

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**BİYOKÜTLE/SIVI YAKIT VE BİYOKÜTLE/KÖMÜR KARIŞIMLARINDAN
ÜRETİLEN PELETLERİN KAZANDA YAKILMASININ
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

Bilal SUNGUR

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SAMSUN
2019**

Her hakkı saklıdır.

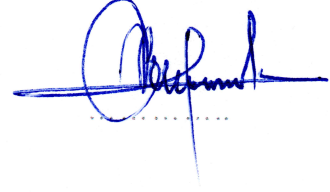
TEZ ONAYI

Bilal SUNGUR tarafından hazırlanan “Biyokütle/Sıvı Yakıt ve Biyokütle/Kömür Karışımlarından Üretilen Peletlerin Kazanda Yakılmasının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi” adlı tez çalışması 21/02/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman Prof. Dr. Bahattin TOPALOĞLU
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri

Başkan Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı



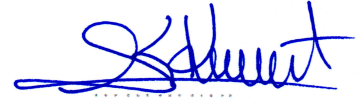
Üye Prof. Dr. Bahattin TOPALOĞLU
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye Doç. Dr. Hakan ÖZCAN
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye Dr. Öğr. Üyesi Kemal KUVVET
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Enerji Sist. Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye Dr. Öğr. Üyesi Burak KURŞUN
Amasya Üniversitesi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım. / /2019

Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

21/02/2019



Bilal SUNGUR

ÖZET

Doktora Tezi

BİYOKÜTLE/SIVI YAKIT VE BİYOKÜTLE/KÖMÜR KARIŞIMLARINDAN ÜRETİLEN PELETLERİN KAZANDA YAKILMASININ DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Bilal SUNGUR

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bahattin Topaloğlu

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütle ile ilgili çalışmalar son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Yapılan çalışmada evsel ısıtmada kullanılan biyokütle kaynaklı pelet yakıtlı kazanlar, deneysel ve nümerik olarak performans ve emisyon açısından incelenmiştir. Bu kapsamda ham pelet yakıtına dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı gibi sıvılar emdirilerek pelet yakıtının sıvıları emebilme kapasiteleri araştırılmıştır. Ham pelet, taş kömürü ve meşe mangal kömürüyle de belirli oranlarda karıştırılarak elde edilen yakıtlarla da incelemeler yapılmıştır. Hazırlanan bu karışımlar birinci geçişte duman borusuz (Kazan-1) ve birinci geçişte duman borulu (Kazan-2) olmak üzere iki farklı deney kazanlarında yakılarak kazan verimleri ve baca gazı emisyonları ölçülmüş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca, kazana eklenen duman borularının da kazan verimine ve emisyonlarına olan etkisi irdelenmiştir.

Nümerik çalışmalarda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olarak Fluent paket programı kullanılmıştır. Hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülans modeli olarak RNG k- ϵ , yanma modeli olarak Finite rate/Eddy dissipation modeli kullanılmıştır. Kazan geometrisine göre oluşan sıcaklık konturları, hız vektörleri, baca gazı sıcaklıkları ve verimler incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Nümerik hesaplama sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslanarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Pelet yakıtına sıvı emdirilmesiyle ilgili yapılan deneylerin sonucunda, pelet yakıtının (hacim değişimi olmaksızın) kütesel bazda %15 dizel, %17 biyodizel ve %19 ayçiçek yağı emdiği tespit edilmiştir. Birim hacim başına ısı değerini, dizel emdirilmesi sonucu %36.7, biyodizel emdirilmesi sonucu %36.9 ve ayçiçek yağı emdirilmesi sonucu %40.9 arttığı tespit edilmiştir. Her iki kazanla yapılan deneylerde, ham pelet yakıtın baca gazı sıcaklıklarının emdirilmiş peletlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kazanların çalıştırılmaya başladıkları andan itibaren dizel ve biyodizel emdirilmiş peletlerin, uçucu madde miktarlarının da ham pelete kıyasla daha fazla olması sebebiyle daha hızlı tutuştuğu görülmüştür. Ham pelet yakıtına kömür eklenmesiyle, nem, kül, sabit karbon ve ısı değeri miktarlarının arttığı, uçucu madde miktarının ise düştüğü belirlenmiştir. Ancak ham pelet-kömür karışımlarının, kazanda iyi yanmadığı ve yanmayı kötüleştirdiği tespit edilmiştir.

Şubat 2019, 177 sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyoyakıtlar, Yanma, Pelet, Sıvı emdirme, Pelet kazanları, Pelet kazanı emisyonları, Nümerik modelleme

ABSTRACT

Doctoral Dissertation

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE COMBUSTION OF PELLETS PRODUCED FROM BIOMASS/LIQUID FUEL AND BIOMASS/COAL MIXTURES IN A BOILER

Bilal SUNGUR

Ondokuz Mayıs University
Graduate School of Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bahattin Topaloğlu

Biomass as a renewable energy source has gained a great importance in recent years. In this study, performance and emissions of biomass-based pellet fuel boilers used in domestic heating were investigated experimentally and numerically. In this context, liquids such as diesel, biodiesel and sunflower oil were absorbed into the raw pellet in order to determine the absorption capacity of the pellet. Raw pellet fuels were also mixed with bituminous coal and charcoal at certain rate and investigations made. These mixtures were burned in two different test boilers which are named the Boiler-1 with no smoke tubes in the first pass and the Boiler-2 with smoke tubes in the first pass. Boiler efficiencies and flue gas emissions were measured and investigated comparatively. In addition, the effects of smoke tube addition to the boiler on the boiler efficiency and emissions were also examined.

Fluent package program was used as the Computational Fluid Dynamics (CFD) program in numerical studies. Calculations were realised in three dimensional conditions. As turbulence model RNG k- ϵ and as combustion model Finite rate/Eddy dissipation model were used. Temperature contours, velocity vectors, flue gas temperatures and efficiencies according to the boiler geometries were examined and results were evaluated. Numerical calculation results were compared with experimental results.

As a result of the experiments carried out on the liquid absorption of the pellet fuel, it was determined that the raw pellet fuel absorbed 15% diesel, 17% biodiesel and 19% sunflower oil on the mass basis (without volume change). It was determined that the heating value per unit volume increased by 36.7% as a result of diesel absorption, 36.9% as a result of biodiesel absorption and 40.9% as a result of sunflower oil absorption. In the experiments with both boilers, the flue gas temperature of the raw pellet fuel was determined to be lower than that of the liquid fuel absorbed pellets. In addition, diesel and biodiesel absorbed pellets ignited faster than the raw pellets because the amount of volatile matter of the absorbed pellets was higher than that of the raw pellet. With the addition of coal to the raw pellet fuel, the amount of moisture, ash, fixed carbon and heating values increased and the amount of volatile matter decreased. However, it was found that the raw pellet-coal mixtures did not burn well in the boiler and worsen the combustion.

February 2019, 177 pages

Keywords: Biofuels, Combustion, Pellet, Liquid absorption, Pellet boilers, Pellet boiler emissions, Numerical modelling

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bilgi ve birikimleriyle beni yönlendiren, akademik görevlerine rağmen bana zaman ayıran tez danışmanım Prof. Dr. Bahattin Topaloğlu'na teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmamla ilgili yapıcı ve yönlendirici önerilerde bulunan Prof. Dr. Bahtiyar Öztürk'e ve Doç. Dr. Hakan Özcan'a, tez çalışmam esnasında benimle fikir alışverişinde bulunan tüm diğer hocalarıma ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bize verdikleri desteklerden dolayı İfyıl firmasına, Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Genel Müdürlüğüne, Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Enerji Tarımı Laboratuvarında görevli olan Mahmut Dok'a, İfyıl firması genel müdürü Harun Reşit Özer'e, yapılan deneylerde yardımlarını esirgemeyen İbrahim Yıldırım'a, Fatih Yıldırım'a ve Timuçin Taşçı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında maddi ve manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim ve beni bu günlere getiren aileme ve çalışma süresince bana verdiği destekten ve gösterdiği sabırdan dolayı kıymetli eşim Demet Sungur'a teşekkürlerimi ve minnetimi sunarım.

