İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALİ'NİN 5. ÜNİTE KAZANINDAKİ ALEV OLUŞUMUNUN SAYISAL MODELLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Faruk ÖZDEMİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

AĞUSTOS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALİ'NİN 5. ÜNİTE KAZANINDAKİ ALEV OLUŞUMUNUN SAYISAL MODELLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Faruk ÖZDEMİR
(503121109)

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Y.Erhan BÖKE

AĞUSTOS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121109 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Faruk ÖZDEMİR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALİ'NİN 5. ÜNİTE KAZANINDAKİ ALEV OLUŞUMUNUN SAYISAL MODELLEMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. İ.Necmi KAPTAN** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ş.Özgür ATAYILMAZ .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **6 Ağustos 2014**
Savunma Tarihi : **13 Ağustos 2014**

Burhan YÖRÜK'e,

ÖNSÖZ

Büyük uğraşlar sonucu meydana getirdiğim çalışmanın, Türk linyiti kaynaklı termik santral kazanlarıyla ilgili yapılan birkaç çalışmadan biri olması nedeniyle ayrı bir sevinç yaşamaktayım. Çalışma boyunca, santral verilerinin elde edilmesinde ve bu verilere bağlı olarak analiz sonuçlarının tutarlı olmasında çeşitli sıkıntılar yaşadım. Özverili çalışma ve danışman hocamın tavsiyeleriyle bu zorlukların üstesinden gelebildim.

Çalışmam boyunca her türlü yardımı sağlayan, bilgisi ile çalışmama yön veren ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Yakup Erhan BÖKE'ye, TÜBİTAK projesi kapsamında beraber çalıştığımız ve çalışmamda bilgilerini esirgemeyen proje yürütücümüz Sayın Doç.Dr. Özer AYDIN'a, çalışmamın yapılabilmesi için gerekli olan bilgisayar olanağını sağlayan ve ilgisini esirgemeyen arkadaşım Sayın Ar.Gör. Burhan YÖRÜK'e, bu süreçte beni destekleyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ağustos 2014

Faruk ÖZDEMİR
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
SEMBOLLER ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 1
2. SANTRALİN TANITILMASI **5**
2.1 Tunçbilek Termik Santrali 5
2.2 Ünite Kazanı 6
2.2.1 Kazanın yapısı 6
2.2.2 Kazanın devreye alınması 7
3. GEOMETRİ VE AĞ YAPISININ OLUŞTURULMASI **9**
3.1 Kazan Geometrisinin Oluşturulması 9
3.2 Kazan Geometrisinde Ağ Yapısının Oluşturulması 12
4. SAYISAL MODELLEME **15**
4.1 Sınır Şartları 15
4.2 Kullanılan Modeller 16
4.3 Sayısal Çözüm Teorisi 17
4.3.1 Kütle korunum denklemi 18
4.3.2 Momentum korunum denklemleri 18
4.3.3 Sıkıştırılabilir akışlar 19
4.3.4 Standart k-ε türbülans modeli 20
4.3.5 Enerji denklemi 21
4.3.6 Işınımla ısı geçişi ve P1 ışınım modeli 22
4.3.7 Ön karışımsız yanma modeli 23
4.3.8 Ayrık faz modeli 25
4.4 Analiz Sonuçları 27
4.4.1 Alt brülör bölgesindeki dağılımlar ve kazandan çıkış süreleri 28
4.4.2 Orta brülör bölgesindeki dağılımlar ve kazandan çıkış süreleri 31
4.4.3 Üst brülör bölgesindeki dağılımlar ve kazandan çıkış süreleri 34
4.4.4 Ölçüm yapılan yüksekliklerdeki sıcaklık karşılaştırmaları 37
4.4.5 X-Z düzlemindeki sıcaklık dağılımları 38
4.4.6 Y-Z düzlemindeki sıcaklık ve CO_2 mol oranı dağılımları 39
4.4.7 Kazan çıkışındaki sıcaklık dağılımları ve karşılaştırmaları 41
5. SEYİTÖMER VE TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALLERİ'NİN KARŞILAŞTIRILMASI **45**
5.1 Seyitömer Termik Santrali'nin Teknik Özellikleri 45

5.2 Kazan Boyunca Sıcaklık ve CO_2 Mol Oranı Dağılımlarının Kıyaslanması 46
5.3 Kazan Çıkışında Hesaplanan Sıcaklık ve Mol Oranı Değerleri 48
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 49
KAYNAKLAR 51
ÖZGEÇMİŞ 53

KISALTMALAR

CFD **:** Computational Fluid Dynamics
PDF **:** Probability Density Function

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Ünitenin karakteristikleri..... 6
Çizelge 2.2 : Kazan karakteristikleri. 6
Çizelge 4.1 : Kullanılan kömürün çabuk analizinden elde edilen değerler. 16
Çizelge 4.2 : Kullanılan kömürün elementel analizinden elde edilen değerler. 17
Çizelge 4.3 : Kullanılan kömürün özellikleri. 17
Çizelge 4.4 : Ölçüm yapılan yüksekliklerdeki sıcaklık karşılaştırmaları. 37
Çizelge 4.5 : Çıkış yüzeyindeki sıcaklıkların karşılaştırılması..... 41
Çizelge 4.6 : Çıkış yüzeyindeki mol oranları. 43
Çizelge 5.1 : Seyitömer Termik Santrali'nde kullanılan kömürün çabuk analizi. 45
Çizelge 5.2 : Seyitömer Termik Santrali'nde kullanılan kömürün elementel analizi.45
Çizelge 5.3 : Her iki çalışma için kazan çıkışında hesaplanan mol oranı değerleri. . 48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Santralin yıllara göre brüt elektrik enerjisi üretimi. 5
Şekil 2.2 : Tunçbilek Termik Santrali 5. ünite. 7
Şekil 3.1 : Modellenen kazanın farklı açılardan görüntüsü. 9
Şekil 3.2 : Kazanda brülörlerin bulunduğu ocak bölgesi. 10
Şekil 3.3 : Brülörlerdeki kömür ve hava girişleri. 10
Şekil 3.4 : Kömür ve havanın püskürtülme açıları ve ocak ölçüleri. 11
Şekil 3.5 : Modellenen kazandaki ocak bölgesinin üstten görünüşü. 11
Şekil 3.6 : Ağ yapısı oluşturulan kazanın üç boyutlu görüntüsü. 12
Şekil 3.7 : Ağ yapısı oluşturulan kazanın ocak bölgesinin görüntüsü. 13
Şekil 3.8 : Ağ yapısı oluşturulan brülörün görüntüsü. 13
Şekil 4.1 : PDF yaklaşımının grafiksel tanımı. 24
Şekil 4.2 : Karşılaştırmaların yapıldığı düzlemler. 27
Şekil 4.3 : Ölçümlerin yapıldığı noktalar. 28
Şekil 4.4 : Durum 1 için alt brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı. 28
Şekil 4.5 : Durum 2 için alt brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı. 29
Şekil 4.6 : Durum 1 için alt brülör bölgesindeki hız dağılımı. 29
Şekil 4.7 : Durum 2 için alt brülör bölgesindeki hız dağılımı. 30
Şekil 4.8 : Durum 1'de alt brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi. 30
Şekil 4.9 : Durum 2'de alt brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi. 31
Şekil 4.10 : Durum 1 için orta brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı. 31
Şekil 4.11 : Durum 2 için orta brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı. 32
Şekil 4.12 : Durum 1 için orta brülör bölgesindeki hız dağılımı. 32
Şekil 4.13 : Durum 2 için orta brülör bölgesindeki hız dağılımı. 33
Şekil 4.14 : Durum 1'de orta brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi. 33
Şekil 4.15 : Durum 2'de orta brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi. 34
Şekil 4.16 : Durum 1 için üst brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı. 34
Şekil 4.17 : Durum 2 için üst brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı. 35
Şekil 4.18 : Durum 1 için üst brülör bölgesindeki hız dağılımı. 35
Şekil 4.19 : Durum 2 için üst brülör bölgesindeki hız dağılımı. 36
Şekil 4.20 : Durum 1'de üst brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi. 36
Şekil 4.21 : Durum 2'de üst brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi. 37
Şekil 4.22 : X-Z düzleminde Durum 1'deki sıcaklık dağılımı. 38
Şekil 4.23 : X-Z düzleminde Durum 2'deki sıcaklık dağılımı. 39
Şekil 4.24 : Y-Z düzleminde Durum 1'deki sıcaklık dağılımı. 39
Şekil 4.25 : Y-Z düzleminde Durum 2'deki sıcaklık dağılımı. 40

Şekil 4.26 : Y-Z düzleminde Durum 1'deki CO_2 mol oranı dağılımı. 40
Şekil 4.27 : Y-Z düzleminde Durum 2'deki CO_2 mol oranı dağılımı. 41
Şekil 4.28 : Durum 1 için çıkış yüzeyindeki sıcaklık dağılımı. 42
Şekil 4.29 : Durum 2 için çıkış yüzeyindeki sıcaklık dağılımı. 42
Şekil 5.1 : Seyitömer Termik Santrali koşullarında kazandaki sıcaklık dağılımı. 46
Şekil 5.2 : Tunçbilek Termik Santrali koşullarında kazandaki sıcaklık dağılımı. 47
Şekil 5.3 : Seyitömer Termik Santrali koşullarında kazandaki CO_2 mol oranı dağılımı. 47
Şekil 5.4 : Tunçbilek Termik Santrali koşullarında kazandaki CO_2 mol oranı dağılımı. 48

SEMBOLLER

ρ : Akışkanın yoğunluğu
v : Akışkanın hızı
S_m : Kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimi
v_x : Eksenel hız
v_r : Radyal hız
p : Statik basınç
τ : Gerilme tensörü
ρg : Yerçekimi kuvveti
F : Dış kuvvetler
μ : Moleküler viskozite
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 : Türbülans kinetik enerjisi
ε : Disipasyon oranı
G_k : Hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi
G_b : Kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini
σ_k : Türbülans kinetik enerjisi için Prandtl sayısı
σ_ε : Disipasyon oranı için Prandtl sayısı
S_k : Kullanıcı tarafından tanımlanan k üretim terimi
S_ε : Kullanıcı tarafından tanımlanan ε üretim terimi
H : Toplam entalpi
Y_j : J maddesinin kütle fraksiyonu
$T_{ref,j}$: J maddesinin referans sıcaklığı
$h^0_j(T_{ref,j})$: J maddesinin referans sıcaklığındaki oluşum entalpisi
r : Pozisyon vektörü
s' : Saçılma yön vektörü
s : Yol uzunluğu
a : Absorpsiyon katsayısı
n : Yansıtma indeksi
σ_s : Saçılma katsayısı
σ : Stefan-Boltzmann sabiti
T : Yersel sıcaklık
Φ : Faz fonksiyonu
Ω' : Katı açısı
G : Anlık radyasyon
C : Lineer-anizotropik faz fonksiyonu katsayısı
S_G : Kullanıcı tarafından tanımlanan ışınım kaynağı

f : Karışım fraksiyonu
Z_i : İ elementinin elementsel kütle fraksiyonu
f'^2 : Karışım fraksiyon varyansı
$p(f)$: Olasılık yoğunluk fonksiyonu
F_D : Birim partikül kütlesi için sürükleme kuvveti
U : Akışkan faz hızı
u_p : Partikül hızı
ρ_p : Partikül yoğunluğu
d_p : Partikül çapı
Re : Bağıl Reynolds sayısı
u : Dalgalanan gaz akış hızı

TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALİ'NİN 5.ÜNİTE KAZANINDAKİ ALEV OLUŞUMUNUN SAYISAL MODELLEMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, Tunçbilek Termik Santrali'nin 5. ünitesinde pülverize kömür yakan 150 MW ısıl kapasiteye sahip bir kazanın sayısal modellemesi yapılmıştır. Kazan 69 m uzunluktadır ve 12 m x 12 m kesit ölçülerine sahiptir. Kazanda dört adet köşelerde, iki adet de kenarlarda olmak üzere toplam altı adet brülör grubu bulunmaktadır. Her grupta ise alt, orta ve üst bölgede olmak üzere üçer adet brülör bulunmaktadır.

Kazan geometrisi CATIA yazılımı kullanılarak kazanın ölçülerine göre oluşturulmuştur. Daha sonra GAMBIT yazılımı kullanılarak mevcut geometride ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısında 4,2 milyon hücre kullanılmıştır.

Sayısal model hazırlanırken iki farklı durum göz önüne alınmıştır. Bu durumlar arasındaki farklılık toplam hava ve yakıt miktarlarının brülörlere dağılma oranlarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Dağılma oranlarının santral verilerine göre hazırlandığı model Durum 1, varsayıma dayalı olarak hazırlandığı model Durum 2 olarak adlandırılmıştır.

Kazanın sayısal modellemesi ANSYS yazılımı içindeki FLUENT modülü kullanılarak yapılmıştır. Kazan gerçek çalışma koşullarına uygun şekilde modellenmiştir. Oluşturulan modelde sınır şartları olarak kazan üzerinden ölçülen sıcaklık değerleri ve santral verilerinden elde edilen hava ve kömür debileri kullanılmıştır. Kazanın üst bölgesindeki borular karmaşık geometriye sahip olduğundan bunlara geometride yer verilmemiş, bunların neden olacağı basınç kayıpları bu bölgenin gözenekli ortam olarak tanımlanmasıyla hesaba katılmıştır. Modeldeki denklemler zamandan bağımsız olarak çözdürülmüştür. Modelde türbülans modeli olarak standart k-ε türbülans modeli, yanma modeli olarak ön karışımsız yanma modeli ve ışınım modeli olarak P1 ışınım modeli kullanılmıştır. Ön karışımsız yanma modelindeki PDF modülü sayesinde santralde kullanılan kömürün içeriği tanımlanmıştır. Ayrık faz modeli kullanılarak gaz fazındaki türbülansın katı parçacıkların yörüngelerine olan etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Kömür giriş yüzeylerinde enjeksiyon yüzeyleri oluşturulmuş, deneysel verilerden elde edilen kömür çapları tanımlanarak kazan içerisine kömür püskürtülmüştür.

Beşinci bölümde ise Tunçbilek Termik Santrali'ndeki çalışma koşulları daha önce Seyitömer Termik Santrali ile yapılan çalışmadaki aynı ısıl kapasiteye sahip kazana uygulanarak sonuçlar kıyaslanmıştır.

Tunçbilek Termik Santrali için hazırlanan modellerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde her iki modelin de kendi içinde tutarlı olduğu görülmektedir. Her iki durumda da kazan içindeki en yüksek sıcaklık olarak isimlendirilen alev bölgesi istenen şekilde kazanın merkezinde oluşmaktadır. Kesitlerdeki sıcaklık ve hız dağılımları beklendiği şekilde olmuştur.

Bu çalışmada kazanın 3. grubuna ait brülörler kapatılarak modelleme yapılmıştır. Sonuçların karşılaştırılmasında kullanılan deneysel veriler ise uzun zaman aralığında çeşitli brülörlerin kapalı kalmasıyla elde edilmiş ortalama sıcaklık değerleridir. Bundan dolayı modelin çalışma şartlarına uygunluğu ile ilgili kesin bir değerlendirme yapılması söz konusu olmayıp ele alınan durumların kazan içerisindeki sıcaklık mertebelerine yakınlıkları karşılaştırılmıştır.

NUMERICAL MODELING OF FLAME FORMATION IN THE 5TH UNIT BOILER OF TUNÇBİLEK THERMAL POWER PLANT

SUMMARY

In this study, numerical modeling of the pulverized coal-fired boiler which has 150 MW thermal capacity in the 5th unit of Tunçbilek Thermal Power Plant was performed. There are six burner groups in the boiler. Two of them are on the side and the rest are at the corners. In each group, there are three burner regions which are the lower, middle and upper regions.

Based on the dimensions of the boiler, geometry was generated by using CATIA. The boiler is approximately 69 m length, 12 m width and 12 m depth.

Mesh was generated by using GAMBIT. At critical regions like air and coal inlets and boiler outlet, more mesh elements were used. In mesh generation, 4,2 million cells were used.

When preparing numerical models, two different cases were taken into account. The difference between these cases were caused by differences in distribution of mass rate of total air and total coal to the burners. In Case 1 which was prepared based on the operating conditions of the power plant; the amounts of air which were sent to the upper, middle and lower burners are 43%, 43% and 14% of the total air respectively. The amounts of coal which were sent to the upper, middle and lower burners are 43%, 35% and 22% of the total coal respectively. In Case 2 which was prepared based on assumptions, total air and coal were distributed equally to each burner.

In experimental studies, measurement of the combustion and heat transfer characteristics are expensive. Experimental studies require long time, skill and they have geometric limitations. CFD codes provide to test these characteristics in much shorter time at lower costs and they haven't geometric limitations. They enable to analyse a system which involves combustion, heat transfer, turbulence and chemical reactions. Therefore, in recent years CFD codes became popular to predict the performance of boilers in both scientific and industrial studies. In furnace studies, they are generally used to optimize combustion performance and reduce pollutant emissions. Therefore, numerical modeling of the boiler was performed by using Computational Fluid Dynamics codes. In this study FLUENT was used as CFD codes.

Numerical model was generated based on actual operating conditions. At air inlets, mass flow inlet was used as boundary condition. At these regions, mass flow rate and temperature of the air was defined. Some of the air was sent into the boiler from coal inlets. Thus, better dissemination of the coal particles was provided in the boiler. At coal inlets, coal particles were sent into the boiler by defining these regions as injection surfaces. Defining these regions as injection surfaces provides to define size distribution of the coal particles. Using Rosin Rammler method, minimum and maximum diameters of the coal particles were defined. At the coal inlets, mass flow rate and temperature of the coal was defined. At the outlet of the boiler, pressure outlet was defined as boundary condition.

Pipes which are at the upper side of the boiler have very complex geometry. Therefore, these pipes weren't included in the geometry, but pressure losses caused by these pipes were taken into account by defining this region as a porous medium.

Calculations were performed based on steady state. In similar studies k-ε models were used as turbulence model. There are three kinds of k-ε models which are Standard k-ε, Renormalization-group (RNG) k-ε and Realizable k-ε. The differences of these methods are due to the method of calculating turbulent viscosity, the turbulent Prandtl numbers governing the turbulent diffusion of k and ε and the generation and destruction terms in the ε equation. In this study, Standard k-ε was used as turbulence model. Because this model requires shorter time and provides reasonable accuracy for a wide range of turbulent flows.

Wherefore air and coal enters to the boiler separately, Non-premixed Combustion Model was used as combustion model. In Non-premixed Combustion Model, content of the coal was defined using PDF approach.

