki amaç CO₂ konsantrasyonunun artırılması, sonucunda ise CO₂ ayrılması ve depolanmasının kolaylaştırılmasıdır. Bu yöntemde O₂ oluşturmak için harcanılan enerji üretilen enerjinin %10'nuna denk gelmekte; buna ek olarak CO₂ depolamak için kullanılan enerji de üretilen enerjiden temin edilmektedir [5,6].

Nasere göre Kazanda hava yerine farklı gazların kullanılması sonucu yanma karakteristiği değişmektedir [4]. Kazan içi sıcaklık dağılımları, tür konsantrasyonları ve hatta ısıma karakteristiği değişim göstermektedir. Yapılan çalışmalarda azot

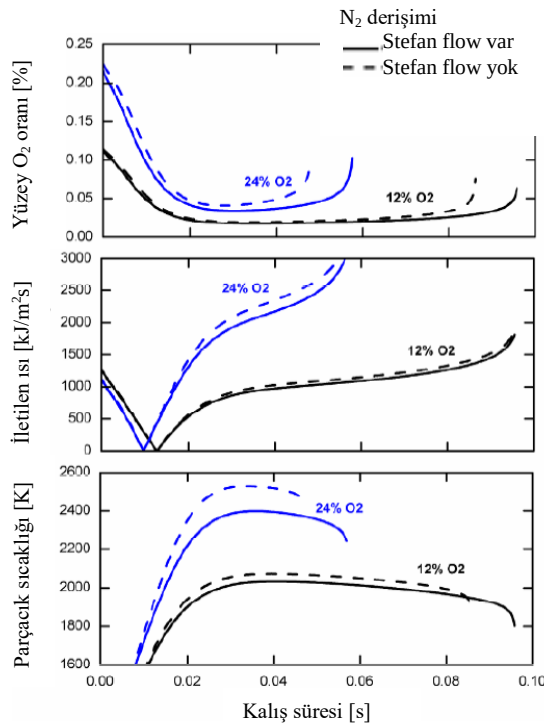
yerine yoğun CO₂ derişimleri kullanıldığında yanma gazlarının soğurduğu ısı kapasitenin arttığı ve alev hızının 1/3 ile 1/5 oranında azaldığı gözlemlenmiştir [4].

Naser çalışmasında HAD analizleri kullanarak oksijen yakıtlı yakıcılarda yanma karakterini analiz etmiştir. Bunun için 100 kW gücündeki laboratuvar boyutlarındaki Anderson yakıcısını kullanmıştır. Analizler için ise 3 farklı oranda yakıcı olarak O₂ ve CO₂ gazı kullanmıştır.

Yapılan analizlerin sonuçları test sonuçları ile karşılaştırıldığında sıcaklık dağılımları ve tür derişimlerinin doğru bir şekilde hesaplanabildiği görülmüştür. Yapılan analizlerde O₂ oranları artırıldıkça alev sıcaklığının yükseldiği, alev yapısının kısaldığı ve kazan çıkış bölgesine yaklaştığı görülmüştür [4]. Benzer şekilde hava yerine O₂ ve egzoz gazları kullanıldığında çıkıştaki CO₂ oranı 5 kata kadar artmıştır.

Tek adımlı kimyasal tepkimeden dolayı yapılan analizlerde nem daha yüksek hesaplanmıştır. Bunun sebebi olarak ise kararsız radikallerin tek adımlı hesaplamalarda modellenmemesidir [4].

Chai'nin [7] araştırmasında pulverize kömür yanmasında kullanılan modeller ve kok oluşumu incelenmiştir. Chai koklaşmanın kömür yanmasında toplam yanma süresini ve radyasyonla ısı transferini baskılayan süreç olduğunu belirtmiştir [7].



Şekil 1.3: Oksijen oranına bağlı olarak Stefan akışının ihmal edildiği ve edilmediği durumlardaki çözümlerin karşılaştırılması [7].

Kok yanma süreci son derece kompleks bir süreçtir. Yapılan çalışmalarda kokun yanmasını etkileyecek çok sayıda faktör bulunmuştur. Bunların bazıları kömür yüzey alanı, kokun porozitesi ve değişimi, stefan akışı, partikül parçalanması ve tanecik safsızlığı olarak sayılabilir [8].

Chai yaptığı çalışmalarda içerisinde %12 ve %24 oksijen içeren kömürleri incelemiş ve eğer kömür %12'nin altında O_2 içeriyorsa Stefan akışının ihmal edilebileceğini Şekil 1.3'de göstermiştir [7].



2. TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALİ

2.1 Tunçbilek Termik Santralinin Tarihçesi

Elektrik günümüz dünyasında vazgeçilmez bir unsurdur. Aslında elektriğin bilinmesi çok eskilere dayanmasına rağmen, kullanışlı hale getirilebilmesi 18. Yüzyılı bulmuştur. 1880’li yıllarda sanayiye uygulanması sonrası ise elektriğin önemi ve sanayinin gelişmesi hızlanmıştır.

Ülkemizde ise ilk defa 1902 tarihinde Tarsus kasabasında 2 kW’lık bir dinamo su değirmeniyle çalıştırılmış; 1913 yılında ise Silahtarağa santrali İstanbul’da işletmeye açılmıştır [9].

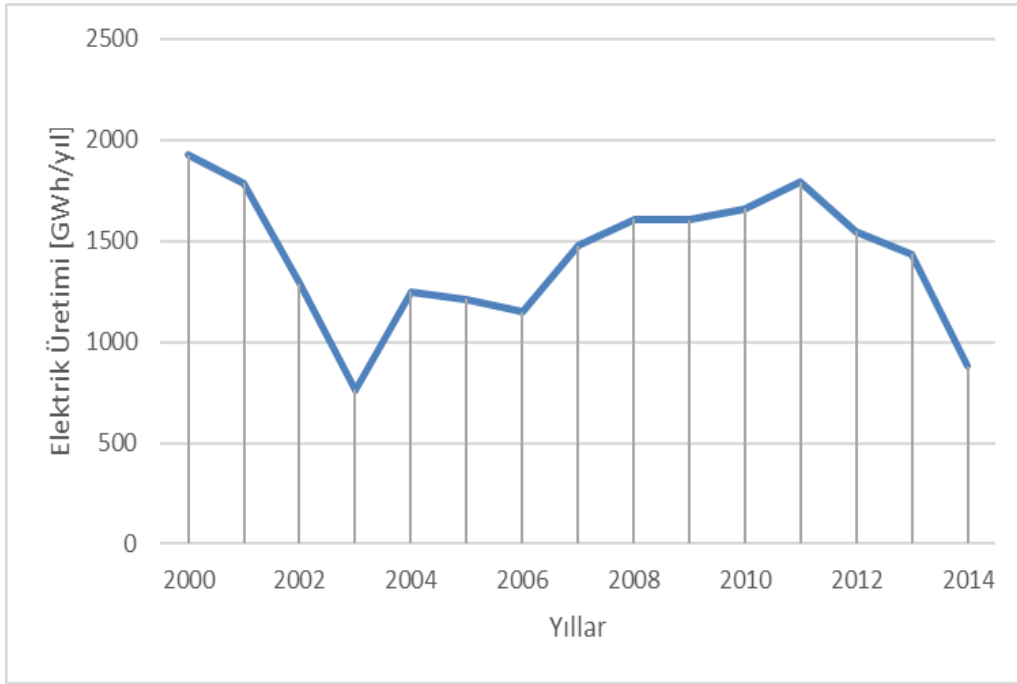
Tunçbilek termik santrali ise ilk olarak 1956 yılında toplamda 48 MW üreten 2 adet 24 MW üniteleri ile işletmeye girmiştir. 1966 yılında ise 65 MW kapasiteli 3. Ünite devreye alınmış; Keban hidroelektrik santralinin işletmeye girmesinin gecikmesi nedeniyle 1977 yılında her biri 150 MW üreten 4. ve 5. Ünite devreye alınmıştır. Bugün 24 MW üreten üniteler kullanılmamaktadır. Santralin toplam 365 MW potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışmada 150 MW güç üreten 5. numaralı kazan incelenmiştir.

Tunçbilek termik santrali Kütahya ilinin Tavşanlı ilçesinin kuzeyinde yer alan Tunçbilek kömür bölgesinde 204,924 m² alana kurulmuştur. Bölgenin seçilmesinde linyit kömür yatakları ve Orhaneli deresinin bulunması etkin rol oynamıştır.

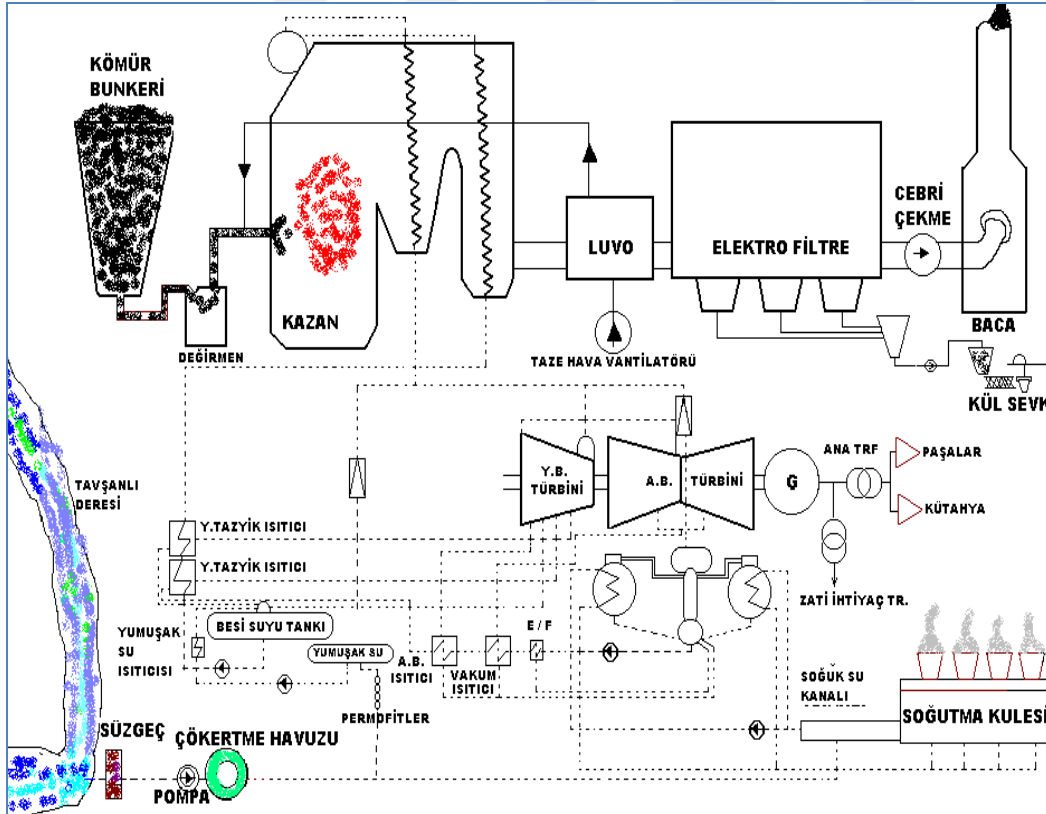
Şekil 2.1’de Tunçbilek termik santralinin yıllara göre elektrik üretim değerleri görülebilir.

2.2 Tunçbilek Termik Santrali 5 Numaralı Ünitesi

5 numaralı ünite 3 sıraya yerleştirilen 12 adet brülör ile beslenen teğetsel yapılı kazan kullanılmaktadır. Yanma sonucu elde edilen ısı ısıtım ve taşınım yolu ile dolaşan akışkana aktarılmaktadır. Şekil 2.2’de şematik olarak 5. ünite ve enerji üretim sistemi görülebilir.



Şekil 2.1: Tunçbilek termik santralinin yıllara göre elektrik üretimi.



Şekil 2.2: 5 numaralı kazan yapısı şematik görünümü [10].

Elektrik enerjisinin üretilebilmesi için Kömür ocakları tarafından gelen ve ısı değeri 9080 kJ/kg, kül oranı % 55, nemi % 24 olan kömür, santralin kömür hazırlama

tesislerinde 0-30 mm büyüklüğünde olacak şekilde kırılır ve kömür park sahasında stok edilir.

150 MW'lık bir grup saatte 156 ton, günde 3744 ton kömür tükettiği için park sahasında en az 1 aylık; yani 112,000 ton'luk stok kömürün bantlarla kazan tesisinde bulunan 6 adet iri kömür bunkerine nakledilir ve daha sonra kazan ateşlenir. Kazan içindeki borular demineralize saf su ile pompalarla basılarak doldurulur.

Kazana önce brülörler ile motorin püskürtülür ve ateşlenerek kazan yakılır. Belirli bir sıcaklık elde edildikten sonra kazana fuel-oil püskürtülmeye başlanır ve yanma odası belirli bir sıcaklığa ulaştıktan sonra kazan bunkerlerindeki kömürü alıp öğütecek olan değirmen motorları devreye alınır. Değirmenler bunkerlerden aldığı kömürü 0-30 mm büyüklüğünde olacak şekilde kırar. 150 MW'lık bir grupta 6 adet kömür değirmeni bulunur ve bu 6 adet değirmenden bir tanesi yedek olarak tutulur.

Öğütülen kömür ısıtılmış hava ile birlikte kazan yanma odasına püskürtülerek yakılır ve 5 adet değirmen ile kazanda 540°C' sıcaklığında ve 13.6 MPa'lık basınçta buhar elde edilir.

Kazanda elde edilen 540°C ve 13.6 MPa sıcaklık ve basınçtaki buhar, yüksek basınç türbinine gönderilir ve türbini çevirmeye başlar. Burada iş üreten buhar tekrar kazana gider, ara ısıtılır ve orta basınç türbinine gelir. Orta basınç türbini iş üretir ve buradan çıkan buhar, alçak basınç türbinine geçer ve türbin 3000 devir / dakika ile dönmeye başlar. Türbinde iş üreten buhar, kondenserde yoğunlaştırılır. 7 adet ısıtıcıda ısıtılarak tekrar besleme suyu pompaları ile kazana basılır ve tekrar buhar elde edilir. Bu sirkülasyon işlemi aksamadan devam eder ve türbinin 3000 devir / dakika ile dönmesi sağlanır.

5 numaralı ünite'de 0-30 mm çapında; %55 kül, %24 nem olan ve tasarımsal alt ısısı 9080 kJ / kg olan kömür kullanılmaktadır. Ünite nominal çalışma koşullarında saatte 150 ton kömür tüketmektedir. Kazan ve ünite karakteristiği Çizelge 2.1'de görülebilir.

Çizelge 2.1: 5 numaralı kazan karakteristiği.

Kurulu Güç	150 MW
İşletmeye açılış tarihi	11.08.1977
Günlük Yakıt İhtiyacı	3500 Ton
Yardımcı yakıt cinsi	Mazot, Fuel Oil
Ana yakıt stok kapasitesi	120000 Ton

Çizelge 2.2: Beş numaralı ünite karakteristiği.

Kazan Tipi	Domlu tabii sirkilasyonlu, tekrar kızdırıcı, radyasyon ve konveksiyon ısı iletimli, cebri çekişli direk yakma sistemli
Ana buhar sıcaklığı	540 °C
Ana buhar çıkış basıncı	13.6 MPa
Tekrar kızdırıcı buhar sıcaklığı	540 °C
Tekrar kızdırıcı buhar basıncı	3.9 MPa
Nominal debi	480 t/h
Besleme suyu eko giriş sıcaklığı	250 °C
Besleme suyu eko giriş basıncı	15.9 MPa

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ METODOLOJİSİ

Tunçbilek termik santrali 5. nite kazanında yanma analizi yapmak için ANSYS Fluent 16.2 programından faydalanılmıştır. Analizler yapılırken kullanılan modeller bu bölümde açıklanmıştır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, kısaca HAD, akış dinamiklerini, ısı transferini ve kimyasal reaksiyonların hesaplanmasında kullanılan bilgisayar temelli bir analiz yöntemidir. HAD metodu 1920’li yıllarda geliştirilmiş olmasına rağmen ancak 1960 yıllardan sonra araştırma ve tasarım aracı olarak kullanılabilmektedir [11]. Günümüzde ise hesaplama maliyetlerinin azalması ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sonucunda daha detaylı analizlerin daha kısa sürelerde sonuçlandırılması sayesinde endüstriyel ve akademik çalışmalarda içten yanmalı motorlar, elektronik devre soğutmaları, damar kan modellemesi, kömür kazanlarının yanma modellemesi gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır [11].

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği üç aşamalı bir çözüm sürecinden oluşur. Bunlar ön-hazırlık ya da model hazırlanması, çözümleme ve sonuçların değerlendirilmesi olarak sıralanabilir. Kullanılacak modelin hazırlanması ve çözümleme metotları ön hazırlık aşamasında belirlenir [11].

3.1 Korunum Denklemleri

Tüm akış problemlerinin çözümünde kütle ve momentum korunum denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Buna ek olarak yapılan çözümlemede ısı transferi de bulunuyorsa termodinamiğin birinci kanunu olan enerji korunum denklemlerinin de çözülmesi gerekmektedir.

Kütle korunum veya süreklilik denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.1)$$

Denklem 3.1 sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar için geçerli olan kütle korunum denkleminin genel halini ifade etmektedir. Burada S_m sisteme eklenen kütle miktarını ifade etmektedir.

Momentum korunum denklemi ise:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada $\bar{\tau}$ yüzey gerilim tensörünü ifade etmektedir. Yüzey gerilim tensörü ise denklem 3.3 de görülebilir.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} I \right] \quad (3.3)$$

Burada μ moleküler vizkozite, I birim tensörünü göstermektedir. Denklemin sağ tarafında kalan ikinci terim ise hacimsel genleşmenin etkisini ifade etmektedir.

3.2 Enerji Denklemleri

Fluent Programında enerji denklemleri denklem 3.4 formunda çözülmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3.4)$$

Burada k_{eff} efektif iletkenliği ($k + k_t$, k_t türbülans modeline bağlı türbülans iletkenliği) ve $\vec{j}_j$ türlerin difüzyon akışını ifade etmektedir. Denklemin sağ tarafındaki 3 ifade iletimden (conduction), tür değişimlerinden ve viskoz kayıplardan oluşmaktadır. Burada S_h kimyasal reaksiyonda veya başka herhangi bir durumdan oluşan ısı yükleri ifade etmektedir.

3.2.1 Ön-karışimsız yanma modeli enerji denklemleri

Tunçbilek termik santrali 5. ünite kazan analizi yapılırken yanma modellemesinde ön-karışimsız yanma modeli kullanılmıştır. İlgili model kullanıldığında çözülen enerji denklemi denklem 3.5’de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (3.5)$$

Toplam entalpi H ise aşadığıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$H = \sum_j Y_j H_j \quad (3.6)$$

Olarak ifade edilmektedir. Burada Y_j j türünün kütle derişimini ifade etmekte ve,

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \quad (3.7)$$

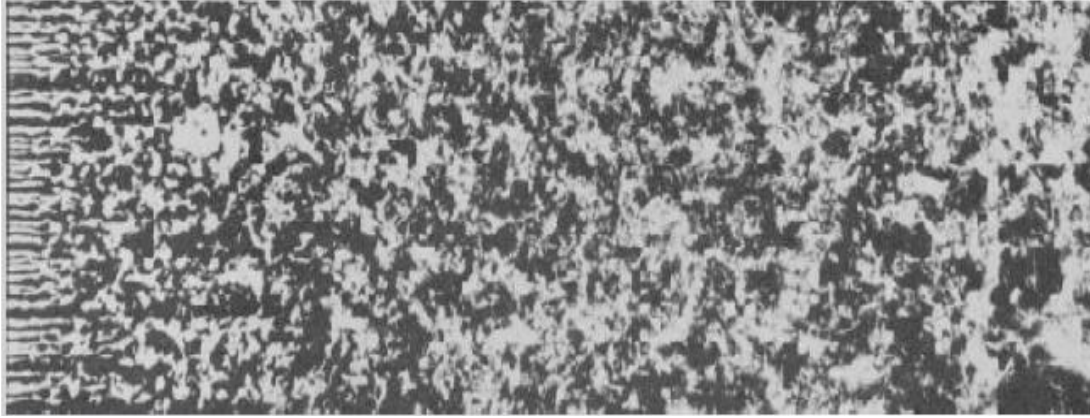
Olarak tanımlanmaktadır. $h_j^0(T_{ref,j})$ ifadesi, j türünün referans sıcaklığındaki ifade etmektedir [12].

3.3 Çalkantı Modelleme

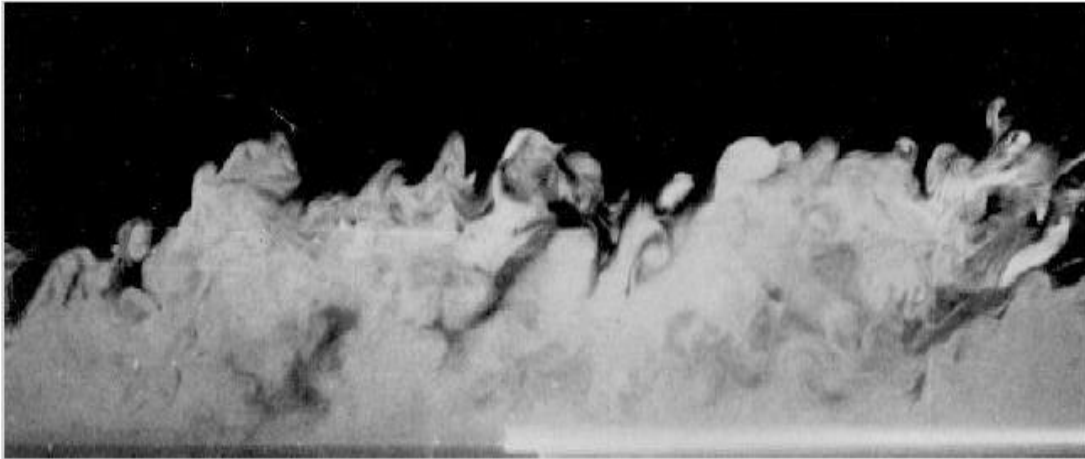
Çalkantı bir akışkanın kaotik düzensizliği olarak tanımlanabilir. Çalkantılı akışta küçük hız bileşenlerinin titreşimleri olur. Hız alanın bu kararsız – kaotik hareketi ile momentum, enerji ve kütle transferleri gerçekleşir. Dolayısıyla taşınım denklemleri çözülürken çalkantının denklemlere dahil edilmesi gerekmektedir. Bu çalkantılar büyük girdaplardan küçük girdaplara doğru olur. Büyük, yüksek enerjili girdaplardan küçük girdaplara geçerken enerji vorteks genişlemesi (vortex stretching) ile transfer edilir. Burada büyük girdapların enerjisi ve hızı akışa bağlıdır. Küçük girdaplarda bu kinetik enerji viskoz yok olmayla (viscous dissipation) ısı enerjisine dönüşür. Oluşan bu çalkantılar uzay ve zaman ölçeğinde tamamen rastgele oluşan çalkantılardır. Buna karşılık istatistiki ortalamalar çalkantılı akışların çözülmesinde kullanılabilir. Büyük eddyler akışın genelinden yoğun bir şekilde etkilenirken küçük eddyler genel olarak tahmin edilebilir benzeri karakteristikte olurlar. Bir akışın çalkantılı olup olmadığına karar verilirken genelde Reynolds sayısında faydalanılır. Çalkantılı akışların oluşmasına yüzey bozuklukları da sebebiyet verebilir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de tüm akışta oluşan çalkantı ve sınır tabakadan oluşan çalkantı görülebilir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde (HAD) çalkantılı akışlar çözülürken modellerden faydalanılır. Çalkantının direk olarak çözülmesi oluşan çalkantılar çok küçük ölçeklerde ve çok yüksek frekanslarda oluştuğu için işlemsel olarak çok pahalıdır ve günümüz bilgisayarlarında çözülmesi rasyonel değildir. Çalkantılı

akışkanları modellerken Reynolds Avaraged Navier Stokes (RANS) modellemeleri veya Large Eddy Simulation (LES) yaklaşımı kullanılabilir. RANS modelleri denklem sayısına göre komplekslikleri değişerek ve farklı karakteristiklerdeki akışlara daha uygun tepkiler verecek şekilde modellenmişlerdir. RANS metodunda bütün ölçeklerdeki girdaplar modellenmektedir. LES yaklaşımında ise büyük girdaplar çözülürken sadece küçük girdaplar modellenmektedir. LES yaklaşımı daha doğru, gerçek sonuçlar verse de detaylı bir ayrıklaştırma ve zamana bağlı çözüm gerektirmektedir. Hesap yükü olarak çok pahalı bir çözüm olmaktadır. Bu analizde çalkantı modeli olarak RANS yaklaşımında olan Realizable $k-\epsilon$ modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Homojen olarak akışa yayılmış çalkantı [13].



Şekil 3.2: Sınır tabakada oluşan çalkantı [13].

3.3.1 Realizable $k - \epsilon$ modeli

Realizable $k - \epsilon$ modeli standart $k - \epsilon$ modelinden türetilmiştir. Bu iki model arasındaki farklar ise:

- Realizable k- ε modeli çalkantı viskozitesi için bir formülasyon kullanmaktadır.
- ε hız salınımlarının taşının denkleminin ortalama kare değerinden doğrudan türetilmiştir.

Realizable model yapılan doğrulamalarda kompleks ikincil akış özelliklerinin olduğu akışlarda tüm k- ε modellerine göre en iyi performansı göstermiştir [12].

Realizable k- ε denklemleri aşağıda yer almaktadır.

Taşınım denklemleri:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \quad (3.17)$$

Burada:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3.18)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.19)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.20)$$

olarak ifade edilmektedir. Denklem içerisindeki

P_k = Ortalama hız gradyenlerinden oluşan çalkantı kinetik enerjisini;

P_b = Kaldırma kuvvetinden (bouyancy) oluşan çalkantı kinetik enerjisini belirtmektedir.

Çalkantı vizkozite modeli ise:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.21)$$

Burada;

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (3.22)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.23)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (3.24)$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (3.25)$$

Olarak tanımlanabilir. $\overline{\Omega_{ij}}$ değeri ortalama dönme oranı tensörünü ifade etmektedir.

Aynı zamanda model sabitleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$A_0 = 4.04, \quad (3.26)$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (3.27)$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (3.28)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (3.29)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad (3.30)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.31)$$

Deneysel model sabitleri ise aşağıda görülebilir.

$$C_{1\varepsilon} = 1.44$$

$$C_2 = 1.9$$

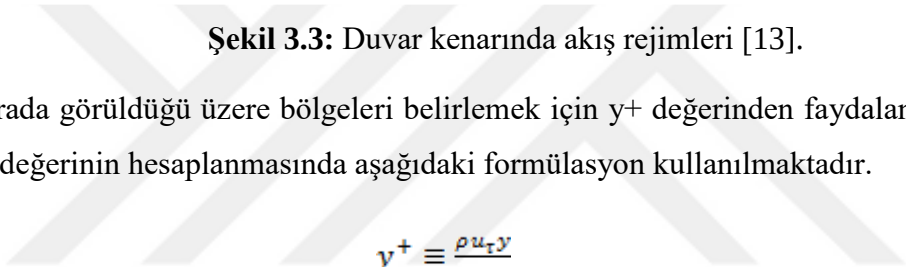
$$\sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.2$$

3.3.2 Duvar kenarı yaklaşımları (near wall treatment)

Duvara yakın bölgelerde viskoz sönümlenme duvara paralel hızları azaltırken duvarın kendisi normal hızları engellemektedir. Bunun sonucunda oluşan yüksek hız gradyanları çalkantı oluşumuna sebep olmaktadır.