Şubat 2019, Samsun

Bilal Sungur

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER	vi
KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Deneysel Çalışmalar	5
2.2. Nümerik Çalışmalar	8
2.3. Deneysel ve Nümerik Çalışmalar	11
3. GENEL BİLGİLER.....	17
3.1. Yakıtlar ve Özellikleri	17
3.1.1. Kömür	18
3.1.2. Pelet	20
3.1.3. Dizel.....	23
3.1.4. Biyodizel.....	24
3.1.5. Ayçiçek yağı	26
3.2. Katı ve Sıvı Yakıtların Yanma Hesapları	27
3.2.1. Stokiyometrik yanma hesapları	27
3.2.2. Termokimyasal denge ve reaksiyon kinetiği	31
3.3. Katı Yakıtlı Kazanlarda Verim	34
3.4. Pelet Yakıtlı Kazanlar ve Yakma Teknolojileri.....	38
3.4.1. Pelet besleme sistemleri.....	41
3.4.2. Pelet yakma hazneleri ve ocakları	41
3.4.3. Pelet ateşleme sistemleri.....	43
3.4.4. Kontrol teknikleri	43
3.4.5. Güvenlik	44
3.4.6. Bakım.....	44
3.4.7. Pelet yükleme sistemleri ve depoları	45
3.4.8. Baca	46
3.4.9. Emisyon düzenlemeleri	46
3.5. Pelet Yakıtlı Kazanların Piyasa Değerlendirmesi.....	48
3.6. Hava Kirlenici Emisyonlar	50
3.6.1. Partiküller (Tozlar)	50
3.6.2. Karbonmonoksit	51
3.6.3. Hidrokarbonlar.....	51
3.6.4. Kükürtoksitler	52
3.6.5. Azotoksitler	52
4. MATERYAL VE METOD	57
4.1. Deneysel Çalışma	57
4.1.1. Yakıt karışımlarının hazırlanması.....	57
4.1.1.1. Pelet yakıtına sıvıların emdirilme işlemi	58

4.1.1.2. Pelet-Kömür karışımlarının hazırlanması.....	59
4.1.2. Deney kazanları	63
4.1.2.1. Kazan-1 geometrisi.....	63
4.1.2.2. Kazan-2 geometrisi.....	65
4.1.3. Deney düzeneği	67
4.2. Nümerik Modelleme.....	70
4.2.1. Genel korunum denklemleri	70
4.2.2. Türbülans modelleri.....	72
4.2.3. FLUENT programında yanmanın modellenmesi	77
4.2.4. Pelet yanmasının modellenmesi	80
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	89
5.1. Deneysel Sonuçlar	89
5.1.1. Yakıt karışımlarının hazırlanması.....	89
5.1.1.1. Pelet yakıtına sıvı emdirme deney sonuçları	89
5.1.1.2. Pelet-Kömür karışımlarının hazırlanması ile ilgili deney sonuçları.....	92
5.1.2. Yakıtların karakterizasyon test sonuçları	93
5.1.3. Performans deney sonuçları.....	96
5.1.3.1. Kazan-1 sonuçları	96
5.1.3.2. Kazan-2 sonuçları	118
5.1.3.3. Kazan-1 ve Kazan-2'nin sonuçlarının karşılaştırılması.....	135
5.1.4. Tekno-Ekonomik Analiz	139
5.2. Nümerik Sonuçlar ve Deneysel Sonuçlarla Kıyaslama	141
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	163
KAYNAKLAR	169
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER

a	Reaksiyon derecesi
A	Arrhenius faktörü
b	Reaksiyon derecesi
$c_{p,exh}$	Baca gazı özgül ısısı
$c_{p,su}$	Suyun özgül ısısı
E_a	Aktivasyon enerjisi
η	Isıl verim
k	Reaksiyon hız sabiti
$k_{b,r}$	Geri reaksiyon hız sabiti
$k_{f,r}$	İleri reaksiyon hız sabiti
λ	Hava fazlalık katsayısı
v_i'	Reaktantların stokiyometrik katsayısı
v_i''	Ürünlerin stokiyometrik katsayısı
n	Mol sayısı
N	Toplam bileşen sayısı
q	Toplam ısı kaybı
q_a	Aralıklı çalışma kaybı
q_b	Baca kaybı
q_d	Cüruftan gelen duyulur ve gizli ısı kaybı
q_e	Eksik yanma kaybı
q_f	Küldeki yanmamış karbon kaybı
q_s	Sıcak cidar kaybı
q_u	Baca gazı içerisindeki yanmamış karbon kaybı
q_y	Yanmamış yakacak kaybı
$R_{i',k}$	Reaksiyon hızı
R_u	Üniversal gaz sabiti
T	Sıcaklık
T_{exh}	Baca gazı sıcaklığı
T_o	Ortam havası sıcaklığı

$V_{\text{exh,d}}$	Yanma sırasında oluşan kg yakıt başına kuru baca gazı hacmi
V_w	Baca gazındaki spesifik nem hacmi
X_i	i. kimyasal bileşenin moleküler özelliği
y_i	i. bileşenin konsantrasyonu



KISALTMALAR

A	Kül
C	Karbon
C _s	Sabit karbon
C _u	Uçucu karbon
Cl	Klor
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
H	Hidrojen
H _h	Üst ısı değer
H _{min}	Stokiyometrik (minimum) hava ihtiyacı
H _u	Alt ısı değer
HC	Hidrokarbon
HP _x	Kütlesel olarak %x ham pelet miktarı
[i]	Baca gazı içerisindeki i bileşenin konsantrasyonu
MK _x	Kütlesel olarak %x mangal kömürü miktarı
N	Azot
NO _x	Azotoksit
O _{min}	Stokiyometrik (minimum) oksijen ihtiyacı
PM	Partikül madde
S	Kükürt
SO _x	Kükürtoksit
TK _x	Kütlesel olarak %x taş kömürü miktarı
UHC	Yanmamış hidrokarbon
W	Nem

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Biyokütle üretim, işleme, yakıtları ve dönüşümü ile ilgili bilgiler... ..	18
Şekil 3.2. Kömürlerin sınıflandırması... ..	19
Şekil 3.3. Pelet yakıtı... ..	21
Şekil 3.4. Pelet üretim aşamaları... ..	21
Şekil 3.5. Katı yakıt içeriği... ..	29
Şekil 3.6. Pelet yakıt yanma aşamaları... ..	33
Şekil 3.7. Pelet yakıtlı kazan görünümü... ..	39
Şekil 3.8. Pelet yakıtlı soba görünümü... ..	40
Şekil 3.9. Pelet yakıtların kazana veya ocağa beslenme şekilleri.....	41
Şekil 3.10. Pelet yakıtı yakma teknolojileri	43
Şekil 3.11. Farklı tip odun yakıtlı kazanların emisyonları, A: Odun kütüğü kazanı, doğal çekişli, 20-50 kW; B: Odun kütüğü kazanı, mikroişlemci kontrollü hava beslemeli, 20-50 kW; C: Odun yongası kazanı, 40-70 kW; D: Pelet kazanı, 15 kW	47
Şekil 4.1. Ham pelet yakıtı sıvı emdirme işlemi özet gösterimi	58
Şekil 4.2. Pelet üretim makinesi	59
Şekil 4.3. Toz karışımlar (solda) ve pelet hali (sağda)	60
Şekil 4.4. Pelet yapımında kullanılan disk ve röle	60
Şekil 4.5. Odun-Kömür karışımlarından elde edilen peletlerin üretim sürecinin özet gösterimi	61
Şekil 4.6. İKA C200 bomba kalorimetresi	62
Şekil 4.7. Elementel analiz cihazı	63
Şekil 4.8. Kazan-1 geometrisi	64
Şekil 4.9. Kazan-2 geometrisi	66
Şekil 4.10. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	67
Şekil 4.11. Kazan ön kapağında termoelemanların yerleşim pozisyonları şematik gösterimi	68
Şekil 4.12. Yanma odasında sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı kesitler	68
Şekil 4.13. Kazan-1 geometrisi ön ve yan kesit görüntüleri, ölçüleri ve sınır adlandırmaları.....	81
Şekil 4.14. Birinci duman borusuz kazanın (Kazan-1) izometrik görünümü.....	83
Şekil 4.15. Gaz geçiş yolları; kırmızı ok: Yanma odasından çıkan gaz, mavi ok : İkincil duman borusuna giren gaz (Kazan-1)	83
Şekil 4.16. Kazan-2'nin izometrik görünümü	84
Şekil 4.17. Gaz geçiş yolları; kırmızı ok: Birinci duman borusundan çıkan gaz, mavi ok : İkinci duman borusuna giren gaz (Kazan-2)	84
Şekil 4.18. Helisel türbülator geometrisi.....	85
Şekil 4.19. Kazan-1 için kullanılan farklı ağ yapılarının önden görünümü	86
Şekil 4.20. Kazan-1 ağ yapısı izometrik görünümü	87
Şekil 4.21. Kazan-2 ağ yapısı izometrik görünümü	87
Şekil 5.1. Deneyde kullanılan peletler: a) ham pelet, b) biyodizel emdirilme sonucu 0. saniye, c) biyodizel emdirilme sonucu 30. saniye, d) biyodizel emdirilme sonucu 60. saniye, e) biyodizel emdirilme sonucu 120. saniye, ve f) biyodizel emdirilme sonucu 300. saniye.....	90
Şekil 5.2. Ham pelet ve emdirilmiş pelet görüntüleri	90