There are five kinds of radiation models which are Discrete Transfer Radiation Model (DTRM), P-1, Rosseland, Surface-to-Surface (S2S) and Discrete Ordinates (DO). In this study, P-1 was used. Because; it provides reasonable accuracy in shorter time and requires little CPU demand.

To predict the trajectories of individual coal particles, Discrete Phase Model was used. This model is used to predict the effects of turbulence in gas phase on the dispersion of particles.

In our previous study, we had prepared a numerical model which was based on operating conditions for Seyitömer Power Plant. In the fifth section, operating conditions of Tunçbilek Power Plant were applied to the Seyitömer Power Plant' s boiler which has the same thermal capacity and the results obtained from both studies were compared. According to the obtained results, flame region occurs at higher region for operating conditions of Tunçbilek Power Plant compared to operating conditions of Seyitömer Power Plant. It is understood that differences between coal contents and particle diameters cause this situation.

When the results obtained from prepared models for Tunçbilek Power Plant are considered, it is seen that both cases are self-consistent. In both cases the maximum temperature in the boiler known as the flame zone occurs in the center of the boiler as desired. In both cases, swirling combustion occurs at the center of the furnace. Temperature and velocity distributions in the cross-sections occur as expected.

When the distribution of carbon dioxide is considered, it is seen that towards the center of the boiler from the burner surface carbon dioxide concentration increases.

While the coal particles sprayed from the bottom burners move upward and downward, coal particles sprayed from the middle and top burners move upward.

When coal particles enter the furnace, mass transfer from the coal particles starts immediately and reaches maximum rate at the center of the furnace. It is seen that air and fuel mixing is intense near the burners and due to intimate mixing of fuel and air and chemical reactions from this point towards the center of the furnace, concentrations of gas components also change rapidly.

Experimental data were obtained 45 cm away from the surfaces where any burner does not take place.

In this study, when the numerical model was prepared, only the burners belonging to the third group of the boiler were closed. Experimental data used for the comparison of the results were mean temperature values obtained by closing various burner groups in long time period. Therefore, it is not possible to decide if these results are suitable for the operating conditions of the power plant. On the other hand, it is possible to decide if obtained values close to the temperature levels in the boiler.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı

Bir ülkenin ekonomik ve endüstriyel gelişimindeki temel girdi enerjidir. Bu alanlarda kalkınmanın gerçekleşebilmesi için enerjinin yeteri kadar sağlanabilmesi gereklidir. Türkiye endüstriyel, ekonomik ve nüfus olarak büyümekte olan bir ülkedir. Endüstrideki gelişme ve nüfustaki artışa paralel olarak elektrik enerjisi gereksinimi de sürekli artmaktadır.

Ülkemizde elektrik üretiminde büyük ölçüde fosil yakıtlar ve hidrolik kaynaklardan yararlanılmaktadır. Tunçbilek Termik Santrali ülke kaynaklarından çıkarılan linyitin değerlendirilerek elektrik enerjisi gereksiniminin karşılanması amacıyla kurulmuştur.

Günümüzde deneysel çalışmaların pahalı ve zor olması, uzun zaman gerektirmesi, kısıtlı geometrilere imkân vermesi, yanma proseslerinin kontrol edilmesinde ve görüntülenmesinde zorluklar yaşanması nedeniyle yüksek performanslı bilgisayarlar kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics - CFD) yazılımlarından yararlanılmaktadır. Gerek bilimsel çalışmalarda, gerekse endüstriyel çalışmalarda kazan performanslarının incelenmesinde bu yazılımların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

Bu çalışmada, söz konusu yazılımlar kullanılarak kazandaki alev oluşumunun sayısal olarak modellenmesiyle kömür ile kazan arasındaki uyumun incelenmesi amaçlanmaktadır. Sıcaklık ölçüm cihazları kullanılarak kazanın içerisindeki belirli noktalarından sıcaklık ölçümleri yapılmış, bu değerler ile sayısal modelden elde edilen sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Türkçe ve yabancı literatürde Türk kömürleri için termik santral kazanı modelleme çalışması bulunamamıştır. Literatür araştırmasında bulunan benzer çalışmaların incelenmesiyle aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir.

Xu ve diğ. pülverize kömür yakan 350 MW'lık bir kazanın %100, 95, 85, 70, 50 ve 25 yükleme durumları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanarak sayısal modellemesini yapmışlardır. Tam yük hariç yükleme arttıkça tanımlanan özelliklerdeki değişimlerin tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Tam yükteki durumun ise %70 ve %100 arasındaki yüklemelerdeki giriş parametrelerinin lineer ölçeklendirilmesinden kaynaklanabileceği söylenmiştir. Ayrıca hava debisindeki artışın kazan çıkış sıcaklığını azalttığı ve NOx emisyonlarındaki etkisinin ise az olduğu gözlemlenmiştir [1].

Le Bris ve diğ. pülverize kömür yakan bir kazanı modellemiş ve sonuçları deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada kazanın üst kısmındaki ısı değiştiricilerin geometrilerinin oluşturulması zor olduğundan bu bölgeye geometride yer verilmemiş fakat bunların neden olduğu basınç kayıpları buradaki akış hacminin gözenekli ortam olarak tanımlanmasıyla hesaba katılmıştır [2].

Holkar ve diğ. farklı ışınım modelleri kullanarak pülverize kömür yakan bir kazanı modellemişler ve sonuçları deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada P1, Discrete Transfer ve Discrete Ordinates ışınım modelleri kullanılmıştır. Sayısal modelden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırıldığında tüm modellerin yakın sonuçlar verdiği fakat Discrete Transfer ve Discrete Ordinates modellerinin kullanıldığı durumlarda bu sonuçların daha da yakın olduğu görülmüştür [3].

Weber ve diğ. hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanarak pülverize kömür yakan bir kazanı modellemişler ve kül partiküllerinin davranışını incelemişlerdir. Tortunun biriktiği yüzeyde kül paçacıklarının boyut dağılımının güvenilemez olduğunu fakat gelişmiş yakıt tanımlamaları ile bunun önüne geçilebileceğini söylemişlerdir [4].

Eastwick ve diğ. pülverize kömür kazanının modellenmesinde FLUENT ve CFX yazılımlarının performanslarını kıyaslamışlardır. İki modelden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırıldığında iki yazılımın da iyi sonuçlar verdiği fakat FLUENT yazılımının performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [5].

Vuthaluru ve diğ. FLUENT yazılımındaki erozyon modellerini kullanarak kömür kazanındaki erozyon aşınmasını modellemişlerdir. Akış alanındaki parçacıkların hızlarının ve yörüngelerinin, yayınlanmış verilerle ve santraldeki gözlemlemelerle uyumlu olduğu görülmüştür [6].

Modlinski, kömür yakan bir kazanda üç boyutlu olarak modelleyerek geleneksel yakıcıların yerine kullanılan jet yakıcıların akışa, yanma performansına ve ısı geçişine etkisini incelemiştir. Modelden elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Jet yakıcının uzun menzili sayesinde ikincil veya üçüncül akış olmadan bile kararlı bir alevin oluştuğu ve bu türlü alevin kazan duvarlarındaki korozyon riskini ve cürufu azalttığı gözlemlendi [7].

Purimetla ve Cui kömür kazanının sayısal modellemesini yaparak değişik kütlesel debilerdeki ve yakıcı pozisyonlarındaki durumları inceleyip elde edilen sonuçları 1/8 ölçeğinde hazırlanmış deneysel modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [8].

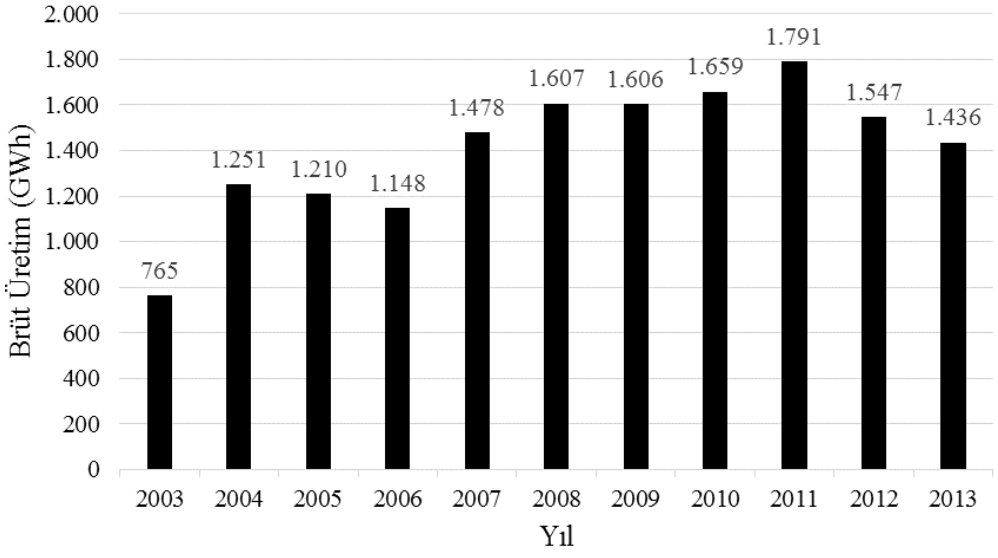
2. SANTRALİN TANITILMASI

2.1 Tunçbilek Termik Santrali

Tunçbilek Termik Santrali, Kütahya'nın Tavşanlı ilçesi sınırlarında linyit kömürü havzası olan Tunçbilek yöresinde bulunmaktadır. Beş üniteden oluşan santral 204924 m^2 alan üzerine kurulmuştur.

Santral ilk olarak iki ünite şeklinde planlanmış olup 17 Eylül 1954'te inşaatına başlanmıştır. 32 MW'lık iki üniteden oluşan santral 15 Nisan 1956'da faaliyete girmiştir. Daha sonra santrale 65 MW'lık üçüncü bir ünite eklenmesine karar verilmiştir. İnşaatına 21 Mayıs 1963'te başlanan üçüncü ünite 18 Ağustos 1965'te faaliyete girmiştir. Keban Hidrolik Santrali'nin işletmeye girmesinin gecikmesi nedeniyle meydana gelebilecek enerji açığını kapatmak maksadıyla üç üniteden müteşekkil toplam 129 MW'lık Tunçbilek Termik Santrali'ne 150 MW'lık bir ünite ilave edilmesine karar verilmiştir. Kurulan 150 MW'lık yeni ünite, Tunçbilek bölgesindeki Demirbilek ve Beye ocaklarından sağlanan linyit ile çalışmaktadır. 32 MW'lık birinci ve ikinci ünitelerde faaliyet durmuş olup, 65 MW'lık üçüncü ünite ve 150 MW'lık dördüncü ve beşinci üniteler faaliyetini sürdürmektedir

Şekil 2.1'de santralin yıllara göre brüt elektrik enerjisi üretimi görülmektedir.



Şekil 2.1 : Santralin yıllara göre brüt elektrik enerjisi üretimi [9].

Santralin kurulu gücü 365 MW olup yıllık yakıt ihtiyacı 2920000 ton'dur. Santralin üçüncü ünitesinde alt ısıl değeri 3500 kcal/kg, dördüncü ve beşinci ünitelerinde alt ısıl değeri 2350 kcal/kg olan yakıt kullanılmaktadır [9].

2.2 Ünite Kazanı

2.2.1 Kazanın yapısı

Sızdırmaz kaynak edilmiş membran duvarlara sahip, tek çekişli, tabii su sirkülasyonlu OB-500 tipi kazan taşıyıcı ızgara konstrüksiyonuna asılarak yerleştirilmiştir. 82 m kotunda bulunan taşıyıcı ızgara konstrüksiyonu, kazanı çevreleyen 4 adet kolonla desteklenmiştir. Kazan domu 75 m kotundadır. Kazanın alt kısmından 37 m kotuna kadar köşelerine 3 ayrı seviyede yerleştirilmiş 12 adet brülörle püskürtülen kömürün yakıldığı kare kesitli yanma odası bulunmaktadır. Yanma işleminde üretilen ısı, sirküle eden akışkana (su veya buhara) kazan ısıtıcı yüzeylerinden radyasyon ve konveksiyon yoluyla iletilir. Yanma odası üzerinde 70,6 m kotuna kadar içinde diğer kazan ısıtıcı yüzeylerinin bulunduğu kazan konveksiyon yolu bulunmaktadır [9].

Ünitenin ve kazanın karakteristikleri sırasıyla Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Ünitenin karakteristikleri [9].

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

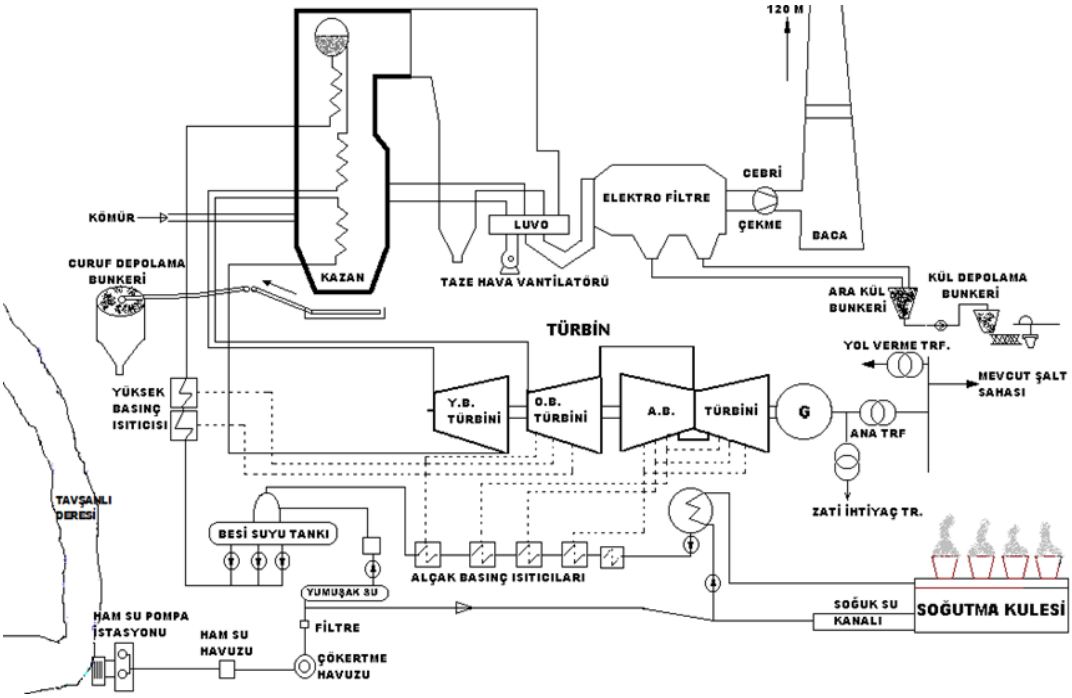
Çizelge 2.2 : Kazan karakteristikleri [9].

Kazan Tipi	Domlu tabii sirkülasyonlu, tekrar kızdırıcılı, radyasyon ve konveksiyon ısı iletimli, cebri çekişli direkt yakma sistemli
Ana Buhar Sıcaklığı	540 ^{0}C
Ana Buhar Çıkış Basıncı	139 kg/cm^2
Tekrar Kızdırıcı Buhar Sıcaklığı	540 ^{0}C
Tekrar Kızdırıcı Buhar Basıncı	40.2 kg/cm^2
Nominal Debi	480 t/h
Besleme Suyu Eko Giriş Sıcaklığı	250 ^{0}C
Besleme Suyu Eko Giriş Basıncı	163 kg/cm^2

2.2.2 Kazanın devreye alınması

Kazan ilk devreye alındığında ilk önce besi suyu tankından ekonomizere su basılır ve sırasıyla ekonomizerden sonra dom, dom düşüş boruları, kazan altı kollektörleri ve ekran boruları su ile dolar. Su ile dolan ekranlardan sonra su doma geçer ve burada su seviyesi ölçülür. %50 su seviyesi görüldüğünde kazan ateşlenir. Kazan ateşlenmesi ilk önce mazotla yapılır. Belli bir sıcaklık değerine geldikten sonra fuel oil ile ateşlemeye devam edilir. Sıcaklığı arttırdıktan sonra ise teker teker değirmenler devreye alınarak yanma işlemine kömürle devam edilir.

Şekil 2.2'de 5.ünite elemanlarının yerleşim planı verilmiştir.



Şekil 2.2 : Tunçbilek Termik Santrali 5. ünite [9].

Yanma odasında meydana gelen yanma sonucu sıcaklığın yükselmesiyle beraber ekran borularında buharlaşan su ekranları doldurarak yükselmeye başlar. Ekranlardaki buhar yükselerek doma girer. Domda sıvı buhar dengesinin ardından buhar 1. kızdırıcı giriş kollektörüne gelir. Buradan askı borularıyla 1. kızdırıcıya geçer.

1. kızdırıcıda sıcaklığı artırılan buhar 2. kızdırıcıya gelir. (Her bir kızdırıcı geçişlerinde borular bir önceki kızdırıcının çıkış kollektöründe birleşir ve bir sonraki kızdırıcının giriş kollektörüne bağlanarak bir sonraki kızdırıcının boru demetine dağıtılır.)