Nümerik araştırmalar duvar kenarı bölgesinin 3 farklı kısma ayrıldığını göstermektedir. Bunlar duvara en yakın kısım olan viskoz bölge (viscous sublayer), bu bölgede akış laminar bir haldedir ve moleküler viskozite momentum, ısı ve kütle transferinde baskın bir rol oynamaktadır. En dış kısım ise çalkantılı bölge olarak isimlendirilmektedir. Bu bölgede ise çalkantı akış karakteristiğinde baskındır. Arada kalan bölge ise geçiş bölgesidir. Şekil 3.3’de bu bölgeler görülebilir.



Burada görüldüğü üzere bölgeleri belirlemek için y_+ değerinden faydalanılmaktadır. y_+ değerinin hesaplanmasında aşağıdaki formülasyon kullanılmaktadır.

ve burada

Olarak ifade edilmektedir.

3.4 Önkarişimsız Yanma Modeli

17

Burke - Schumann alevinde reaksiyonun sonsuz hızlı gerçekleştiği varsayılır. Yani yakıt ve oksijen temas ettikleri anda yanarlar. Alevin genişliği sonsuz incelikte olarak alınır.

Bu yaklaşıma göre;

- Yakıt ve oksijen farklı akış çizgileri izlerler,
- Tür difüzyon katsayıları eşittir. (Çalkantılı akışlarda çalkantı difüzyonu baskın olduğu için çalkantılı akışlara uygundur.)
- Lewis sayısı 1 civarında olan akışlar,
- Düşük Mach sayılı akışlar bu yaklaşımdan faydalanabilirler.

Bu yaklaşımlar ışığında taşınım denklemleri karışım oranına bağlı tek bir denkleme indirgenebilirler. Bu denkleme bağımlı olarak reaksiyon kaynak terimleri iptal edilebilirler [14].

Karışım oranı yaklaşımında karışım oranı aşağıdaki denklem kullanılarak ifade edilebilir.

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,o}}{Z_{i,yakıt} - Z_{i,o}} \quad (3.34)$$

Burada f karışım oranını ifade ederken, Z_i i elementinin kütle oranını, $Z_{i,o}$ ortama giriş koşulundaki oksijen oranını ve $Z_{i,yakıt}$ ortama giriş koşulundaki yakıt oranını ifade eder. Karışım oranı eşitlik oranı (equivalence ratio) ile ifade edilmek istenirse eğer:

$$f = \frac{\phi}{\phi + r} \quad (3.35)$$

İle ifade edilebilir. Burada ise r kütleli hava – yakıt oranını ifade etmektedir. Sadece yakıt olan bölgelerde f 1'e eşit; sadece yakıcı (oksijen – hava) olan bölgelerde ise f 0'a eşittir.

Eş difüzyon varsayımı yapılarak tür denklemleri sadece tek bir denklem olan mixture fraction, f , denkleminde indirgenebilir. Bu yaklaşım çalkantılı akışlarda difüzyon

moleküler difüzyon yerine çalkantı ile belirlendiği için doğru sonuçlar vermektedir. Favre ortalaması alınmış karışım oranı denklemi aşağıda görülebilir,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \quad (3.36)$$

Burada μ_l laminar viskoziteyi, μ_t ise çalkantı viskozitesini belirtmektedir. Benzer şekilde S_m kaynak değeri yakıtın sebep olabileceği kütle transferini (sıvı yakıt ya da kömür gibi), S_{user} ise kullanıcı tarafından tanımlanacak olan herhangi bir kaynak terimini ifade etmektedir.

Program bu denkleme ek olarak Favre ortalaması alınmış mixture fraction varyans $\overline{f'^2}$ denklemini de çözmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t \cdot (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \overline{f'^2} + S_{user} \quad (3.37)$$

Burada $f' = f - \bar{f}$ şeklinde ifade edilmektedir. Denklem sabitleri ise $\sigma_t=0.85$, $C_g=2.86$ ve $C_d=2.0$ olarak ön tanımlıdır. Mixture fraction varyansı çalkantı – kimya etkilişimini tamamlamak adına kullanılmaktadır.

Karışım fraksiyonu yazılım tarafından önceden hazırlanan tablolarda alınmaktadır. Bu tablolar oluşturulurken kullanıcının girdiği veriler baz alınarak olasılık yoğunluk fonksiyonlarından (PDF) faydalanılmaktadır.

3.4.1 Kirletici modelleri NO_x

NO_x emisyonu çoğunluğu azot oksit (NO) ve daha az miktarlarda azot dioksit (NO₂) ve diazot monooksitten (N₂O) oluşmaktadır.

Yazılım NO_x taşınım denklemlerini analiz sonucunda elde edilen akış ve yanma değerlerinin üstüne çözmektedir. Yani NO_x çözümleme bir analiz sonrası aracıdır. Diğer yandan doğru bir yanma analizi aynı zamanda doğru NO_x çözümlemesi gerektirmektedir.

NO_x çözümlemede tıpkı diğer çözümlemelerde olduğu gibi doğru veri girişi (sınır tabaka, model, ayrıklaştırılmış hacim vs.) gerekmektedir. Program çözümlemelerinde

veri girişi doğru olsa bile çoğu koşulda NO_x değerleri doğru hesaplanamayabilmekte fakat trendler ve dağılımlar karşılaştırma açısından kullanılabılır olmaktadır. Bu trendlerin doğruluğu ise karşılaştırma ve dizayn süreci için doğru fikirler verebilmektedir [12].

Fluent NO için çözdüğü kötü taşınım denklemlerinde NO türünün ve bağlı trlerin konveksiyonu, difizyonu, üretimini ve tüketimini hesaplamaktadır. NO_x mekanizmasının ihtiyaç duyduğu oluşma zamanı Eulerian referans yaklaşımında konveksiyon teriminin içerisinde bulunmaktadır. Aynı şekilde termal ve ani NO_x mekanizmaları için sadece NO taşınım denklemine ihtiyaç bulunmaktadır [12].

NO taşınım denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (3.38)$$

NO_x hesaplamasında benzer şekilde N içeren ara trler önem kazanmaktadır. Yazılım NO hesaplamalarına ek olarak HCN, NH₃ ve N₂O için de taşınım denklemleri çözmektedir. Bu denklemler:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{HCN}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{HCN}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{HCN}) + S_{HCN} \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{NH_3}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NH_3}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{NH_3}) + S_{NH_3} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{N_2O}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{N_2O}) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D} \nabla Y_{N_2O}) + S_{N_2O} \quad (3.41)$$

Denklemleridir. Burada Y_{HCN} , Y_{NH_3} , Y_{N_2O} ve Y_{NO} CN, NH₃, N₂O ve NO trlerinin gaz fazındaki kötü derişimlerini ifade etmekte, $\mathcal{D}$ efektif difüzyon katsayısını ifade etmektedir [12].

3.5 P1 Işınım Modeli

P1 ışınım modeli en basit ve işlem yükü açısından en hafif ışınım modelini oluşturmaktadır. Işlem gücü kapasitesi kısıtları nedeniyle P1 ışınım modeli seçilmiştir. Işınımla ısı akısı (q_r) hesaplanırken aşağıdaki denklem kullanılmaktadır [12].

$$q_r = -\frac{1}{3(a+\sigma_s)-C\sigma_s}\nabla G \quad (3.42)$$

Burada a emilim (absorbsiyon) katsayısını, σ_s yayılım katsayısını, G anlık ışıınımı ve C ise doğtusal anizotropik faz fonksiyon katsayısını ifade etmektedir. G için taşınım denklemi,

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4an^2\sigma T^4 = S_G \quad (3.43)$$

Olarak ifade edilmektedir. Burada n yansıtma indeksini, σ Stefan-Boltzmann sabitini ve S_G tanımlanan ışıınım kaynağını ifade etmektedir.

3.6 Ayırık Faz Modelleri

Ansyes Fluent yazılımı Lagrangian ayırık faz modelini kullanırken Euler-Lagrange yaklaşımından faydalanmaktadır. Akışkan fazı Navier-Stokes denklemleriyle hesaplanırken, ayırık evre çok sayıdaki partiküllerin takip edilmesiyle hesaplanmaktadır. Ayırık evre aynı zamanda akışkan bölge ile moment, kütle ve enerji transferi gerçekleştirebilir.

Partikül rotaları akışkan fazı hesaplamalarının aralarında ayrı olarak hesaplanmaktadır. Bu ayrı hesaplama modeli spreş püşkürtme, kömür ve sıvı yakıt yanması ve benzer durumlar için uygun hale getirmekte fakat sıvı sıvı karışım lar gibi akış hacmiyle doğrudan etkileşime giren koşullar için uyumsuz kalmaktadır. Bu çalışmada kömür yanma analizi yapıldığı için yaklaşım kullanılabilmektedir.

Yazılım partikül rotasını hesaplar ken lagrange referans çerçevesinde partiküle etkiyen yük dengesini hesaplamaktadır. Etkiyen yük dengesi aşğıdaki denklemdeki şekilde ifade edilebilir [12].

$$\frac{\partial \vec{u}_p}{\partial t} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (3.44)$$

Burada $\vec{F}$ ivme terimi, $\frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ ise birim partikül kütle si başına düşen sürüklenme kuvvetini ifade etmektedir ve

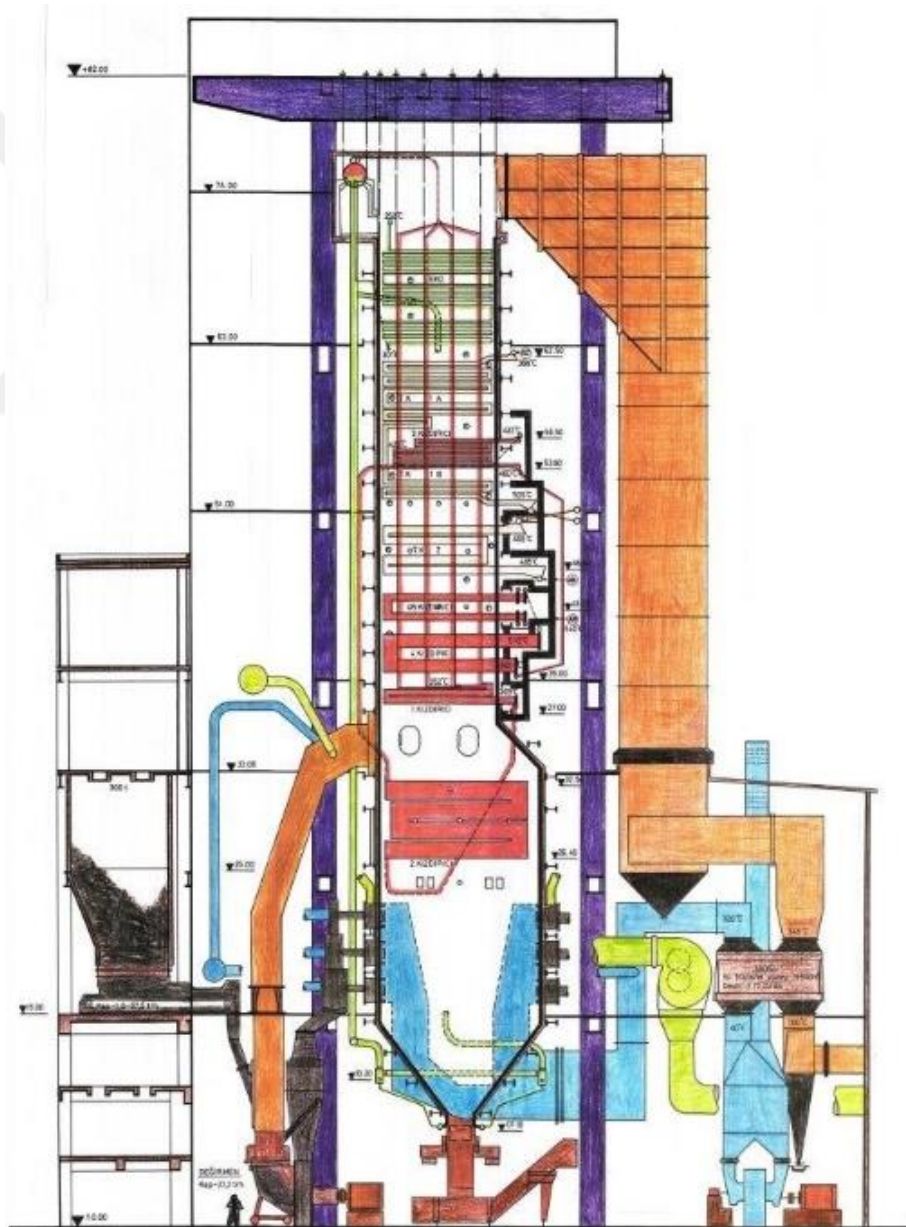
$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (3.45)$$

Olarak ifade edilmektedir. Burada τ_r relaksiyon zamanı, $\vec{u}$ akışkan fazı hız vektörü, $\vec{u}_p$ partikül hız vektörü, μ akışkanın moleküler viskozitesini, ρ akışkanın yoğunluğunu, ρ_p partikülün yoğunluğunu ve d_p partikülün çapını ifade etmektedir. Re ifadesi ise Reynolds sayısını belirtmekte ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (3.46)$$

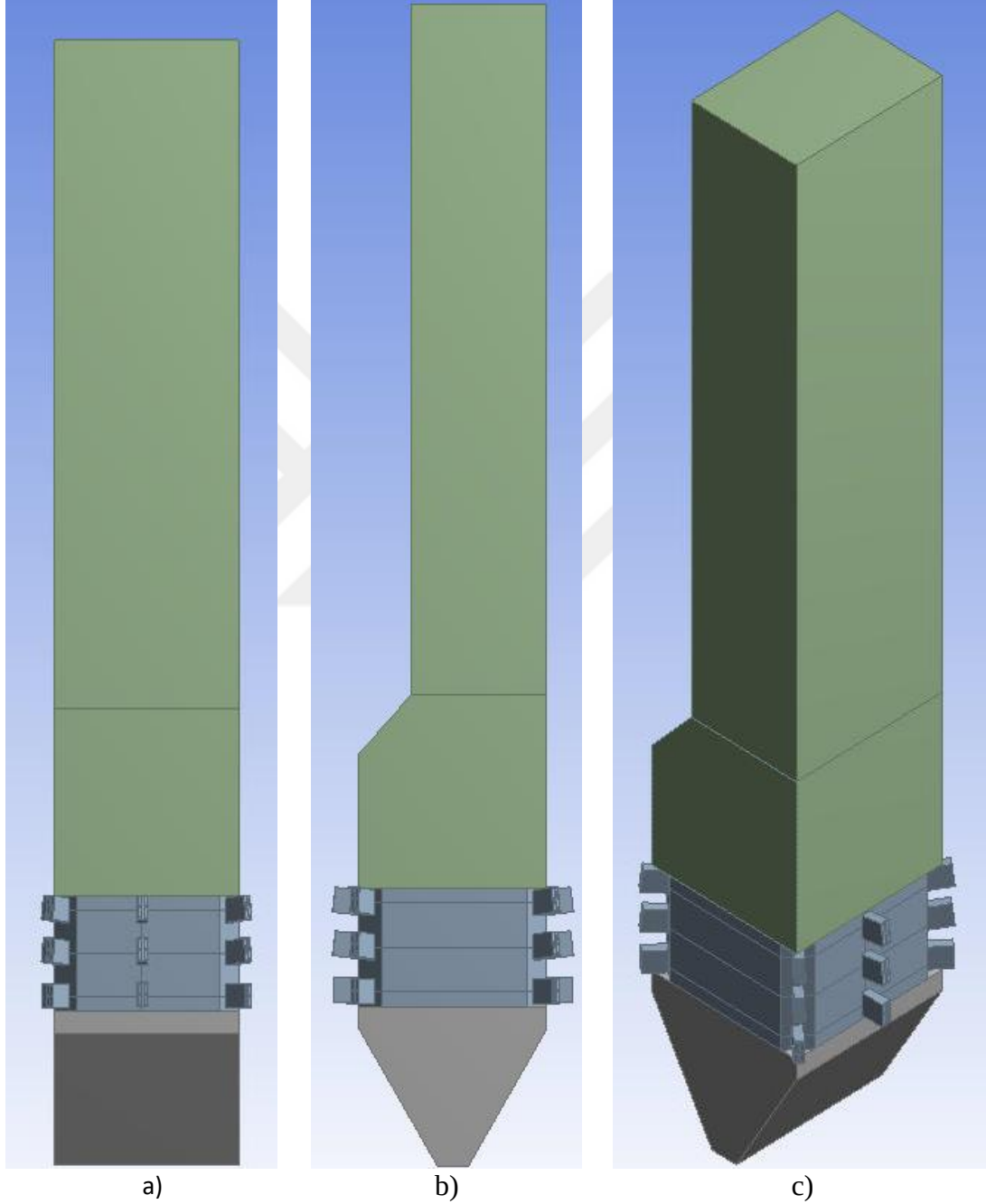
4. PROBLEMİN TANIMI VE AYRIK UZAY OLUŞTURMA

Tez çalışmasında Tünçbilek termik santralinde kullanılmakta olan 5 numaralı 150MW kurulu güce sahip olan kazan incelenmiştir. Burada amaçlanan kazanın yanma karakteristiğinin belirlenip, farklı yakıcı giriş açılarına ve farklı egzoz gazı çıkış alanlarına bağlı olarak kazan kesitlerindeki sıcaklık dağılımı ve kirletici (yanmamış hidrokarbon, NO gazı ve N₂O gazı) değişimlerinin incelenmesidir.



Şekil 4.1: Kazan kesit geometrisi [15].

Çalışma için kazanın cüruf bölgesinden kazan çıkışına kadar olan bölge modellenmiştir. Kazanın katı modeli oluşturulurken Ansys Design modeller R16.2 programı kullanılmıştır. Modelleme esnasında kazanın gerçek ölçülerinden faydalanılmıştır. Kazan kesit görüntüsü Şekil 4.1’de, modellenen kazan genel görüntüsü ise Şekil 4.2’de verilmiştir.



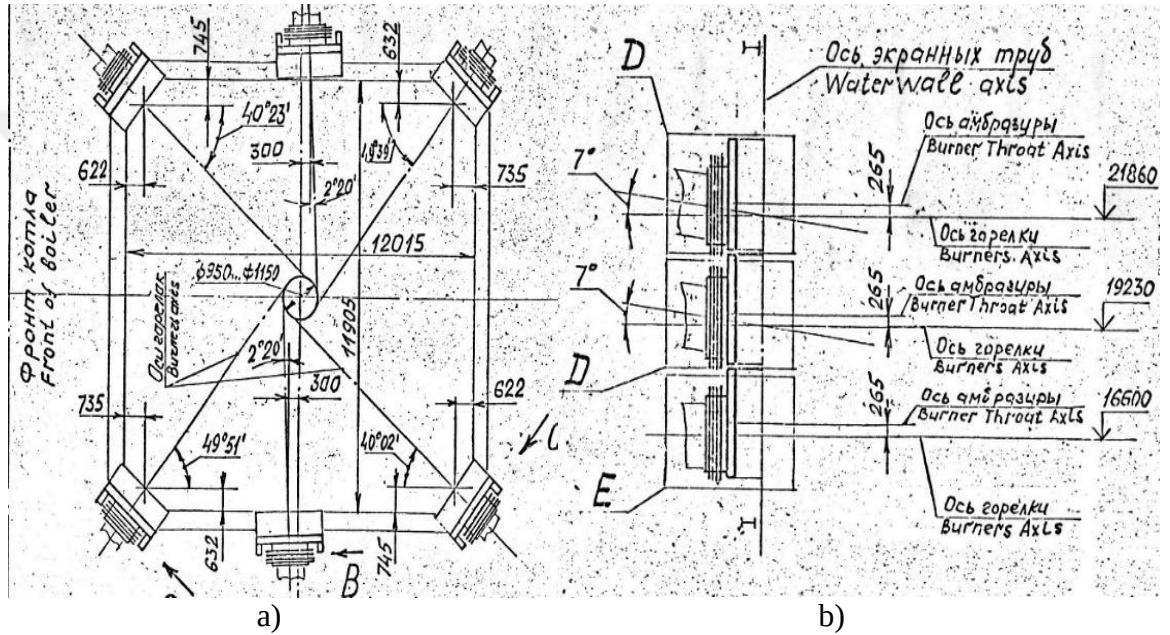
Şekil 4.2: Modellenen kazan geometrisinin a) önden görünüşü, b) yandan görünüşü ve c) izometrik görünüşü.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de görülen kazanın en alt kısmında cüruf toplama bölgesi bulunmakta, sonrasında ise düşeyde 3 farklı yükseklikte olan toplamda 18 adet

kömür yakıcısı bulunmaktadır. Kazan daralma bölgesinden hemen önce iki kızdırıcı bulunmaktadır. Kazan daralma bölgesinden sonra ise sırayla 1. kızdırıcı, 4. kızdırıcı, 5. kızdırıcı, 3. kızdırıcı ve ekonomizer yer almaktadır.

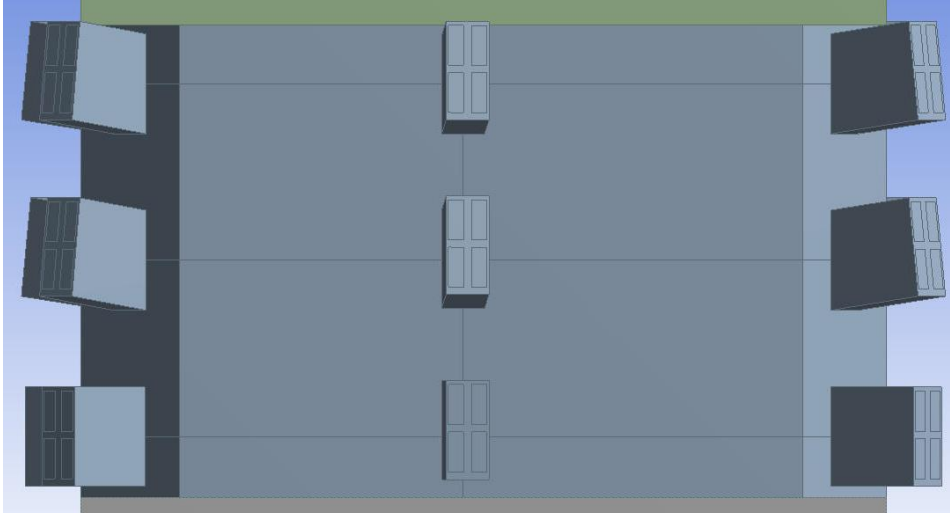
Kazanın modellenmesi yapılırken kompleks ve potansiyel olarak ayırık uzay oluşturma ve yakınsama problemi oluşturacak olan kazan borularının detaylı modellenmesi yapılmamıştır; onun yerine literatürde de kullanımı olan gözenekli hacim (porous zone) tanımlaması yapılmıştır.

Şekil 4.3’de kömür yakıcıları modellenirken kullanılan teknik resimler görülebilir.

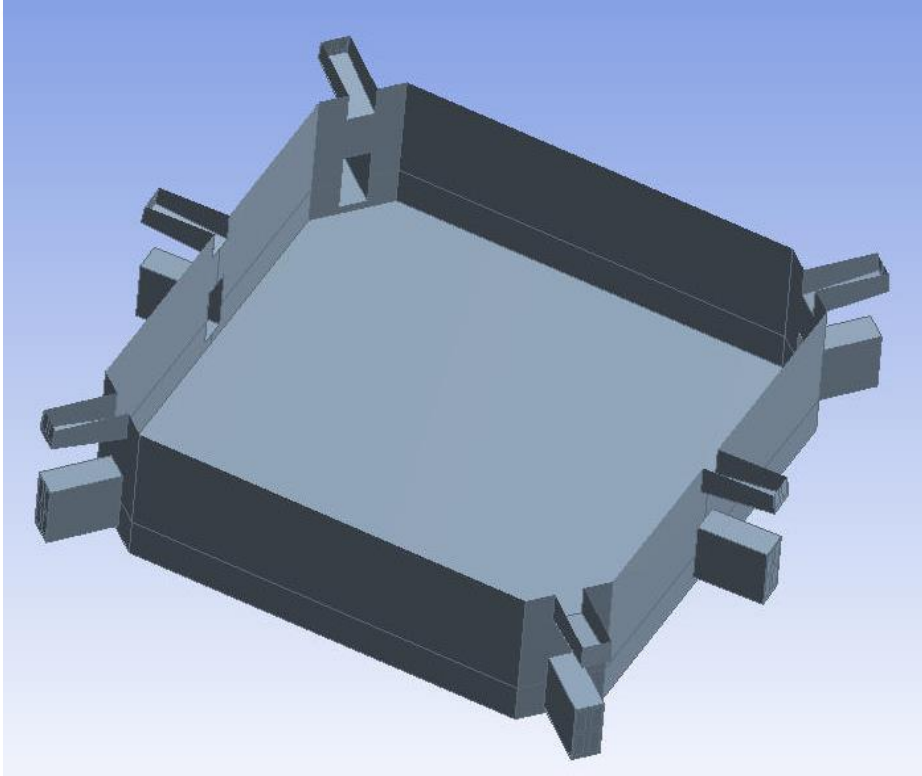


Şekil 4.3: Kömür yakıcılarının (a) yatay, (b) düşey düzlemdeki yerleşimi ve konumları [16].

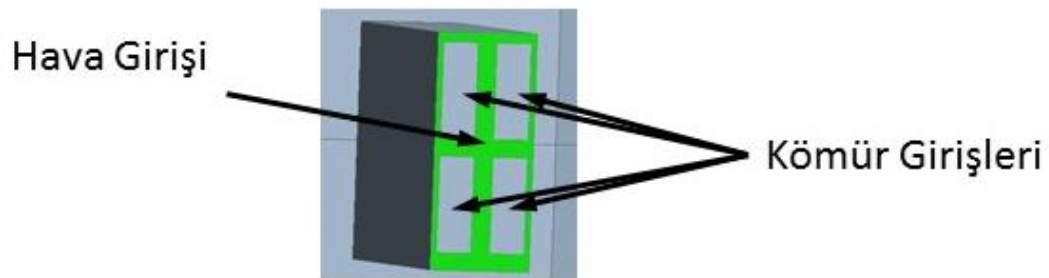
Şekil 4.3’de yer alan teknik resimlerde görülebileceği gibi kazanda düşeyde üç farklı yükseklikte, her yükseklikte altı adet olmak üzere toplam 18 adet kömür yakıcısı kullanılmıştır. Kömür yakıcıları sırasıyla cüruf toplama bölgesi 0 yüksekliği olarak alındığında 10.4 metre, 13.03 metre ve 15.66 metre yüksekliklerinde yer almaktadır. 1. sıra yakıcılar zemine paralel olarak durmakta, 2. ve 3. sıra yakıcılar ise zemine göre 7° açıyla yukarıya yönlendirilmiştir. Her bir eş yükseltide bulunan 6 adet yakıcının eksen çizgisi, kesit alanının merkezinde bulunan 950 mm ile 1150 mm çap aralığındaki çemberlere teğet geçmektedir. Yakıcı açıları ve konumları alevin girdap yapısını etkilediği için modelleme yapılırken bu değerlere dikkat edilmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de bu bilgiler ışığında modellenen yakıcıların detay görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.6’da ise yakıcıların hava ve kömür kesit girişleri görülebilir.