Şekil 5.3. Zamana göre kütle değişim miktarları ...	91
Şekil 5.4. Ham pelet-Kömür karışımlarının görüntüsü ...	93
Şekil 5.5. Zamanla ön kısımda (kapakta) ölçülen sıcaklık dağılımı (Kazan-1)...	97
Şekil 5.6. Kararlı halde ön kısımda (kapakta) ölçülen sıcaklık dağılımı (Kazan-1) ...	97
Şekil 5.7. Kararlı haldeki üst kısımda ölçülen sıcaklık dağılımı (Kazan-1).....	98
Şekil 5.8. Ham pelet ve emdirilmiş peletler için gözetleme camından çekilmiş alev görüntüleri (Kazan-1)	98
Şekil 5.9. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası merkez kesiti sıcaklık konturları (Kazan-1).....	100
Şekil 5.10. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası arka kesiti sıcaklık konturları (Kazan-1).....	101
Şekil 5.11. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası ön kesiti sıcaklık konturları (Kazan-1)	102
Şekil 5.12. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası ön, merkez ve arka kesit sıcaklık konturları (Kazan-1)	103
Şekil 5.13. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama baca gazı sıcaklıkları (Kazan-1)	104
Şekil 5.14. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama termal verimleri (Kazan-1)	105
Şekil 5.15. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama O ₂ ve CO ₂ konsantrasyonları (Kazan-1).....	107
Şekil 5.16. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama NO _x ve CO konsantrasyonları (Kazan-1)	108
Şekil 5.17. Ham pelet-Kömür karışımlarının gözetleme camından çekilmiş alev görüntüleri (Kazan-1)	109
Şekil 5.18. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan yanma odası merkez kesitindeki sıcaklık konturları (Kazan-1)	111
Şekil 5.19. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan yanma odası ön kesitindeki sıcaklık konturları (Kazan-1)	112
Şekil 5.20. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan yanma odası arka kesitindeki sıcaklık konturları (Kazan-1)	113
Şekil 5.21. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan ortalama baca gazı sıcaklıkları (Kazan-1).....	114
Şekil 5.22. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan ortalama termal verimleri (Kazan-1)	115
Şekil 5.23. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan ortalama O ₂ ve CO ₂ konsantrasyonları (Kazan-1).....	117
Şekil 5.24. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan ortalama NO _x ve CO konsantrasyonları (Kazan-1)	118
Şekil 5.25. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı baca gazı sıcaklık değişimi (Kazan-2).....	119
Şekil 5.26. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı ısı verim değişimi (Kazan-2)	120
Şekil 5.27. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı CO ₂ değişimi (Kazan-2)	121
Şekil 5.28. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı NO _x değişimi (Kazan-2)	122
Şekil 5.29. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı CO değişimi (Kazan-2)	123

Şekil 5.30. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı O ₂ değişimi (Kazan-2)	124
Şekil 5.31. Ham pelet ve biyodizel emdirilmiş pelet alev görüntüleri (Kazan-2)	125
Şekil 5.32. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası merkez kesiti sıcaklık konturları (Kazan-2)	127
Şekil 5.33. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası arka kesiti sıcaklık konturları (Kazan-2)	128
Şekil 5.34. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası ön kesiti sıcaklık konturları (Kazan-2)	129
Şekil 5.35. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası ön, merkez ve arka kesit sıcaklık konturları (Kazan-2)	130
Şekil 5.36. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu suya olan ısı geçiş miktarları (Kazan-2)	131
Şekil 5.37. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama baca gazı sıcaklıkları (Kazan-2)	132
Şekil 5.38. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama termal verimleri (Kazan-2)	133
Şekil 5.39. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama O ₂ ve CO ₂ konsantrasyonları (Kazan-2)	134
Şekil 5.40. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama NO _x ve CO konsantrasyonları (Kazan-2)	135
Şekil 5.41. Kazan tiplerine göre oluşan baca gazı sıcaklıkları (Kazan-2)	136
Şekil 5.42. Kazan tiplerine göre oluşan termal verimler (Kazan-2)	136
Şekil 5.43. Kazan tiplerine göre oluşan O ₂ konsantrasyonları (Kazan-2)	137
Şekil 5.44. Kazan tiplerine göre oluşan CO ₂ konsantrasyonları (Kazan-2)	137
Şekil 5.45. Kazan tiplerine göre oluşan NO _x konsantrasyonları (Kazan-2)	138
Şekil 5.46. Kazan tiplerine göre oluşan CO konsantrasyonları (Kazan-2)	139
Şekil 5.47. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrileri için deneysel ve nümerik yanma odası merkez kesit sıcaklıkları	142
Şekil 5.48. Kazan-1 geometrisinde ham pelet yanması sonucu elde edilen hız vektörleri, a) izometrik görünüş, b) hazne merkez kesit görüntüsü, c) ikinci geçiş ön duman borusu merkez kesit, d) ikinci geçiş arka duman borusu merkez kesit	143
Şekil 5.49. Kazan-1 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-taş kömürü karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları	145
Şekil 5.50. Kazan-1 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-mangal kömürü karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları	146
Şekil 5.51. Kazan-1 geometrisinde ham pelet ve dizel emdirilmiş pelet karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları	147
Şekil 5.52. Kazan-2 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-taş kömürü karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları	148
Şekil 5.53. Kazan-2 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-mangal kömürü karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları	148
Şekil 5.54. Kazan-2 geometrisinde ham pelet ve dizel emdirilmiş pelet karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık	

konturları	149
Şekil 5.55. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde ham pelet yanması sonucu elde edilen hız vektörleri, a) izometrik görünüş, b) hazne merkez kesit görüntüsü	150
Şekil 5.56. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklık konturları, a) izometrik görünüş, b) hazne merkez kesit görüntüsü, c) ikinci geçiş arka duman borusu merkez kesit.....	151
Şekil 5.57. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinin baca gazı sıcaklıklarının nümerik kıyaslanması	152
Şekil 5.58. Kazan-1 geometrisinde ham pelet (HP100) yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar ..	153
Şekil 5.59. Kazan-1 geometrisinde dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar ..	154
Şekil 5.60. Kazan-2 geometrisinde ham pelet (HP100) yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar ..	155
Şekil 5.61. Kazan-2 geometrisinde dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar ..	157
Şekil 5.62. Kazan-1 geometrisinin baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik kıyaslanması	158

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1. Yakıtların sınıflandırılması... ..	17
Çizelge 3.2. Çeşitli pelet yakıtı analizleri.....	22
Çizelge 3.3. Odun peleti standartları.....	23
Çizelge 3.4. Dizel yakıtı No.2 özellikleri (ASTM D 975)	24
Çizelge 3.5. Yağ asidi metil esterlerine ait TSE 14214 standardının belirlediği genel özellikler	25
Çizelge 3.6. Çeşitli yağlardan elde edilen biyodizellerin yakıt özellikleri.....	25
Çizelge 3.7. Bazı bitkisel yağların yakıt özellikleri	27
Çizelge 3.8. Yakıtların reaksiyon ısıları	28
Çizelge 3.9. Elementlerin mol kütle, reaksiyon, spesifik oksijen ihtiyacı ve reaksiyon ürün miktarları	30
Çizelge 3.10. Emisyon sınır değerleri	47
Çizelge 3.11. Piyasada üretilen bazı pelet kazanlarının teknik verileri.....	49
Çizelge 4.1. IKA C200 bomba kalorimetre cihazı teknik özellikleri.....	62
Çizelge 4.2. Kazan-1 teknik özellikleri	65
Çizelge 4.3. Kazan-2 teknik özellikleri	67
Çizelge 4.4. TESTO 350 XL gaz analiz cihazı ve K tipi termoelemanın teknik özellikleri.....	69
Çizelge 4.5. Kartezyen koordinatlar için eşitlikler.....	71
Çizelge 4.6. Standart k-ε modelde kullanılan sabitler ve değerleri.....	75
Çizelge 4.7. RNG k-ε modelde kullanılan sabitler ve değerleri.....	77
Çizelge 4.8. Pelet yakıt özellikleri.....	82
Çizelge 5.1. Pelet yakıt özellikleri.....	93
Çizelge 5.2. Sıvı yakıtların karakterizasyon test sonuçları	94
Çizelge 5.3. Emdirilmiş pelet yakıt özellik sonuçları	94
Çizelge 5.4. Taş kömürü ve mangal kömürünün yakıt özellik sonuçları... ..	95
Çizelge 5.5. Pelet-kömür karışımlarının yakıt özellik sonuçları... ..	96
Çizelge 5.6. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu kalorimetrede ölçülen ortalama sıcaklıkları (Kazan-1).....	106
Çizelge 5.7. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu kalorimetrede ölçülen ortalama sıcaklıklar (Kazan-1).....	116
Çizelge 5.8. Ham pelet ve emdirilmiş peletlerin yükleme durumlarına geçiş süreleri (Kazan-2).....	118
Çizelge 5.9. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu kalorimetrede ölçülen ortalama sıcaklıkları (Kazan-2).....	132
Çizelge 5.10. Yakıt tipi ve kazan verimine göre yapılan tekno-ekonomik analiz.....	140
Çizelge 5.11. Kazan-1 için karşılaştırılan ağ yapıları	141
Çizelge 5.12. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinin baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik türbülans modelleriyle kıyaslanması.....	141
Çizelge 5.13. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinin baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik kıyaslanması.....	159