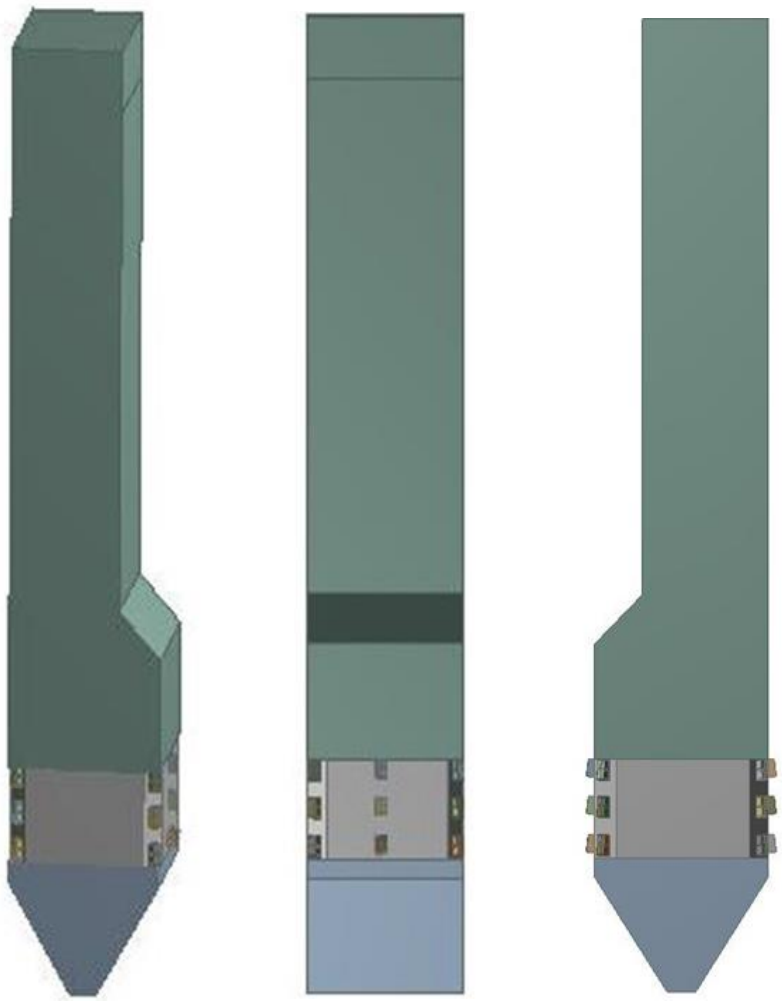
2. kızdırıcıda kızdırılan buhar sırayla 3. kızdırıcı, 4. kızdırıcı ve ardından 5. kızdırıcıya gelir ve RA hattı üzerinden yüksek basınç türbinine gelir. Burada iş gören buhar

yüksek basınç türbininden çıkarak RC hattı üzerinden kazan içindeki tekrar kızdırıcı1ara gelir. İlk önce tekrar kızdırıcı 1'e gelir. Tekrar kızdırıcı 2'ye geçerken çapraz bir şekilde püskürtme yapılır ve buharlar karıştırılır. Buradaki amaç ısıl dengeye ulaşmaktır. Çünkü sıcaklığın bir miktar azaltılması gerekir aksi halde orta basınç türbinine giren buhar sıcaklığı sistemde gerekli olan sıcaklığın çok üzerine çıkar ve bu da istenmeyen bir durumdur. Tekrar kızdırıcı 2'den çıkan buhar RB hattı üzerinden orta basınç türbinine gelir ve burada iş gördükten sonra kazana geri dönmeksizin SA hattından alçak basınç türbinine geçer ve jeneratörü devreye sokarak elektrik üretir [9].

3. GEOMETRİ VE AĞ YAPISININ OLUŞTURULMASI

3.1 Kazan Geometrisinin Oluşturulması

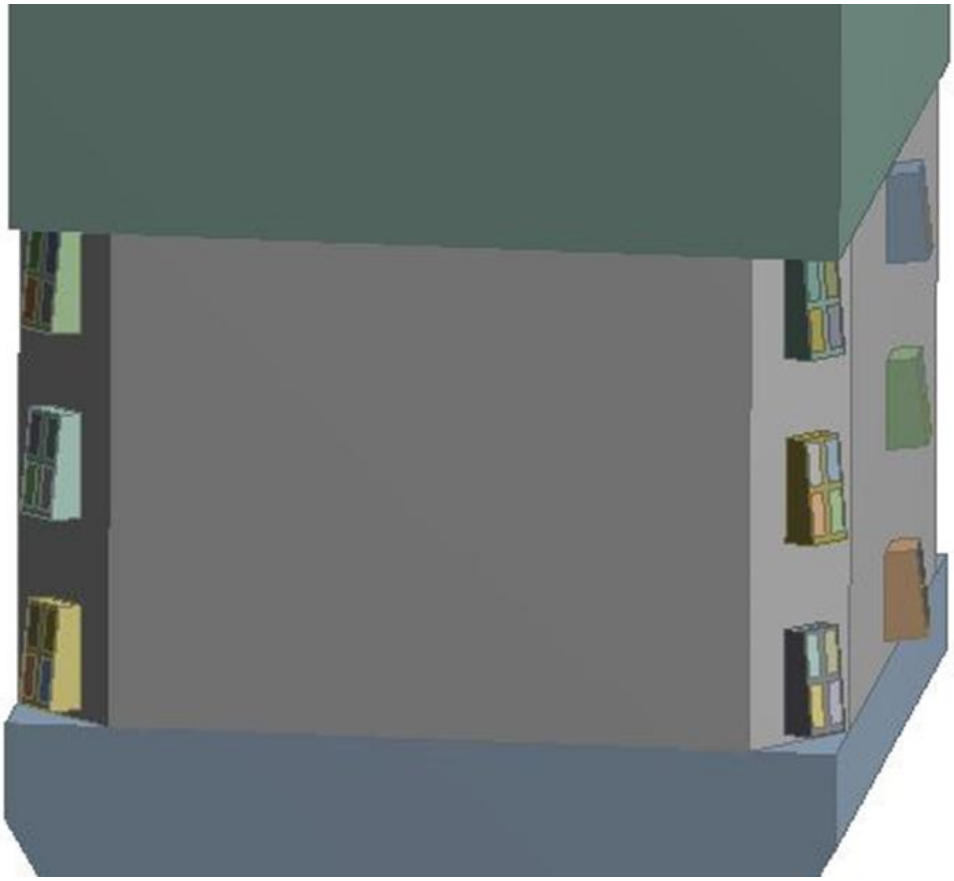
Santralin 5. ünitesinde kullanılan 150 MW kurulu güce sahip kazanın geometrisi kazanın gerçek ölçülerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Kazanın modellemesinde cüruf bölgesinden kazan çıkışına kadar olan bölge ele alınmıştır. Geometrinin oluşturulmasında CATIA yazılımından yararlanılmıştır. Oluşturulan geometriye ait farklı görünüşler Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



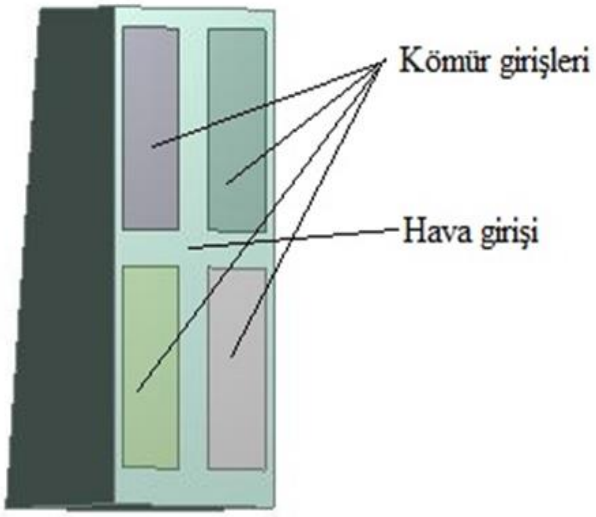
Şekil 3.1 : Modellenen kazanın farklı açılardan görüntüsü.

Kazan geometrisinde görüldüğü gibi kazandaki brülörler karşılıklı yüzeylerde konumlandırılmıştır.

Kazandaki ocak bölgesi ve hava ile kömür giriş yüzeyleri sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Kazanda 16,6 m yükseklikte bulunan brülörler alt grup, 19,2 m yükseklikte bulunanlar orta grup, 21,9 m yükseklikte bulunanlar ise üst grup olarak adlandırılmaktadır.

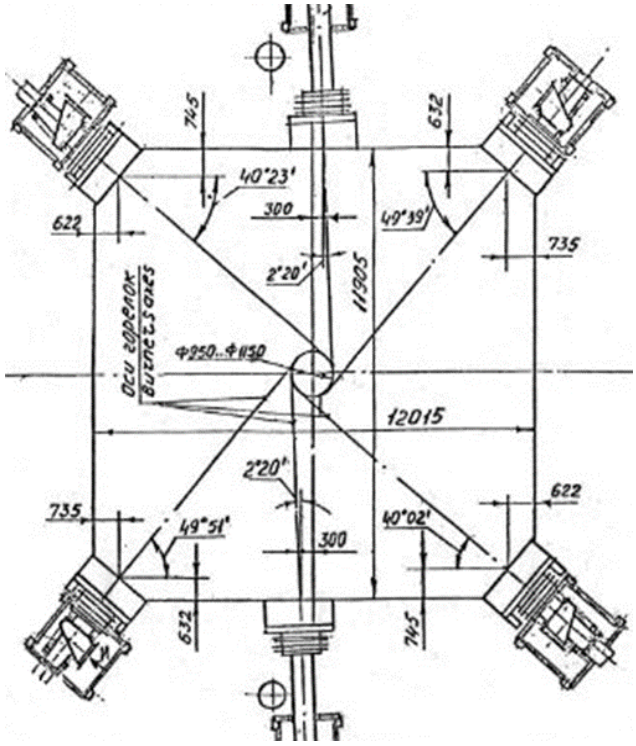


Şekil 3.2 : Kazanda brülörlerin bulunduğu ocak bölgesi.



Şekil 3.3 : Brülörlerdeki kömür ve hava girişleri.

Ocak bölgesindeki brülörler kazana farklı açılarla bağlanarak kazan merkezinde teğetsel yanmanın oluşması sağlanmıştır. Ocak bölgesine ait ölçüler ve oluşturulan geometri sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Kömür ve havanın püskürtülme açıları ve ocak ölçüleri [9].



Şekil 3.5 : Modellenen kazandaki ocak bölgesinin üstten görünüşü.

Kazanın üst bölgesindeki kızdırıcı borular karmaşık bir geometriye sahip olduğundan bunların modellenmesi zordur. Bundan dolayı oluşturulan modele bu geometriler dâhil edilmemiştir.

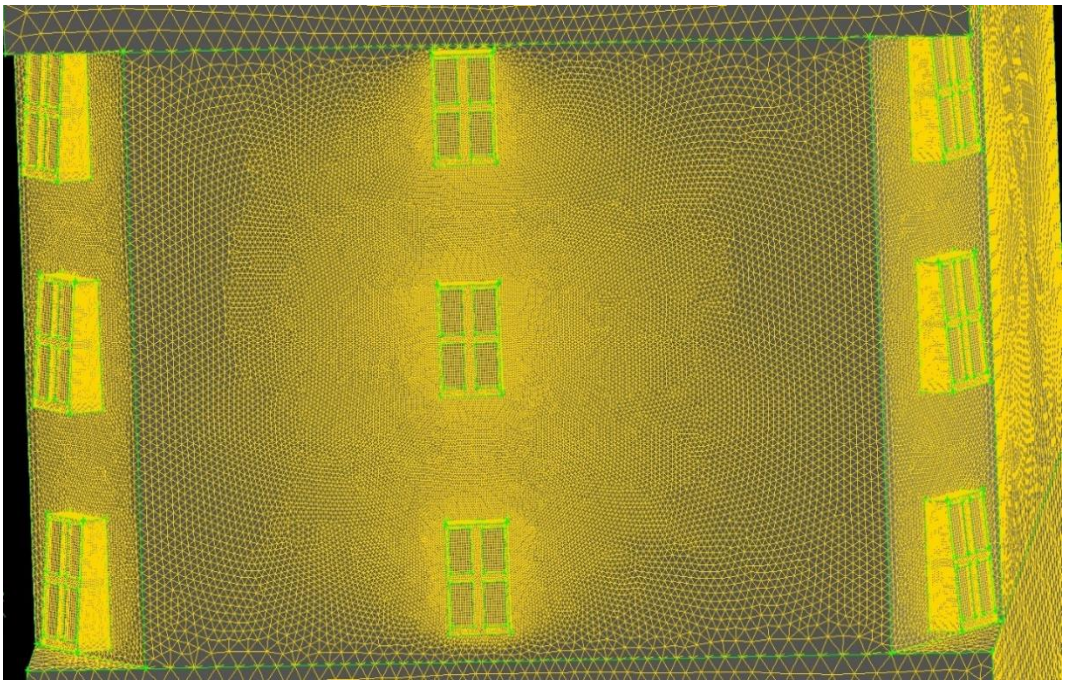
3.2 Kazan Geometrisinde Ağ Yapısının Oluşturulması

Kazan geometrisinin ağ yapısının oluşturulmasında GAMBIT yazılımından yararlanılmıştır. Şekil 3.6'da ağ yapısı oluşturulan geometrinin üç boyutlu şekli gösterilmiştir.

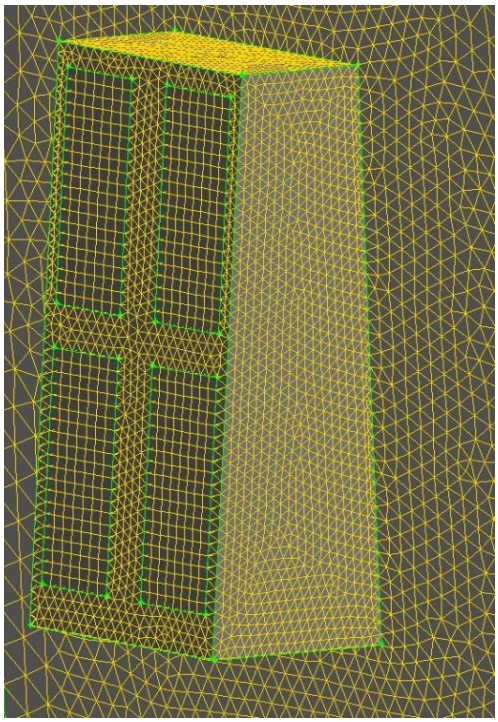


Şekil 3.6 : Ağ yapısı oluşturulan kazanın üç boyutlu görüntüsü.

Ağ yapısının yakıt hava karışım bölgeleri, alev bölgesi ve kazan çıkışı gibi kritik bölgelerde daha sık olmasına dikkat edilmiştir. Ağ yapısında 4,2 milyon hücre kullanılmıştır. Bölgenin yapısına bağlı olarak üçgen veya dörtgen ağ elemanları tercih edilmiştir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de ağ yapısının daha sık olduğu bölgeler gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Ağ yapısı oluşturulan kazanın ocak bölgesinin görüntüsü.



Şekil 3.8 : Ağ yapısı oluşturulan brülörün görüntüsü.

4. SAYISAL MODELLEME

Kazanın sayısal modellemesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan FLUENT yazılımı kullanılmıştır. FLUENT yazılımında fiziksel modeller, malzeme özellikleri ve sınır şartları tanımlanmıştır.

Sayısal model hazırlanırken Durum 1 ve Durum 2 olarak adlandırılan iki farklı durum ele alınmıştır. Bu durumlar arasındaki farklılık toplam hava ve kömür debilerinin brülörlere dağılma oranları arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Durum 1, santral verilerine dayalı olarak oluşturulmuştur. Burada toplam hava debisinin %43'ü alt, %43'ü orta ve %14'ü üst brülörlerden, toplam kömür debisinin %43'ü üst, %35'i orta ve %22'si üst brülörlerden gönderilmiştir. Varsayıma dayalı Durum 2'de ise toplam hava ve kömür debileri her brülöre eşit şekilde gönderilmiştir.

4.1 Sınır Şartları

Kazandaki hava giriş yerlerinde kütle giriş şartı kullanılanarak burada kütlesel hava debisi ve havanın sıcaklığı tanımlanmıştır. Kazana 613 K sıcaklıkta toplam 199 kg/s hava gönderilmiştir. Kazana gönderilen havanın bir kısmı kömür giriş yerlerinden gönderilerek kömür taneciklerinin kazan içinde daha iyi yayılması sağlanmıştır.

Kömür giriş yerlerinde enjeksiyon yüzeyi tanımlanarak buradan kömür gönderilmiştir. Kömür giriş yerlerinde enjeksiyon yüzeylerinin oluşturulması kömür taneciklerinin boyutlarının tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Santral verilerine dayalı olarak kazandaki 3 numaralı gruba ait brülörlerden sadece hava gönderilmiştir. Kömür giriş yerlerinden 573 K sıcaklıkta 38,61 kg/s kömür gönderilmiştir. Kömür analizlerine dayalı olarak kömür taneciklerinin minimum ve maksimum çapları sırasıyla 90 ve 500 μm olarak tanımlanmıştır.

Kazan çıkış yüzeyinde sınır şartı olarak basınç çıkışı kullanılmıştır.

Kazan ve brülör yüzeyleri duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Kazan duvarlarının tamamı su soğutmalıdır. Duvar sınır şartı olarak tanımlanan sıcaklık değeri literatürdeki benzer çalışmalardan hareketle borulardaki suyun doyma sıcaklığından

50 K daha fazla alınarak belirlenmiştir. Kazan duvarlarında kullanılan sabit sıcaklık değeri 659 K'dir.

Geometride yer verilmeyen, kazanın üst bölgesindeki kızdırıcı boruların bulunduğu bölgedeki akış hacminin gözenekli ortam olarak tanımlanmasıyla bu boruların neden olacağı basınç kayıpları hesaba katılmıştır. Bu bölgedeki akış hacmi için porozite değeri 0,8 olarak kullanılmıştır.

4.2 Kullanılan Modeller

Pülverize kömür kazanının sayısal modellenmesiyle ilgili geniş bir literatür araştırması yapılmış olup konuyla ilgili olan çalışmalarda ağırlıklı olarak kullanılan modeller kullanılmıştır.

Hesaplamalar zamandan bağımsız olarak yaptırılmıştır.

Kazan içerisindeki türbülanslı akışın modellenmesinde diğer türbülans modellerine göre zamandan tasarruf sağlayıp kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar sağlayan standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Pülverize kömür yanmasında kömür ile hava ayrı kanallardan kazana girdiğinden dolayı ön karışımsız yanma mevcuttur. Bundan dolayı yanmanın modellenmesinde ön karışımsız yanma modeli kullanılmıştır. Bu modelin içindeki PDF yaklaşımı kullanılarak kazanda kullanılan kömürün içeriği ve özelliği tanımlanmıştır.

Çizelge 4.1' de kullanılan kömüre ait çabuk analiz değerleri gösterilmiştir. İçerik incelendiğinde kül oranının fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Kullanılan kömürün çabuk analizinden elde edilen değerler.

Madde Türü	Kütlesel Oran
Uçucu Madde	% 23,8
Sabit Karbon	% 20,4
Nem	% 15,6
Kül	% 40,2

Kullanılan kömüre ait kuru ve külsüz bazdaki elementel analiz değerleri ve özellikler sırasıyla Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Kullanılan kömürün elementel analizinden elde edilen değerler.

Madde Türü	Kütlesel Oran
Karbon	% 72
Oksijen	% 16,2
Hidrojen	% 5
Azot	% 2,7
Kükürt	% 4,1

Çizelge 4.3 : 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

Kazandaki ışınımın modellenmesinde, diğer ışınım modellerine göre zamandan tasarruf sağlayan buna karşın kabul edilebilir ölçüde doğru sonuçlar sunan P1 ışınım modeli kullanılmıştır.