Şekil 4.4: Kömür yakıcıları yakından önden görünüşü



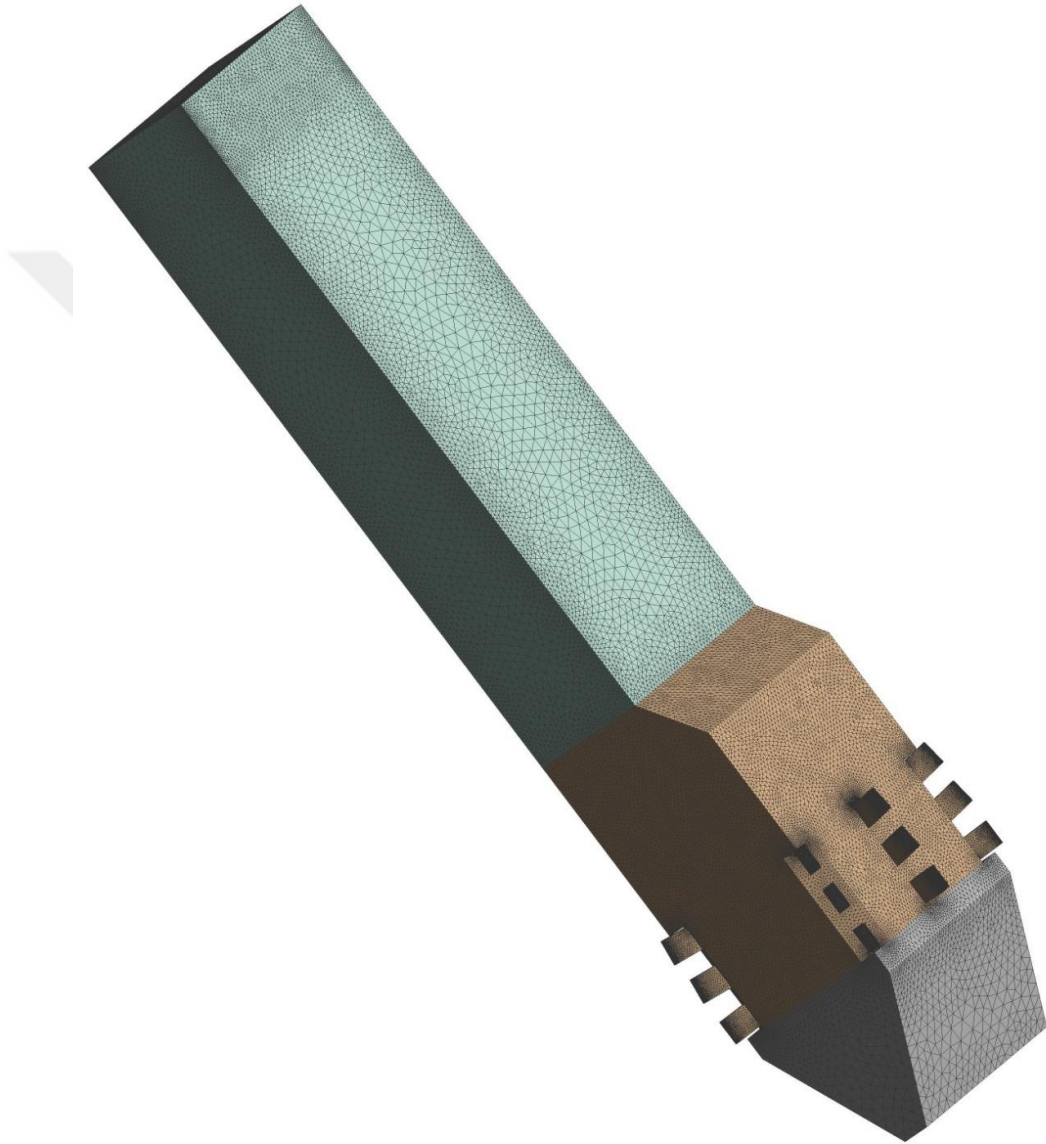
Şekil 4.5: Kömür yakıcıları kesit görünüşü



Şekil 4.6: Yakıcı kömür ve hava girişleri

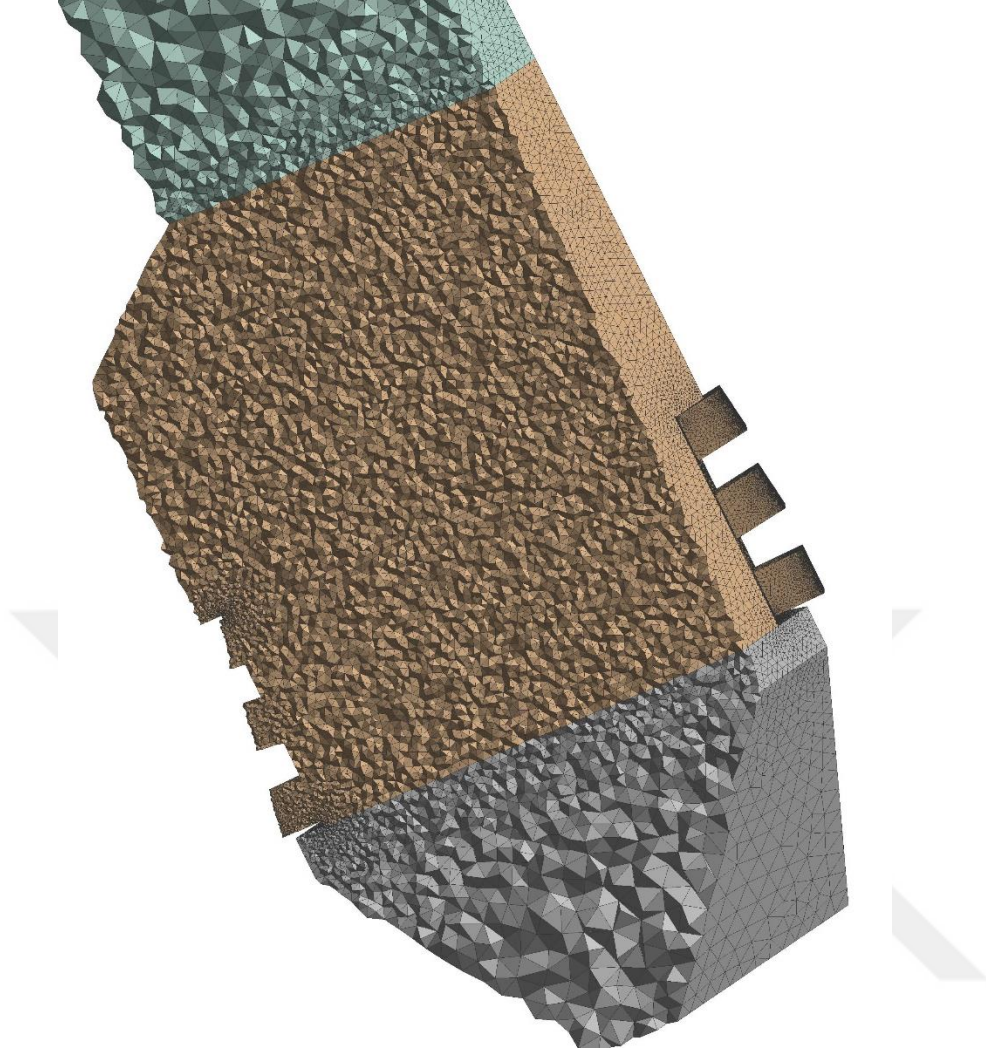
4.1 Ayırık Uzay Oluşturma

Kazan geometrisinde ağ yapısı oluşturulurken Ansys Meshing R16.2 programından yararlanılmıştır. Geometri için üçgen (tetrahedral) ağ yapısı kullanılmıştır. Oluşturulan ağ yapısında 4,404,53 adet eleman kullanılmıştır. Ağ yapısı şekil 4.7' de verilmiştir.



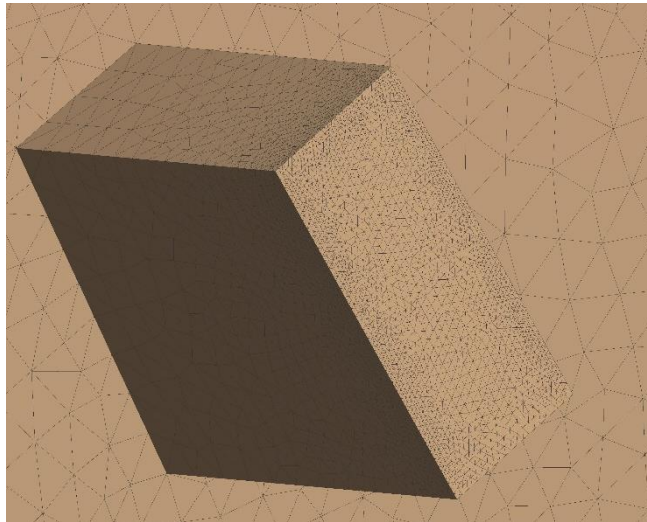
şekil 4.7: Oluşturulan ağ yapısı.

şekil 4.7'de görülebileceği gibi gereken hesaplama süresi ve gücü göz önünde bulundurularak tüm hacime sık ağ yapısı oluşturmak yerine yakıcı bölgesinde ve alev oluşma bölgesinde sık yapı kullanılmıştır. Sık ağ yapısı kullanılan bölgesin kesit görüntüsü şekil 4.8'de verilmiştir.

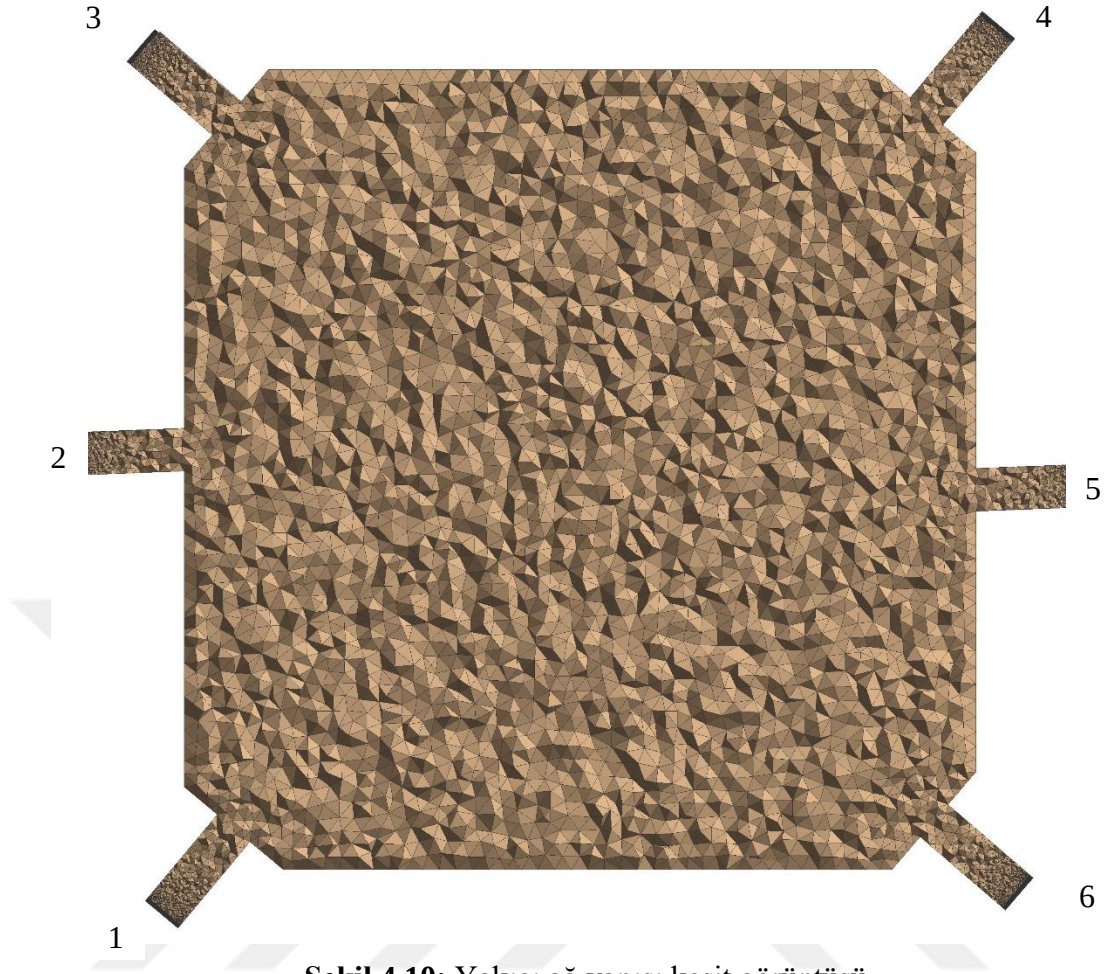


Şekil 4.8: Sık ağ yapısı bölgesi kesit görüntüsü.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da yakıcı ağ yapısı görüntüsü ve yakıcı hizasından alınmış kesit ağ yapısı görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 4.9: Yakıcılar ağ yapısı.



Şekil 4.10: Yakıcı ağ yapısı kesit görüntüsü.

4.2 Sınır Şartları Ve Modelleme

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerini gerçekleştirmek için ANSYS Fluent R16.2 programından yararlanılmıştır. Analizler sırasında 6 çekirdekli intel i7 5820k kodlu işlemcili ve 32 Gb ram belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

Kazana 613 K sıcaklıkta 199 kg/s hava debisinde hava ve 573 K sıcaklıkta 38.61kg/s debisinde kömür gönderilmiştir. Kazanın işletilmesi sırasında her sıradaki 6 adet yakıcının 5 adeti aktif olarak çalışmakta, 4 numaralı yakıcılardan kömür gönderilmemektedir. Toplam hava debisinin %43'ü alt, %43'ü orta ve %14'ü üst yakıcılardan gönderilmekte; toplam kömür debisinin ise %43'ü alt, %35'i orta ve %22'si üst yakıcılardan gönderilmektedir. İşletmeden alınan kömür analizleri sonucunda kömür taneciklerinin çapları en az 90µm, en fazla ise 500µm olacak şekilde modellenmiştir. Tanecik çapı dağılımı için Rosin-Rammler metodu kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de her yakıcı sırası için kullanılan sınır koşulları bulunmaktadır.

Çizelge 4.1: Kömür tanecikleri püskürtme koşulları.

Konum	Sıcaklık [K]	Hız [m/s]	Kütle Debisi [kg/s]
Alt Enjektörler	573	20	3.32
Orta Enjektörler	573	20	2.7
Üst Enjektörler	573	20	1.69

Kazan duvarları modellenirken duvarlarda sabit sıcaklık şartı tanımlanmış ve duvar sıcaklıkları suyun doyma sıcaklığından 50K fazla alınarak 659K alınmıştır.

Geometride yer almayan ve gözenekli ortam olarak modelleme yapılan boruların bulunduğu bölgede basınç kaybı hesaba katılmıştır. Bu bölge için 0.8 porozite değeri kullanılmıştır. Analizler zamandan bağımsız olarak yapılmıştır.

Yanma reaksiyonu ve problemin karakteristiği gereği çalkantı modellemesi yapılması gerekmektedir. Yapılan literatür çalışmaları ve akışın karakteristiğinden dolayı realizable k-ε modeli y^+ değerinden bağımsız çözümleme yapılabilen Menter Lencher sınır tabaka yaklaşımı ile birlikte kullanılmıştır.

Yanma modellemesinde ise ön karışimsız yanma modeli PDF tabloları ile birlikte kullanılmıştır. Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 değerlerine bağlı olarak PDF tabloları oluşturulmuştur.

Çizelge 4.2: Kullanılan kömür çubuk analizinden elde edilen değerler.

Bileşen	Kütlesel Oran [%]
Uçucu Madde	23.8
Sabit Karbon	20.4
Nem	15.6
Kül	40.2

Çizelge 4.3: Kullanılan kömürün elemental analizinden elde edilen değerler.

Bileşen	Kütlesel Oran [%]
Karbon	72
Oksijen	16.2
Hidrojen	5
Azot	2.7
Kükürt	4.1

Çizelge 4.4: Kullanılan kömürün özellikleri.

Özellik	Değer
Yoğunluk	1300 [kg/m ³]
Özgül Isı	1300 [kJ/kgK]
Üst Isıl Değer	1,33x10 ⁷ [J/kg]
Alt Isıl Değer	1,25x10 ⁷ [J/kg]

Kömür modellenirken Lagrange yaklaşımında ayırık faz modeli kullanılmış ve kömür tanecikleri takip edilmiştir.

Kazan yanmasında ısı transferinde ışıınım önemli bir rol aldığı için ışıınım modellemesi yapılmıştır. Işıınım çözümlemesi için ayırık faz modeli kullanılmış ve ışıınımın tanecikler üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmuştur.

4.3 Analiz Doğrulama Çalışması

Yapılan analizlerin doğrulanması için test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Kazanın 4 farklı yüksekliğinde 8 noktada ölçülen sıcaklık değerleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 4.11’de sıcaklık değerleri ölçülen noktalar konumları verilmiştir; Çizelge 4.5’te ise curüf boşaltım noktası 0 yükseklik olarak alındığı durumda ölçme nokta sıralarının yükseklikleri verilmiştir.

Çizelge 4.5: Test veri sıraları yükseklikleri.

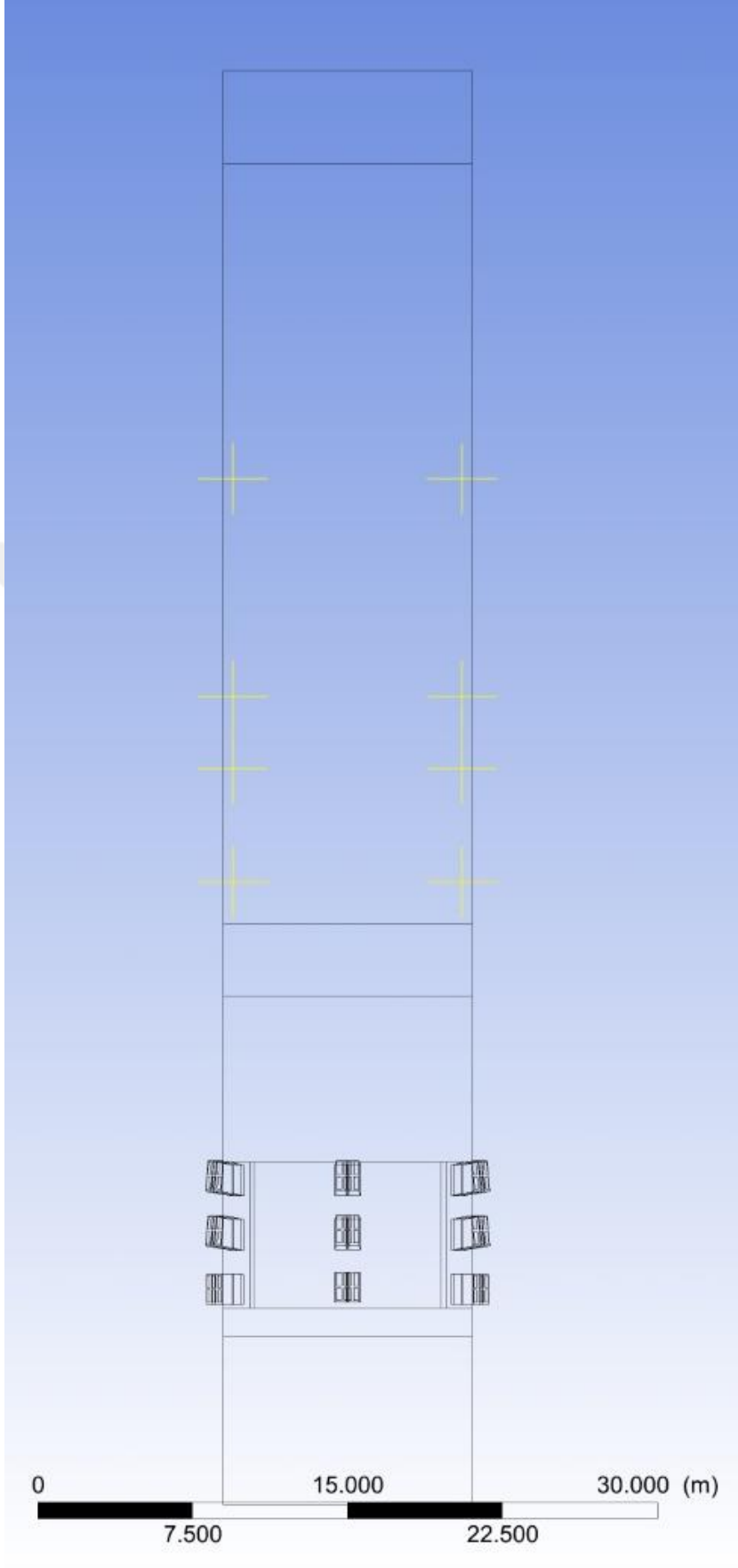
Konum	Yükseklik [m]
1. Sıra	30.05
2. Sıra	35.53
3. Sıra	39.00
4. Sıra	49.50

Ölçümler kazan çeperlerinden 45 cm içeriye girilerek yapılmıştır.

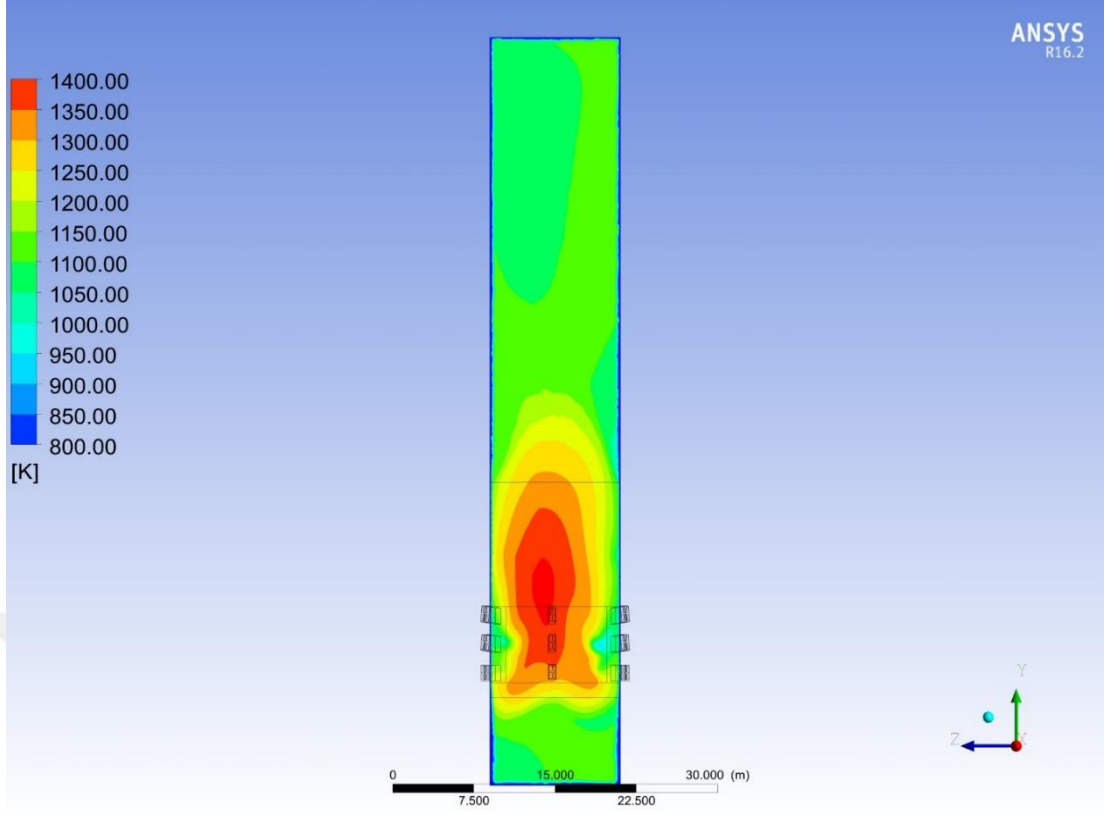
Şekil 4.12’de görüldüğü gibi alev kazanın orta noktasında oluşmaktadır. Çıkış tarafında sıcaklık daha hızlı düşmekte ve bu değişim sıcaklık dağılımının simetrik olmasını engellemektedir. Çizelge 4.6’da deneysel ve hesaplanan sıcaklık değerleri ve bunların bağıl hataları görülmektedir.

Çizelge 4.6: Hesaplanan ve ölçülen sıcaklıkların karşılaştırılması.

Sıra	Konum	Hesaplanan Sıcaklık [K]	Ölçülen Sıcaklık [K]	% hata
1	1	1112.4	1181.7	5.8
	2	1036	1164.7	11.0
2	1	1106.4	1104.8	-0.1
	2	1007	1100.9	8.5
3	1	1014.8	1023	0.8
	2	1077.9	1036.4	-4.0
4	1	917.5	816.9	-12.3
	2	1082.6	802.9	-34.8



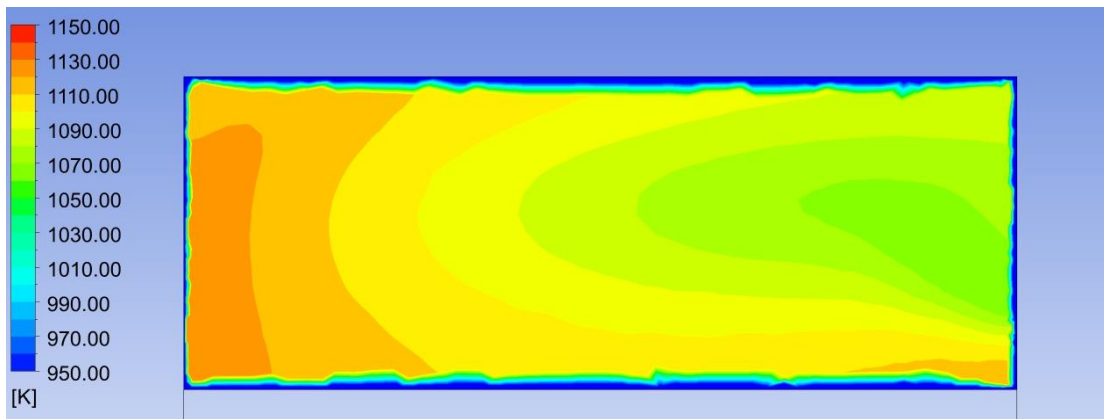
Şekil 4.11: Deneysel sıcaklık ölçüm noktaları.



Şekil 4.12: Sıcaklık dağılımı.

Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi kazan üst kısımlarına gidildikçe hata artmaktadır. Aynı zamanda eş sıcaklık eğrilerinde de görüldüğü gibi asimetrik bir sonuç alınmıştır. Burada modelleme yapılırken kızdırıcılar gerçek olarak modellenmek yerine porous ortam modellemesi yapılmıştır. Bunun sonucu olarak sıcaklık değişimlerinde farklılıklar oluşabilmektedir. Alev bölgesine yakın bölümlerdeki hata oranı uygun olarak kabul edilebilir.

Aynı zamanda kazandan çıkış gazlarının sıcaklıkları da ölçülmüştür. Şekil 4.13’de kazandan çıkan gazların hesaplanan sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.13: Kazan çıkışı sıcaklık dağılımı.

Kazan çıkışında gaz sıcaklığı 1000K olarak ölçülmüştür. Hesaplamalar sonucunda bulunan kütleel ortalama sıcaklık değeri ise 1094K'dir. Buradaki bağıl hata oranı %9.4 olarak bulunmuştur.