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte enerji tüketimi giderek artmaktadır. Dünyadaki enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımının 2011-2015 yıllarının ortalaması alınarak yapılan araştırmada en fazla tüketime petrol (%33) sahipken, bunu sırasıyla kömür (%30), doğalgaz (%24), hidrolik (%7), nükleer (%4) ve diğer yenilenebilir kaynakları (%2) takip etmektedir (Sungur vd, 2017). Geçmişte ve günümüzde geniş çaplı bir kullanım alanına sahip olan fosil enerji kaynaklarının (petrol, kömür, doğalgaz gibi) yakın bir gelecekte enerji ihtiyacını karşılayamayacağı ve bu nedenle bir enerji sıkıntısının yaşanacağı düşünülmektedir. Belirtilen sıkıntıların yaşanmaması için yenilenemeyen kaynaklarla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının da kullanıma sunulması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütle ile ilgili çalışmalar özellikle son yıllarda büyük hız kazanmıştır. Biyokütlenin ekonomik ve çevresel açıdan avantajları biyoenerji konusuna ilgiyi giderek arttırmaktadır. Dünyada dördüncü en büyük enerji kaynağını oluşturması yönüyle de biyokütle, önemli bir enerji kaynağı konumundadır. Gelişmiş ülkelerin birçoğu biyoenerjiyi geleceğin temel enerji kaynağı olarak görmektedir. Örneğin; AB ülkeleri enerji tüketiminin biyokütleden karşılanması ile ilgili olarak 2020 yılı için %20 gibi bir hedef koymuşlardır (Sungur vd, 2018). Biyokütle, ısınma ve sanayi amaçlı yakma sistemlerinde kullanılabilir. Genellikle konutlarda ısınma amaçlı olarak kullanılan kazanlar, enerji gereksinimi olan birçok sanayi dalında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Kazanlarda enerji verimliliği, yanmanın mükemmelliğine ve yanma sonucu ortaya çıkan ısının aracı akışkana (genellikle suya) transfer miktarına bağlıdır. Bununla birlikte baca gazı emisyonları ise yine yanmanın kalitesine, brülör tasarımına, yakıt içerisindeki kirleticilerin oranına ve yakma sisteminin işletme şartlarına bağlıdır.

Yanma problemlerinin çözümünde, analitik, deneysel ve nümerik yöntemler uygulanabilir. Bu yöntemler ayrı ayrı kullanılabilirdiği gibi, birlikte de kullanılabilirler. Deneysel uygulamalarda yanma odası içerisine yerleştirilen termoelemanlar ile sıcaklıklar ölçülerek yanma odası sıcaklık dağılımları elde edilebilir, baca gazı emisyonları ölçülebilir ve sonuçlar değerlendirilir. Ancak

deneysel çalışmaların zor ve yüksek maliyetli olması sebebiyle, nümerik yöntemler oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır.

Yanma olayında kütle, momentum ve enerji transferleri aynı anda gerçekleşir. Süreklilik, momentum, enerji ve türlerin korunumu gibi kısmi diferansiyel denklemleri çözmek bilgisayar programı yardımı olmadan basit haller dışında neredeyse imkansızdır. Uygulamada çok sayıda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği programları mevcuttur. FLUENT paket programı da bunlardan bir tanesidir. FLUENT ısı transferi, akışkan hareketleri, partikül hareketleri, damlacık hareketleri, yanma gibi çok değişik akışkan proseslerini modelleyebilmektedir. FLUENT kısmi diferansiyel denklemleri sonlu hacimler metoduna dayanarak cebirsel denklem takımına dönüştürmekte ve çözmektedir.

Literatürdeki deneysel çalışmalar genellikle, farklı biyokütle atıklarının harmanlanarak peletlenmesi ve yanması, farklı işletme şartlarında yanmanın incelenmesi, yanma haznesinde sekonder hava etkisinin incelenmesi, lambda sensörünün kullanılması ile en uygun yakıt/hava oranının sağlanması üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmaların büyük kısmında yanma odası sıcaklıkları genellikle ölçülmemiş ve göz ardı edilmiştir. Nümerik çalışmalarda, genellikle tek bir parçacığın yanması kod yazılarak modellenmeye çalışılmıştır. Kazanlarda katı yakıt yanmasında ise oluşan yanmayı mevcut programlara eklemeler yaparak, yatak içi ve yatak dışı olarak iki ayrı kısımda modellemiştir.

Ham pelet yakıtının ısı kapasitesinin artırılması için yeni uygulamalar, mevcut paket programlarla çeşitli yaklaşımlar yaparak katı yakıt yanmasının nümerik modellenmesi, kazan içerisinde gaz geçiş yollarının kazan verimine etkisinin incelenmesi gibi alanlarda eksiklik olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ham pelet yakıtına dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı gibi sıvılar emdirilerek ham pelet yakıtının ısı değerleri arttırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca ham peletle taş kömürü ve meşe mangal kömürü belirli oranlarda karıştırılarak da ısı değeri arttırılmaya çalışılmıştır. Hazırlanan bu karışımlar iki farklı deney kazanında yakılarak yanma karakteristikleri ve baca gazı emisyonları irdelenmiş ve karşılaştırmalı olarak incelemeler yapılmıştır. Ayrıca yanma odası içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları ölçülerek yanma karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Özetlemek gerekirse tez kapsamında, ısıtma uygulamalarında evsel kullanıma uygun pelet kazanlarında kömürlerin ve/veya biyokütle (pelet) kaynaklarının,

1. yanma verimlerinin iyileştirilmesi,
2. pelet yakıtına çeşitli sıvı yakıtlar (dizel, biyodizel, atık bitkisel yağ gibi) emdirilmesi ve yeni bir alternatif yakıt elde edilerek kazanda yanma karakteristiklerinin incelenmesi,
3. pelet ve kömür yakıtlarının toz hale getirilip birbirleriyle değişik oranlarda karıştırılarak elde edilen yeni kompozit yakıtın yanma analizleri,
4. farklı geometriye sahip evsel kullanıma uygun iki pelet kazanının birbiriyle kıyaslanarak avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi,
5. pelet yakıtlı kazanda oluşan yanmanın mevcut paket programlarında yeni yaklaşımlar yaparak nümerik modellenmesi ve elde edilen nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçların kıyaslanması hedeflenmiştir.

Tezin amacı, ülkemizin enerji kaynakları içinde önemli bir paya sahip olan biyokütlenin ve kömürün değerlendirilebilmesi için uygun alternatif yakıtların elde edilmesi, kazanın yanma veriminin arttırılması ve nümerik olarak pelet yakıt yanmasının modellenerek deneysel sonuçlarla uyumluluğunun gözlemlenmesi olarak özetlenebilir. Deneyler evsel tip kullanımına uygun iki farklı pelet kazanında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma teknik, ekonomik ve çevresel açıdan biyokütle, sıvı yakıt ve kömür kaynaklarının etkin kullanımının sağlanmasını destekleyecek bir çalışmadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmanın kapsamı dikkate alınarak yapılan literatür taraması, kazanlar, pelet yakıtı, yanmanın modellenmesi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, katı yakıtların yanmasının nümerik modellenmesi konularında yapılmıştır. Literatürde bu konularda birçok çalışma ve araştırma mevcuttur. Bu bölümde literatürdeki çalışmalar deneysel, nümerik, deneysel ve nümerik olmak üzere üçe ayrılmıştır ve bir kısmı aşağıda sunulmuştur.