Ayrık faz (Discrete phase) modeli kullanılarak gaz fazındaki türbülansın kömür parçacıklarının yörüngelerine olan etkisi göz önünde bulundurulmuştur.

4.3 Sayısal Çözüm Teorisi

ANSYS FLUENT, çok geniş fiziksel modelleme kabiliyetine sahip olan ve ilgili denklemleri sonlu hacimler yaklaşımıyla çözen bir yazılımdır. Bu yazılım sayesinde karmaşık geometrilerdeki ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar gibi aktarım olayları sayısal olarak modellenebilir. Tüm akışlarda kütle ve momentum korunum denklemleri çözdürülmektedir. Bunlara ek olarak ısı transferi ve sıkıştırılabilirliğin olduğu durumlarda enerji denklemi, karışımın olduğu durumlarda tür korunum denklemi, ön karışımsız yanmada fraksiyon ve varyans korunum denklemleri de çözdürülmektedir. Bu yazılım, fırındaki yanmanın modellenmesi gibi birçok endüstriyel çalışmada kullanılmaktadır.

4.3.1 Kütle korunum denklemi

Kütle korunum denkleminin genel şekli aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \right) = S_m \tag{4.1}$$

Burada ρ akışkanın yoğunluğunu, v akışkanın hızını, S_m ise ayrılmış ikinci fazdan (sıvı damlacıklarının buharlaşması nedeni gibi) sürekli faza ilave edilen kütleyi veya kullanıcı tarafından tanımlanan kaynağı ifade etmektedir.

İki boyutlu eksenel simetrikliğin olduğu geometrilerde ise bu denklem;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho v_x \right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\rho v_r \right) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \tag{4.2}$$

şeklinde gösterilir. Burada x eksenel koordinatı, r radyal koordinatı, v_x eksenel hızı ve v_r ise radyal hızı temsil etmektedir [10].

4.3.2 Momentum korunum denklemleri

İvmelenme olmayan bir atalet referans çerçevesinde momentum korunum denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \vec{v} \right) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \vec{v} \right) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \left(\bar{\bar{\tau}} \right) + \vec{F} \tag{4.3}$$

Burada p statik basıncı, $\bar{\bar{\tau}}$ gerilme tensörünü, $\rho \vec{g}$ yerçekimi kuvvetini ve $\vec{F}$ ise dış kuvvetleri (ayrık faz ile etkileşimden meydana gelen) temsil etmektedir. Ayrıca $\vec{F}$, gözenekli ortam ve kullanıcı tanımlı kaynaklar gibi diğer model bağımlı kaynak terimlerini de içerir.

Burada gerilme tensörü $\bar{\bar{\tau}}$, aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^{\,T} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \tag{4.4}$$

Bu eşitlikte, μ ve I sırasıyla moleküler viskoziteyi ve birim tensörünü göstermektedir. Denklemin sağ tarafında kalan ikinci terim ise hacimsel genleşmenin etkisini ifade etmektedir.

İki boyutlu eksenel simetrik olan geometriler için geçerli olan eksenel ve radyal doğrultulardaki momentum korunumu denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_x)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_r v_x)=-\frac{\partial p}{\partial x}+$$
$$\frac{\partial^2\Omega}{\partial v^2}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_x}{\partial x}-\frac{2}{3}\left(\nabla.\vec{v}\right)\right)\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_x}{\partial r}+\frac{\partial vr}{\partial r}\right)\right]+F_x \quad \textbf{(4.5)}$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_r)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial v_r}{\partial x}+\frac{\partial v_x}{\partial r}\right)\right]$$
$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_r}{\partial r}-\frac{2}{3}\left(\nabla.\vec{v}\right)\right)\right]-2\mu\frac{v_r}{r^2}+\frac{2}{3}\frac{\mu}{r}\left(\nabla.\vec{v}\right)+\rho\frac{v_z^2}{r}+F_r \quad \textbf{(4.6)}$$

şeklindedir. Burada;

$$\nabla\cdot\vec{v}=\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{v_r}{r} \quad \textbf{(4.7)}$$

v_z girdap hızıdır [10].

4.3.3 Sıkıştırılabilir akışlar

Yüksek hızlardaki ve/veya basınç değişimlerinin yüksek olduğu gaz akışlarında sıkıştırılabilirlik etkileriyle karşılaşılır. Akış hızı ses hızına yaklaştığında veya ses hızını aştığında veya sistemdeki basınç değişimi *(Δp/p)* büyük olduğunda gaz yoğunluğunun basınçla değişimi akışın hızı, basıncı ve sıcaklığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olur.

Sıkıştırılabilir akışlar Mach sayısının değeri ile karakterize edilebilir. Mach sayısı;

$$M\equiv u/c \quad \textbf{(4.8)}$$

şeklinde ifade edilir. Burada *c* ses hızıdır;

$$c=\sqrt{\gamma RT} \quad \textbf{(4.9)}$$

şeklinde gösterilir. Burada γ, özgül ısıların oranıdır *(cp/cv)*.

Akış karakteristiklerinin belirlenmesinde Mach sayısının 1'e göre durumuna bakılır. Mach sayısı 1'den küçük olduğunda akış subsonik olarak adlandırılır. Mach sayısı 1'den çok küçük olduğunda (M<0.1) sıkıştırılabilirlik etkileri ihmal edilebilir. Mach sayısı 1'e yaklaştıkça sıkıştırılabilirlik etkileri önemli olmaya başlar. Mach sayısı 1'i geçtiğinde akış süpersonik olarak adlandırılır.

Sıkıştırılabilir akışlar genellikle toplam basınç p_0 ve toplam sıcaklık T_0 ile karakterize edilirler. İdeal gaz için bu büyüklükler statik basınç ve sıcaklıkla ilişkilendirilebilir.

$$\frac{p_0}{p} = \exp\left(\frac{\int_T^{T_0} \frac{C_p}{T} dT}{R} \right) \tag{4.10}$$

Denklem, sabit c_p için;

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{4.11}$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \tag{4.12}$$

şekline indirgenebilir. Bu bağıntılar, izantropik koşullar altında hız (Mach sayısı) değiştiğinde statik basınç ve statik sıcaklıktaki değişimi gösterir.

Sıkıştırılabilir akışlarda ideal gaz denklemi;

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{\frac{R}{M_w} T} \tag{4.13}$$

şeklinde yazılır. Burada p_{op} işletme basıncını, p işletme basıncına göre bağıl yersel statik basıncı, R evrensel gaz sabitini ve M_w ise moleküler ağırlığı göstermektedir. T sıcaklığı ise enerji denkleminden hesaplanacaktır [10].

4.3.4 Standart k-ε türbülans modeli

Standart, RNG ve Realizable olmak üzere üç tane k-ε türbülans modeli bulunmaktadır. Bunların arasındaki temel farklılıklar ise;

- türbülanslı viskozitenin hesaplanma yöntemi
- k-ε'un türbülans yayılımıyla ilgili olan Prandtl sayıları
- ε denklemindeki üretim ve tüketim terimleridir.

Çoğu türbülanslı akış için sağlam, ekonomik ve makul doğrulukta olması bu modeli endüstriyel akış ve ısı transferi simülasyonlarında popüler kılmıştır. Burada k türbülans kinetik enerjisini, ε ise disipasyon oranını göstermektedir. Bu modelde akışın tamamen türbülanslı ve moleküler viskozitenin etkilerinin ihmal edilebilir olduğu varsayımı

yapılmaktadır. Bu yüzden standart k-ε modeli sadece tamamen türbülanslı akışlar için geçerlidir.

K ve *ε* aşağıdaki denklemlerden elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b+\rho\varepsilon-Y_M+S_k \qquad \textbf{(4.14)}$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)+ C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \qquad \textbf{(4.15)}$$

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

Türbülans viskozitesinin bulunmasında aşağıdaki eşitlikten yararlanılır.

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \textbf{(4.16)}$$

Burada C_μ bir sabittir.

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ, σ_k ve σ_ε için programda kullanılan ilk değerler;

$C_{1\varepsilon}$ = 1.44, $C_{2\varepsilon}$ = 1.92, C_μ = 0.09, σ_k = 1.0, σ_ε = 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 [10].

4.3.5 Enerji denklemi

Adyabatik olmayan durumlarda ön karışımsız yanma modeli için yapılan hesaplamalarda enerji denkleminin toplam entalpi formu çözdürülür. Bu denklem aşağıda gösterilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H)+\nabla.(\rho H)=\nabla.(\nabla H)+S_h \qquad \textbf{(4.17)}$$

Burada *H* toplam entalpiyi göstermektedir.

$$H=\sum_j Y_j H_j \qquad \textbf{(4.18)}$$

$Y_{j,}j$ maddesinin kütle fraksiyonunu ifade etmektedir.

$$H_j=\int_{T_{ref,j}}^{T} c_{p,j}dT+h_j^0(T_{ref,j}) \qquad \textbf{(4.19)}$$

$h_j^0(T_{ref,j})$, j maddesinin $T_{ref,j}$ referans sıcaklığındaki oluşum entalpisini göstermektedir [10].

4.3.6 Işınımla ısı geçişi ve P1 ışınım modeli

$\vec{s}$ yönünde $\vec{r}$ pozisyonunda absorbe eden, yayan ve saçan bir ortam için ışınımla ısı geçişi denklemi;

$$\frac{dI(\vec{r},\vec{s})}{ds}+(a+\sigma_s)I(\vec{r},\vec{s})=an^2\frac{\sigma T^4}{\pi}+\frac{\sigma_s}{4\pi}\int_0^{4\pi} I(\vec{r},\vec{s}')\Phi(\vec{s},\vec{s}')d\Omega' \qquad \textbf{(4.20)}$$

Bu denklemde $\vec{r}$ pozisyon vektörünü, $\vec{s}$ yön vektörünü, $\vec{s}'$ saçılma yön vektörünü, s yol uzunluğunu, a absorpsiyon katsayısını, n yansıtma indeksini, σ_s saçılma katsayısını, σ Stefan-Boltzmann sabitini, *I* radyasyon şiddetini, *T* yersel sıcaklığı, *Φ* faz fonksiyonunu, *Ω′* katı açısını, $(a+\sigma_s)s$ ise optik kalınlığı veya ortamın saydamlığını göstermektedir.

Programda mevcut olan ışınım modellerinden en basit olanı P1 radyasyon modelidir. P1 modelinde ısı akısı ifadesi;

$$q_r=-\frac{1}{3(a+\sigma_s)-C\sigma_s}\nabla G \qquad \textbf{(4.21)}$$

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

$$\nabla(\Gamma\nabla G)-aG+4a\sigma T^4=S_G \qquad \textbf{(4.22)}$$

şeklindedir. S_G tanımlanan ışınım kaynağını göstermektedir [10].

4.3.7 Ön karışımsız yanma modeli

Ön karışımsız yanmada, yakıt ve oksitleyici madde reaksiyon bölgesine ayrı akımlardan girerler. Pülverize kömür fırınlarının ve içten yanmalı dizel motorların modellenmesinde bu modelden yararlanılır. Belirli kabuller altında termokimya, karışım fraksiyonu kullanılarak tek bir parametreye indirgenebilir. Karışım fraksiyonu *f* ile gösterilir. Bu, tüm bileşenlerde yakıt akımındaki yanmış ve yanmamış yakıt akımı elemanlarının yersel kütle fraksiyonudur. Atomik elemanların kimyasal reaksiyonlarda korunmasından dolayı bu yaklaşım çok iyidir. Karışım fraksiyonu korunan skalar bir büyüklüktür. Bundan dolayı bununla ilgili transport denklemi üretim terimi içermez. Yanma, karışım problemine indirgenerek non-lineer ortalama reaksiyon hızlarından kaynaklanan zorlukların önüne geçilmiş olur. Ön karışımsız yanma modeli karışım fraksiyonları için transport denklemlerin çözümlerini içerir. Her bir bileşen için bir denklem çözülmez. Bunun yerine bileşenlerin konsantrasyonları, tahmin edilen karışım fraksiyon alanlarından türetilir. Türbülans ile kimya arasındaki etkileşim Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF - Probability Density Function) ile hesaba katılır.

Karışım fraksiyonu atomik kütle fraksiyonu cinsinden;

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,\,fuel} - Z_{i,ox}} \tag{4.23}$$

şeklinde yazılır. Burada Z_i, i elementinin elementsel kütle fraksiyonunu göstermektedir. Ox alt indisi oksitleyici akımının, fuel alt indisi ise yakıt akımının girişindeki değeri göstermektedir. Eğer tüm türler için difüzyon katsayıları aynı ise üstteki denklem tüm elementler için aynıdır ve karışım fraksiyonu tanımı tektir. Eşit difüzyonlar varsayımı yapılarak, bileşen denklemleri tek bir denkleme indirgenebilir. Bu durum laminer akışlar için problem oluştururken türbülanslı taşınımın moleküler difüzyona göre hakim olduğu türbülanslı akışlarda genellikle kabul edilebilir düzeydedir. Favre ortalama karışım fraksiyon denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f}) + \nabla.(\rho \vec{v} \overline{f}) = \nabla.\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f}\right) + S_m + S_{user} \tag{4.24}$$

şeklindedir. S_m sıvı yakıt damlacıklarından gaz fazına olan kütle transferinden veya reaktif partikülden meydana gelen kaynak terimi, S_{user} kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimidir.

Yazılım, Favre ortalama karışım fraksiyon denkleminin yanısıra karışım fraksiyon varyansı, $\overline{f'^2}$, için de bir korunum denklemi çözmektedir.

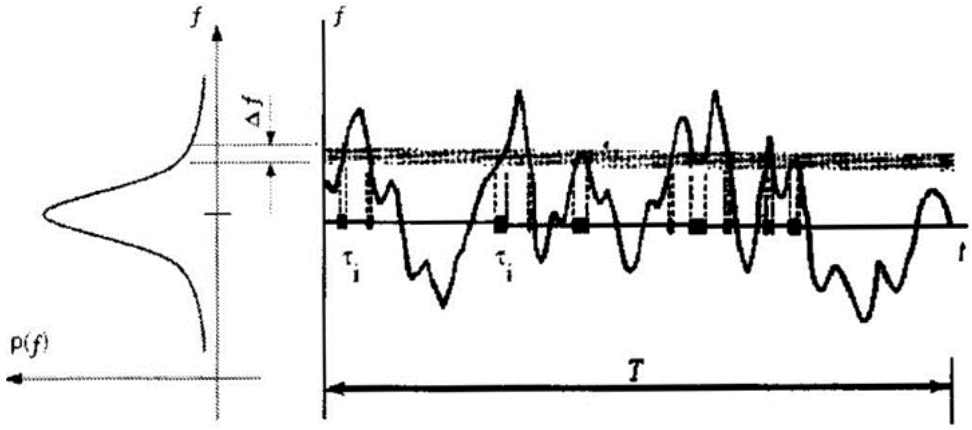
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla.(\rho \vec{v} \overline{f'^2}) = \nabla.\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2}\right) + C_g \mu_t (\nabla \overline{f})^2 - C_d \mu_t \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} + S_{user} \quad \textbf{(4.25)}$$

Burada $f' = f - \overline{f}$ 'tir. σ_1 , C_g ve C_d sabitleri için başlangıç değerleri sırasıyla 0.85, 2.86 ve 2'dir. S_{user} kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimini göstermektedir.

Karışım fraksiyon varyansı türbülans – kimya etkileşimini açıklayan bir kapatma modelidir.

Yazılımın reaksiyona giren türbülanslı akışla ilgili tahmini karışım fraksiyonu, bileşen fraksiyonu, yoğunluk ve sıcaklık gibi dalgalanan skalerlerin ortalamasının tahimini ile ilişkilidir. Yazılım, ön karışımsız yanma olduğunda bu tahminler için Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF)'nu kullanır.

Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu, *p(f)* ile gösterilir, akışkanın *f* durumunda harcadığı zamanın kısmını gösterir. Şekil 4.1'de sağ tarafta akış içerisindeki bir noktadaki karışım fraksiyonunun zaman izleri, sol tarafta ise *f*'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 4.1 : PDF yaklaşımının grafiksel tanımı [10].

Sağ taraftaki salınım yapan *f* değeri, *Δf* aralığında bir kısım zaman harcar. Şeklin sol tarafında çizilmiş olan *p(f), Δf* bandındaki kendi eğrisi altında kalan değerleri alır.

Matematiksel olarak;

$$p(f)\Delta f = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \sum \tau_i \quad \textbf{(4.26)}$$

şeklinde ifade edilir. Burada T zaman ölçeğini, τ_i ise f'nin Δf bandında harcadığı zamanın miktarını göstermektedir. $P(f)$ fonksiyonunun şekli f 'deki türbülanslı salınımların doğasına bağlıdır. Pratikte $p(f)$, deneysel olarak gözlemlenmiş olan gerçek PDF şekline yaklaşan bir matematiksel fonksiyon olarak modellenir [10].

4.3.8 Ayrık faz modeli

Çok fazlı akışların sayısal hesaplanmasında iki tane yaklaşımdan yararlanılmaktadır. Bunlar; Euler-Lagrange yaklaşımı ve Euler-Euler yaklaşımıdır. Lagrange ayrıklaştırma modeli Euler-Lagrange yaklaşımını kullanmaktadır. Akışkan fazı Navier-Stokes denklemlerini çözerek sürekli ortam gibi davranırken, dağılmış faz hesaplanan akış alanı boyunca çok sayıdaki partiküllerin, kabarcıkların veya damlacıkların izlenmesiyle çözülür. Dağılmış faz akışkan fazıyla momentum, kütle ve enerji transferinde bulunabilir. Partikül-partikül etkileşimi ihmal edilebilir olduğunda bu yaklaşım daha basit hale gelmektedir. Bu durum dağılmış ikinci fazın küçük hacim kaplamasını gerektirir. Akışkan fazındaki hesaplamalar sırasında belirli aralıklarla partikül ya da damlacık yörüngeleri ayrı ayrı hesaplanır. Bu yaklaşım sprey kurutucular, kömür ve sıvı yakıt yanması için uygundur; fakat, sıvı-sıvı karışımlarında, akışkan yataklar gibi dağılmış ikinci fazın hacim fraksiyonunun ihmal edilebilir olmadığı uygulamalar için uygun değildir.