5. SONUÇLAR

Doğrulama çalışmalarından sonra farklı yakıcı açılarının ve egzoz gazı çıkış kesitinin büyüklüğünün yanmaya ve emisyonlara olan etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda bütün durumlar için yanma odasına gönderilen hava ve kömür miktarları aynıdır.

Farklı durumların özellikleri aşağıdaki Çizelge 5.1’de verilmiştir. Standart olan durum, durum 1 olarak adlandırılmıştır.

Çizelge 5.1: Farklı durumların karşılaştırılması.

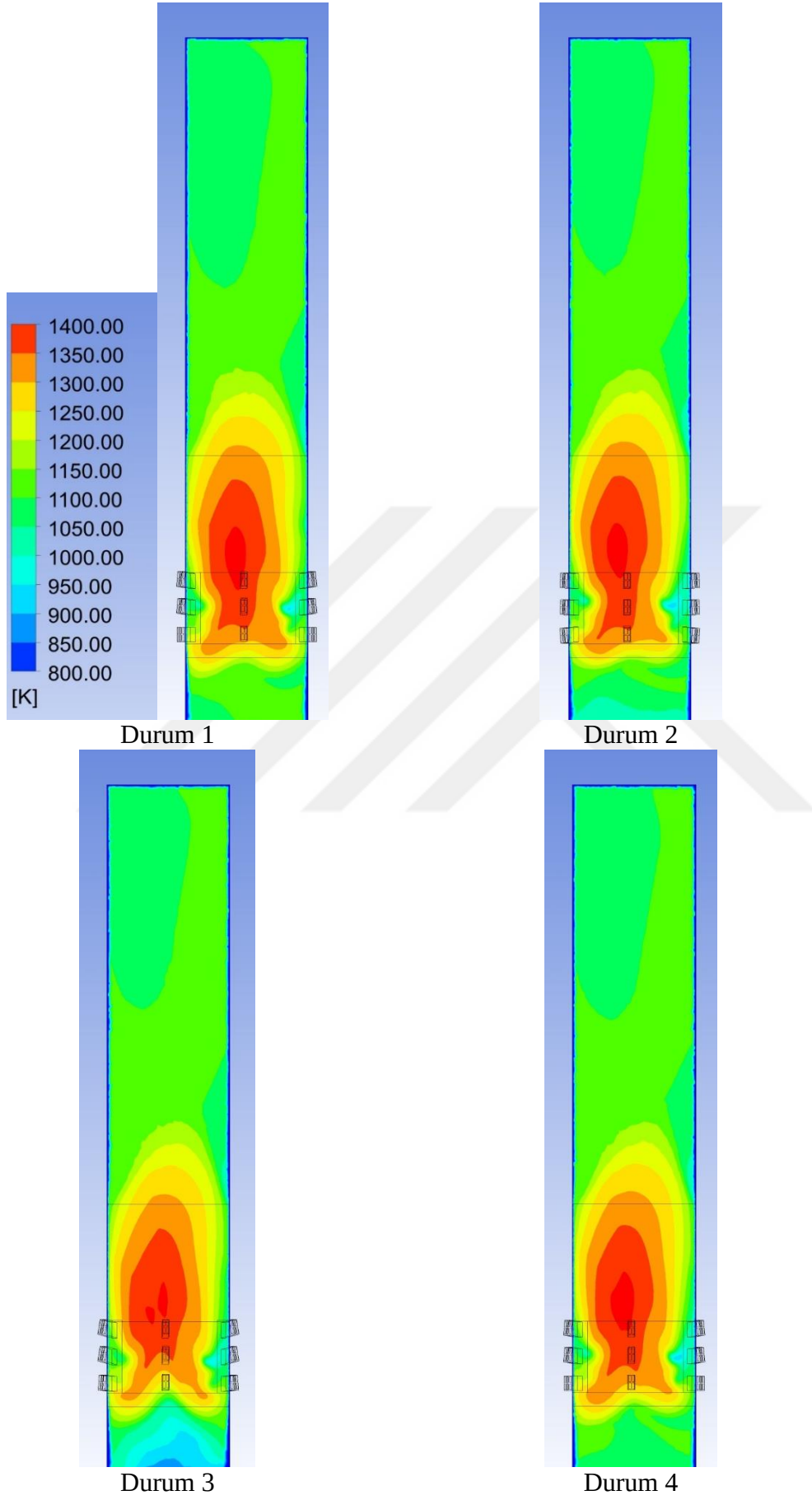
Durum	1. Sıra yakıcı açısı	2. Sıra yakıcı açısı	3. Sıra yakıcı açısı	Gaz çıkış alanı
Durum 1	0°	+7°	+7°	54 m ²
Durum 2	+5°	+12°	+12°	54 m ²
Durum 3	-5°	+2°	+2°	54 m ²
Durum 4	0°	+7°	+7°	108 m ²

Çizelge 5.1’de verilen yakıcı açıları yakıcıların zemin ile yaptıkları açıları göstermektedir. Durum 2 oluşturulurken yakıcı açıları 5° yukarıya alınmış, durum 3 oluşturulurken ise yakıcı açıları 5° aşağıya indirilmiştir. Son olarak durum 4 de ise yakıcı açıları sabit tutulurken gaz çıkış alanı 2 katına çıkarılmıştır.

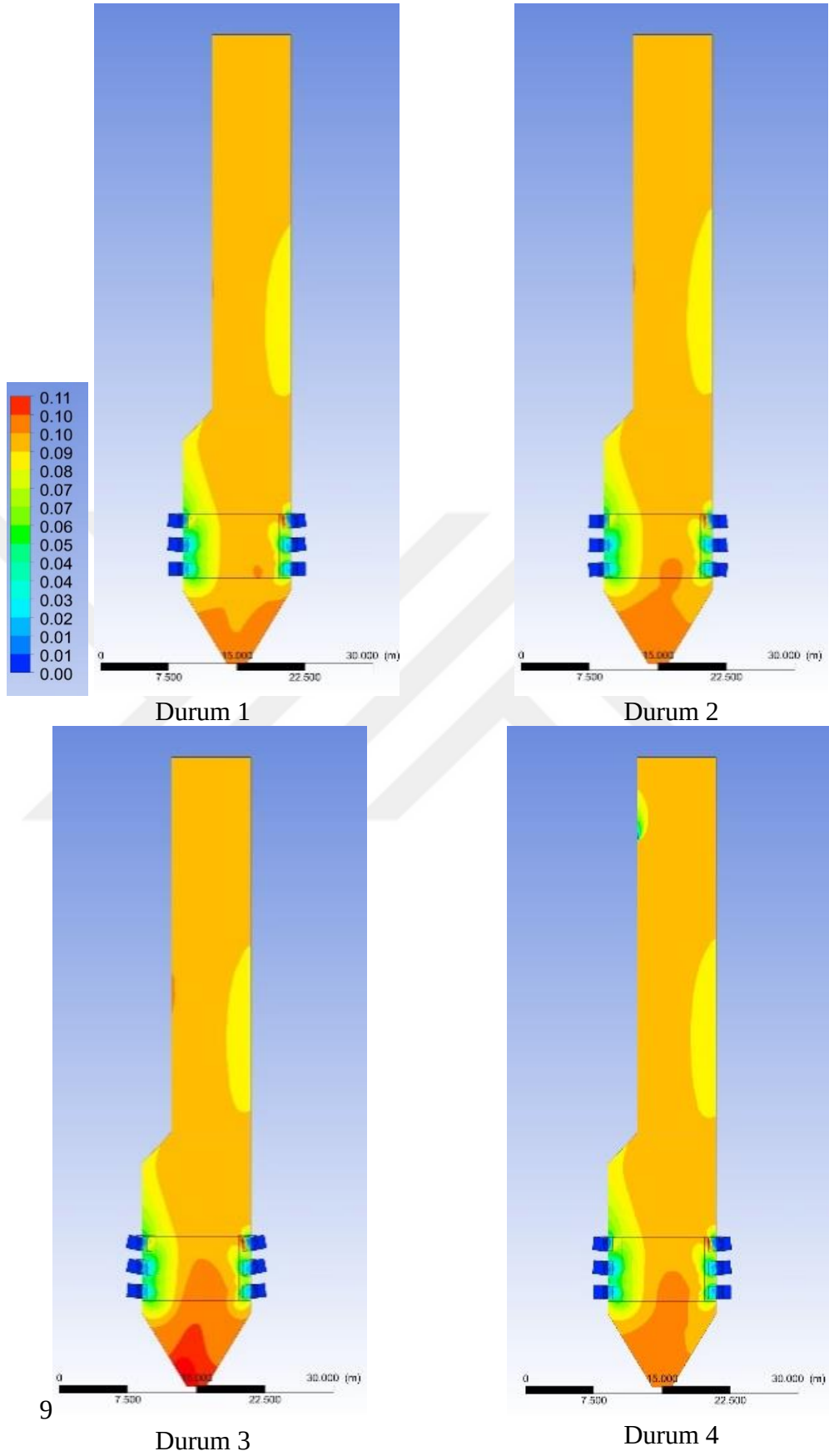
Şekil 5.1’de farklı durumlar için YZ eksenindeki sıcaklık dağılımları görülmektedir.

Şekil 5.1 incelendiğinde sıcaklık dağılımlarının genel olarak benzer olduğu, durum 3 için aşağıya doğru bakan yakıcılar halinde alevin daha yukarıda başladığı görülmektedir. Bunun sebebini daha iyi anlamak için aynı yüzeyden alınan kömür karışım oranları Şekil 5.2’de verilmiştir.

Şekil 5.2 incelendiğinde sonuçların Şekil 5.1’de ki sıcaklık dağılımlarını açıklar nitelikte olduğu görülmektedir. Beklenin aksine aşağıya bakan yakıcıları durum 3’de alev topu daha yukarıdan başlamıştır. Bunun sebebi yakıcılar aşağıya baktığı durumda aşağı bölgede yakıtca zengin bir ortam oluşmakta, bunun sonucunda ise daha yukarıda yanma için uygun bir ortam oluşabilmektedir.

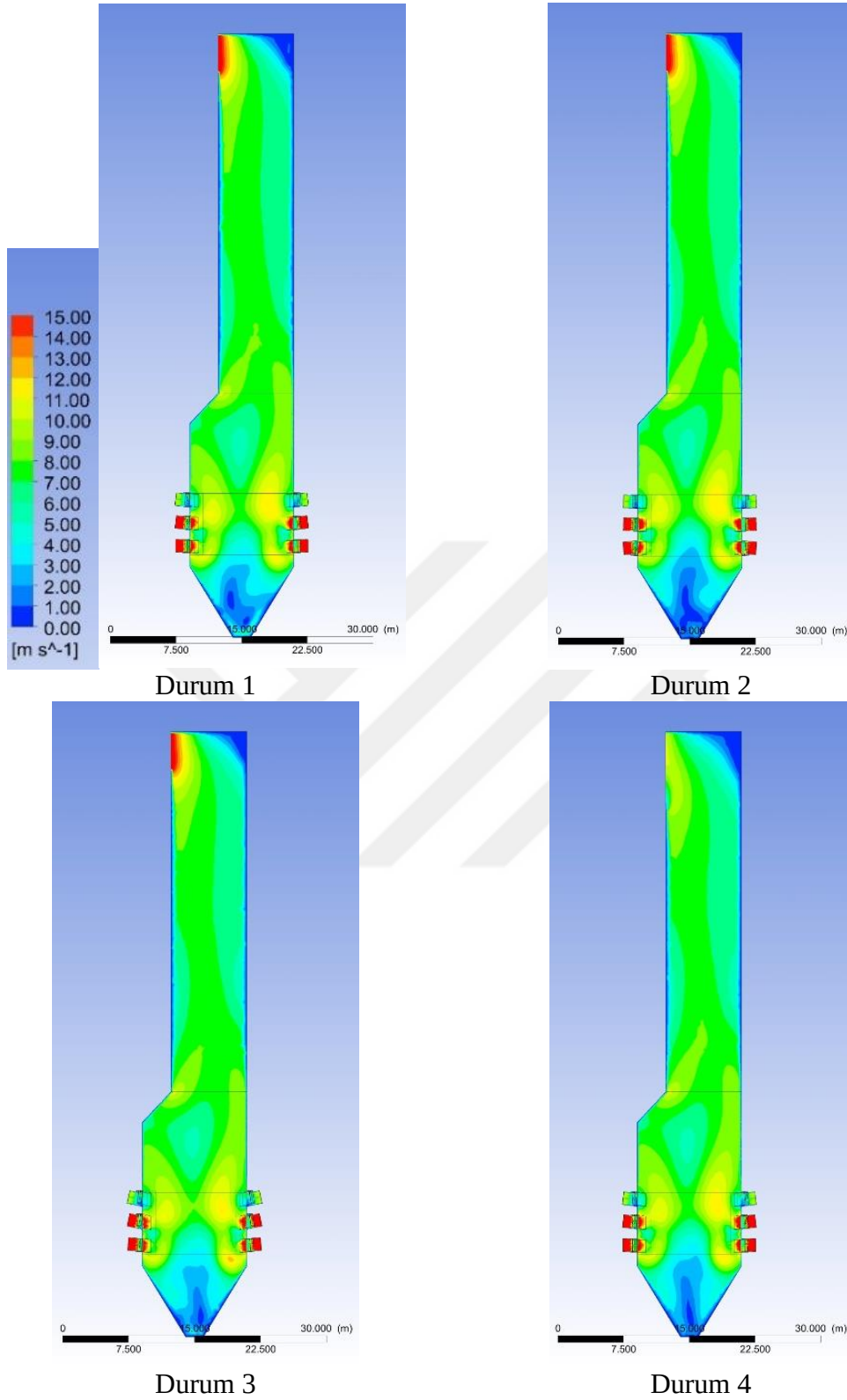


Şekil 5.1: Farklı durumlar için YZ eksenindeki sıcaklık dağılımları.



Şekil 5.2: Farklı durumlar için YZ eksenindeki karışım oranları.

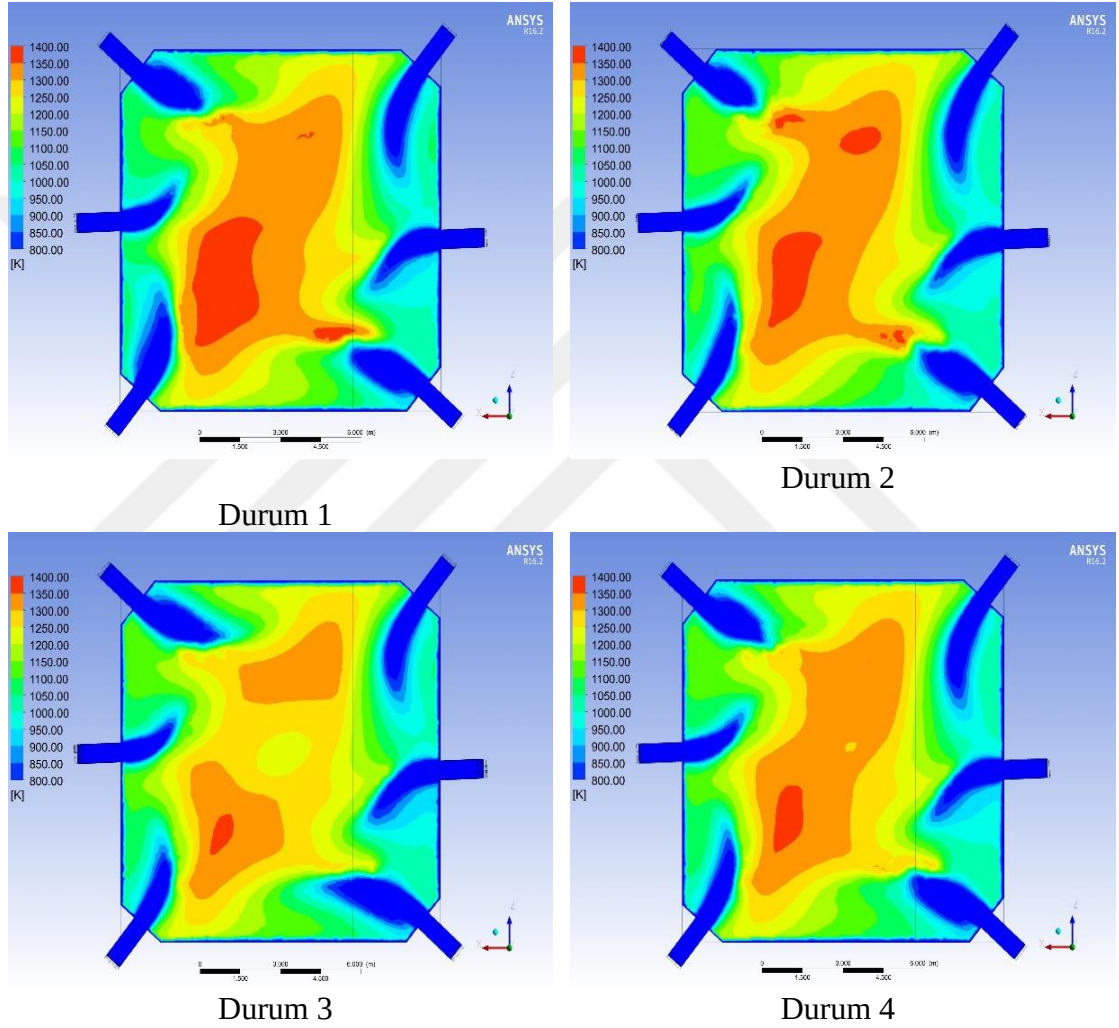
Şekil 5.3’de XY düzleminde ki farklı durumlar için hız dağılımları verilmiştir.



Şekil 5.3: Farklı durumlar için XY düzleminde ki hız dağılımları.

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi çıkış alanı aynı olan durum 1, 2 ve 3 de küçük farklılıklar bulunmasına rağmen cüruf toplama bölgesinde farklılıkların arttığı görülmektedir. Standart koşula göre yakıcıların yukarı baktığı durumda cüruf bölgesinde daha

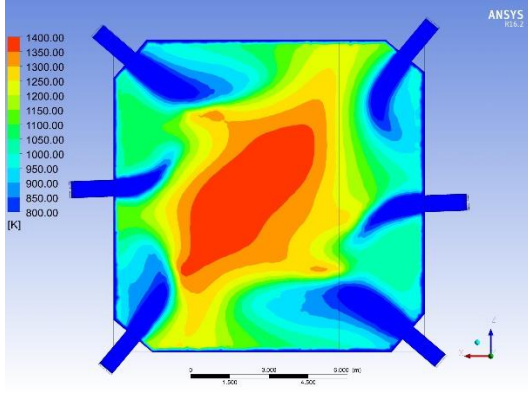
durağan bir akış oluşurken, yakıcıların aşağı baktığı koşulda durağan bölge daralmıştır. Durum 4 incelendiğinde ise genişleyen çıkış bölgesi sonucu akış yüksek hızlara ulaşmadan kazanı terk etmektedir. Beklenildiğinin aksine çıkış bölgesi karşısındaki durağan bölge küçülmek yerine büyümüştür. Burada dikkate alınması gereken önemli bir konu ise çıkış alanının büyümesi neticesinde akışın koptuğu bölgede ters akış oluşmasıdır. Şekil 5.4’de alt sıra yakıcıları için sıcaklık dağılımı görülebilir.



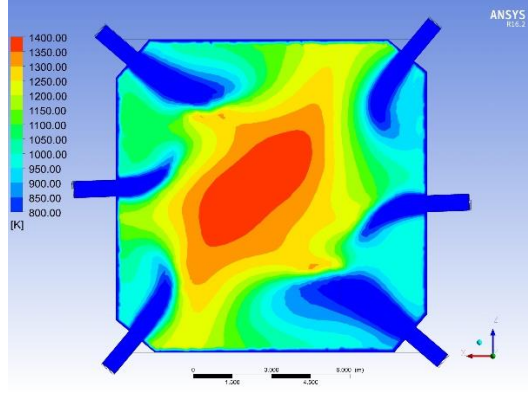
Şekil 5.4: Farklı durumlar için alt sıra yakıcıları sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.4’de görüldüğü gibi alt sıra enjektör eksen hizasından alınan sıcaklık dağılımında yüksek sıcak bölgeler en yoğun olarak durum 1 de yer almaktadır. Bunu sırası ile durum 2, durum 4 ve durum 3 takip etmektedir.

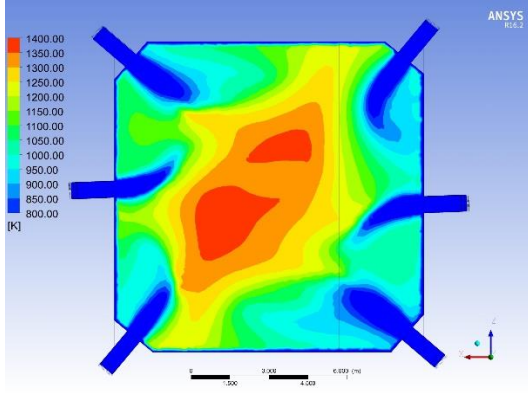
Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da sırasıyla orta ve üst sıra yakıcıları için sıcaklık dağılımı görülebilir.



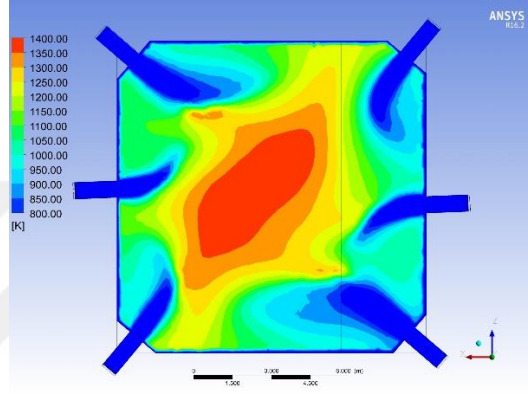
Durum 1



Durum 2

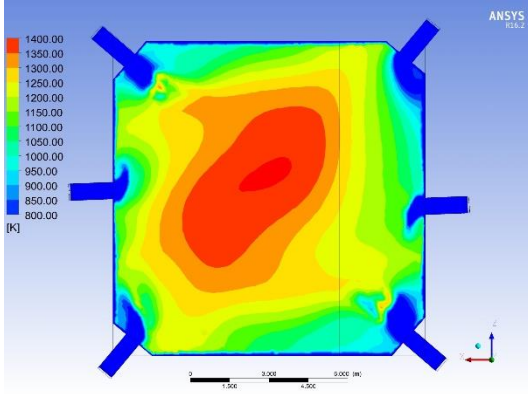


Durum 3

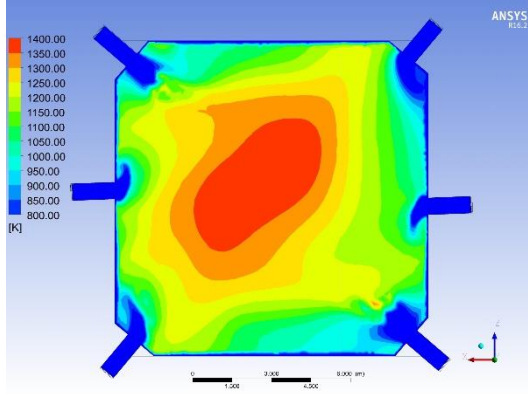


Durum 4

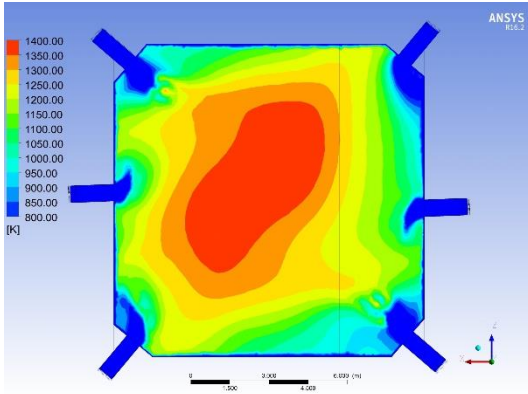
Şekil 5.5: Orta sıra yakıcılar sıcaklık dağılımı.



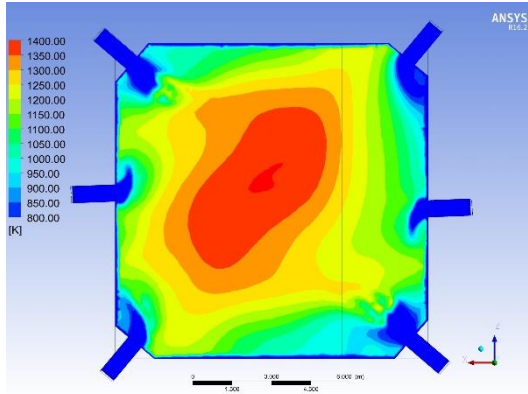
Durum 1



Durum 2



Durum 3



Durum 4

Şekil 5.6: Üst sıra yakıcılar sıcaklık dağılımı.

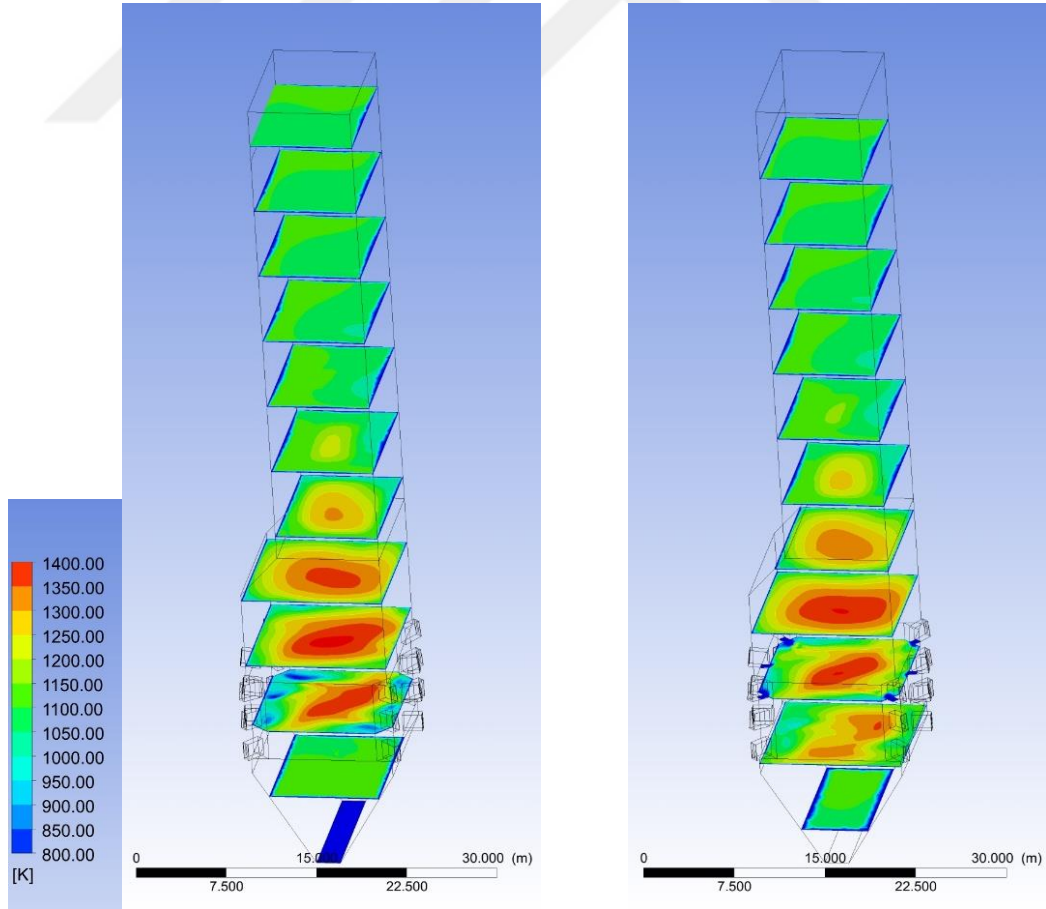
Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da görüldüğü gibi alev topu farklı durumlar için benzer yapıda oluşmuştur. Burada aynı zamanda kömür gönderilmeyen 4 numaralı yakıcının bulunduğu bölgede soğuk alan gözlenmektedir. Farklı durumlar için hesaplanan en yüksek sıcaklıklar Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Farklı durumlar için hesaplanan en yüksek sıcaklık değerleri.