2.1. Deneysel Çalışmalar

Literatürdeki deneysel çalışmalar genellikle; farklı biyokütle atıklarının harmanlanarak peletlenmesi ve yanması, mümkün olduğunca baca gazı sıcaklıklarının ve zararlı baca gazı emisyonlarının azaltılması, verimliliğin artırılması ve lambda sensörünün kullanılması ile en uygun yakıt/hava oranının sağlanması üzerine odaklanmıştır (Arranz vd, 2015; Carlon vd, 2015; Carvalho vd, 2013; Dias vd, 2004; Eskilsson vd, 2004; Fernandes ve Costa, 2012; Forbes vd, 2014; González vd, 2006; González vd, 2004; Johansson vd, 2004; Johansson vd, 2003; Kjällstrand ve Olsson, 2004; Liu vd, 2013; Miranda vd, 2012; Morán vd, 2006; Nussbaumer, 1997; Olsson, 2006; Olsson ve Kjällstrand, 2004; Purvis vd, 2000; Rabaçal vd, 2013; Roy vd, 2013; Shen vd, 2012; Sikanen ve Teemu, 2012; Sippula vd, 2007; Verma vd, 2012; Wiinikka ve Gebart, 2004; Zamorano vd, 2011; Zandekis vd, 2010). Yapılan çalışmaların bir kısmı detaylandırılarak aşağıda verilmiştir.

González vd (2004) çalışmalarında 11.6 kW'lık kazanda farklı atıkların yanma proseslerini optimize etmeyi amaçlamışlardır. Pelet yakıtı olarak üç adet biyokütle atığından elde edilen peletleri (domates, zeytin çekirdeği ve kenger) ve orman peletini kullanmışlardır. Atık tipi, yakıt debisi, baca çekişi ve atık karışımlarının yanma parametrelerine etkilerini çalışmışlardır. Üç atığın davranışlarının orman peletine benzediğini belirtmişlerdir. Kazan verimlerinin domates, orman, zeytin çekirdeği ve kenger peletleri için sırasıyla %91, %90.5, %89.7 ve %91.6 olduğunu belirtmişlerdir. Optimum atık karışımının domates (%75) ve orman (%25) peletlerinden elde edildiğini ve bu durumda kazan veriminin %92.4 olduğunu

belirtmişlerdir. Carvalho vd (2013) çalışmalarında 15 kW'lık pelet kazanında farklı biyokütle yakıtlarından (budanmış üzüm bağı, saman, ekin sapı, miscanthus, darı, sorgum, buğday kepeği, odun + %5 çavdar unu) elde edilen peletlerin teknik ve çevresel performanslarını değerlendirmişlerdir. Kazan verimlerinin tüm pelet yakıtlarında birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini ve %90 civarında olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca verim kaybını engellemek için duman borularında sık sık temizlik yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Zandekis vd (2010), 15 kW'lık alttan beslemeli pelet kazanında baca gazı resirkülasyonunu ve ikincil havanın NO_x emisyonlarına olan etkisini araştırmışlardır. Sadece baca gazı resirkülasyon işleminin, NO_x miktarını %21 oranında düşürdüğünü belirtmişlerdir. Roy vd (2013), 7-32 kW'lık pelet kazanında odun peleti ve çim peletinin yanma verimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca yakıt özelliklerini, gaz emisyonlarını ve ısı verimleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, çim peletlerinin, uygun koşullar altında yakıldıklarında, diğer odun peletlerine benzer performans gösterdiğini ve benzer emisyonlar yaydığını belirtmişlerdir. Morán vd (2006), 25 kW'lık sabit yataklı pelet ocaklı pilot bir tesiste, hava ön ısıtılmasının optimizasyonunu, ikincil hava miktarını ve baca gazı resirkülasyonunun emisyonlara olan etkisini incelemişlerdir. İkincil hava ve baca gazı resirkülasyonunun, CO emisyonlarını azalttığını ifade etmişlerdir. Rabaçal vd (2013), 22 kW'lık evsel bir pelet kazanında çeşitli peletlerin (çam, endüstriyel odun atıkları, şeftali çekirdeği gibi) yanma performansını ve emisyon karakteristiklerini araştırmışlardır. Çam peletlerinin endüstriyel atıklardan ve şeftali çekirdeğinden elde edilen peletlerden daha iyi emisyon özelliklerine sahip olduklarını bulmuşlardır. Farklı biyokütleden üretilen pelet yakıtlarının karşılaştırılmasına ilişkin çok sayıda benzer çalışma vardır (Arranz vd, 2015; Dias vd, 2004; Forbes vd, 2014; González vd, 2006; Miranda vd, 2012; Olsson, 2006; Sippula vd, 2007; Verma vd, 2012; Zamorano vd, 2011).

Sikanen ve Teemu (2012) pelet uzunluğunun yanmaya olan etkisini araştırmışlardır. Pelet uzunluğunun 5.8 mm'den 13.1 mm'ye yükselmesinin ortalama yanma sıcaklığını %31, baca gazı sıcaklığını ise %25 düşürdüğünü gözlemlemişlerdir.

Liu vd (2013) evsel tip 50 kW'lık alttan beslemeli pelet kazanında birincil ve ikincil hava oranlarının, ikincil hava giriş pozisyonunun NO_x emisyonlarına olan etkisini incelemişlerdir. Hava giriş oranlarının ve ikincil hava girişlerinin

konumunun NO_x emisyonlarını önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Wiinikka ve Gebart (2004) tasarım parametrelerinin (birincil hava miktarı, toplam hava miktarı ve yanma odasındaki dönen (swirl) akış büyüklüğü) baca gazı ve partikül emisyonlarına olan etkisini belirlemek için çalışmışlardır. Sonuç olarak, toplam partikül emisyonları üzerindeki en güçlü etkinin toplam hava miktarı olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, yakıcının çok düşük CO emisyonu yaydığını belirtmişlerdir. Birincil ve ikincil havaların oranlarının optimizasyonu ve NO_x emisyonlarının azaltılmasına yönelik literatürde benzer çalışmalar mevcuttur (Eskilsson vd, 2004; Johansson vd, 2004; Nussbaumer, 1997; Purvis vd, 2000).

Carlson vd (2015) Avusturya'daki konut binalarına yerleştirilen küçük ölçekli pelet kazanlarında laboratuvar ve gerçek kullanım sonucu oluşan verimlilikleri karşılaştırmışlardır. Deneylede nominal kapasitesi 6 kW, 9.9 kW, 12 kW, 21 kW ve 26 kW olan kazanlar kullanmışlardır. Gerçek kullanımda yıllık verimliliklerin %65-85 aralığında olduğunu ve laboratuvar testlerinde verimlilik değerlerinin yaklaşık %90-94 olduğunu belirtmişlerdir.

Johansson vd (2003) çalışmalarında odun peleti ve odun briketinin pelet sobasında (6 kW), iki adet pelet yakıcısında (11 kW ve 22 kW) ve iki adet merkezi ısıtmalı kazanda (2 MW) yanması sonucu oluşan partikülleri incelemişlerdir. Hava fazlalığının partikül emisyonlarının boyutlarını etkilediğini, düşük hava fazlalığında daha büyük partiküllerin salındığını tespit etmişlerdir. Kjällstrand ve Olsson (2004) çalışmalarında küçük ölçekli yakıcılarda odun veya pelet kullanımının partikül emisyonlarına olan etkisini incelemişlerdir. Deneylede 20 kW'lık odun sobası, 7 kW'lık pelet sobası, düşük ısı güçlü pelet yakıcıları, 20 kW'lık pelet yakıcısı ve 30 kW'lık odun kazanı kullanmışlardır. Odun yakıtı yerine pelet yakıtı kullanımının emisyonları azalttığını belirtmişlerdir. Olsson ve Kjällstrand (2004) çalışmalarında 10 kW ve 20 kW'lık pelet yakıcısında, 4 kW ve 7 kW'lık pelet sobasında ve 8 kW ve 25 kW'lık pelet kazanında yanma sonucu oluşan emisyonları incelemişlerdir. Pelet emisyonlarının yakıcılarda ve kazanlarda iyi sonuçlar verdiğini, ancak bu konuda daha fazla çalışmanın yapılabileceğini belirtmişlerdir. Fernandes ve Costa (2012), farklı ısı yüklemelerde çam peletinin yanma performansını ve özellikle partikül madde emisyonlarını incelemişlerdir. Partikül madde boyutlarının ısı yüklemeye beraber değiştiğini ve 2.5 µm'nin altında ve 10 µm'nin üzerinde olduğunu belirtmişlerdir.

Daha önce belirtildiği gibi, çalışmalar ağırlıklı olarak farklı biyokütlelerden üretilen peletler ve bunların dayanıklılık, yanma karakteristikleri ve partikül madde emisyonlarının karşılaştırılması üzerine odaklanmıştır. Pelet yakıtına sıvı yakıt emdirilmesi ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak sıvı emdirilmesi ile alakalı başka alanlarda çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, petrol sızıntı kazaları ve sıvı organik maddelerin sızıntısı, sağlığı tehdit eden çevresel sorunlardır (Feng vd, 2004; Yuan vd, 2008). Bu nedenle araştırmacılar sudan yağın ve toksik organik kirleticilerin uzaklaştırılması ve nakliye sürecinde ortaya çıkan petrol sızıntılarını önlemek için etkili materyaller bulmayı hedeflemişlerdir. Bu kapsamda yağ emiliminde köpükler, süngerler ve aerojeller biçimindeki çeşitli gözenekli malzemeler kullanılmıştır (Calcagnile vd, 2012; Sun vd, 2013; Zhao vd, 2014).