Yazılım, partikülün üzerindeki kuvvet dengesini integre ederek ayrık fazdaki partikülün, damlacığın veya kabarcığın yörüngesini tahmin eder. Bu kuvvet dengesi partiküle etkiyen kuvvetler ile parçacık ataletini eşitler. Bu eşitlik kartezyen koordinatlarda x yönü için yazılırsa;

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \qquad \textbf{(4.27)}$$

eşitliği elde edilir. Burada $\vec{F}$ ek hızlanma (kuvvet/birim partikül kütlesi) terimi, F_D birim partikül kütlesi için sürükleme kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \qquad \textbf{(4.28)}$$

Burada $\vec{U}$ ve $\vec{u}_p$ sırasıyla akışkan faz hızını ve partikül hızını göstermektedir.

Denklemdeki μ akışkanın moleküler viskozitesi, ρ akışkan yoğunluğu, ρ_p partikül yoğunluğu ve d_p partikül çapıdır. *Re*, bağıl Reynolds sayısını göstermektedir ve

$$Re = \frac{\rho d_p \left| \vec{u}_p - \vec{u} \right|}{\mu} \tag{4.29}$$

şeklinde ifade edilir.

Ek kuvvetlerin birincisi partikülü çevreleyen akışkanı hızlandırmak için gereken sanal kütle kuvvetidir. Bu kuvvet;

$$F = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (\vec{u} - \vec{u}_p) \tag{4.30}$$

şeklinde ifade edilir ve $\rho > \rho_p$ olduğu durumda önemlidir. Ek kuvvet akışkandaki basınç gradyanlarından dolayı oluşur;

$$F = \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right) \vec{u}_p \nabla u \tag{4.31}$$

Sıvı fazındaki partiküllerin türbülanstan dolayı dağılması olasılıksal izleme modeli ya da partikül bulut modeli kullanılır. Bu çalışmada olasılıksal izleme modeli kullanılmıştır. Olasılıksal izleme modeli, olasılık yöntemleri kullanarak partikül yörüngelerindeki ani türbülanslı hız dalgalanmalarının etkisini içerir.

Akış türbülanslı olduğunda yazılım, yörünge denklemlerinde ortalama akışkan faz hızını kullanarak partiküllerin yörüngelerini tahmin eder. Türbülanstan kaynaklanan dağılmayı tahmin etmek için dalgalanan gaz akış hızının, $\bar{u}$, anlık değerleri;

$$u = \bar{u} + u' \tag{4.32}$$

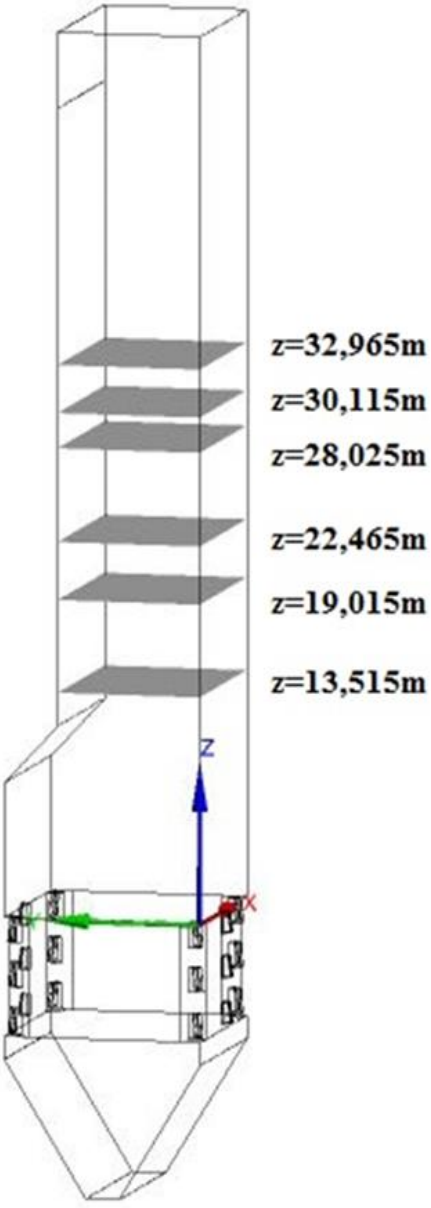
eşitliğinden bulunabilir.

Olasılıksal yaklaşımda, ANSYS FLUENT partikülün türbülanslı dağılımını partikülün izlediği yol boyunca her bir partikülün yörünge denklemlerini integre ederek tahmin eder [10].

4.4 Analiz Sonuçları

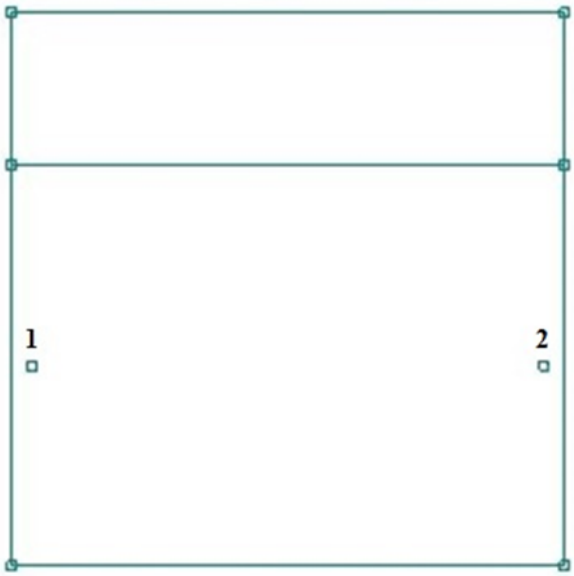
Bu kısımda kazanın brülör seviyelerindeki sıcaklık ve hız dağılımları incelenmiş, belirli noktalardan ve kazan çıkışından ölçülen sıcaklık değerleri modelden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanarak bağıl hata hesabı yapılmıştır.

Kıyaslama yapılan yükseklikler Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Karşılaştırmaların yapıldığı düzlemler.

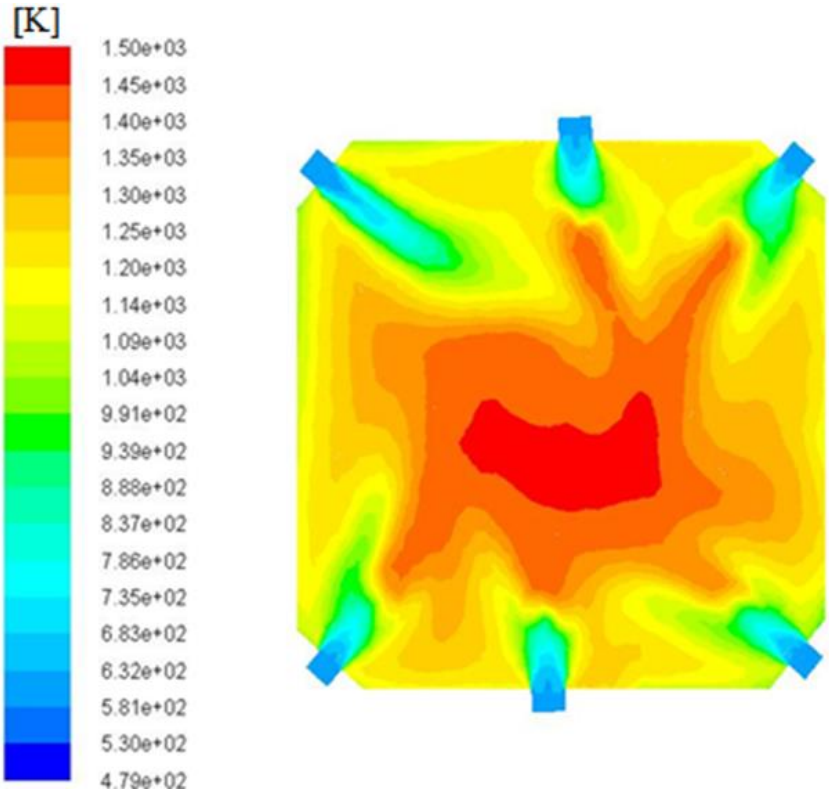
Ölçümler brülörlerin olmadığı yüzeylerin ortasından kazanın 45 cm içine girilerek yapılmıştır. Şekil 4.3'te kazanın üstten görünüşü verilerek ölçümlerin yapıldığı noktalar gösterilmiştir.



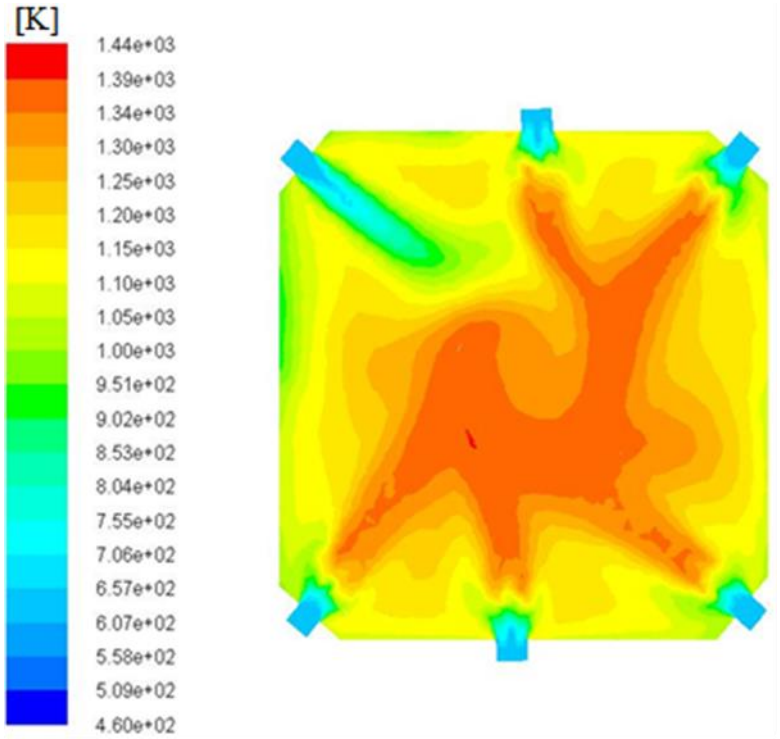
Şekil 4.3 : Ölçümlerin yapıldığı noktalar.

4.4.1 Alt brülör bölgesindeki dağılımlar ve kazandan çıkış süreleri

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'teki durumlar incelendiğinde her iki durumda da en sıcak bölge olarak isimlendirilen alev bölgesi kazanın merkezinde oluşmaktadır. Her iki durumda da sadece hava gönderilen 3. gruba ait brülörün önünde soğuk bir alan oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.4'te daha düzgün bir sıcaklık dağılımı mevcuttur.

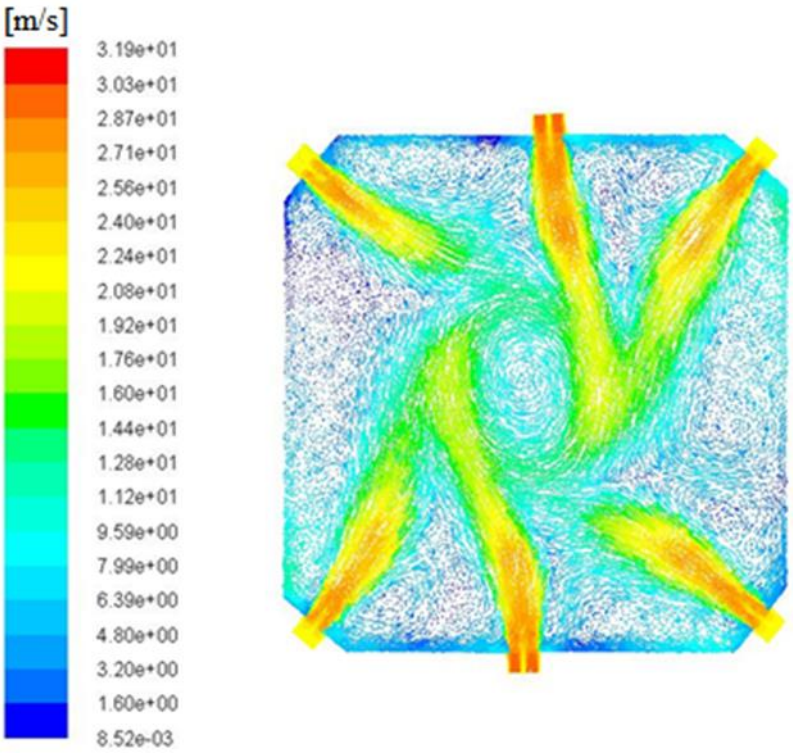


Şekil 4.4 : Durum 1 için alt brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı.

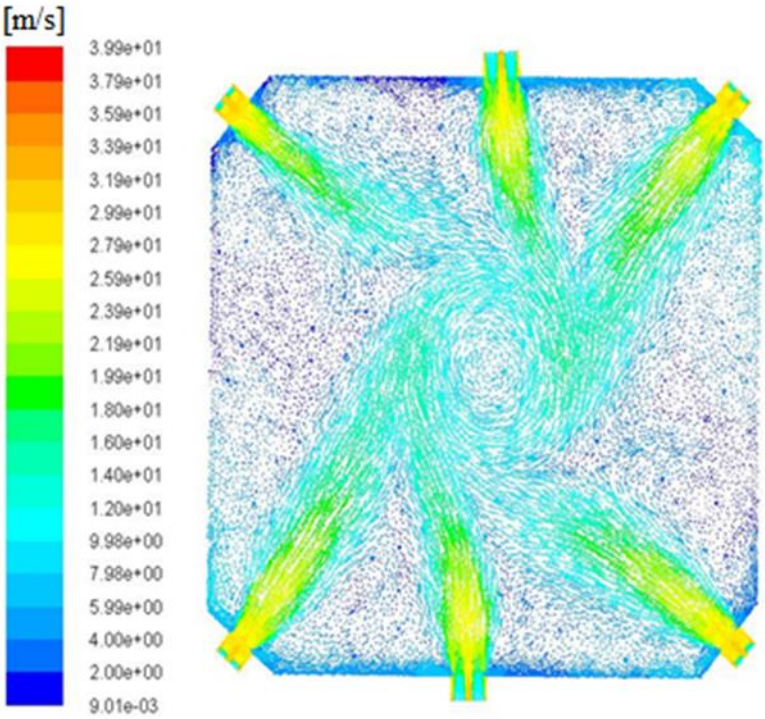


Şekil 4.5 : Durum 2 için alt brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 incelendiğinde her iki durumda da kazanın merkezinde beklendiği gibi girdap oluşmaktadır. Durum 1'de brülörlere gönderilen hava debileri daha fazla olduğundan hız değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

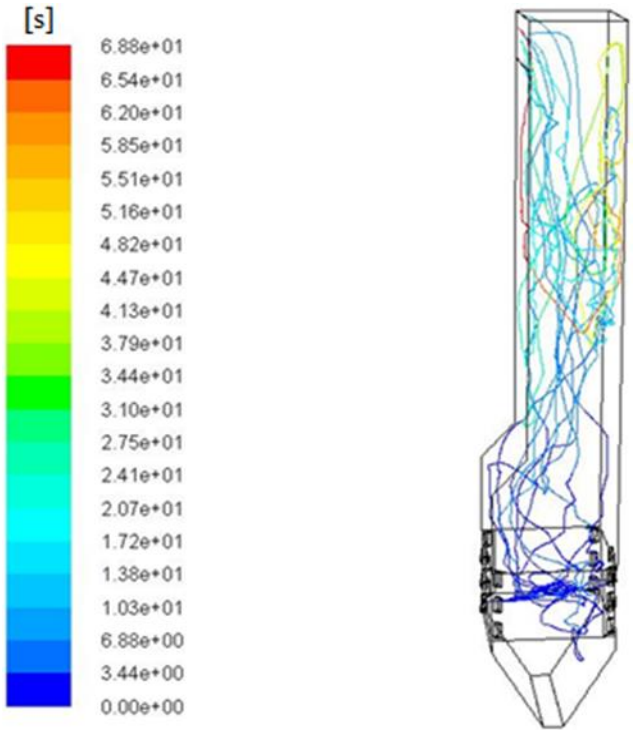


Şekil 4.6 : Durum 1 için alt brülör bölgesindeki hız dağılımı.

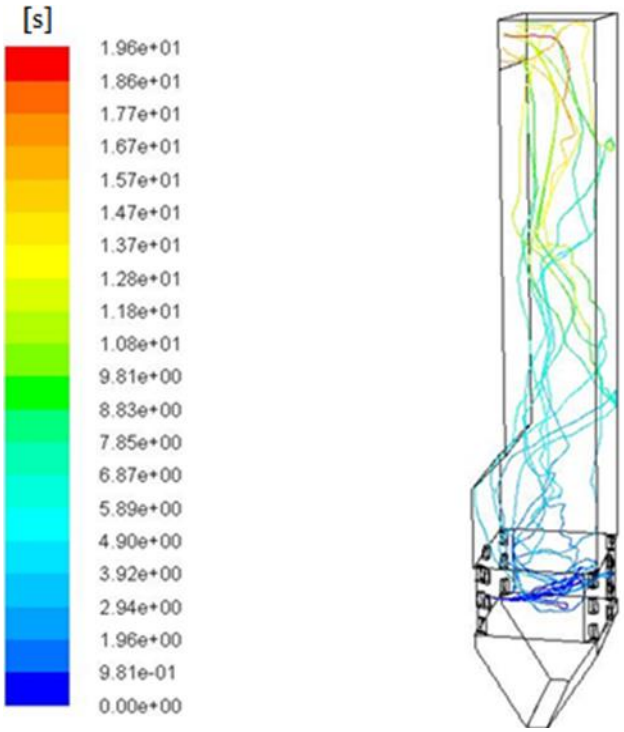


Şekil 4.7 : Durum 2 için alt brülör bölgesindeki hız dağılımı.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 incelendiğinde Durum 1'de alt brülörden gönderilen kömür taneciklerinden sonuncusun kazanı yaklaşık 69 s'de terkettiği görülürken Durum 2'de yaklaşık 20 s'de terkettiği görülmektedir.



Şekil 4.8 : Durum 1'de alt brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi.