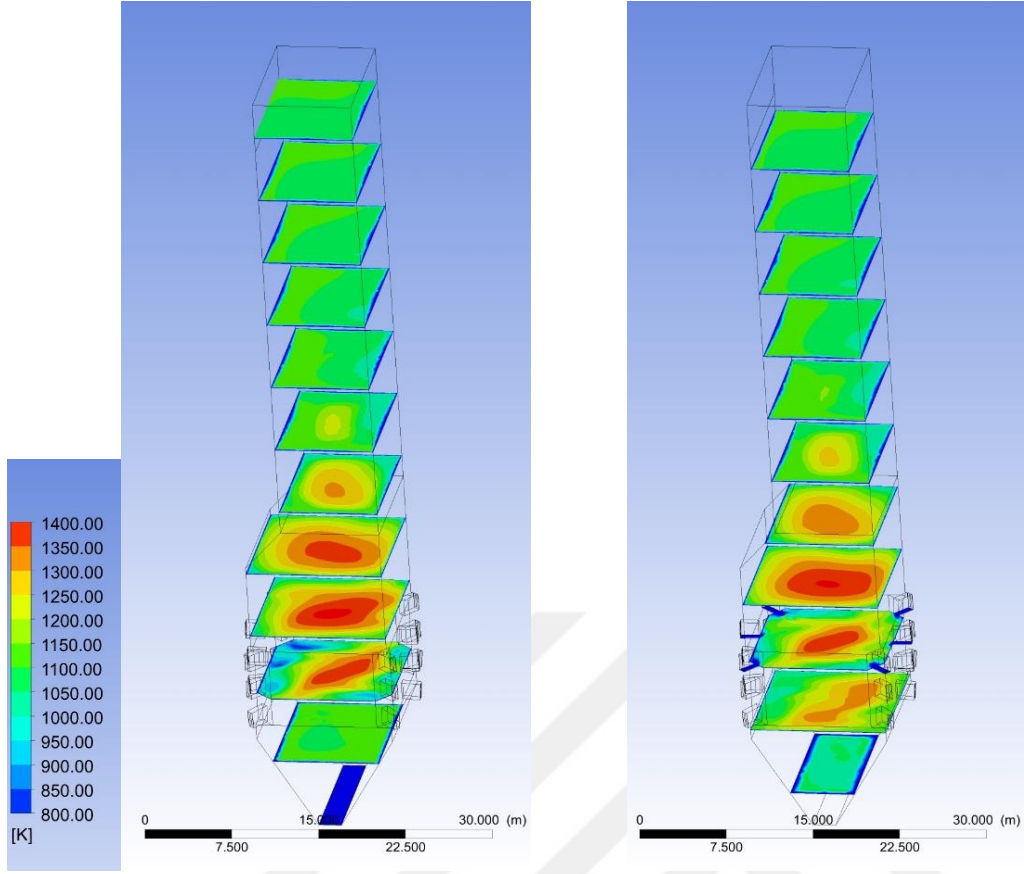
Durum	Sıcaklık [K]
Durum 1	1524
Durum 2	1526
Durum 3	1513
Durum 4	1507

Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi farklı durumlar için en yüksek sıcaklıklar benzer olarak hesaplanmıştır. Burada sonuçlar değerlendirilirken her durum için gönderilen yakıt ve hava miktarı aynı olduğu unutulmamalıdır.

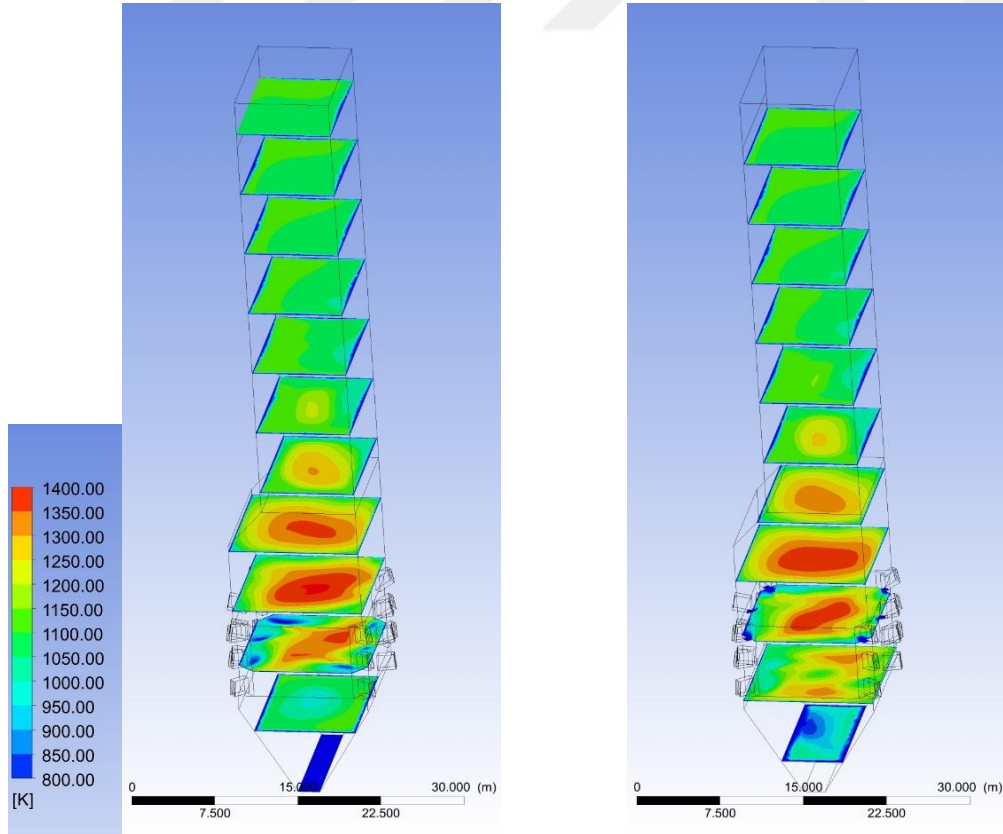
Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da sırasıyla durum 1, durum 2, durum 3 ve durum 4 için eş yüksekliklerden alınmış sıcaklık dağılımları görülebilir.



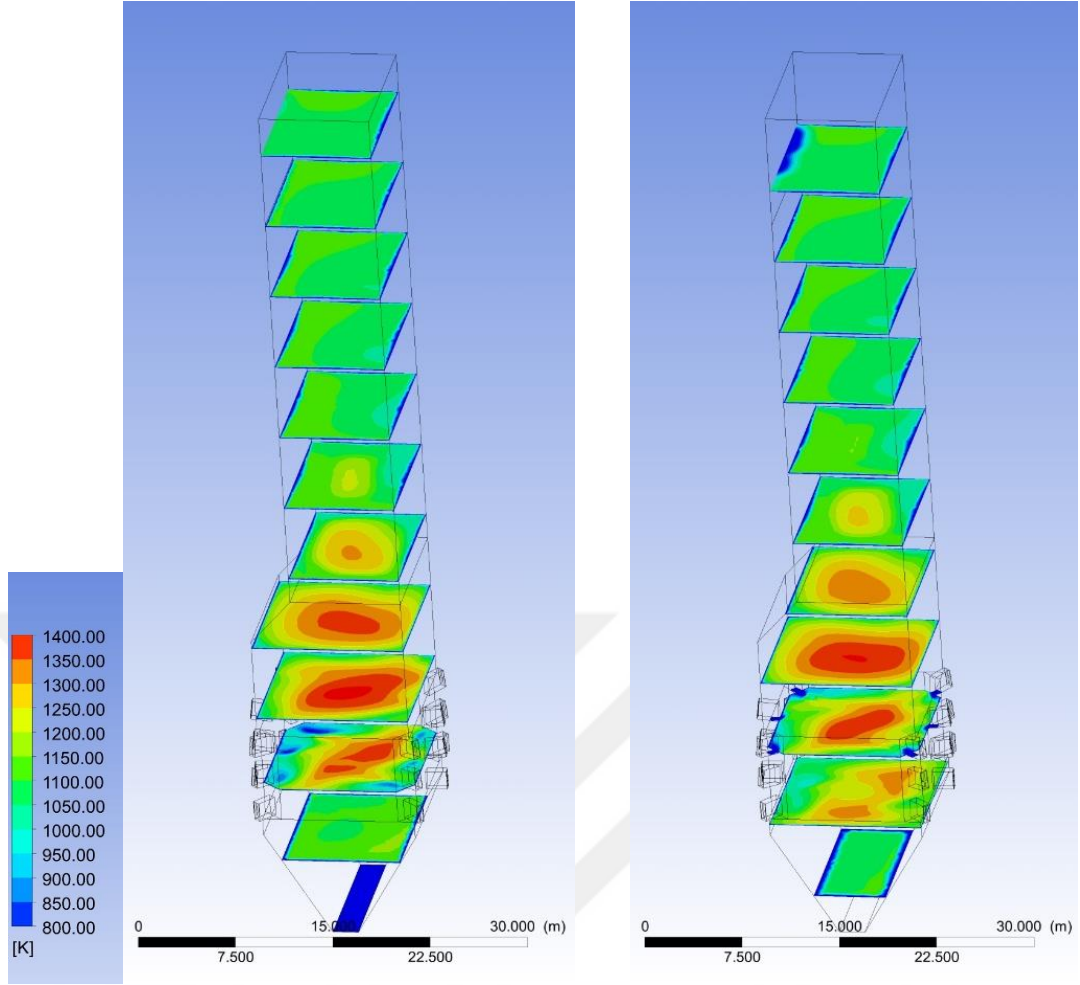
Şekil 5.7: Durum 1 için hacim sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.8: Durum 2 için hacim sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.9: Durum 3 için hacim sıcaklık dağılımı.

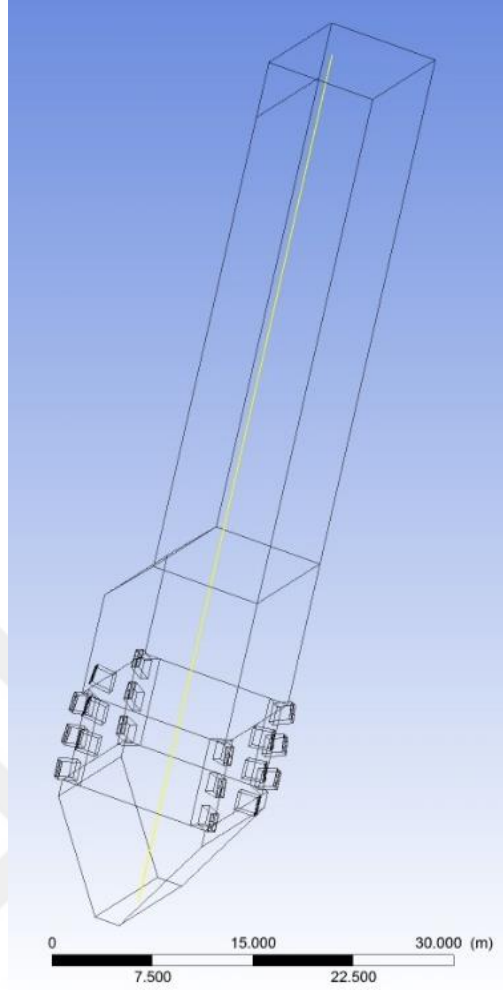


Şekil 5.10: Durum 4 için hacim sıcaklık dağılımı.

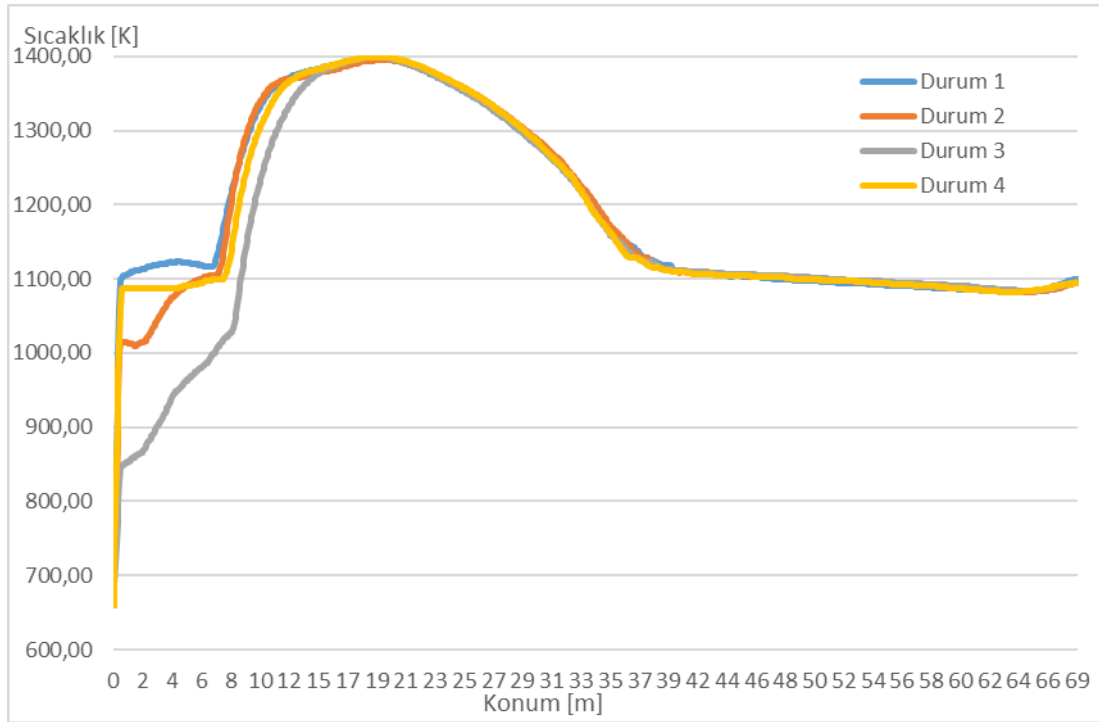
Şekil 5.7 - Şekil 5.10 incelendiğinde alev boyutlarında gerçekleşen değişimler görülmektedir. Standart durum referans alındığı takdirde yakıcıların yukarıya baktığı durum 2’de sıcak bölgelerin, kazanda yukarıya gidildikçe daha büyük alan kapladığı, aşağıya bakan durum 3 için ise daha kısa ama daha yoğun bir alev bölgesi olduğu gözlemlenmektedir. Büyük çıkış hacmine sahip olan durum 4’de ise alevin daha kısa ve daha küçük olduğu, soğumanın daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 5.11’de verilen çizgi boyunca sıcaklığın kazan yüksekliğinde göre değişimi Şekil 5.12’de verilmiştir.

Şekil 5.12’de görülebileceği gibi durum 3 aşağı yönlü yakıcılarda sıcaklık kazanın daha yukarı bölümlerinde artmaya başlamıştır. Bu yanma reaksiyonlarının daha geç başladığının göstergesidir. Yukarı yönlü yakıcıların bulunduğu durum 2 de ise sıcaklık daha yavaş artmış fakat sonrasında en sıcak bölge daha geniş bir yüksekliği kaplamaktadır.



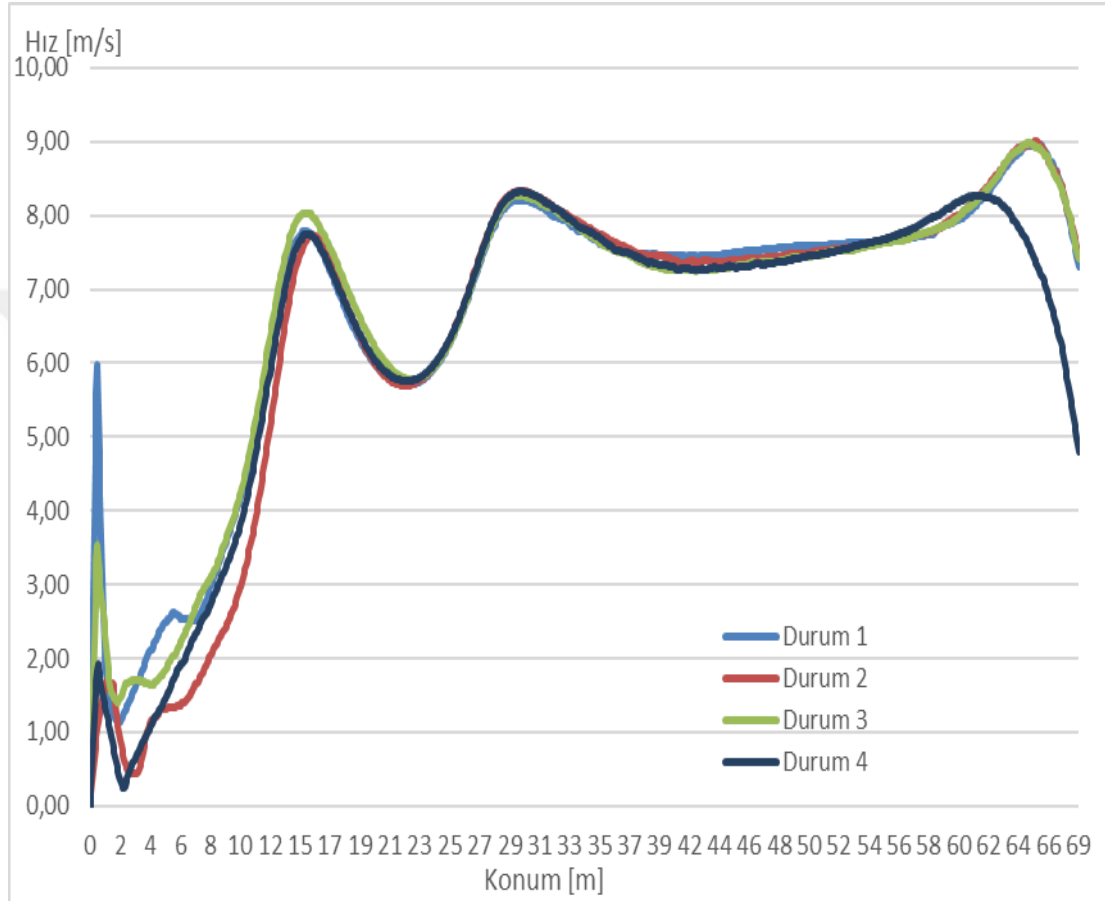
Şekil 5.11: Değerlerin alındığı eksen çizgisi.



Şekil 5.12: Çizgi üzerindeki sıcaklık dağılım grafiği.

1100 – 1400 K sıcaklık aralığının kazanın 6 – 39 metreleri arasında gerçekleştiği, bu aralıkta sıcaklık yaklaşık 20 metre kazan yüksekliğinde en büyük değeri aldığı görülmektedir.

Şekil 5.13’de ise aynı çizgi boyunca kazan yüksekliğine göre hız değişimi verilmiştir.

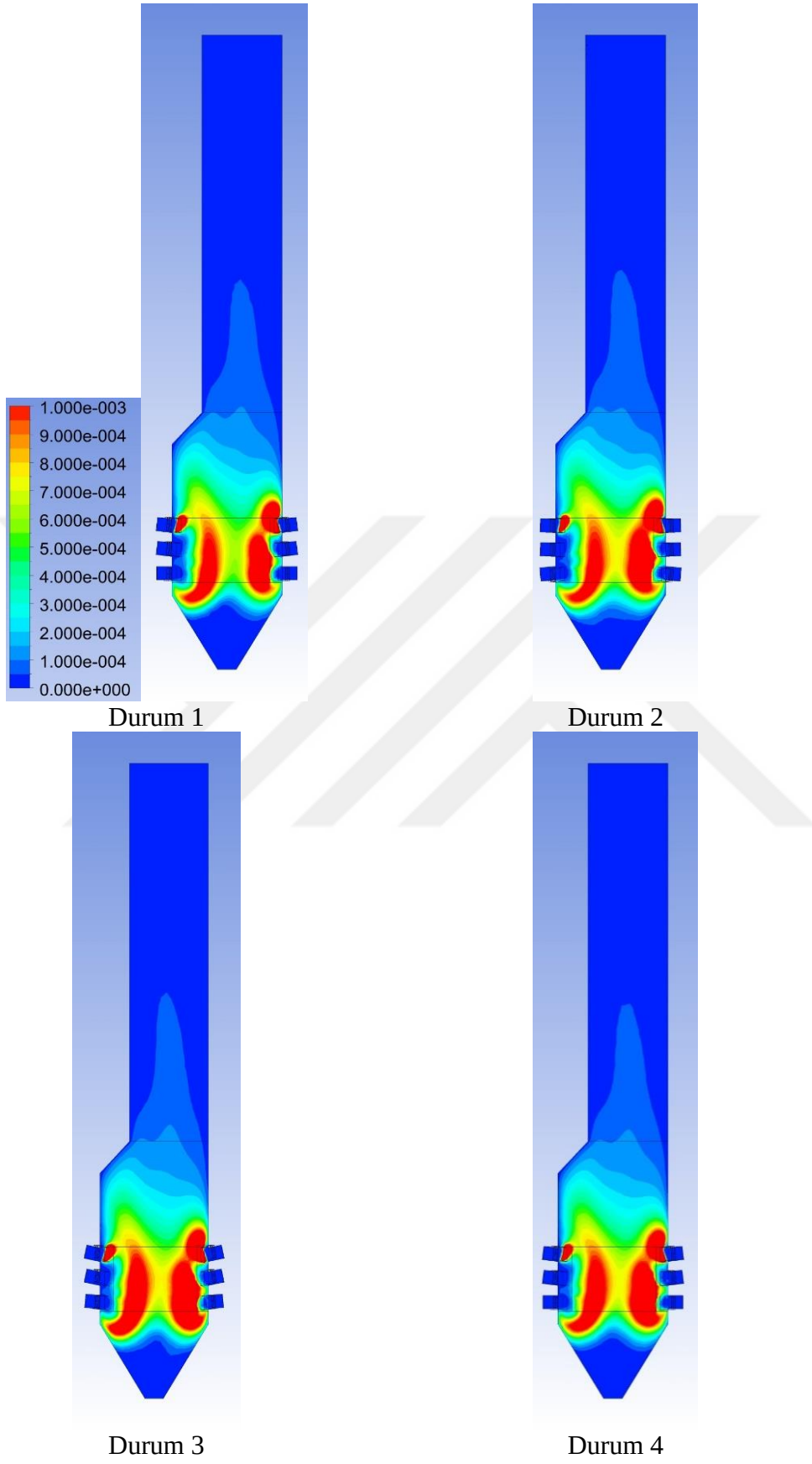


Şekil 5.13: Çizgi üzerindeki hız dağılımı grafiği.

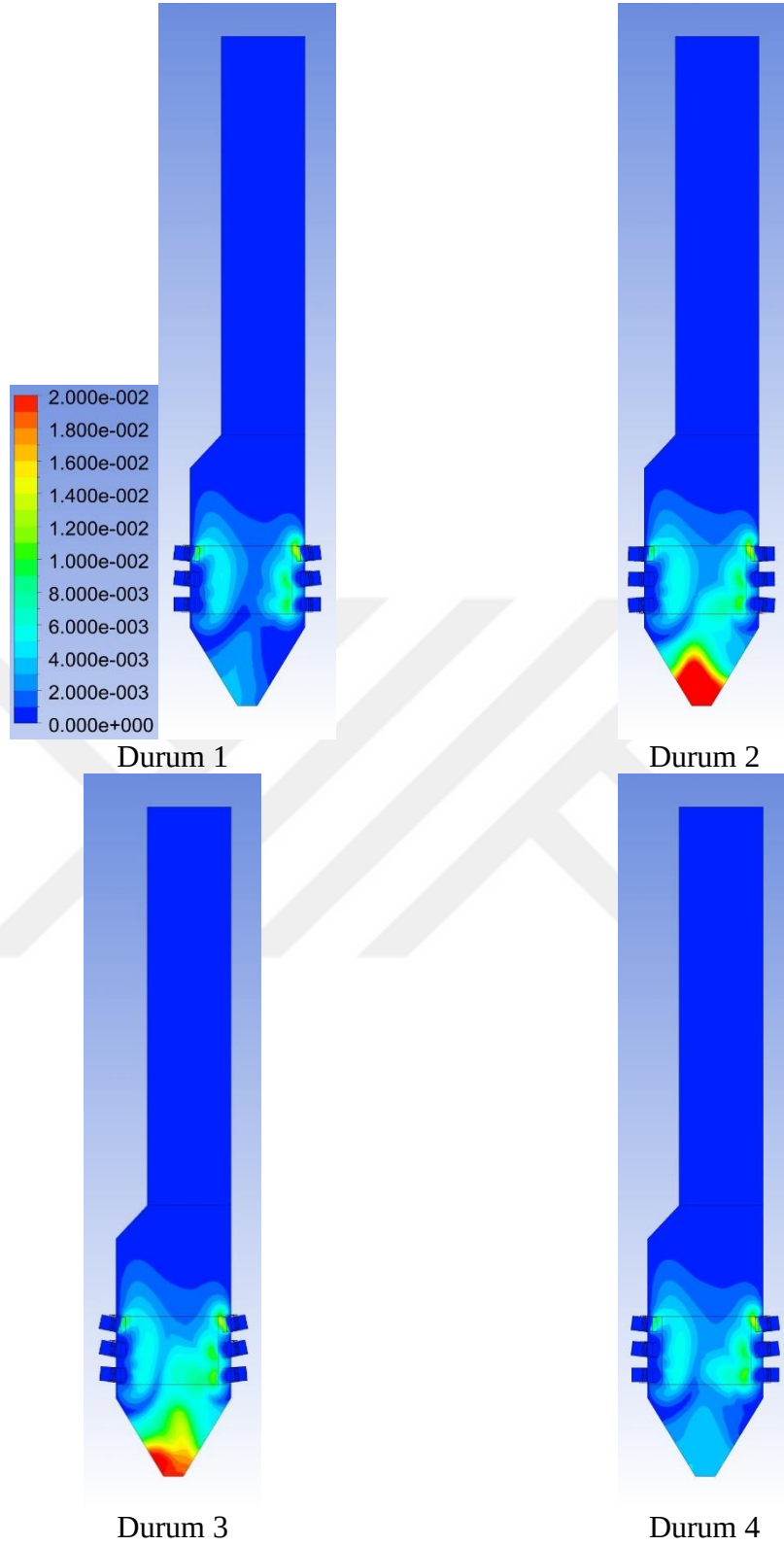
Şekil 5.13’de yer alan diyagram standart durum ve durum 3 aşağı yönlü yakıcı çözümünde alt noktalarda hızın daha yüksek olduğu görülmektedir. Durum 4’ün ise beklenildiği gibi çıkış bölgesine yaklaştıkça hızın daha fazla düştüğü görülmektedir.