Ayrıca, birincil yakıtla (kömür, doğalgaz, dizel gibi) yenilenebilir yakıtların (biyokütle gibi) birlikte yakılması araştırmacılar tarafından halen üzerinde çalışılan bir konudur (Kopczyński vd, 2017; Muthuraman vd, 2010; Sami vd, 2001; Skodras vd, 2002). Bu çalışmalar genellikle biyokütleyi kömürle birlikte yakarak (co-combustion) zararlı emisyonları azaltmaya odaklanmıştır. Biyokütle, yüksek kükürtlü kömürlerle birlikte yakıldığında biyokütleden elde edilen alkali kül ayrıca yanma sırasında üretilen SO₂'nin bir kısmını da yakalayabilir (Yin vd, 2008). Kömürün ve biyokütlenin eşzamanlı olarak yanması, kömürle kıyaslandığında daha düşük karbondioksit yayar ve bu yanmadan kaynaklanan kükürt oksit (SO_x) ve azot oksit (NO_x) emisyonları daha düşüktür (Hein ve Bemtgen, 1998; Spliethoff ve Hein, 1998; Sweeten vd, 2003). Ayrıca ekonomi, yakıt fiyatı dengeleme, yakıt esnekliği ve kömür yakıtlı tesislerin biyokütle ile uyumlu hale getirilmesinin düşük maliyetli olması gibi avantajları vardır (Baxter, 2005). Biyokütle ve kömür arasındaki en büyük farkın uçucu içeriği ve sabit karbon miktarı olduğu söylenebilir. Biyokütlenin uçucu madde içeriği kömürünkenden daha fazladır ve sabit karbon içeriği daha azdır. Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki son çalışmalar, fosil yakıtlarla yanan biyokütlenin çevre ve enerji üretimi ekonomisi üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir (Mock vd, 2017).

2.2. Nümerik Çalışmalar

Sabit yatakta yanmanın nümerik modellenmesi, biyokütle, kömür ve kentsel katı atık yanmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Ahn ve Kim, 2014; Begum vd, 2014;

Chaney vd, 2012; Chen vd, 2010; Chen vd, 2015; Collazo vd, 2012a; Collazo vd, 2012b; Dong ve Blasiak, 2001; Frey vd, 2003; Gómez vd, 2012; Gómez vd, 2016; Hermansson ve Thunman, 2011; Hussain, 2012; Huttunen, 2004; Kær, 2004; Klason ve Bai, 2007; Lee vd, 2011; Mehrabian vd, 2014; Nosek vd, 2011; Novozhilov vd, 1996; Porteiro vd, 2009; Ryu vd, 2004; Shin ve Choi, 2000; Sui vd, 2013; Westerlund vd, 2012; Yang vd, 2007; Yang vd, 2004, 2005; Yang vd, 2008; Yang vd, 2003; Yin vd, 2008; Zhang vd, 2010; Zhou vd, 2005). Bunların bir kısmı detaylı olarak aşağıda verilmiştir.

Chaney vd (2012) yürüttükleri bir çalışmada 50 kW'lık pelet kazanının yanma performansını ve CO emisyonunun optimizasyonunu incelemişlerdir. Birincil ve ikincil hava ayarı, ikincil hava giriş sayısı gibi birçok ayarlanabilir parametrenin kazanda bulunduğunu ve bu parametrelerin yanma performansını ve NO_x emisyonlarını iyileştirmede kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Simulasyonlarda FLUENT paket programından yararlanmışlardır. Pelet yakıtının termal dekompozisyonunu ve gaz fazıyla etkileşimini C programıyla yazmışlar ve HAD ile bağlantılı hale getirmişlerdir. Yatak içini (nemin buharlaşması, uçucuların ortaya çıkması, char oksidasyonu) ve dışını (gaz fazı) ayrı ayrı modellemişlerdir. Gaz fazının modellenmesinde Eddy Dissipation modelini kullanmışlardır. Birincil havanın toplam yanma için gerekli havaya oranına split ratio adını vermişlerdir. Split ratio değerinin 1 (yanma için gerekli havanın tamamının birincil havadan karşılanması durumu), 0.8, 0.6 ve 0.4 durumları için hesaplamalar yapmışlardır. Split rasyonun artması CO emisyonlarını azaltıcı etkide bulunduğunu ifade etmişlerdir.

Dong ve Blasiak (2001) çalışmalarında ikincil havanın kazan içerisine daha verimli dağılarak daha verimli yanmayı ve emisyonları azaltmayı amaçlayan sistemi (Ecotube system) iki farklı ızgara tipinde nümerik olarak incelemişlerdir. İncelemiş oldukları kazanlardan bir tanesi 15 MW'lık atık biyokütle diğeri ise 29 MW'lık kömür kazanıdır. Nümerik çözümde FLUENT paket programından faydalanmışlardır. Türbülans ve kimyasal reaksiyon arasındaki ilişkiyi çözümlenmede Arrhenius finite-rate ve Magnussen ve Hijertager eddy dissipation modellerini kullanmışlardır. Çok kompleks olayların yanma yatağı kısmında gerçekleştiğini ve bu olayların yakıt partiküllerinin ısınması ve kurumması, partiküllerin ızgara üzerinde hareket etmesi, gaz ve katı faz arasındaki etkileşim, yakıt pirolizi ve uçucuların çıkması ve son olarak gazlaşma ve yanmayı içerdiğini belirtmişlerdir. Bu karmaşık

olayları ızgara üzerinde sadece homojen gaz fazının modellenmesiyle basitleştirmişlerdir. Sınır şartlarını yakıt piroliz reaksiyon sonuçlarına göre girmişlerdir. Biyokütle yanması sonucu elde edilen maksimum sıcaklık değerinin 1260 °C civarında olduğunu belirtmişlerdir.

Hussain (2012) çalışmasında kentsel katı atıkların fırında yanmasını modellemiştir. Yatakta yakıtın kuruma, gazlaşma gibi aşamalarını FLIC kodunu kullanarak modellemiş ve buradan çıkan sonuçları Fluent programına aktararak gaz fazının yanmasını modellemiştir. Yakma sisteminde üç farklı ızgara tipi kullanmıştır ve kıyaslamalar yapmıştır. Reaksiyon modeli olarak Eddy dissipation model, türbülans modeli olarak Standart k-ε model, Radyasyon modeli olarak P1 model kullanmıştır.

Sui vd (2013) çalışmalarında iki çeşit biyokütle yakıtı (briket) ile kömürün yanmasını ayrı ayrı nümerik olarak araştırmışlardır. Öncelikle yakıtların karakteristiklerini ve içeriklerini deneysel olarak test etmişlerdir. Biyokütle yakıtının kömür yakıtına göre: 1) daha yüksek uçucu içeriği, düşük sabit karbon içeriği ve ısı değeri; 2) daha yüksek oksijen içeriği; 3) daha düşük tutuşma sıcaklığı, yüksek yanma hızına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Nümerik sonuçların sıcaklık dağılımı, oksijen dağılımı, karbondioksit dağılımı içerdiği ve buna göre yanmaya olan etkilerin yorumlandığını belirtmişlerdir. Yatak içini modelledikten sonra buradan elde edilen sonuçları Fluent programına sınır şartı olarak girmişler ve ayrıca gaz fazının modellemesini de Fluent programında yapmışlardır. Nümerik olarak biyokütle yakıtının yanma performansını kömür kazanı ve dönüştürülmüş bir kazan için hesaplamışlardır. Biyokütle yakıtının kömür kazanında yanması sonucu oluşan maksimum sıcaklıklar 2430 K civarlarında olurken, dönüştürülmüş kazanda bu değerin 1900 K civarlarına düştüğünü belirtmişlerdir.

Westerlund vd (2012) çalışmalarında HAD kullanarak 20 kW'lık pelet yakıcısının optimizasyonunu araştırmışlardır. Sadece gazların karıştığı yaklaşımla simülasyonlar yapmışlardır. Yakıcının orijinal geometrisinin yetersiz performans verdiğini belirtmişlerdir. Simulasyonlardan elde ettikleri optimal dizayn ile çıkış gücünün arttığını ve yanmamış konsantrasyonların azaldığını ancak daha da düşürülebileceğini belirtmişlerdir. Yanma gazları ile ikincil hava arasındaki etkileşim zamanının muhtemelen kısa olduğu ve bu sürenin arttırılmasının pozitif etki edebileceğini ifade etmişlerdir.