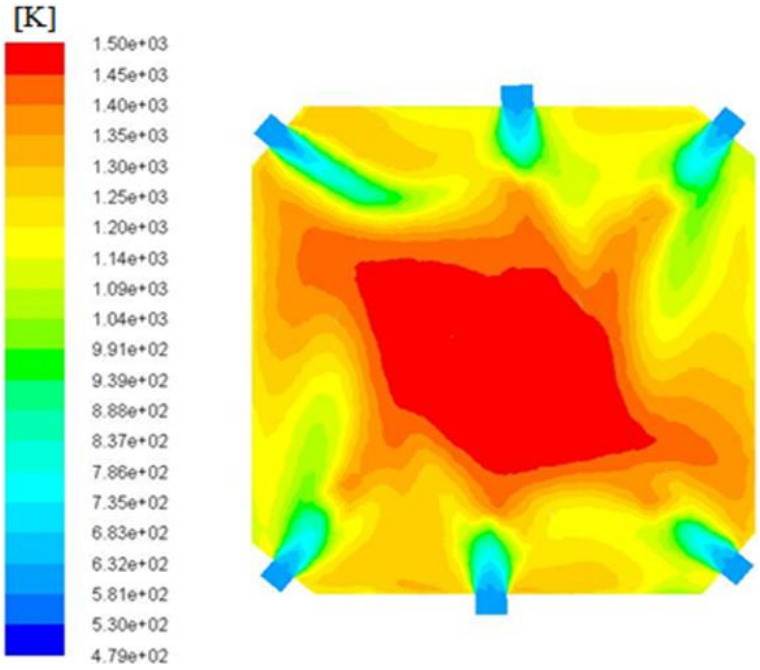


Şekil 4.9 : Durum 2'de alt brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi.

4.4.2 Orta brülör bölgesindeki dağılımlar ve kazandan çıkış süreleri

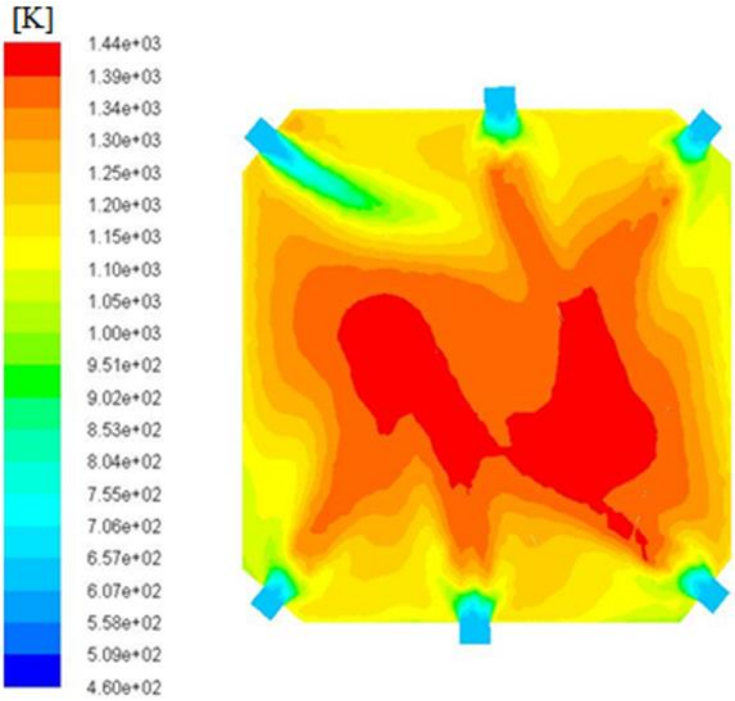
Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de orta brülör bölgesindeki sıcalık dağılımları görülmektedir.

Her iki durumda da alev bölgesinin kazan merkezinde oluştuğu görülmektedir.



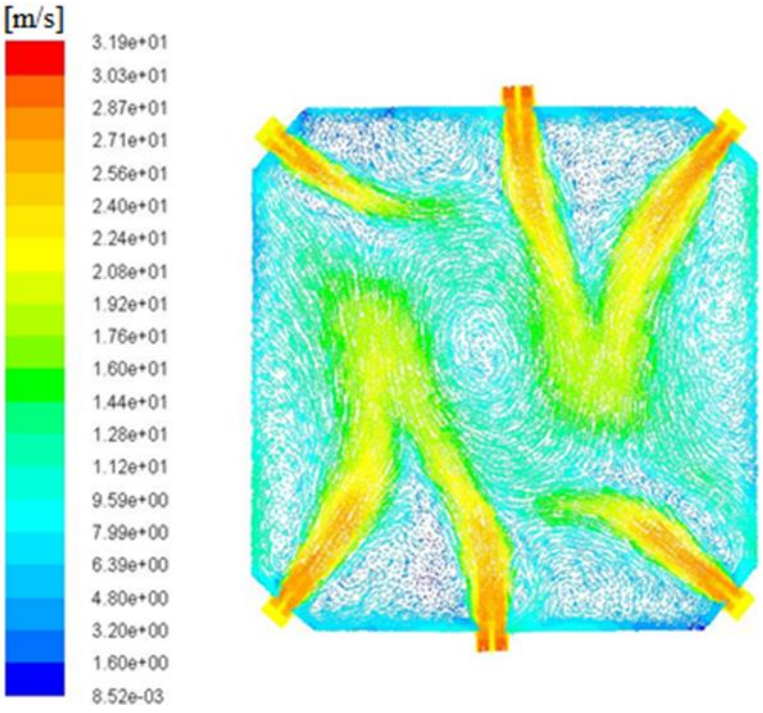
Şekil 4.10 : Durum 1 için orta brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.11'de sıcaklık dağılımı geniş bir alana yayılmışken Şekil 4.10'da daha kısıtlı bir alana yayılmıştır.

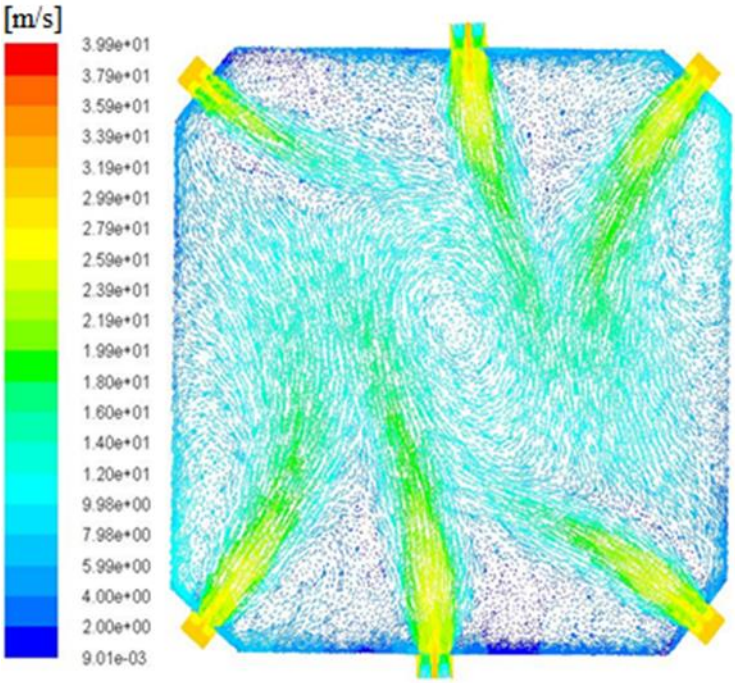


Şekil 4.11 : Durum 2 için orta brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'teki hız dağılımları incelendiğinde her iki durumda da kazan merkezinde girdap oluştuğu görülmektedir.

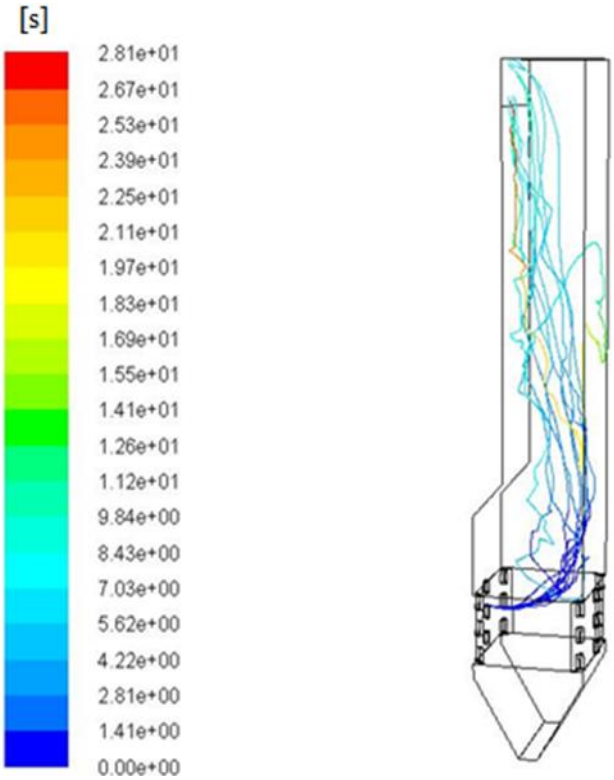


Şekil 4.12 : Durum 1 için orta brülör bölgesindeki hız dağılımı.

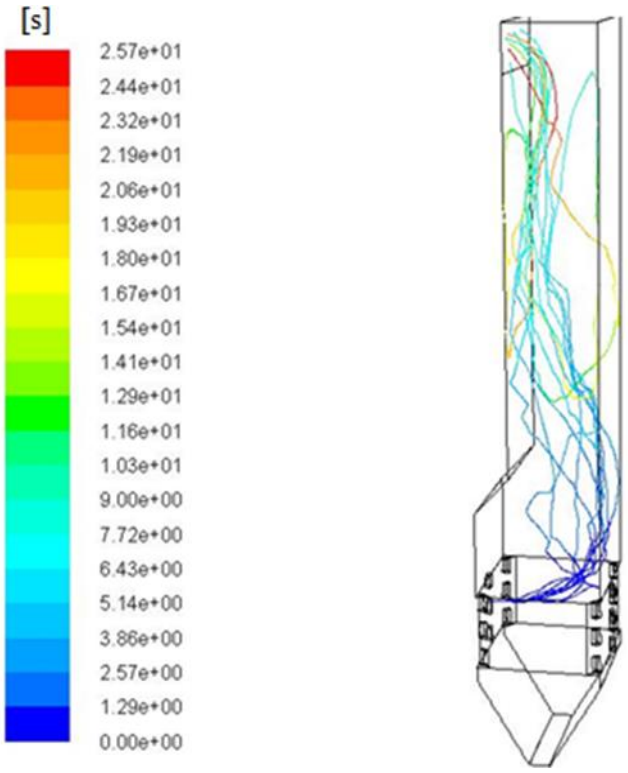


Şekil 4.13 : Durum 2 için orta brülör bölgesindeki hız dağılımı.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 incelendiğinde Durum 1'de orta brülörden gönderilen kömür taneciklerinden sonuncusu kazanı yaklaşık 28 s'de terkederken Durum 2'de yaklaşık 26 s'de terkettiği görülmektedir.



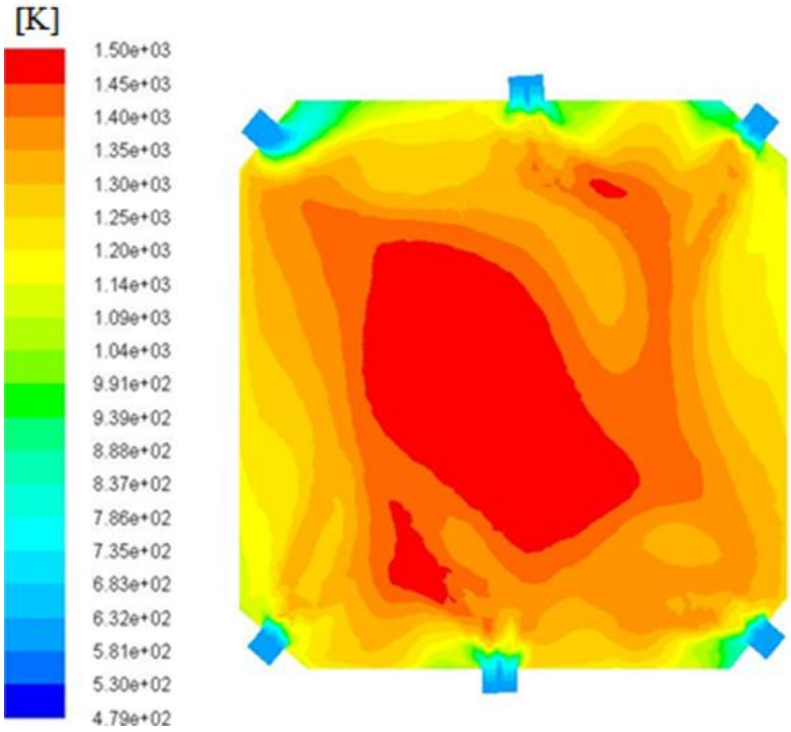
Şekil 4.14 : Durum 1'de orta brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi.



Şekil 4.15 : Durum 2'de orta brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi.

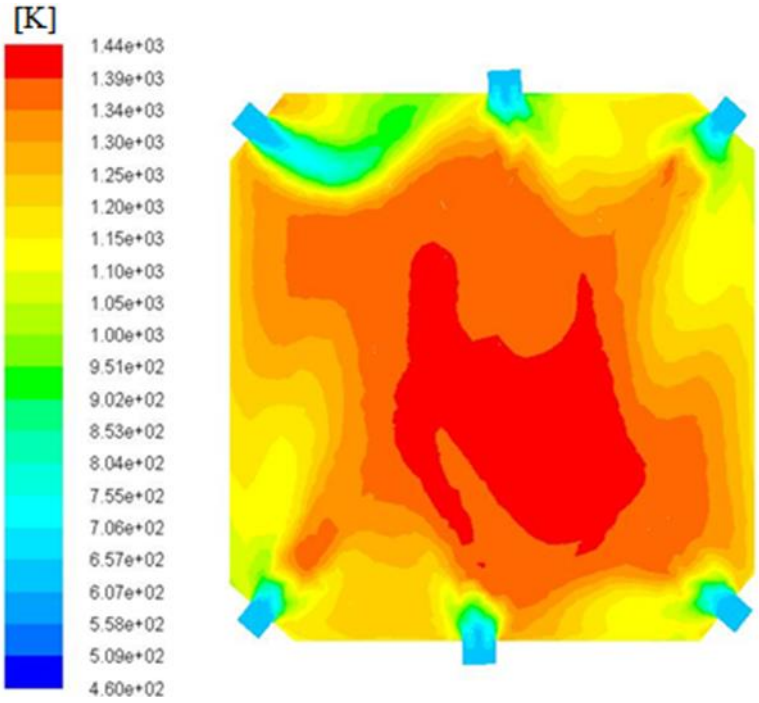
4.4.3 Üst brülör bölgesindeki dağılımlar ve kazandan çıkış süreleri

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de üst brülör düzeyindeki sıcaklık dağılımları görülmektedir.



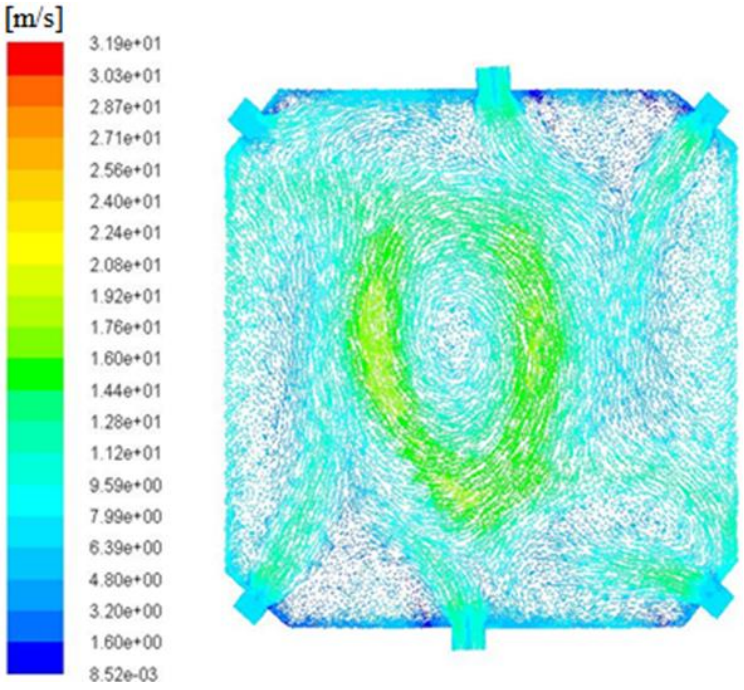
Şekil 4.16 : Durum 1 için üst brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı.

Her iki durumda da alev bölgesinin kazan merkezinde oluştuğu fakat Durum 2'deki sıcaklık dağılımının daha düzenli bir şekilde oluştuğu görülmektedir.

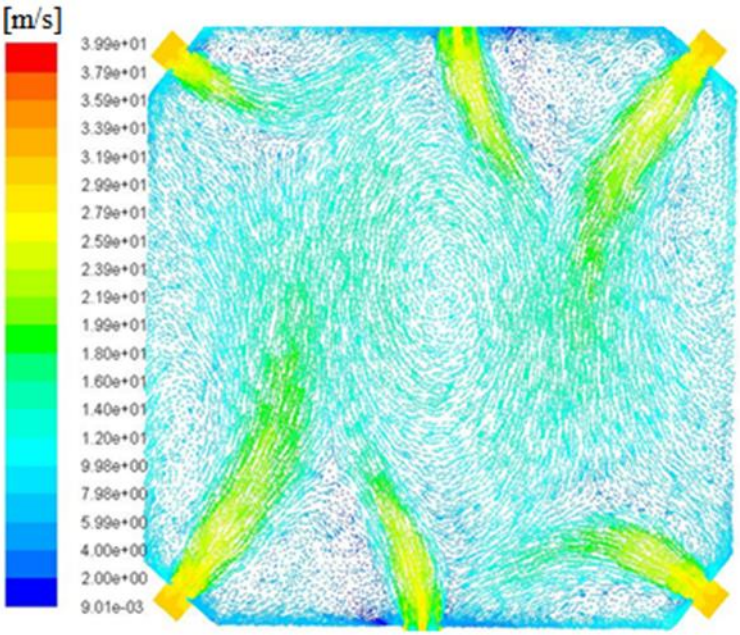


Şekil 4.17 : Durum 2 için üst brülör bölgesindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 incelendiğinde her iki durumda da kazan ortasında girdap oluştuğu görülmektedir. Durum 2'de üst brülör seviyesine gönderilen hava debisi daha fazla olduğundan buradaki hız değerleri daha yüksektir.