Hız ve sıcaklık değerleri incelendikten sonra yanma ürünü olan ve kirletici olarak etkin bir rol oynayan karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂) ve yanmanın veriminde belirleyici bir rol oynayan katı karbon incelenmiştir. Şekil 5.4’de farklı durumlarda ki karbon kütle oranı görülebilir.

Şekil 5.14’de görüneceğiniz üzere farklı durumlar için XY düzlemi karbon dağılımı kütle oranları verilmiştir. Farklı koşullarda dağılım benzerlik göstermektedir.

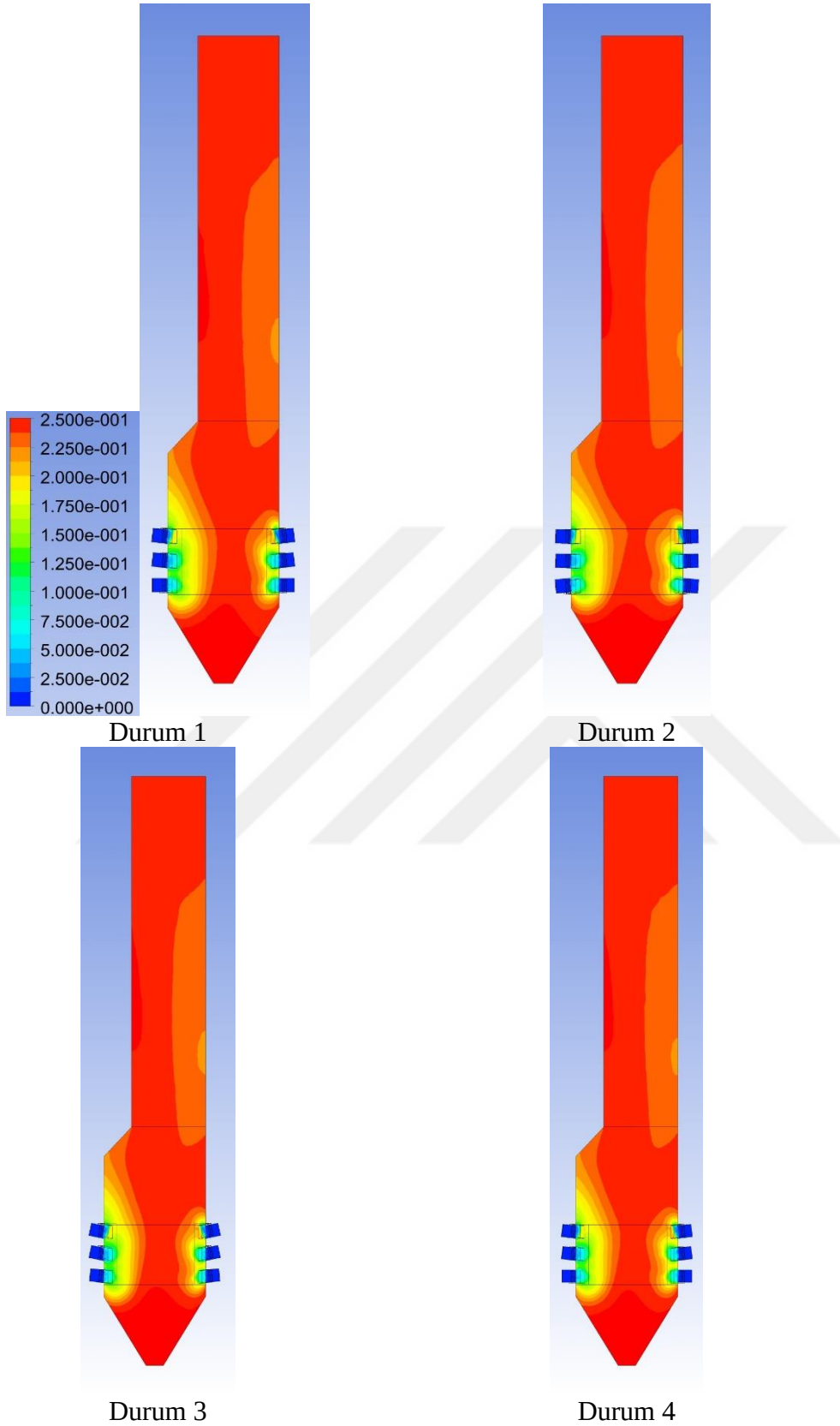


Şekil 5.14: Karbon kütle oranları.



Şekil 5.15: Karbonmonoksit (CO) kütle oranları.

Şekil 5.15’de ise farklı durumlar için karbon monoksit dağılımları verilmiştir. Her 4 durum için de dağılım incelendiği takdirde karbon monoksit oluşumunun cüruf toplama bölgesinden yoğun olarak gerçekleştiği görülebilir.

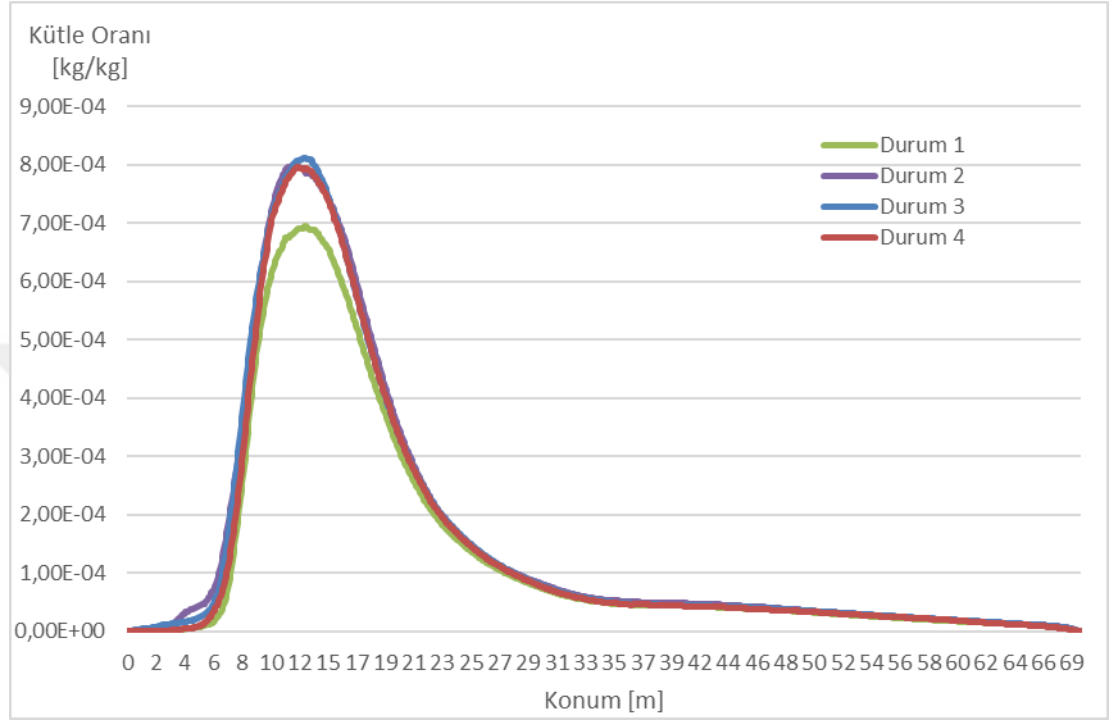


Şekil 5.16: Karbondioksit (CO₂) kütle oranları.

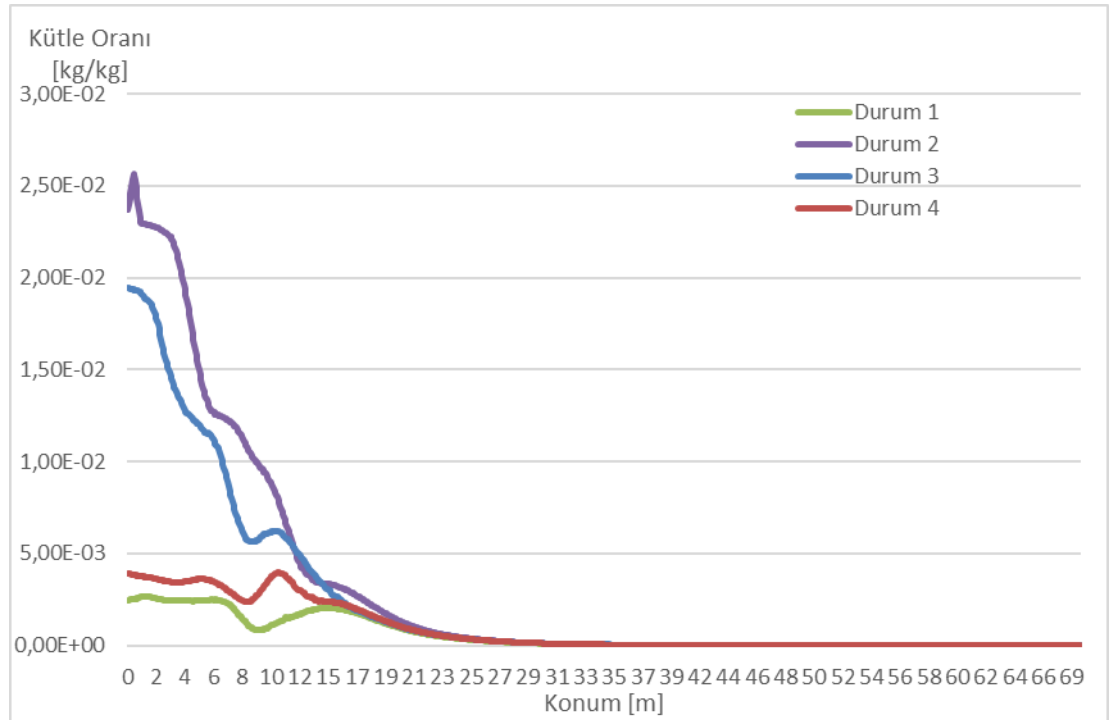
Şekil 5.16'daki karbon dioksit kütle oranı dağılımları incelendiğinde karbondioksitin tüm hacimde yayılı halde bulunduğu, yakıcıların üfleme bölgesinde üflenmiş taze

hava ve reaksiyonun gerçekleşmesi durumuna bağlı olarak en düşük oranlarda bulunduğu görülmüştür.

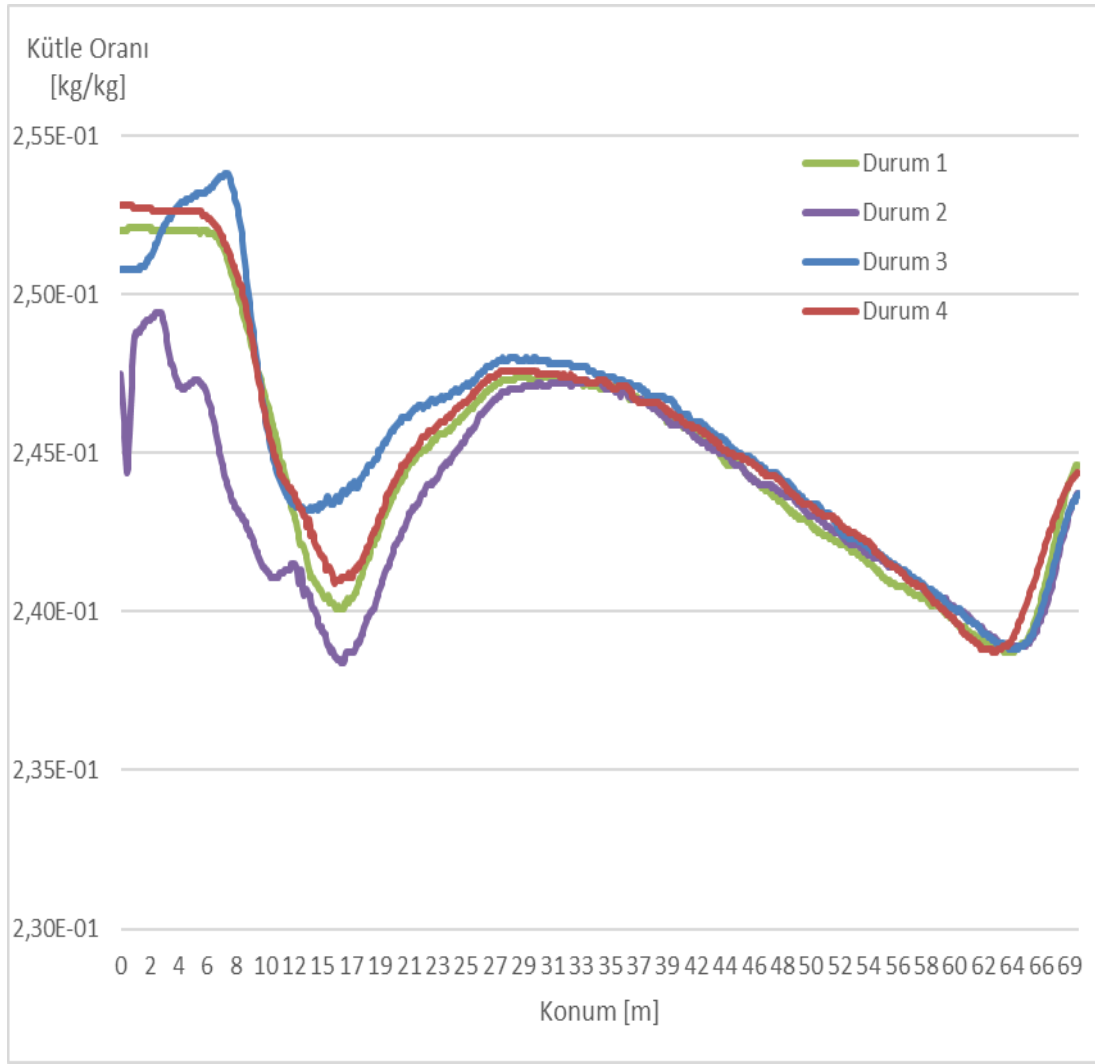
Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19’da eksen çizgisi boyunca katı karbon, karbon monoksit ve karbondioksit kütle oranı grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.17: Karbon kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.



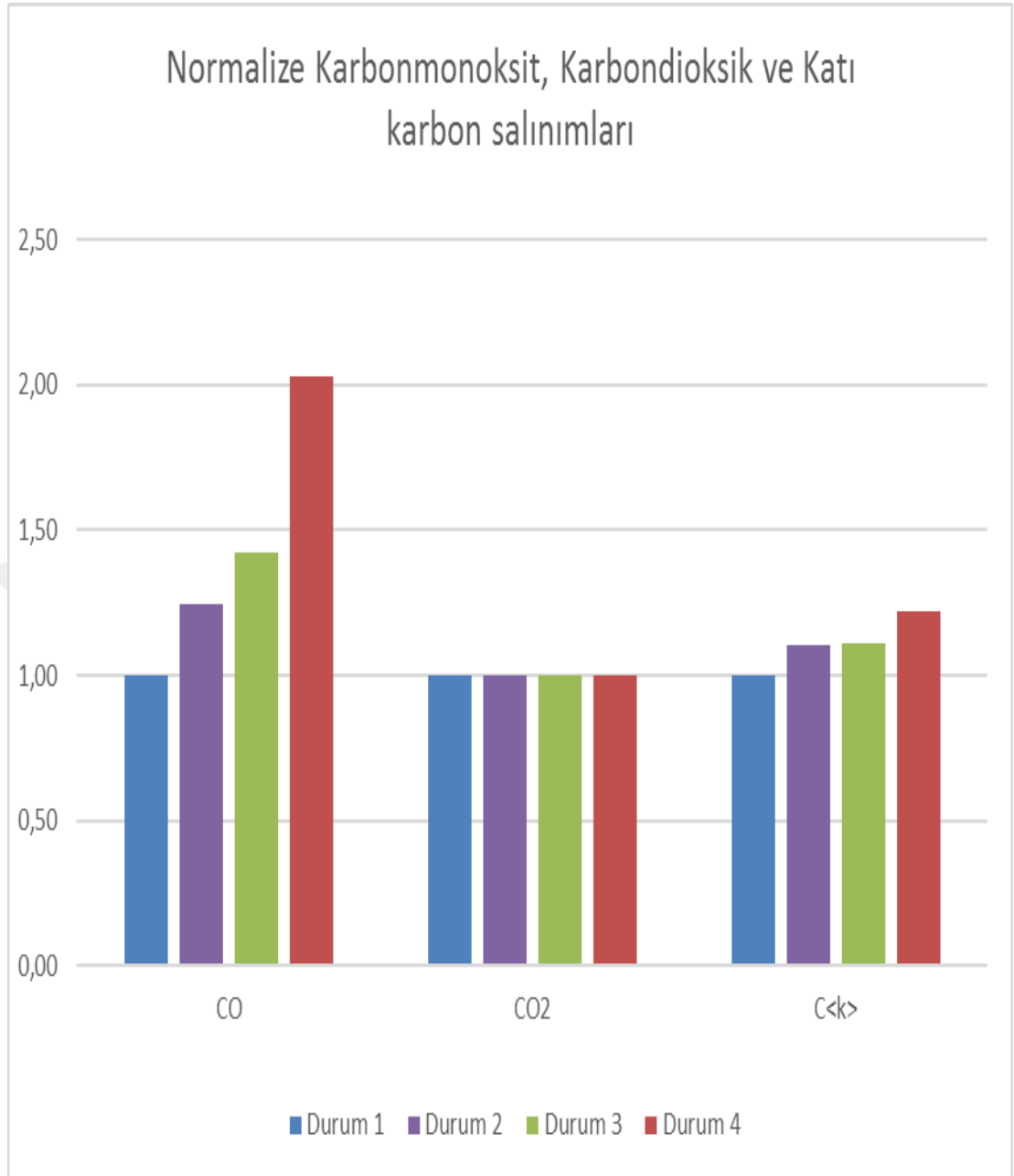
Şekil 5.18: Karbon monoksit kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.



Şekil 5.19: Karbon dioksit kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.

Şekil 5.17’de verilen katı karbon kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi incelendiğinde durum 1’in yanma bölgesinin hemen öncesinde daha düşük derişimlere sahip olduğu, devamında ise her 4 durumun eşdeğer karakter gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.18’de karbon monoksitin yanma bölgesi öncesinde en yüksek derişimlere sahip olduğu, devamında ise derişiminin hızla düştüğü görülmektedir. Bu davranış biçimi yakıcıların alt bölgesindeki oksijen oranının daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.19’da ise karbondioksitin yakıcıların olduğu bölgede derişimin düştüğü, geri kalan bölgelerde ise benzer derişimlere sahip olduğu görülebilir.

Şekil 5.20’de görüldüğü gibi normalize karbondioksit salınımı 4 durum için de eşdeğerken özellikle karbonmonoksit ve karbondioksit salınımlarının durum 4 için daha yüksek olduğu görülmektedir.

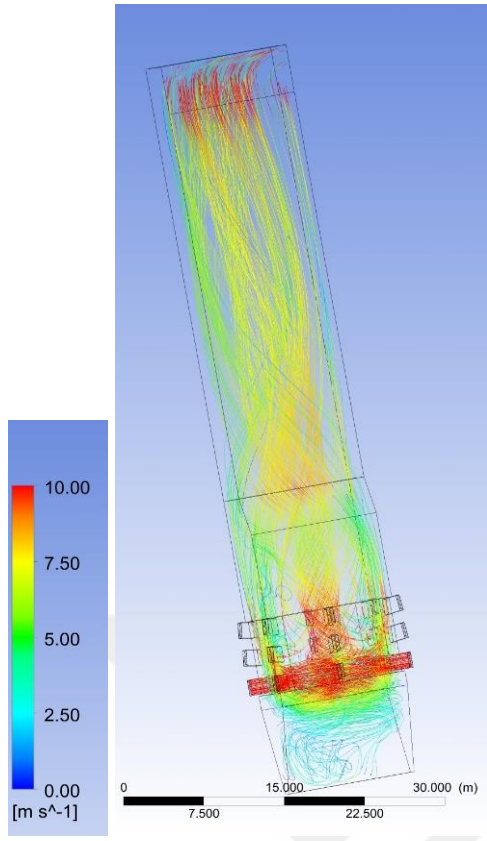


Şekil 5.20: Normalize karbonmonoksit, karbondioksik ve katı karbon salınımları.

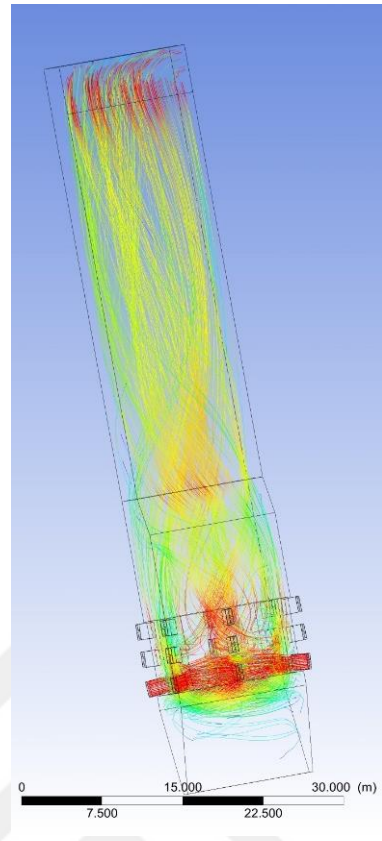
Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’da sırasıyla alt, orta ve üst sıra yakıcılar için kömür taneciklerin izlediği yol ve tanecik hızları görülmektedir.

Şekil 5.20’de durum 4 geniş çıkış alanına sahip olan durum için karbonmonoksit ve karbon emisyonları daha yüksek değer almıştır. Buna sebep olarak geniş çıkış alanına sahip geometride kömür taneciklerinin kazanı daha geç terketmesi gösterilebilir. Karbon ve karbonmonoksit emisyonlarının ikisinin de yüksek olması tam yanmanın gerçekleşmediğinin bir göstergesidir ve birbirlerini doğrulamaktadır.

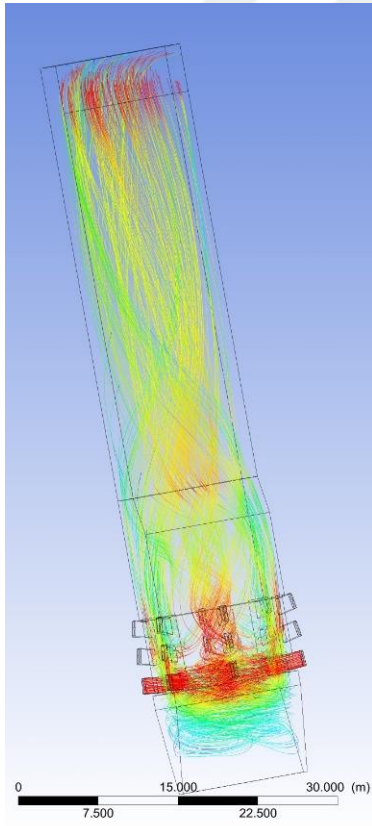
Karbondioksit salımları ise aynı olarak gerçekleşmiştir.



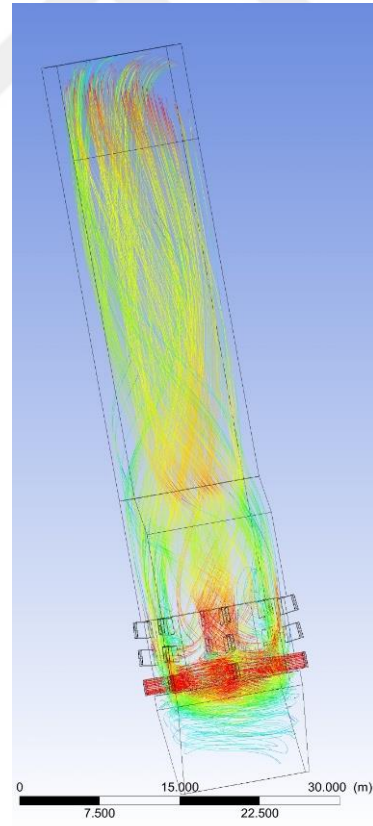
Durum 1



Durum 2

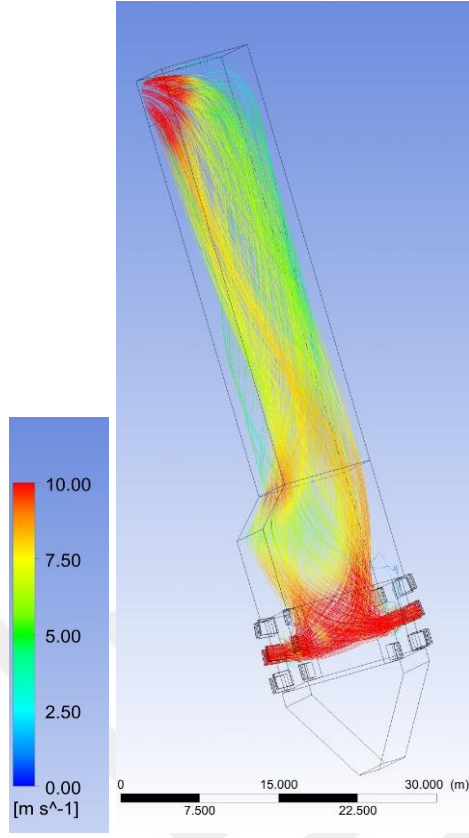


Durum 3

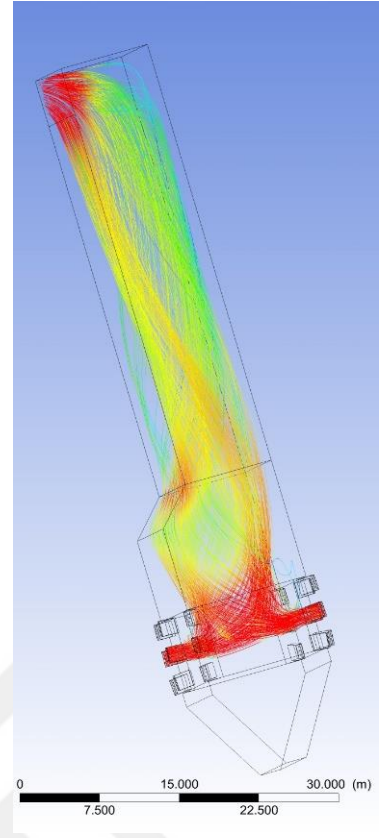


Durum 4

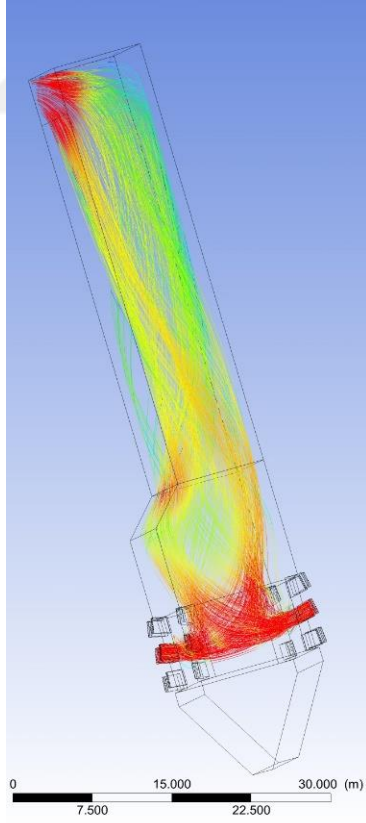
Şekil 5.21: Alt sıra yakıcılar akış çizgisi.