2.3. Deneysel ve Nümerik Çalışmalar

Ahn ve Kim (2014) çalışmalarında sabit yataklı 278 kW'lık pelet kazanı geliştirmişler ve deneysel olarak test etmişlerdir. Ayrıca bu deneysel sonuçları nümerik hesap sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Kazan içi sıcaklıklarını termoelemanlar yardımıyla ölçmüşler, ayrıca termal kamera ile de görüntü almışlardır. Kazan içinde oluşan maksimum sıcaklığın 1000 °C civarında olduğunu belirtmişlerdir. Nümerik çözümlemede Fluent paket programından yararlanmışlardır. Yanma modeli olarak Finite rate/Eddy dissipation modelini, radyasyon modeli olarak Discrete Ordinates (DO) modelini ve türbülans modeli olarak da Standart k-ε modelini kullanmışlardır. Kazan içi sıcaklıklarını nümerik ve deneysel olarak kıyaslamışlar ve her ikisinin iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Begum vd (2014) katı atıkların akışkan yatakta gazlaştırılmasını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneylerini pilot ölçekli bir gazlaştırıcı üzerinde yaptıklarını ve sayısal hesaplamalar için Aspen Plus yazılımını kullandıklarını ifade etmişlerdir. Deneysel ve sayısal yöntemlerin iyi bir şekilde uyum sağladığını ve modelin bir gazlaştırma tesisinin sıcaklık, basınç, hava-yakıt oranı ve buhar-yakıt oranını tahmin etmede yararlı olabileceğini belirtmişlerdir.

Chen vd (2010), kömür yakıtlı iki farklı sıcak su kazanının bir tanesini modifiye ederek odun peleti yakmaya uygun hale getirmiş ve kazanların toplam performanslarını (yanma karakteristikleri ve emisyonlar gibi) deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Nümerik modellemede FLIC kodunu ve Fluent programını kullanmışlardır. Baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik olarak birbiriyle iyi uyum sağlamadığını belirtmişlerdir. Pelet yakıtlı kazanda ölçülen baca gazı sıcaklığı 573-640 K iken modelleme sonucu bulunan değer 723 K; kömür yakıtlı kazanda ise ölçüm sonucu elde edilen değer 373-670 K arasında iken modelleme sonucu elde edilen değer 770 K'dir. Maksimum alev sıcaklığı ise pelet yakıtlı kazanda 1000 K, kömür yakıtlı kazanda 1500 K civarlarındadır. Sonuç olarak, yüksek yanma verimi ve düşük emisyonu elde etmek için yüksek uçucu oranına sahip biyokütle yakıtlarının ideal katı yakıt olduğunu belirtmişlerdir.

Chen vd (2015) çalışmalarında baca gazı resirkülasyonunun etkisini 500 kW'lık odun yongası kazanında deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Yatak içinin modellenmesinde FLIC kodunu, yatak dışının yani gaz fazının

modellenmesinde ise Fluent programını kullanmışlardır. Baca gazı resirülasyonunun CO emisyonlarını arttırdığı, NO_x ve PM emisyonlarını ve maksimum alev sıcaklıklarını az da olsa düşürdüğünü belirtmişlerdir. Genel olarak biyokütle yanmasında oluşan alev sıcaklıklarının 800-1100 °C aralığında olması sebebiyle, NO_x oluşumunun temel olarak yakıtsal kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçlarının tatmin edici seviyede uyum sağladığını ifade etmişlerdir.

Collazo vd (2012a) çalışmalarında 18 kW'lık evsel pelet kazanının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile simülasyonunu yapmışlardır. Yanma modeli olarak Finite rate/Eddy dissipation modelini, radyasyon modeli olarak Discrete Ordinates (DO) modeli ve türbülans modeli olarak Realisable k-ε modeli kullanmışlardır. Model sonuçlarıyla deneysel sonuçların iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir. Kazan analizlerinin sonucu olarak; su borularının pozisyonunun, hava girişlerinin dağılımının ve hava sızmasının bu tarz sistemlerde yüksek emisyonlara neden olan önemli faktörler olduğunu belirtmişlerdir. Hava fazlalık katsayısının artmasıyla yanma odası boyunca sıcaklıkların arttığını belirtmişlerdir.

Collazo vd (2012b) çalışmalarında sabit yataklı biyokütle kazanının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile simülasyonunu zamana bağlı olarak yapmışlardır. Yatak ve gaz fazını ayrı ayrı modellemişlerdir ve gaz fazının modellenmesinde Finite rate/Eddy dissipation modelini kullanmışlardır. Oluşan maksimum gaz sıcaklıklarının 1600 K olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak model sonuçlarıyla deneysel sonuçların iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Gómez vd (2012), 18 kW'lık ev tipi pelet soba/kazanın performansını nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca farklı su sıcaklıklarının kazan performansı üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Türbülans ve kimyasal reaksiyon arasındaki ilişkiyi çözümlenmede Arrhenius finite-rate ve Magnussen ve Hijertager eddy dissipation modellerini, türbülansın modellenmesinde Realizable k-ε modelini kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçların iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Klason ve Bai (2007) çalışmalarında 8-11 kW'lık pelet ocağında ikincil ve üçüncül havanın, yanma sonucu oluşan alev sıcaklıkları, O₂, CO₂, CO ve NO_x gibi emisyonlar üzerindeki etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır.

Türbülans modeli olarak Standart k-ε modeli, yanma modeli olarak Eddy Dissipation Concept (EDC) modeli ve radyasyon modeli olarak P1 modeli kullanmışlardır. İkincil ve üçüncül hava kullanımının sabit yataklı biyokütle yanmasının kontrolünde önemli bir yere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Lee vd (2011) çalışmalarında evsel ısıtma amaçlı olarak satılan 35 kW'lık pelet sobasında deneysel ve nümerik incelemeler yapmışlardır. Pelet yakıtı yanması boyunca, gaz bileşimlerini, sıcaklıkları ve kül karakteristiklerini çeşitli çalışma yükleri, hava akım hızı ve ocak konfigürasyonları için sobanın farklı kısımlarında deneysel ve nümerik olarak analiz etmişlerdir. Ayrıca ocak biçimi, akış dağılımı, ikincil ve üçüncül hava enjeksiyonlarının yönlerini sadece nümerik olarak incelemişlerdir. Nümerik hesaplamalarda Fluent 6.3 programını kullanmışlardır. Yanma modeli olarak karışım kesri (mixture fraction) yaklaşımı, radyasyon modeli olarak Discrete Ordinates (DO) modelini ve türbülans modeli olarak Standart k-ε modelini kullanmışlardır.

Nosek vd (2011) çalışmalarında 25 kW'lık evsel bir kazanda kömür yanmasını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Gaz fazının modellenmesinde Fluent programından yararlanmışlardır. Türbülans modeli olarak Standart k-ε model, RNG k-ε model ve Realizable k-ε modellerini, yanma modeli olarak Eddy dissipation model, radyasyon modeli olarak DO modeli kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarında ise kazanın belirli pozisyonlarına termoelemanlar yerleştirmişler ve alev sıcaklıklarını ölçmüşlerdir.

Porteiro vd (2009) çalışmalarında 24 kW'lık pelet kazanında nümerik analizler yapmışlardır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olarak FLUENT 6.3 programını kullanmışlardır ve kullanıcı tanımlı alt modeli C++ programında oluşturarak FLUENT programına aktarmışlardır. Gaz fazı ile yatak modeli arasındaki etkileşimin çözümlenmesinde iteratif prosesi kullanmışlardır. Yatak modelindeki çözümün, HAD programındaki sınır şartlarını belirlediğini ifade etmişlerdir. HAD modeli yakınsadıktan sonra bunun çözümü yatak modelinin yeni sınır şartları olarak kullanılmışlardır ve bu prosesi her iki modelde eş zamanlı çözüme ulaşıncaya kadar devam ettirmişlerdir. Yatak içerisindeki partiküller çıkış gazında askıda duracak yeterli aerodinamik boyuta ulaştığı zaman bunların yatak dışına alındığını ve HAD programında ayrık faz (DPM) model yörüngesi olarak tanımlandığını belirtmişlerdir. 1600000 hücreye sahip ağ yapısı, daimi korunum denklemlerinin çözümünde

SIMPLE algoritması, türbülansın modellenmesinde k-epsilon model ve radyasyonun modellenmesinde Discrete Ordinate (DO) model kullanmışlardır. Gaz fazının modellenmesinde Arrhenius finite rate/Eddy dissipation modelini kullanmışlardır. Biyokütle uçucuları olarak CO, CO₂, H₂O, H₂, hafif hidrokarbonlar (CH₄) ve ağır hidrokarbonlar (C₆H₆) olduğunu kabul etmişlerdir. Farklı ısı güç ve hava fazlalık katsayısı değerlerinde de hesaplamalar yapmışlardır. 24 kW ısı güç ve hava fazlalık katsayısının 1.90 olduğu durumda kazanda oluşan en yüksek sıcaklıkların 1500 K civarında olduğunu, baca gazı çıkış sıcaklıklarının 573 K civarında ve kazan veriminin %80 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak model sonuçlarıyla deneysel gaz sıcaklıklarını ve konsantrasyonlarını karşılaştırmışlardır ve iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Ryu vd (2004), katı atık fırınında yanma ve gaz akışını FLIC ve Fluent programlarını birlikte kullanarak modellemişlerdir. Modelleme sonuçlarını deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır ve kıyaslamalarda sıcaklık, oksijen konsantrasyonu gibi parametreleri kullanmışlardır. Yatak içinde yapılan ölçümlerde sonuçların oldukça dalgalandığı, ancak genel itibariyle modelleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu ifade etmişlerdir.