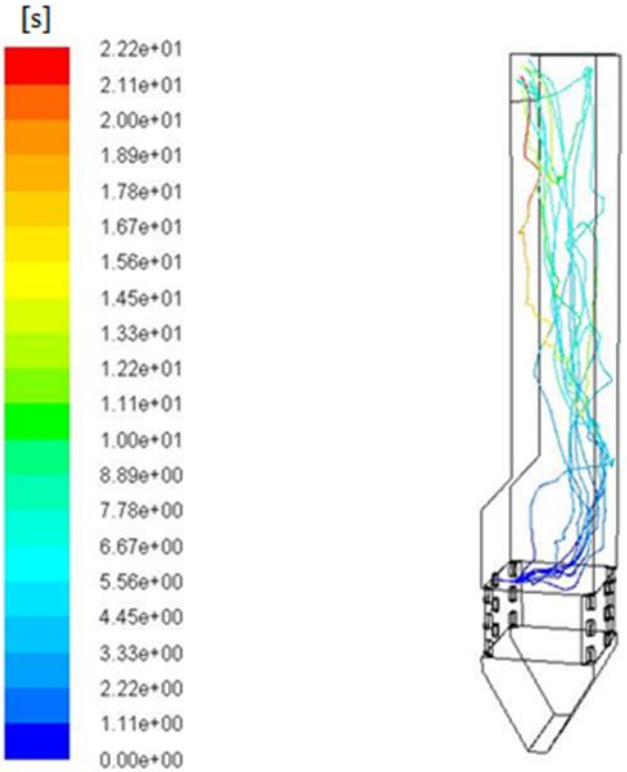


Şekil 4.18 : Durum 1 için üst brülör bölgesindeki hız dağılımı.

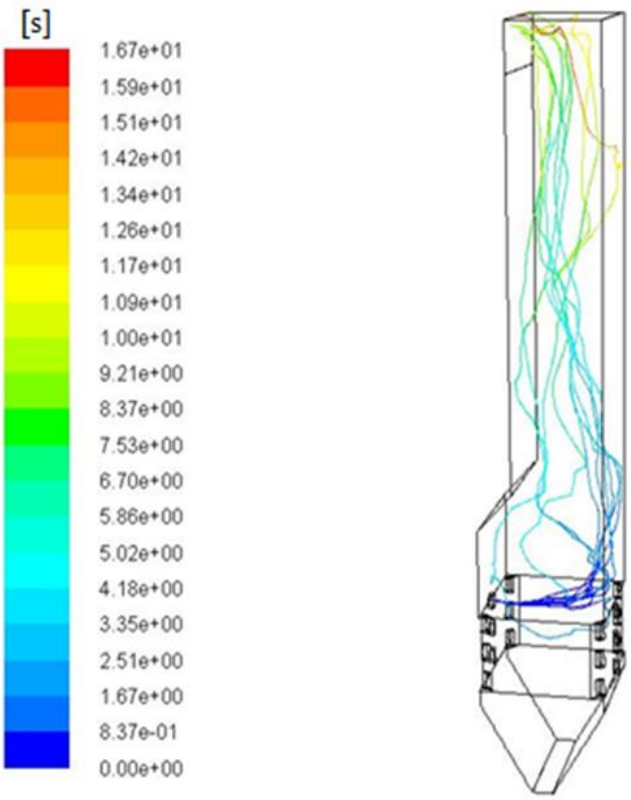


Şekil 4.19 : Durum 2 için üst brülör bölgesindeki hız dağılımı.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de kazanı en son terkeden taneciklerin süreleri gösterilmektedir. Durum 1'de üst brülörden gönderilen kömür taneciklerinden sonuncusu kazanı yaklaşık 22 s'de terkederken Durum 2'de yaklaşık 17 s'de terketmektedir.



Şekil 4.20 : Durum 1'de üst brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi.



Şekil 4.21 : Durum 2'de üst brülörden gönderilen taneciklerden sonuncusunun kazandan çıkış süresi.

4.4.4 Ölçüm yapılan yüksekliklerdeki sıcaklık karşılaştırmaları

Çizelge 4.4'te ölçümlerin yapıldığı yükseklikler ve aynı yükseklikte modelden elde edilen sonuçlar ile bağıl hata hesaplamaları gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Ölçüm yapılan yüksekliklerdeki sıcaklık karşılaştırmaları.

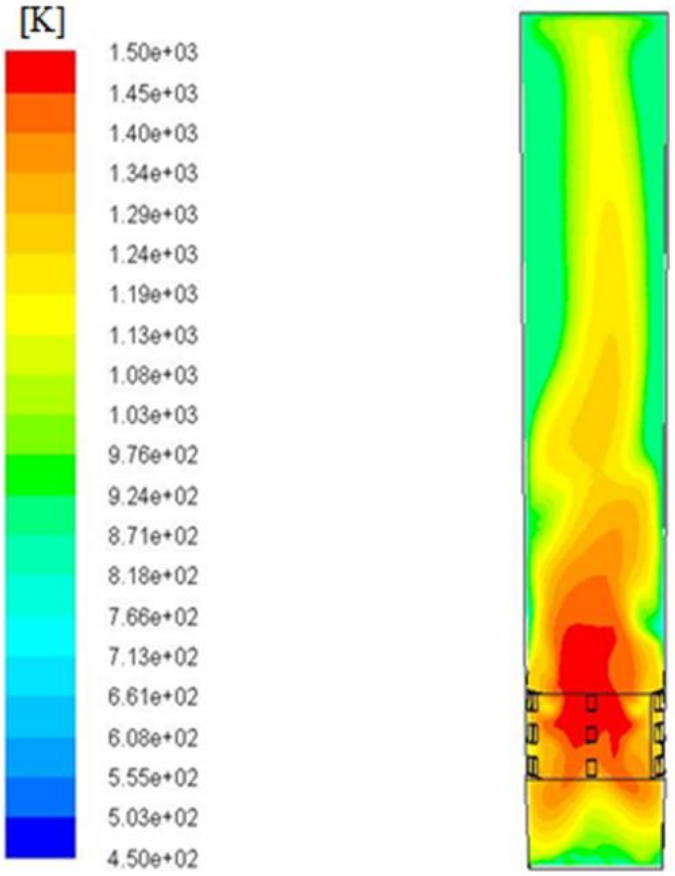
Yükseklik (m)	Nokta	Deneysel (K)	Durum 1 (K)	Durum 2 (K)	Bağıl Hata 1 (%)	Bağıl Hata 2 (%)
13,515	1	1181,7	1104,5	925,02	6,5	21,7
	2	1164,7	1074,4	957	7,7	17,8
19,015	1	1104,8	961,6	894	12,9	19,1
	2	1100,9	923	881	16,1	20
22,465	1	1023	903	891	11,7	12,9
	2	1036,4	899,1	894	13,2	13,8
28,025	1	977	886	892	9,2	8,6
	2	945	904	899	4,4	4,9

Çizelge 4.4 (devam) : Ölçüm yapılan yüksekliklerdeki sıcaklık karşılaştırmaları.

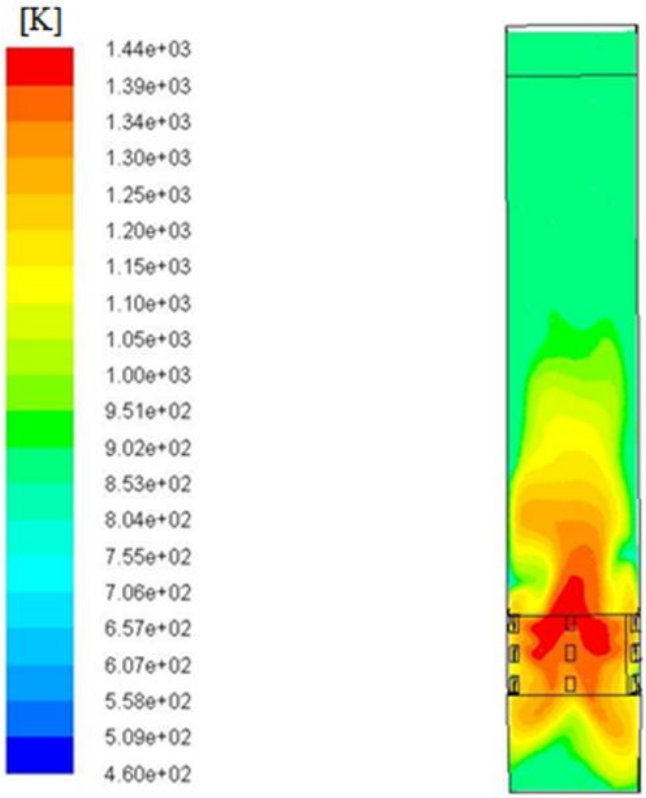
Yükseklik (m)	Nokta	Deneysel (K)	Durum 1 (K)	Durum 2 (K)	Bağıl Hata 1 (%)	Bağıl Hata 2 (%)
30,115	1	893	864	892,8	3,1	0,1
	2	875,7	903	896	3,2	2,3
32,965	1	816,9	863	890,3	5,7	9
	2	802,9	893	894	11,2	11,3

4.4.5 X-Z düzlemindeki sıcaklık dağılımları

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'teki sonuçlar incelendiğinde her iki durumda da alev bölgesi kazan merkezinde oluşmaktadır. Durum 1'de kazan çıkışına kadar merkezdeki sıcaklık değeri düşmekte iken diğer durumda sıcaklık değeri belli bir yüksekliğe kadar belirgin bir düşüş göstermekte, bu yükseklikten itibaren ise homojen bir sıcaklık dağılımı oluşmaktadır. Kazan içindeki en yüksek sıcaklıklar bir birine oldukça yakındır. Durum 1'de en yüksek sıcaklık değeri 1500 K iken Durum 2'de yaklaşık 1440 K'dir.



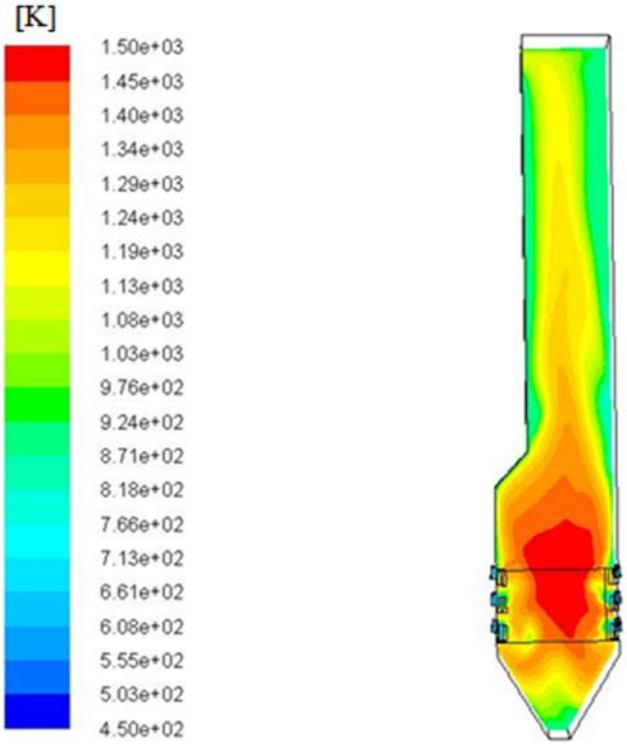
Şekil 4.22 : X-Z düzleminde Durum 1'deki sıcaklık dağılımı.



Şekil 4.23 : X-Z düzleminde Durum 2'deki sıcaklık dağılımı.

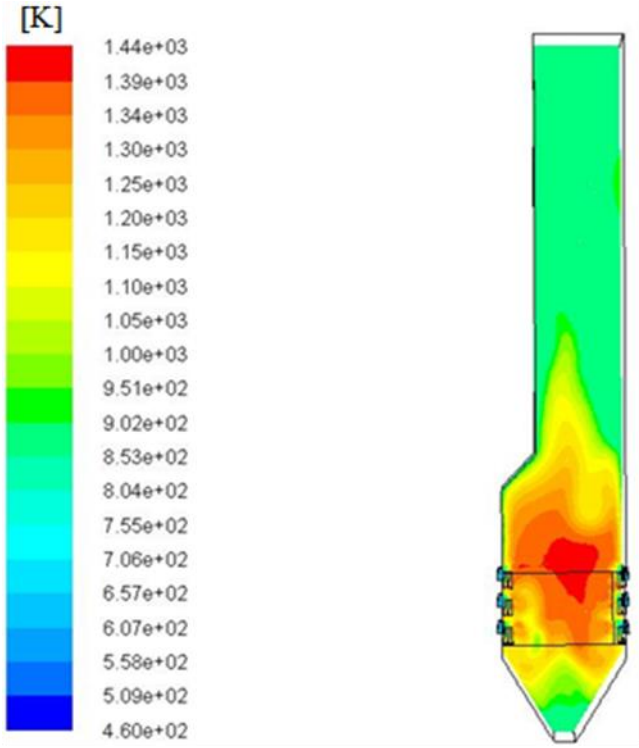
4.4.6 Y-Z düzlemindeki sıcaklık ve CO_2 mol oranı dağılımları

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te Y-Z düzlemindeki sıcaklık dağılımları görülmektedir.



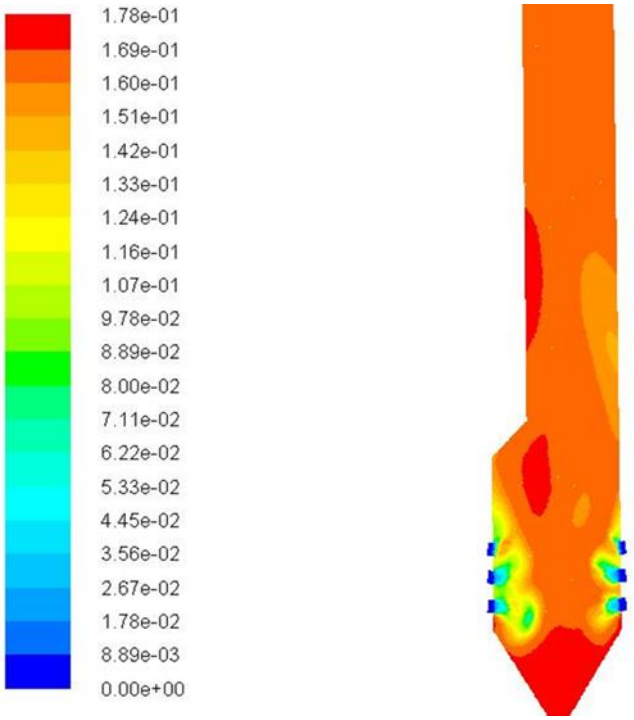
Şekil 4.24 : Y-Z düzleminde Durum 1'deki sıcaklık dağılımı.

Elde edilen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında X-Z düzlemindeki durumun burada da geçerli olduğu görülmektedir.



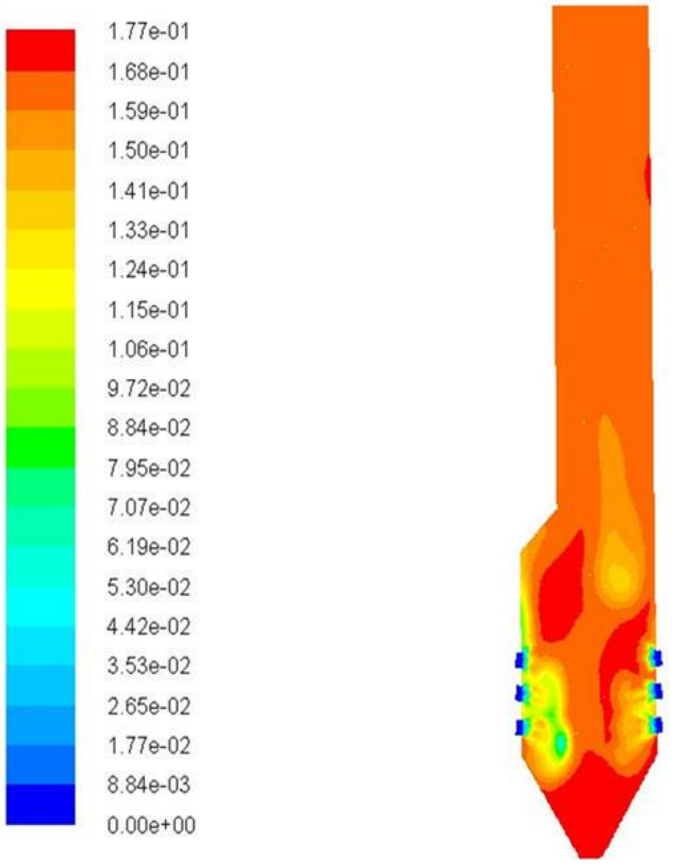
Şekil 4.25 : Y-Z düzleminde Durum 2'deki sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de kazan içindeki CO_2 mol oranı dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.26 : Y-Z düzleminde Durum 1'deki CO_2 mol oranı dağılımı.

Her iki durumda da CO_2 miktarının havanın girdiği brülör yüzeylerinde en düşük seviyede olduğu ve kazan merkezine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir.



Şekil 4.27 : Y-Z düzleminde Durum 2'deki CO_2 mol oranı dağılımı.

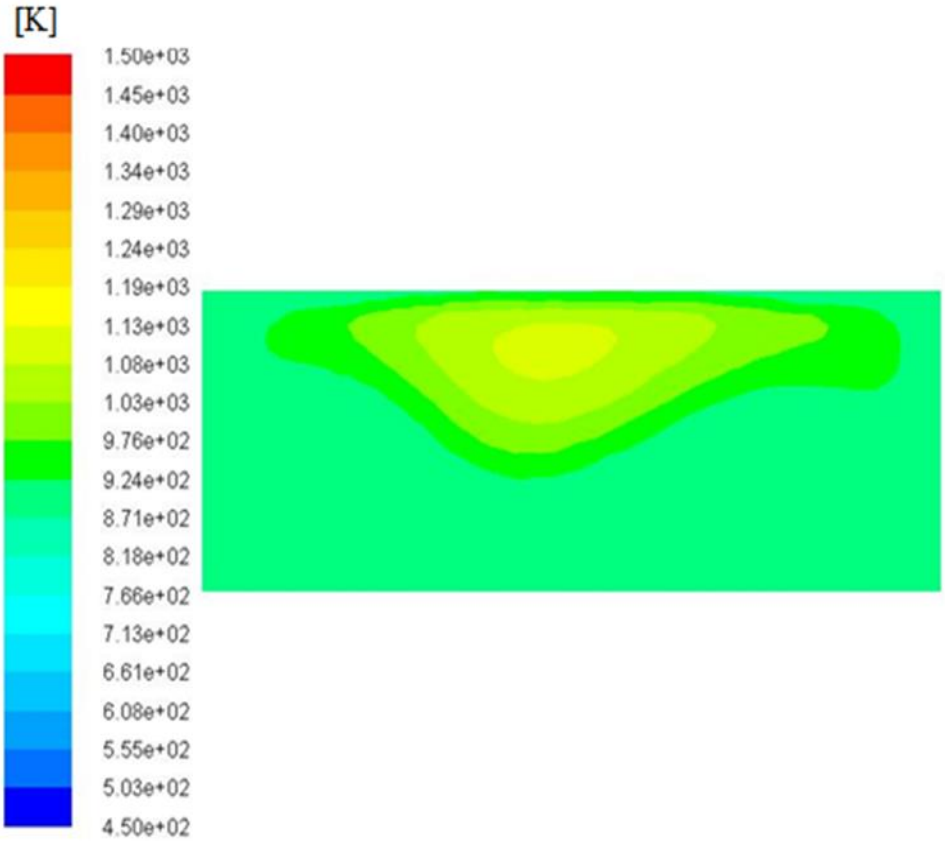
4.4.7 Kazan çıkışındaki sıcaklık dağılımları ve karşılaştırmaları

Çizelge 4.5'te modellerden elde edilen kazan çıkış sıcaklıkları gösterilmiştir. Ölçümlerle karşılaştırma yapıldığında bağıl hataların sırasıyla %6,9 ve %11,3 olduğu görülmektedir.