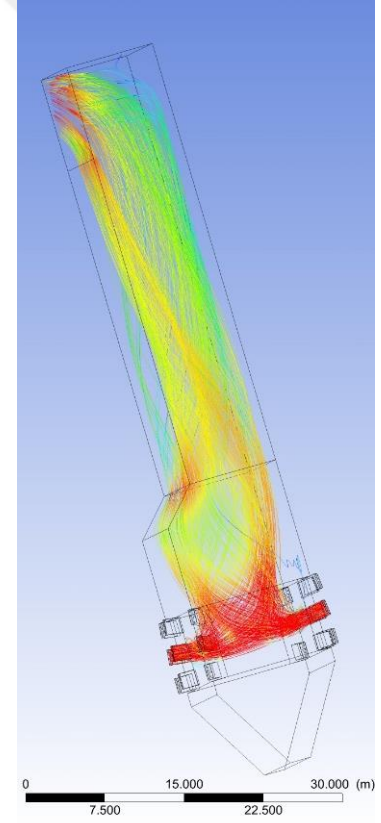
Durum 1



Durum 2

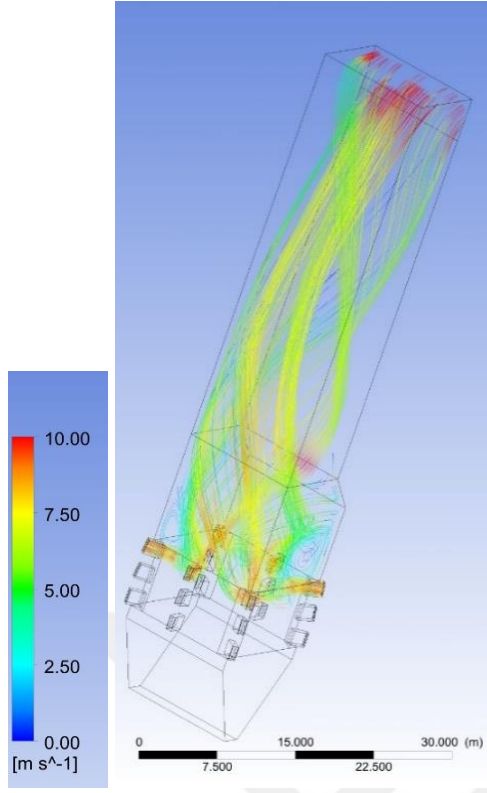


Durum 3

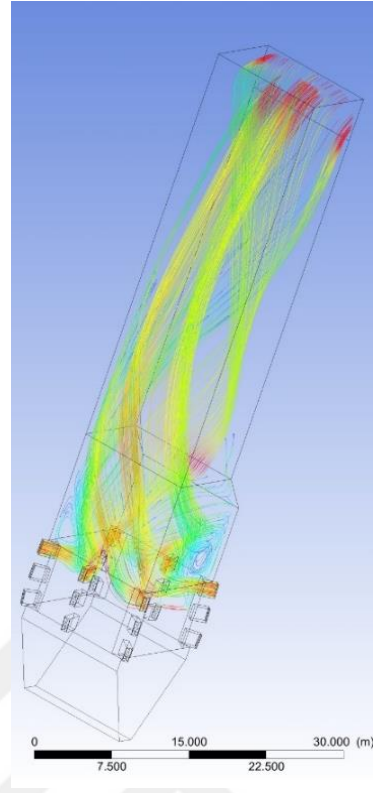


Durum 4

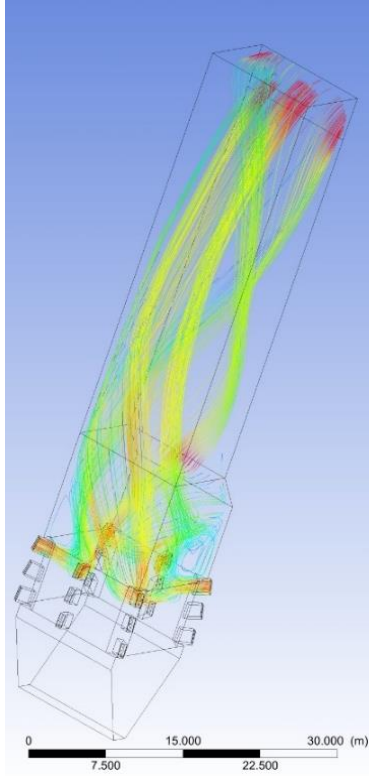
Şekil 5.22: Orta sıra yakıcılar akış çizgisi.



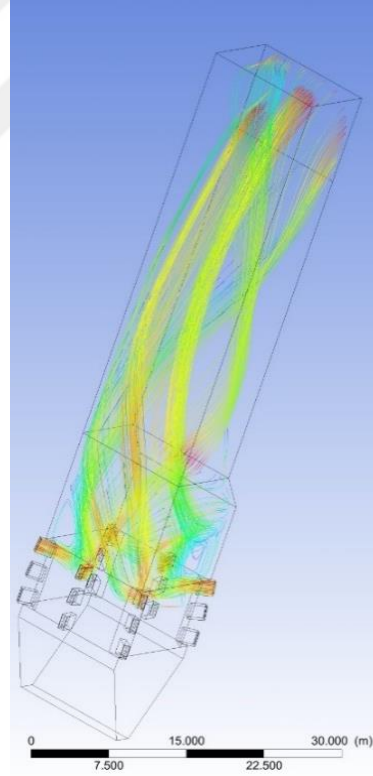
Durum 1



Durum 2



Durum 3

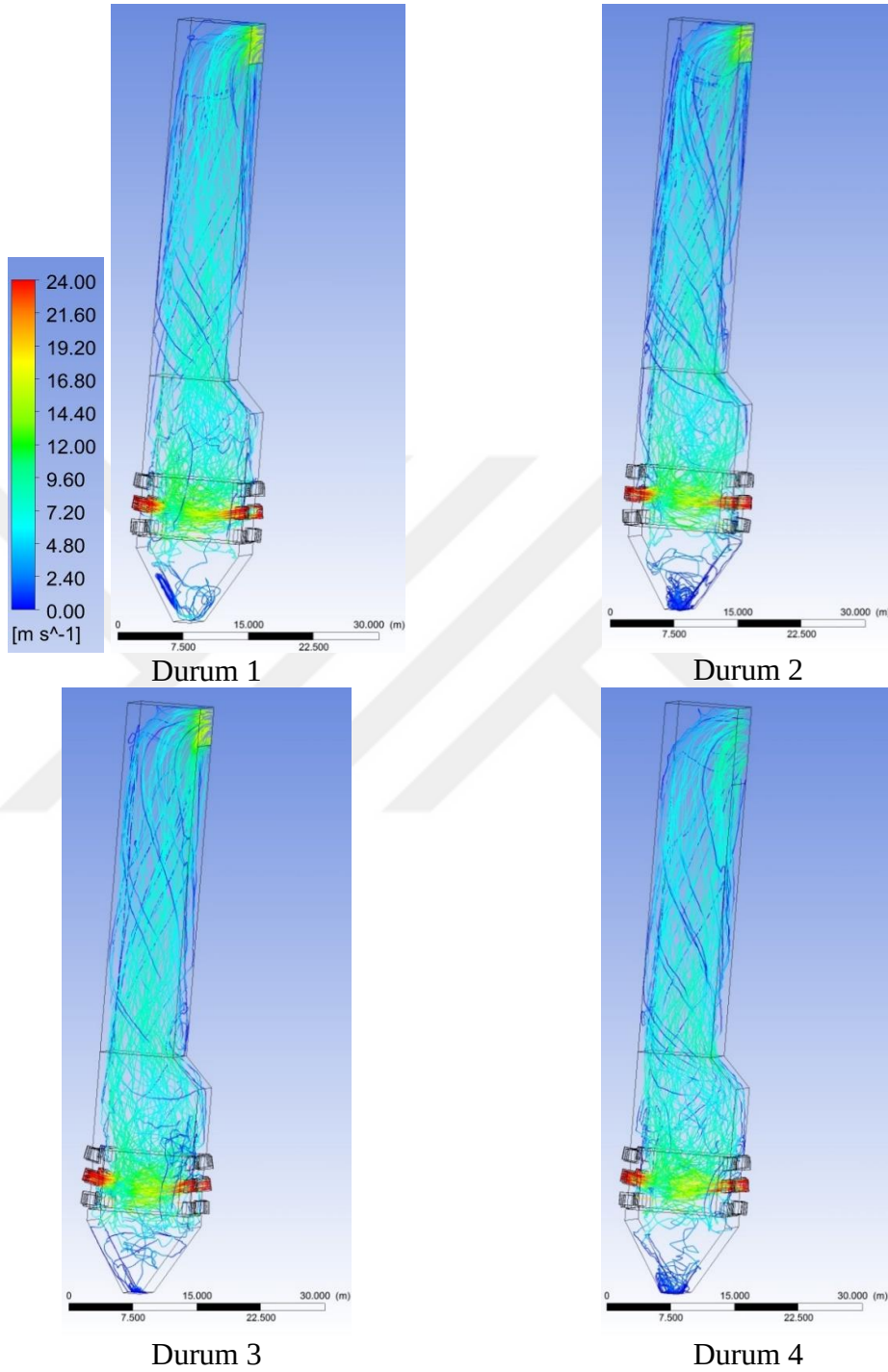


Durum 4

Şekil 5.23: Üst sıra yakıcılar akış çizgisi.

Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de görülebileceği gibi kazanın içinde güçlü bir dönme hareketi ve bunun sonucunda karışım oluşmaktadır. Burada alt sıra yakıcılar

kazan merkezindeki dönme hareketini oluşturmakta, orta sıra yakıcılar onun bir üst katmanını kaplamakta ve üst sıra yakıcılar merkeze nüfuz edememektedir.



Şekil 5.24: Orta sıra yakıcılarından gönderilen kömür taneciklerinin hareketi.

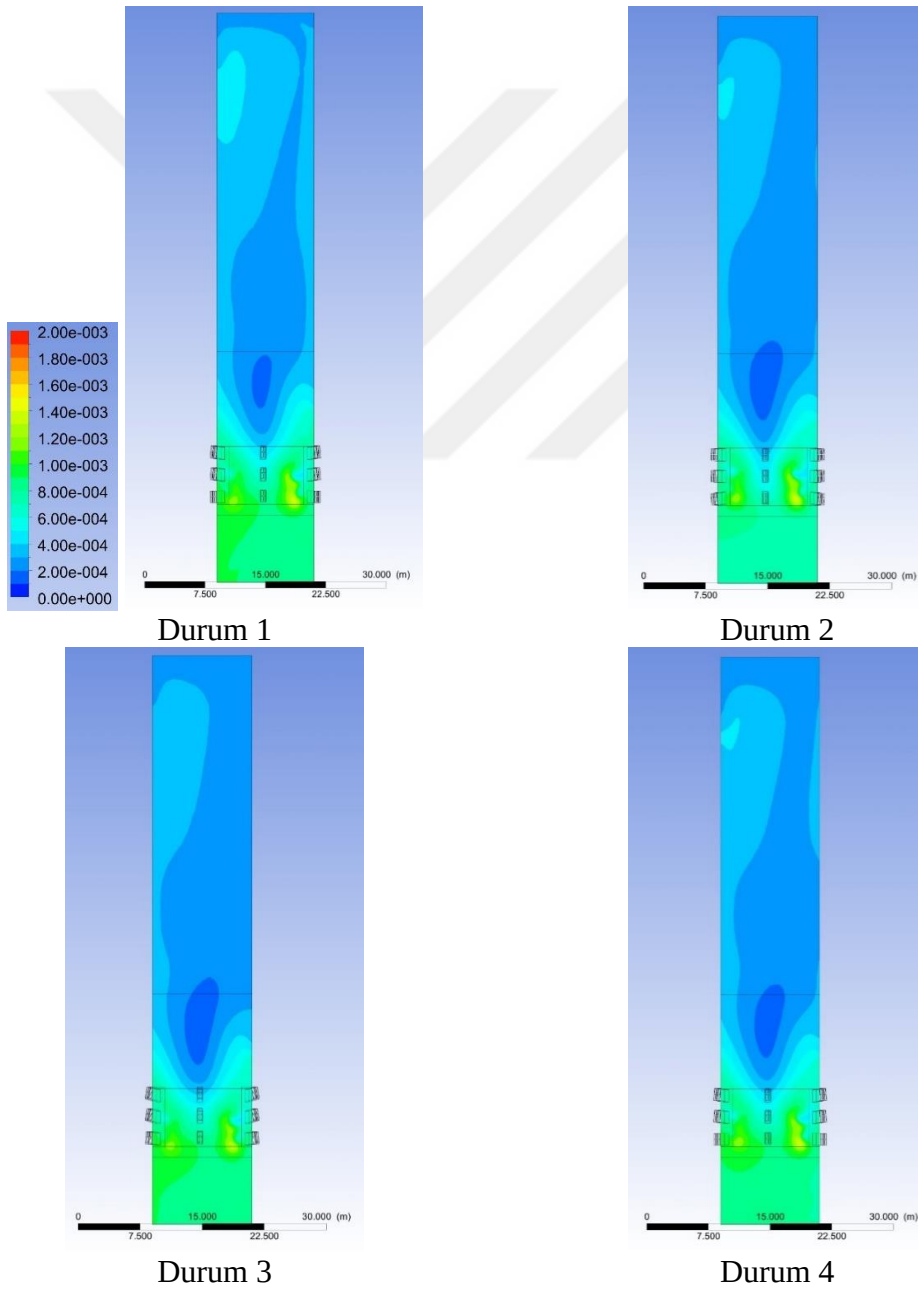
Şekil 5.24’de görülebileceği gibi kömür tanecikleri akışın karakteristiğine uymuş ve döngü hareketini takip etmişlerdir.

Kömür taneciklerinin her bir durum için en kısa, en uzun ve ortalama olarak kalma süreleri Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3: Kömür taneciklerinin kazanda en kısa, en uzun ve ortalama kalma süreleri.

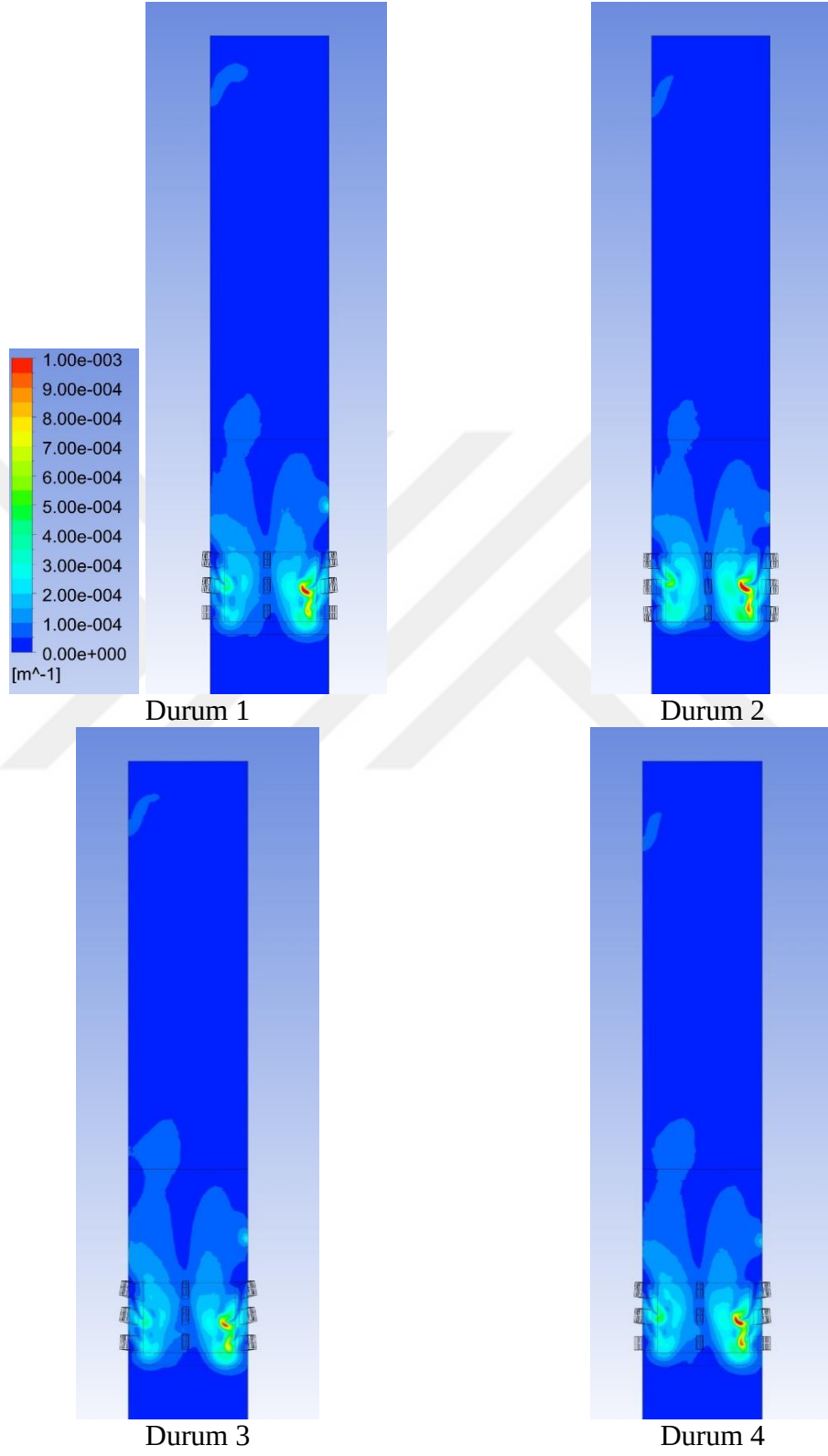
Durum	En kısa [s]	En uzun [s]	Ortalama [s]
Durum 1	5.83	124.5	15.22
Durum 2	5.89	98.17	12.33
Durum 3	5.78	89.17	13.22
Durum 4	5.63	90.91	12.62

Sıcaklık, hız dağılımları ve kömür parçacıkları incelendiğinde Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 arasında önemli farklar olmadığı gözlemlenmiştir. Çözümlerin üzerine Fluent programında NO, N₂O ve HCN değerleri incelenmiştir.



Şekil 5.25: Hidrojen siyanür (HCN) kütle oranı.

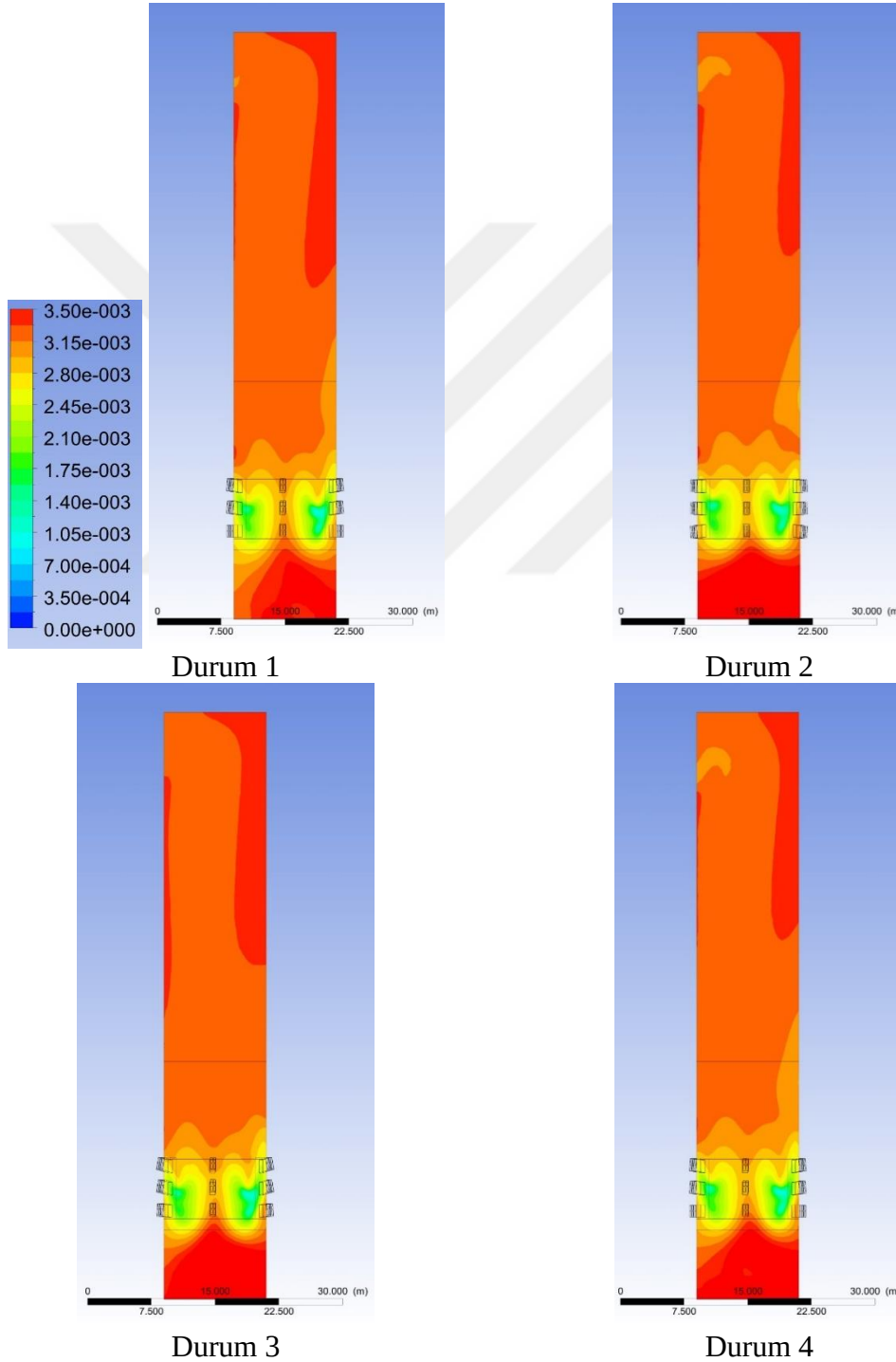
Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’de farklı durumlar için hidrojen sülfür kütle oranları ve gradyenleri verilmiştir.



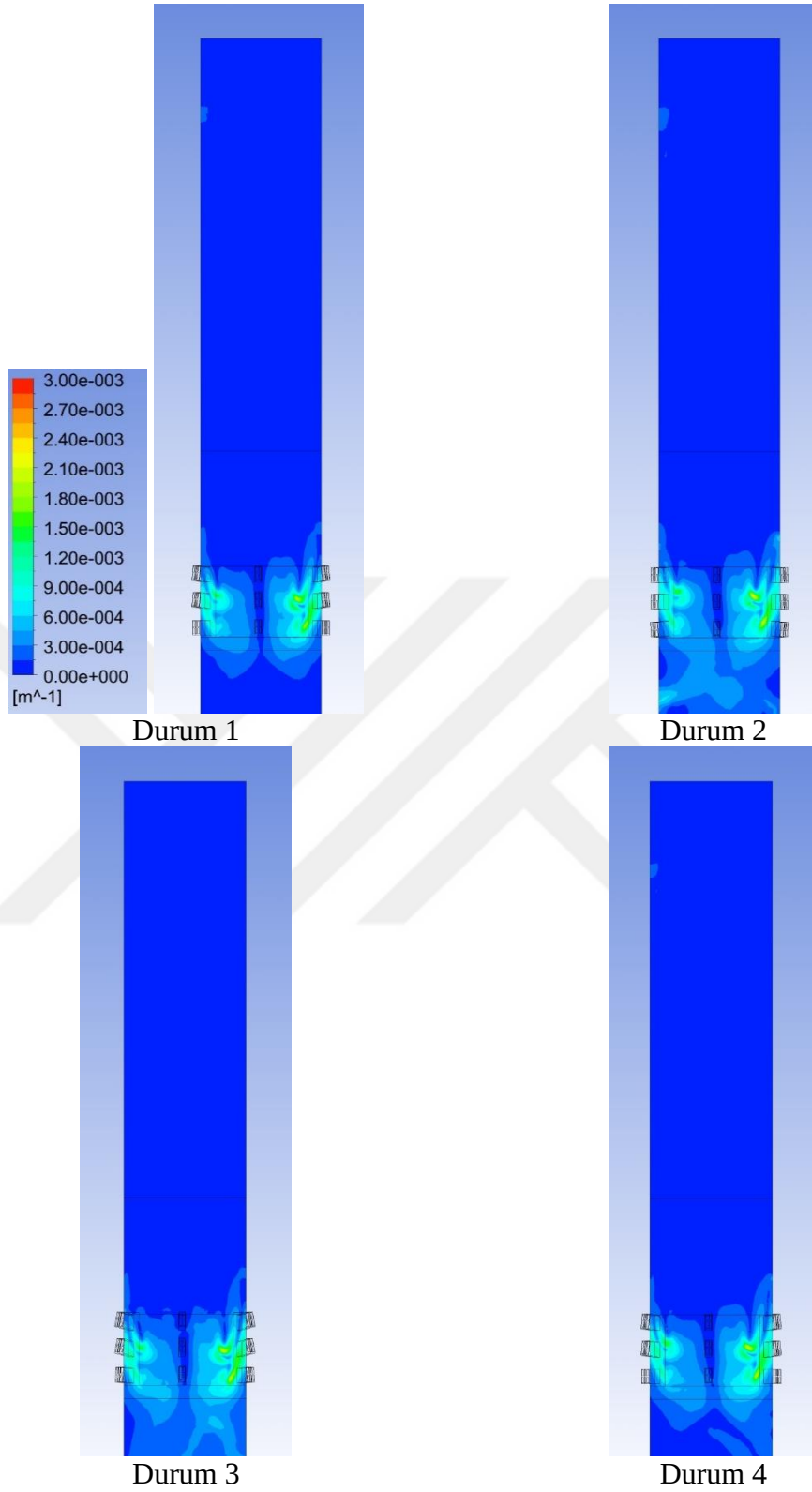
Şekil 5.26: Hidrojen siyanür (HCN) gradyenleri.

Şekil 5.25’de verilen HCN kütle oranları incelendiğinde yakıcıların altındaki cüruf bölgesinde daha yoğun HCN birikimi olduğu görülmektedir. HCN gradyenleri incelendiğinde durum 2’nin yakıcı bölmesinde daha yoğun bir HCN oluşumu tespit edilmiştir.

Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’de azot oksit (NO) gazı için kütle oranları ve gradyenleri verilmiştir.