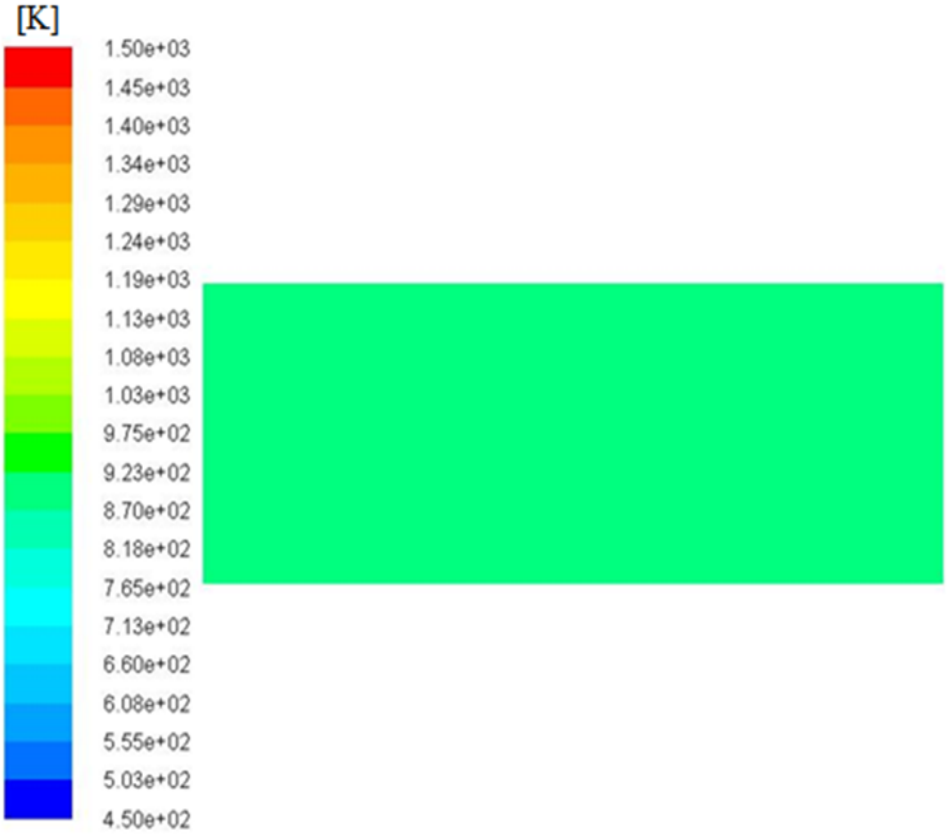
Çizelge 4.5 : Çıkış yüzeyindeki sıcaklıkların karşılaştırılması.

Deneysel	Durum 1	Durum 2
1000 K	931 K	887 K

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da her iki durumdan elde edilen kazan çıkışındaki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Şekil 4.28'de görüldüğü gibi Durum 1'de kazan merkezinde oluşan alev topunun kazanı terkettiği bölge belirgin bir şekilde görülmektedir. Durum 2'de ise kazan çıkışında homojen bir sıcaklık durumu söz konusudur.



Şekil 4.28 : Durum 1 için çıkış yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.



Şekil 4.29 : Durum 2 için çıkış yüzeyindeki sıcaklık dağılımı.

Çizelge 4.6'da yanma sonundaki bazı ürünlerin mol oranları gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : Çıkış yüzeyindeki mol oranları.

Tür	Durum 1	Durum 2
CO_2	0,1655	0,1646
O_2	0,011	0,011
CO	1,3e-06	2,11e-07

5. SEYİTÖMER VE TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALLERİ'NİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde Tunçbilek Termik Santrali'nin çalışma koşulları, daha önce Seyitömer Termik Santrali ile yapılan çalışmadaki aynı ısıl kapasitedeki kazana uygulanarak her iki santral verilerine göre dağılımlar ve hesaplanan değerler kıyaslanmıştır.

5.1 Seyitömer Termik Santrali'nin Teknik Özellikleri

Seyitömer Termik Santrali'nde ele alınan kazanın boyu Tunçbilek Termik Santrali'ndeki kazana göre yaklaşık 20 m daha kısadır. Kazanda kullanılan kömürün üst ve alt ısıl değerleri sırasıyla 8486 kJ/kg ve 7770 kj/kg'dır. Seyitömer Termik Santrali'ndeki kazanda kullanılan kömüre ait çabuk ve elementel analizler sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Seyitömer Termik Santrali'nde kullanılan kömürün çabuk analizi.

Madde Türü	Kütlesel Oran
Uçucu Madde	% 23,7
Sabit Karbon	% 12,2
Nem	% 29,1
Kül	% 35

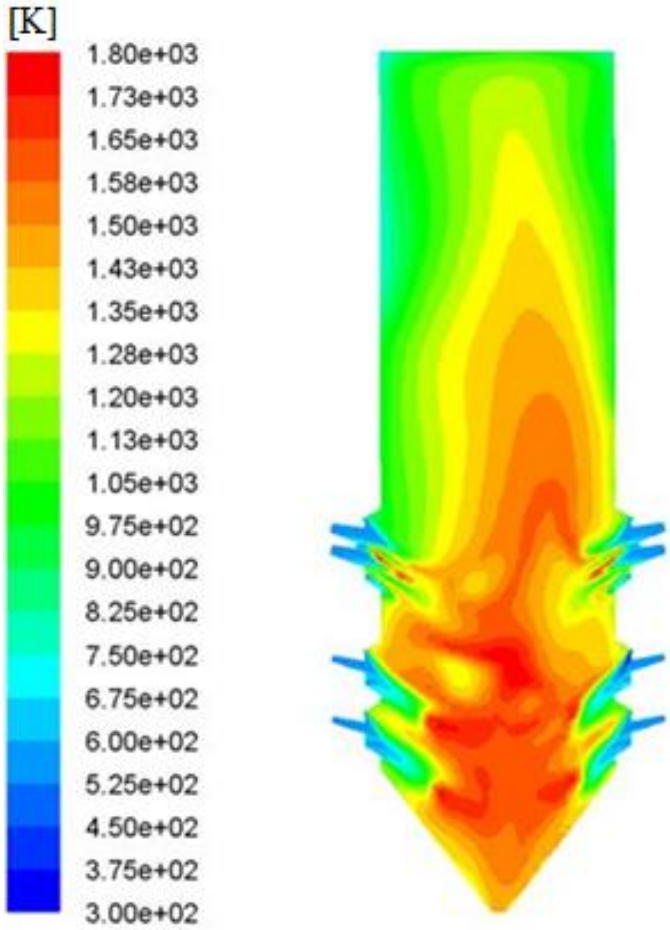
Çizelge 5.2 : Seyitömer Termik Santrali'nde kullanılan kömürün elementel analizi.

Madde Türü	Kütlesel Oran
Karbon	% 72
Oksijen	% 16,5
Hidrojen	% 7,9
Azot	% 1,8
Kükürt	% 1

Tunçbilek yöresine ait kömür analizleri ile karşılaştırıldığında elementel analizlerin benzer olduğu fakat çabuk analizlerde ve ısıl değerlerde belirgin faklılıkların olduğu görülmektedir.

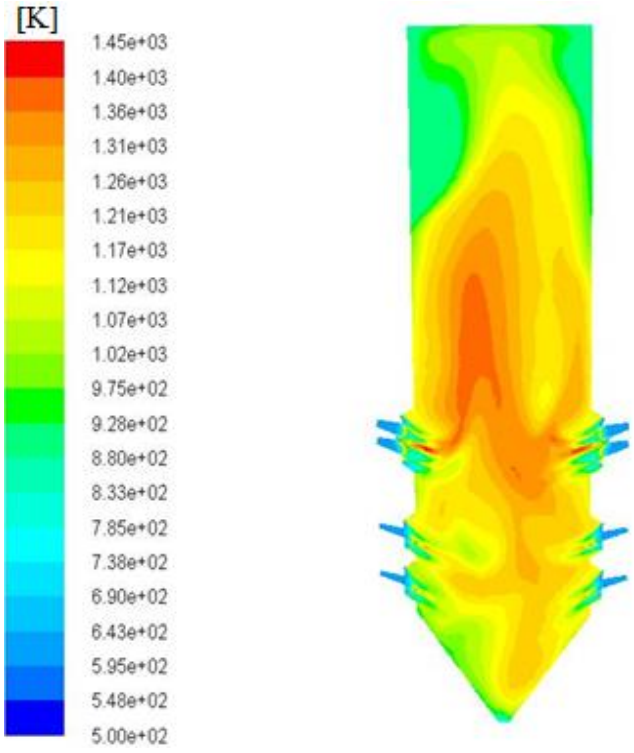
5.2 Kazan Boyunca Sıcaklık ve CO_2 Mol Oranı Dağılımlarının Kıyaslanması

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'deki sıcaklık dağılımları incelendiğinde her iki durumda da kazandaki en yüksek sıcaklık bölgesi istendiği şekilde kazan merkezinde oluşmaktadır.



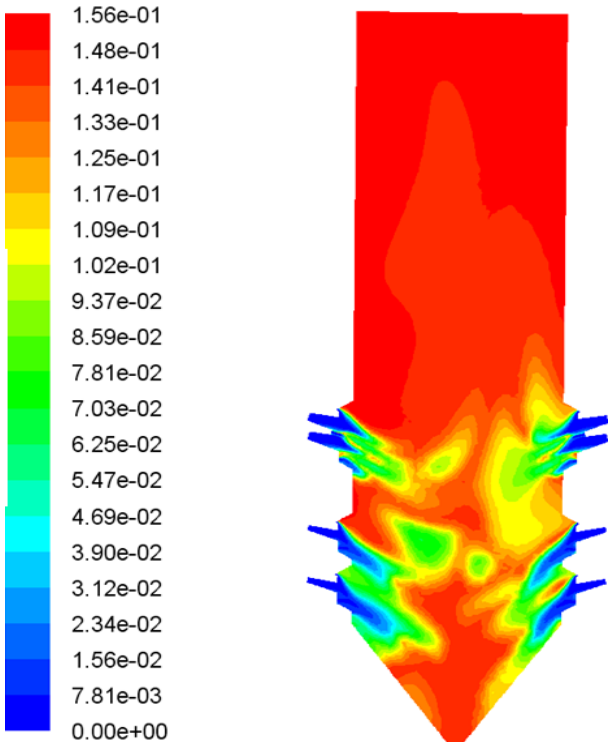
Şekil 5.1 : Seyitömer Termik Santrali koşullarında kazandaki sıcaklık dağılımı.

Kazan içerisindeki en yüksek sıcaklığın oluştuğu alev bölgesi Seyitömer Termik Santrali'nin çalışma koşullarında, istendiği gibi brülörlerin bulunduğu bölgede oluşurken; Tunçbilek Termik Santrali'nin çalışma koşullarında söz konusu bölgenin üstünde oluşmaktadır. Bu durum kullanılan kömürlerin özellikleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Tunçbilek bölgesine ait kömürün yanması geç olduğundan alev bölgesi, istenen bölgenin yukarısında oluşmaktadır.



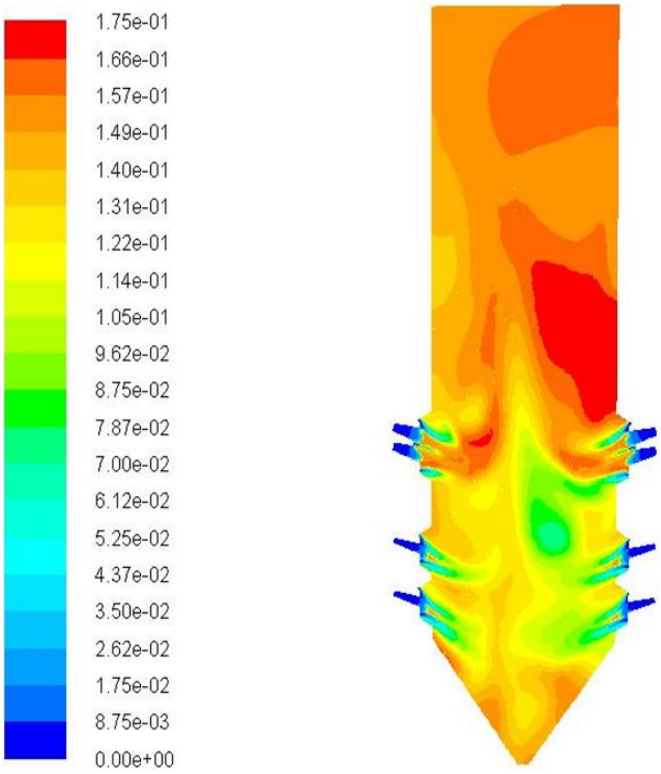
Şekil 5.2 : Tunçbilek Termik Santrali koşullarında kazandaki sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelendiğinde her iki çalışmada da brülör bölgesindeki CO_2 mol oranı dağılımlarının benzer bir eğilimde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3 : Seyitömer Termik Santrali koşullarında kazandaki CO_2 mol oranı dağılımı.

CO_2 miktarının temiz havanın püskürtüldüğü brülörler önünde en düşük seviyede olduğu, kazan merkezine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Her iki modelde de yanma brülör çıkışından itibaren başlamaktadır.



Şekil 5.4 : Tunçbilek Termik Santrali koşullarında kazandaki CO_2 mol oranı dağılımı.

5.3 Kazan Çıkışında Hesaplanan Sıcaklık ve Mol Oranı Değerleri

Seyitömer Termik Santrali'ne ait çalışma koşullarında kazan çıkışında hesaplanan sıcaklık değeri 1012 K iken bu değer Tunçbilek Termik Santrali için 1064 K'dir. Çizelge 5.3'te kazan çıkışında hesaplanan mol oranı değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : Her iki çalışma için kazan çıkışında hesaplanan mol oranı değerleri.

Tür	Seyitömer	Tunçbilek
CO_2	0,132	0,1615
O_2	0,049	0,014
CO	0,00167	0,00011

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuçlarla ilgili genel bir değerlendirme yapıldığında her iki modelin de kendi içinde uyumlu olduğu görülmüştür. Kazan içerisinde alev bölgesi ve hız vektörlerinin dağılımı beklenen şekilde oluşmaktadır.

Bu çalışmada sadece 3. grup brülörleri kapalı tutulmuştur. Santral verilerinden sağlanan ve karşılaştırmada kullanılan deneysel ölçümler ise uzun zaman aralığında çeşitli brülörlerin kapalı kalmasıyla elde edilmiş ortalama sıcaklık değerleridir. Bundan dolayı, sıcaklık kıyaslamalarında brülör bölgesinden uzaklaştıkça hataların azaldığı görülmektedir. Bu durumlar söz konusu olduğundan modelin çalışma şartlarına uygunluğu ile kesin bir değerlendirme yapmak mümkün değildir. Fakat yapılan karşılaştırma kazan içindeki sıcaklıkların mertebeleriyle ilgili bilgi sağlamaktadır. Sıcaklık mertebeleri göz önüne alındığında Durum 1'in çalışma şartlarına daha uygun olduğu görülmektedir.

Modeldeki sınır şartlarının kazan koşullarına daha uygun şekilde tanımlanıp kazan üzerindeki ölçümlerin doğru ve daha hassas bir şekilde yapılmasıyla doğruluğu kıyaslanabilir daha iyi bir model elde edilebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Xu, M., Azevedo, J.L.T., Carvalho, M.G.** (2000). Modelling of the combustion process and NOx emission in a utility boiler, *Fuel*, ***79***, 1611–1619.

[2] **Le Bris, T., Cadavid, F., Caillat, S., Pietrzyk, S., Blondin, J., Baudoin, B.** (2007). Coal combustion modelling of large power plant, for NOx abatement, *Fuel*, ***86***, 2213–2220.

[3] **Holkar, R. ve Hebbal, O.** (2013). CFD Anlysis of Pulverised-Coal Combustion of Burner Used In Furnace with Different Radiation Models, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, ***5***, 25-34.

[4] **Weber, R., Mancini, M., Mancini, N.S., Kupka, T.** (2013). On predicting the ash behaviour using Computational Fluid Dynamics, *Fuel Processing Technology*, ***105***, 113–128.

[5] **Eastwick, C.N., Pickering, S.J., Aroussi, A.** (1999). Comparisons of two commercial computational fluid dynamics codes in modelling pulverised coal combustion for a 2.5 MW burner, *Applied Mathematical Modelling*, ***23***, 437–446.

[6] **Vuthaluru, H., Gandhi, M.B., Vuthaluru, R., French, D., Shah, K.** (2009). CFD based prediction of erosion rate in large scale wall-fired boiler, *Applied Thermal Engineering*, ***42***, 90–100.

[7] **Modlinski, N.** (2010). Computational modeling of a utility boiler tangentially-fired furnace retrofitted with swirl burners, *Fuel Processing Technology*, ***91***, 1601–1608.

[8] **Cui, J., ve Purimetla, A.** (2009). CFD studies on burner secondary airflow, *Applied Mathematical Modelling*, ***33***, 1126–1140.

[9] **Kaynak, O.** (2013). E.Ü. A.Ş. Tunçbilek Termik Santrali İşletme Müdürlüğü kazan bakım mühendisi eğitim raporu, Kütahya, Türkiye.

[10] **Url-1** <http://www.mecheng.osu.edu/documentation/Fluent14.5/145/flu_th.pdf> , alındığı tarih: 20.04.2014.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Faruk ÖZDEMİR

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul – 09.11.1990

E-Posta: ozdemirfar@itu.edu.tr

Lisans: Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü (2012)

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (devam ediyor)