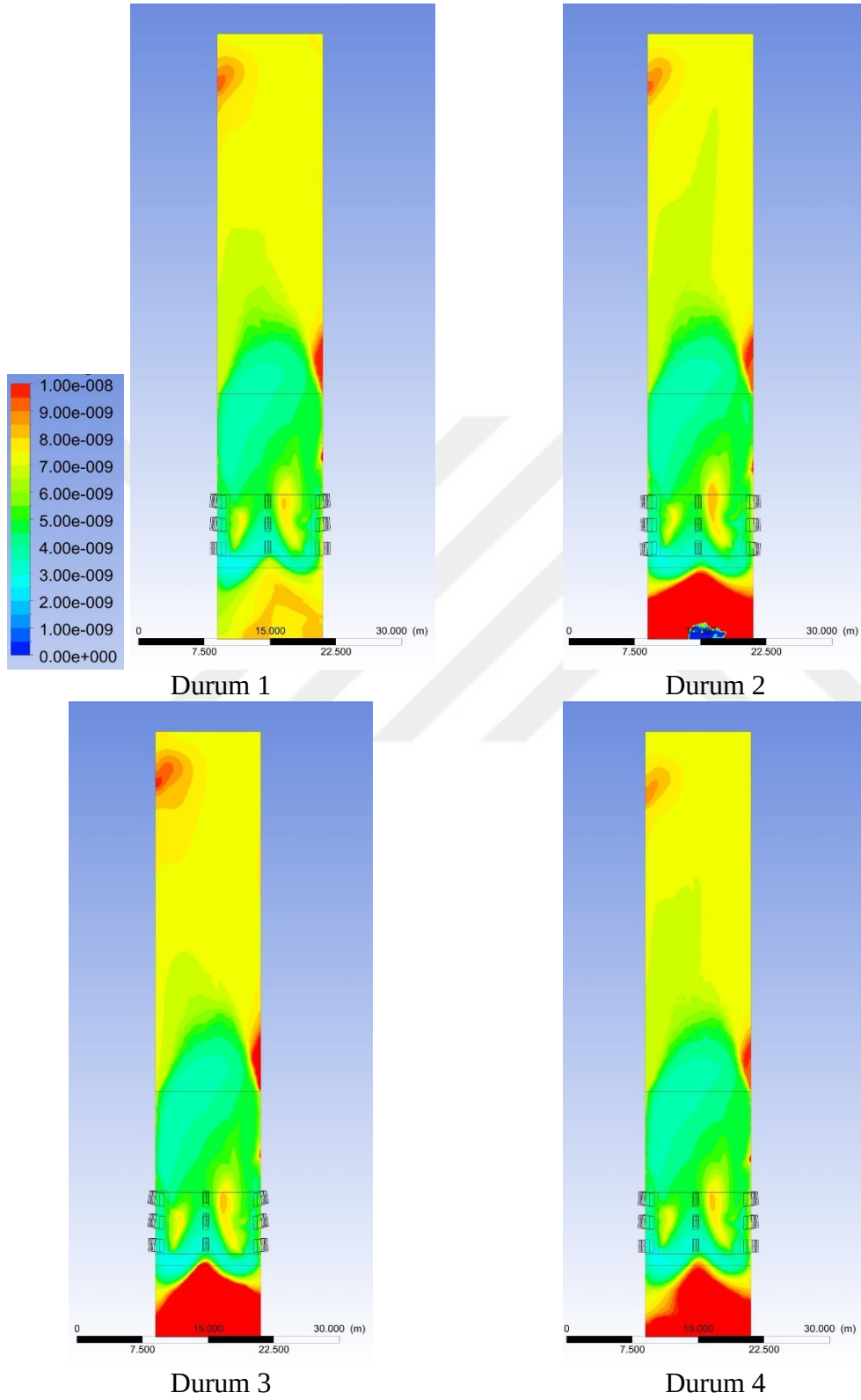
Şekil 5.27: Azot Oksit (NO) kütle oranı.



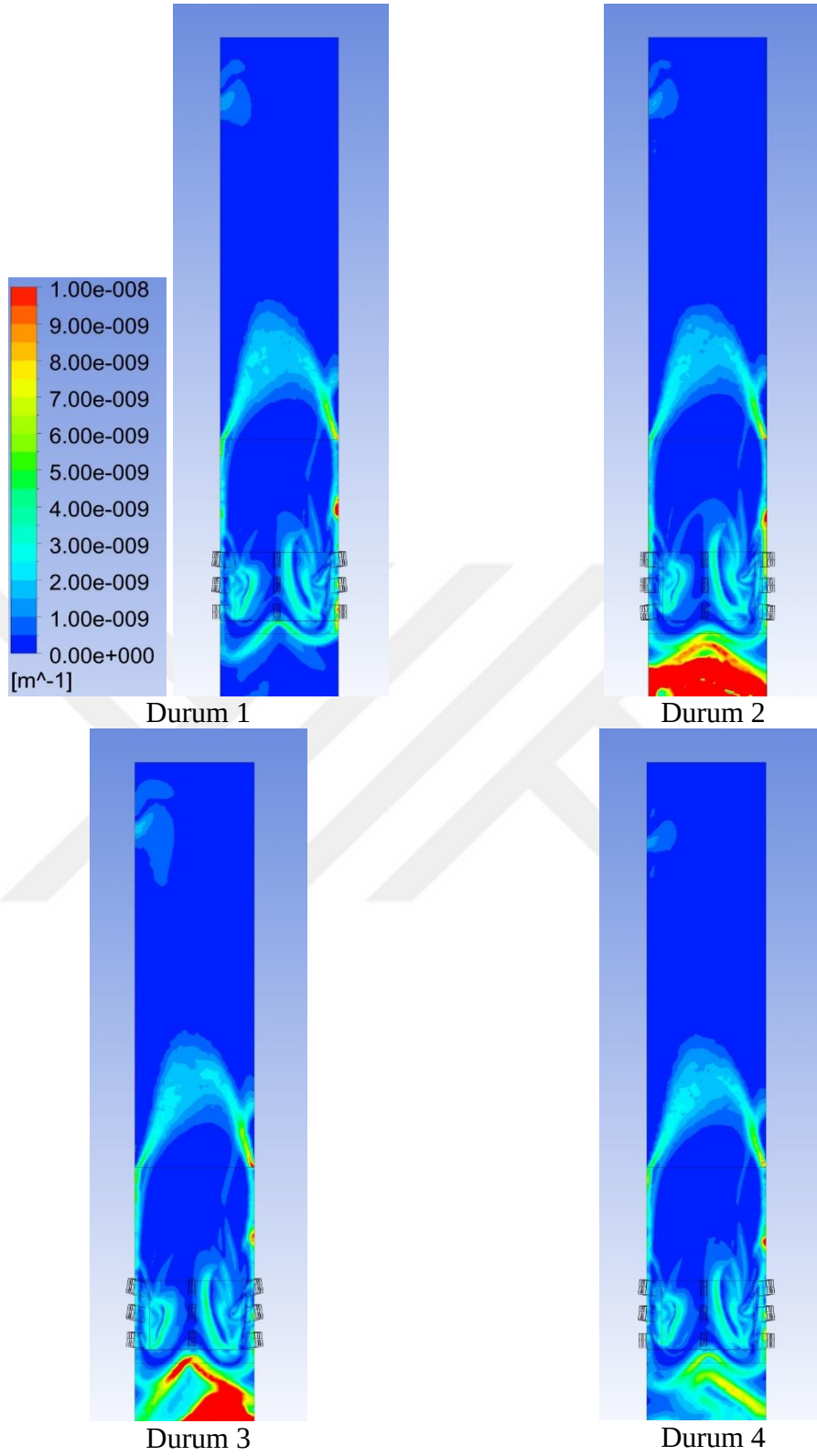
Şekil 5.28: Azot oksit (NO) gradyenleri.

Şekil 5.27’de verilen NO kütle oranı incelendiğinde durum 2 ve durum 4’de yakıcıların yukarısında daha yoğun bir derişim olduğu gözlemlenmektedir. Kazan içerisinde NO yoğun olarak yakıcıların bulunduğu bölgede açığa çıkmaktadır.

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’de ise diazot monoksit (N_2O) gazı için kütle oranı ve grandyenleri verilmiştir.



Şekil 5.29: Diazot monoksit (N_2O) kütle oranı.

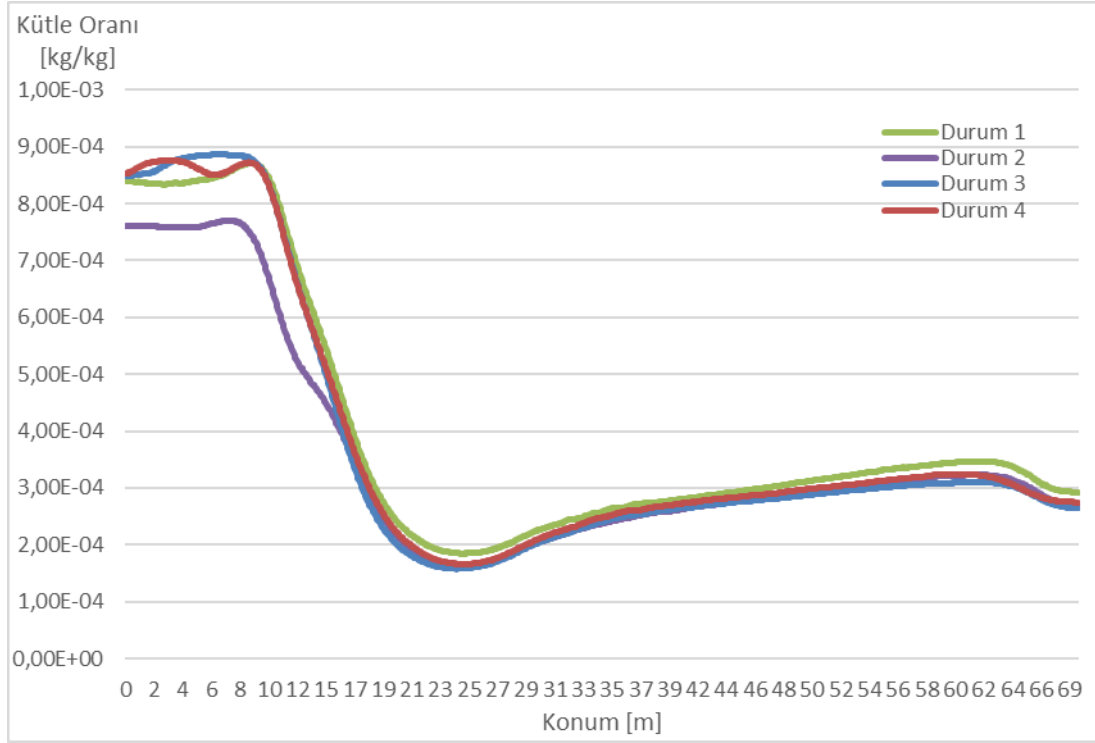


Şekil 5.30: Diazot monoksit (N_2O) gradyeni.

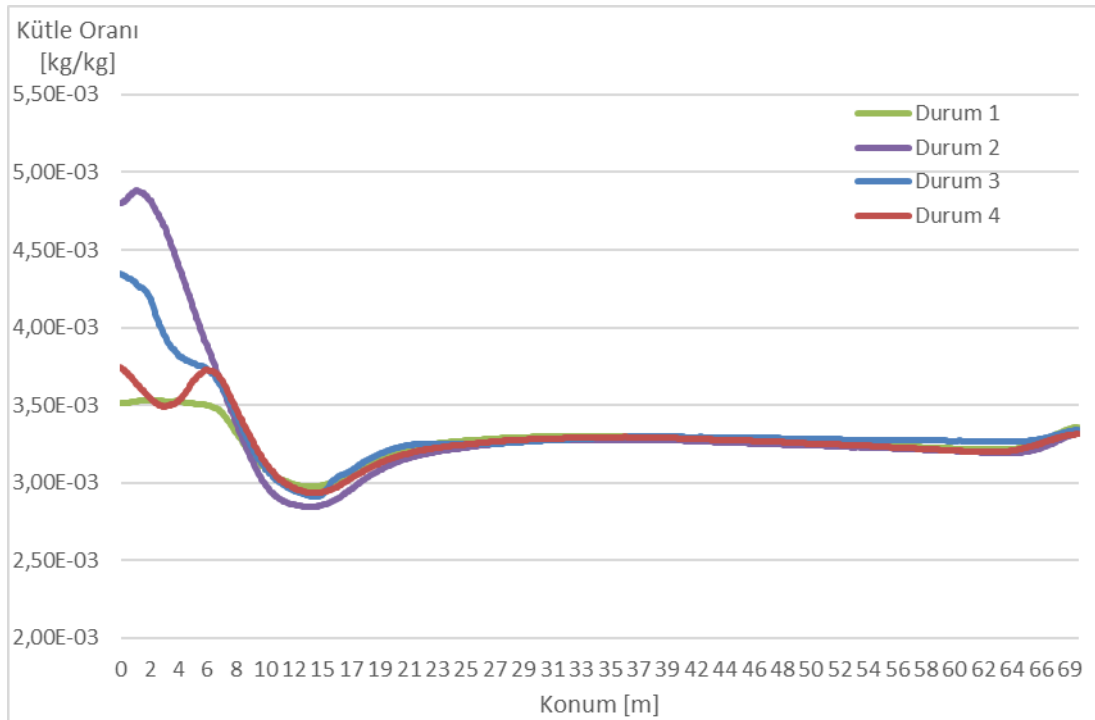
Şekil 5.29’de, N_2O emisyonunun yoğun olarak yakıcıların altındaki cüruf bölgesinde ve eksoz gazı çıkış bölgesinde biriktiği görülmektedir. Şekil 5.30’deki N_2O gradyeni ise

diazot monoksit gazının yoğun olarak alev bölgesi bitiminde ve alev bölgesi altında kalan cüruf bölgesinde oluştuğunu göstermektedir.

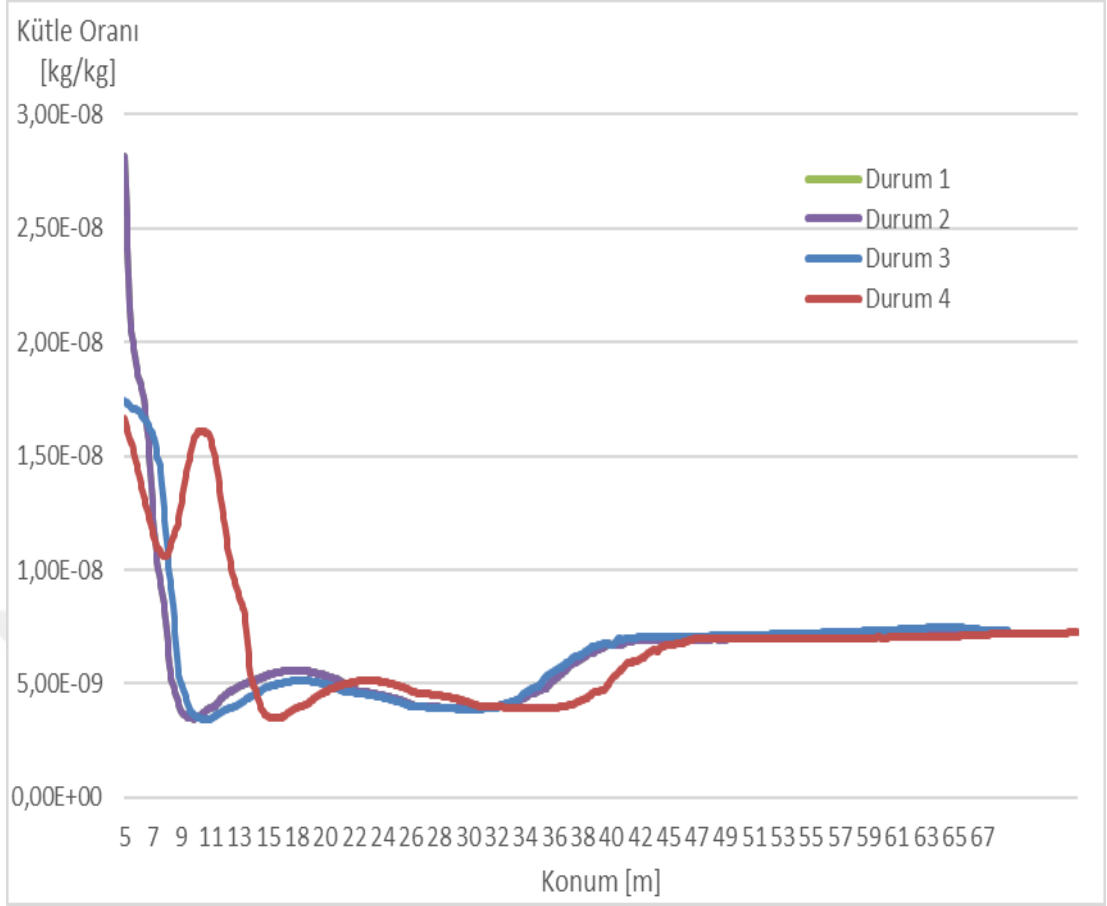
Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33’da sırasıyla HCN, NO ve N₂O gazlarının kütle oranlarının eksen çizgisi boyunca kazan yüksekliğine göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.31: HCN kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.



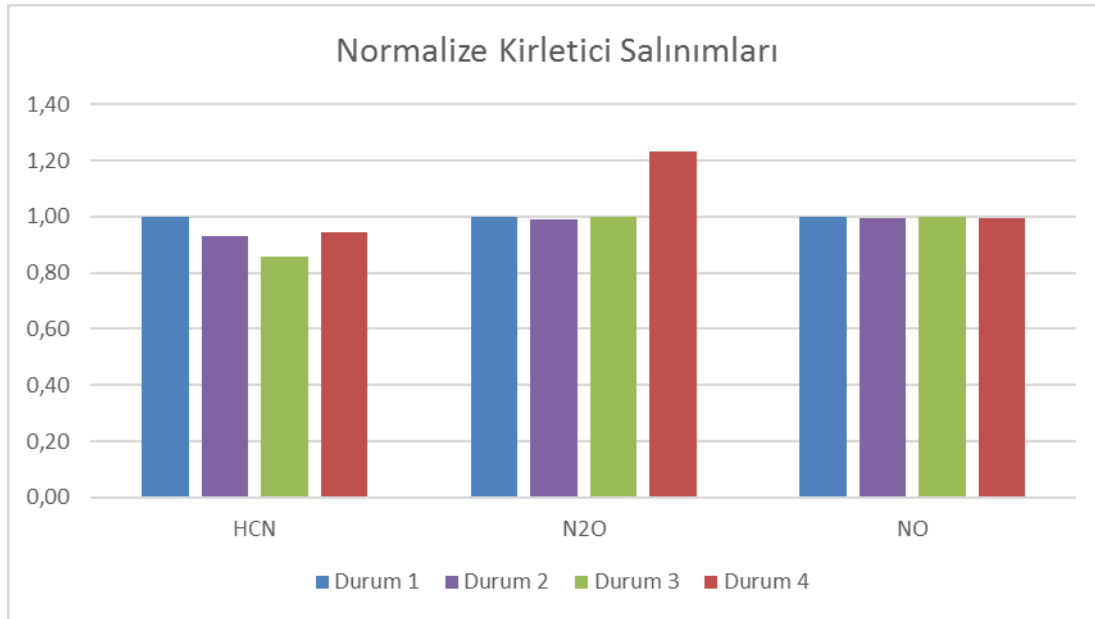
Şekil 5.32: NO kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.



Şekil 5.33: N₂O kütle oranının kazan yüksekliğine göre değişimi.

Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33 incelendiğinde yaklaşık olarak 20. metreye kadar durumlar arasında ayrışma olduğu ve 20. metreden emisyon değişimlerinin nitelik ve nicelik olarak benzer karakter gösterdiği tespit edilmiştir. Kazan içindeki sıcaklığın kazan yüksekliğine göre değişimi incelendiğinde (Şekil 5.12) 20. metre civarı en yüksek sıcaklığın olduğu yüksekliklerdir. Şekil 5.31’de verilen HCN kütle oranının yakıcıların aşağı baktığı durum olan Durum 2’de 20 metre yüksekliğine kadar daha düşük bir kütle derişimi bulunmakta kazan üst kısımlarında kütle derişimi diğer durumların aldığı değerlerle eşitlenmektedir. Şekil 5.32’deki NO değişimi incelendiğinde ise durum 2 kazan alt kısımlarında yüksek NO derişimine görülmektedir. Şekil 5.33’daki N₂O kütle oranının kazan alt bölgelerinde durumlara göre daha kararsız davrandığı, salınımların olduğu, kazanda üst kısmına gidildikçe ise daha kararlı derişimlerin olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.34’de farklı durumların HCN, NO ve N₂O gazları için kazan çıkış noktasındaki ortalama değerleri verilmiştir. Bu değerler daha rahat karşılaştırma yapılabilmek için standart durum olan durum 1’ göre normalize edilmiştir.



Şekil 5.34: Farklı durumların normalize edilmiş kirletici salınımları.

Şekil 5.34’de görüldüğü gibi HCN salınımı en yüksek Durum 1’de, en düşük ise Durum 3’de gerçekleşmiştir. Buna karşılık N₂O salınımı Durum 4’de en yüksek, Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 birbirine yakın değerler almıştır. NO salınımının da her 4 durum için eşdeğer seviyede gerçekleştiği görülebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada Kütahya ilinde yer alan Tunçbilek termik santralinin 5 numaralı kazanının yanma odası hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile incelenmiştir. Analiz programı olarak ANSYS firmasının 16.2 sürümlü Fluent yazılımı kullanılmıştır.

Analizlerde kazan yakıcılarının düşey ile yaptığı açısı ve kazan çıkışı alanı değiştirilmiştir. Standart durum ile birlikte toplam 4 farklı durum incelenmiştir. Yapılan değişikliklerle amaçlanan kömür taneciklerinin kazanda kalma süresinin ve düşey yöndeki hareketinin kazan sıcaklık dağılımına, gaz emisyonlara ve yanmamış karbon oranlarına etkisini incelemektir.

Hazırlanan standart durum modeli öncelikle test verileri ile karşılaştırılmıştır. Toplam 8 noktadan alınan sıcaklık değeri ve çıkış gazlarının ortalama sıcaklık değeri ile sayısal analiz sonuçları incelendiğinde tek noktada %34 oranında bir belirsizlik, diğer noktalarda ise en yüksek %12.3 belirsizlik görülmüştür. Yüksek belirsizlik oranı kazanın üst noktasında alınan veride gerçekleşmiştir. Bu hatanın kızdırıcı boruları modellemek yerine gözenekli ortam modeli kullanıldığı için gerçekleştiği şeklinde yorumlanmıştır. Doğrulama çalışması sonrasında parametrik çalışmalara gerçekleştirilmiştir.

Farklı durumlardaki sıcaklık dağılımları karşılaştırılmış ve en yüksek sıcaklığın 1500 K mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Yakıcıların aşağıya baktığı durum 3 modelinde sıcaklık yakıcıların altındaki noktalarda daha düşük olduğu ve daha yavaş en yüksek sıcaklığa yükseldiği görülmüştür. Bu duruma yakıt karışım oranları incelendiğinde durum 3 modelindeki yakıt birikmesinin neden olduğu görülmüştür.

Farklı durumlardaki akış çizgileri ve tanecik hareketleri incelendiğinde en alt sıra yakıcılarından püskürtülen hava ve yakıtının burgaç hareketinin merkezini oluşturduğu, orta sıranın merkeze bir miktar nüfuz edebildiği ama genel olarak merkezi burgacın etrafını doldurduğu buna karşılık en üst sıra yakıcılarının burgaca nüfuz edemediği görülmüştür.

Kömür taneciklerinin kazan içinde kalma süresi incelendiğinde büyük kesit alanına sahip olan durum 4'te en uzun kalma süresinin en küçük olduğu, ortalama sürenin ise yukarı bakan durum olan durum 2 ile benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Karbondioksit emisyon her dört durum içinde aynı mertebelerde gerçekleşmesine rağmen karbonmonoksit ve karbon emisyonları durum 4 için en yüksektir. Buna sebep olarak kömür taneciklerinin hacimde yeterince kalamayışı gösterilebilir.

Kirletici gazlar olan hidrojen siyanür, azot oksit ve diazot monoksit gazları incelendiğinde gaz emisyonları arasında dört durum için büyük farklılıklar görülmemiştir. Yapılan analizlerde her durum için gaz birikiminin daha çok cüruf bölgesinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Gerçek durumda cüruf bölgesinde biriken kül ve artıklar düzenli olarak temizlenmektedir. Sayısal analizde bu noktada birikimler gerçekleştiği için, kirletici salınımları bu bölgeden daha yüksek olmaktadır.

Her bir durumun değerlendirilmesi sonucu standart durum olan durum 1'in en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. Sıcaklık dağılımları faydalı bölgede benzer olmakla birlikte kirletici salınımları toplu bir şekilde incelendiği takdirde en iyi sonucu durum 1 vermiştir.

Gelecek çalışmalarda sadece hava gönderilen yakıcılar değiştirilerek hava ve hava, yakıt karışımının değişiklikleri ve etkileri incelenebilir. Her bir yakıcı sırasında gönderilen hava ve yakıt debileri değiştirilerek yakıt – hava karışımının nüfuz etme değerleri incelenebilir. Yakıcı açıları düşeyde sabitlenerek merkeze püskürtme açılarının girdaba etkileri ve kirletici sıcaklık dağılımına etkileri incelenmesi en iyi sonucun bulunmasına yardımcı olabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] url-1 <<http://www.teias.gov.tr/YukTevziRaporlari.aspx>> - erişim tarihi 31.03.2016
- [2] **Kumar, Manish, and Santi Gopal Sahu.** (2007) Study on the effect of the operating condition on a pulverized coal-fired furnace using computational fluid dynamics commercial code. *Energy & Fuels* 21.6: 3189-3193.
- [3] **Li, Jun, et al.** (2012) CFD approach for unburned carbon reduction in pulverized coal boilers" *Energy & Fuels* 26.2: 926-937.
- [4] **Al-Abbas, Audai Hussein, Jamal Naser, and David Dodds.** (2011) CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion of lignite in a 100KW furnace. *Fuel* 90.5: 1778-1795.
- [5] **Wall, Terry, et al.** (2009) An overview on oxyfuel coal combustion—state of the art research and technology development. *Chemical Engineering Research and Design* 87.8: 1003-1016.
- [6] **Nikolopoulos, Nikos, et al.** (2011) Numerical investigation of the oxy-fuel combustion in large scale boilers adopting the ECO-Scrub technology. *Fuel* 90.1: 198-214.
- [7] **Kim, Daehee, and Sangmin Choi.** (2015) Effect of typical modeling assumptions for pulverized coal char combustion commonly used in commercial CFD codes. *Journal of Mechanical Science and Technology* 29.11: 4951-4961.
- [8] **Williams, A., M. Pourkashanian, and J. M. Jones.** (2000) The combustion of coal and some other solid fuels. *Proceedings of the Combustion Institute* 28.2: 2141-2162.
- [9] **Karabulut, Yalçın.** (2004) Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi. *Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi* 3: 58.
- [10] **Mustafa Demir** (2014) E.Ü.A.Ş Tunçbilek Termik Santrali İşletme Müdürlüğü.. Dış Tesisler Mühendisi Eğitim Raporu,. Kütahya.
- [11] **Versteeg, Henk Kaarle, and Weeratunge Malalasekera.** (2007) *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.* Pearson Education,.
- [12] **Ansys, Inc.** (2015) *ANSYS FLUENT theory guide R16.2.* Canonsburg, Pennsylvania
- [13] **Ansys, Inc.** (2014) *Turbulence Modeling Using ANSYS Fluent.* Ansys, Inc.
- [14] **Ansys, Inc.** (2011) *Modeling Reacting Flows in Ansys CFD.* Ansys, Inc.
- [15] **Sarımsak, Bilgin Hüseyin.** (2010) Tunçbilek Termik Santrali işletmesi.

- [16] **Sarımsak, Bilgin Hüseyin.** (1995) Tunçbilek Termik Santrali işletmesi.
- [17] **Burke, S. P., and T. E. W. Schumann.** (1928) Diffusion flames. *Industrial & Engineering Chemistry* 20.10: 998-1004.
- [18] **Bilger, R. W.** (1976) The structure of diffusion flames. *Combustion Science and Technology* 13.1-6: 155-170.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Halit Tolga ERKEN
Doğum Tarihi ve Yeri : 04.04.1988 Kütahya
E-posta : halittolgaerken@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, TOBB ETU, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isı Akış Programı (Devam ediyor)