Yang vd (2007), saman yakan 38 MWe'lık bir güç santralinde fırındaki akış ve yanma özelliklerini farklı işletme koşullarında deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Tahmin edilen verileri yani hesaplama sonuçlarını, yanma süresi, fırın sıcaklığı, baca gazı emisyonları (NO_x dahil), küldeki karbon içeriği ve toplam yanma verimi açısından yapılan ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Yatak içinin modellenmesinde FLIC kodunu, yatak dışının yani gaz fazının modellenmesinde ise Fluent programını kullanmışlardır. Türbülans modeli olarak Standart k-ε modeli, yanma modeli olarak Eddy-breakup/Finite rate modeli ve radyasyon modeli olarak DO modeli kullanmışlardır. Yatak içi sıcaklığını maksimum olarak 1100 °C civarında olduğu, gaz fazındaki sıcaklığın ise maksimum olarak 1377 °C civarında olduğunu ve ızgaranın hemen üzerinde oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca saman içerisindeki nem içeriğinin %20'nin üzerinde olması durumunda CO emisyonlarının 5970 ppm gibi yüksek seviyelere çıktığını görmüşlerdir. Sonuç olarak, model sonuçlarıyla deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

Yang vd (2003) çalışmalarında sabit yataklı bir reaktörde odun yongası yanmasını nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Maksimum sıcaklıkların

deneysel ölçümlerde 1200-1260 K arasında olduğu ve nümerik sonuçlarla 100 K civarında bir farklılık olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlarla nümerik sonuçların genel olarak iyi uyum sağladığı, ancak pik alev sıcaklıklarında farklılıklar olduğu ve bu kısımda daha fazla çalışmanın yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Zhang vd (2010) çalışmalarında 320 kW'lık odun yongası yakılan kazanın yanma karakteristiklerini ve emisyonlarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Baca gazı emisyonu olarak CO, NO_x ve PM'yi ölçmüşlerdir. Matematiksel modellemede FLIC ve Fluent kodlarını kullanmışlardır. Türbülans modeli olarak Standart k-ε model, radyasyon modeli olarak P1 modeli kullanmışlardır. Deneysel ölçümlerde kütleli CO emisyonları 550-1600 mg/m³ (%10 O₂) ve NO_x emisyonlarının 28-60 ppm arasında olduğunu belirtmişlerdir. Modelleme sonucunda, yakıtın büyük bir kısmının ocak içerisinde yandığını ve CO emisyonunun düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca modelleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum gösterdiğini belirtmişlerdir.

Zhou vd (2005) çalışmalarında saman yanmasını sabit yataklı reaktörde deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Birincil hava debisi, birincil havanın ön ısıtılması, oksijen konsantrasyonu, samandaki nem içeriği gibi farklı çalışma şartlarında yatak yüzeyindeki gaz bileşenlerinin konsantrasyonu ve yatak sıcaklığının deneysel ölçümlerle iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir.



3. GENEL BİLGİLER

3.1. Yakıtlar ve Özellikleri

Yakıtlar durumlarına göre katı, sıvı veya gaz olarak ve üretim yöntemlerine göre doğal veya yapay olarak sınıflandırılabilir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Yakıtların sınıflandırılması (Topaloglu, 2009)

KATI		SIVI		GAZ	
Doğal	Yapay	Doğal	Yapay	Doğal	Yapay
-antrasit	-kok	-petrol	-dizel	-doğal gaz	-metan
-taş kömürü	-briket		-gaz yağı		-etan
-linyit	-odun kömürü		-likit petrol gazı (lpg)		-jeneratör gazı
			-ağır yağlar		-su gazı
			-katran		-hava gazı
			-biyodizel		-biyogaz
			-alkol		-hidrojen

Bunlardan başka pelet, odun, talaş vs. ve son zamanlarda çöp de yakıt olarak değerlendirilmektedir. Bunların dışında farklı yakıtlar elde edebilmek için yeni teknolojiler de denenmektedir. Örneğin ikinci dünya savaşı sırasında kömürden petrol elde edilmeye çalışılmıştır. Son yıllarda ise fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve bilhassa hava kirliliğini azaltmak amacıyla alternatif yakıtlar ve enerjilerin geliştirilmesine yönelik çabalar artmıştır. Bunların başlıcaları biyokütle, biyogaz, biyodizel ve biyoalkol gibi biyolojik kökenli yakıtlardır (Topaloglu, 2009).

Biyokütle, çeşitli ürünlerin üretimi ve işlenmesi esnasında açığa çıkan karmaşık bir yakıt kaynağıdır (Chum ve Overend, 2001). Şekil 3.1'de biyokütle üretiminde kullanılan malzemeler, biyokütle işleme süreci, biyokütle yakıtları ve biyokütle dönüşüm süreci ile ilgili bilgiler verilmiştir.



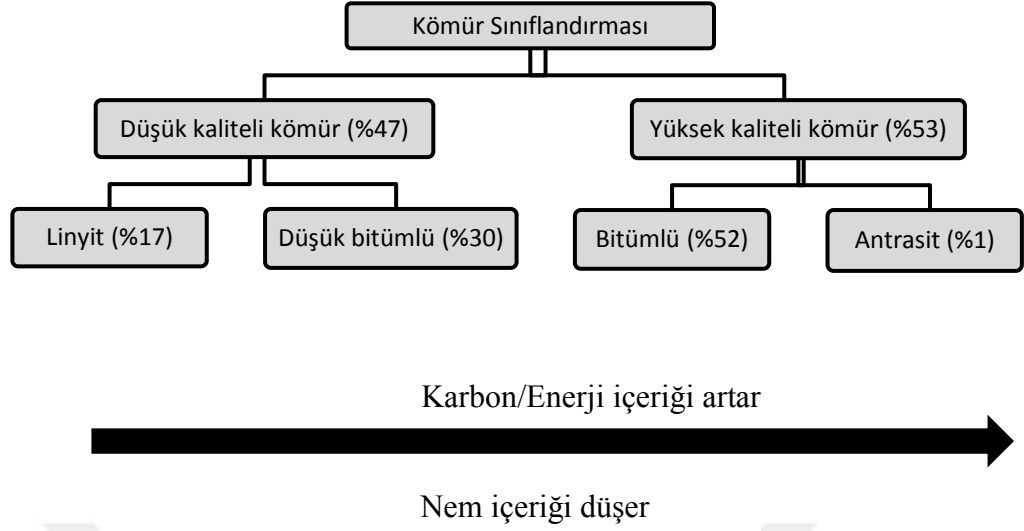
Şekil 3.1. Biyokütle üretim, işleme, yakıtları ve dönüşümü ile ilgili bilgiler (Chum ve Overend, 2001)

Bu çalışmada katı yakıt olarak kömür ve pelet yakıtı, emdirilen sıvı olarak dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı kullanıldığından aşağıda bu yakıtlar ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

3.1.1. Kömür

Kömür, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip heterojen içeriklerden oluşmuş, kahverengi ile siyah renk arasında değişen sedimentler, yanabilir bir kayaç olarak tanımlanabilir. Kömür başlıca karbon, hidrojen ve oksijen gibi elementlerin bileşiminden oluşmuş olup, diğer kaya tabakalarının arasında milyonlarca yıllık bir süre ısı, basınç ve mikrobiyolojik etkilerin sonucunda meydana gelmiştir. Yerin ısısı arttıkça önceleri “turba” olarak adlandırılan ama kömür sayılmayan bu organik madde, önce “linyit” daha sonra sırasıyla “alt bitümlü kömür”, “taşkömürü”, “antrasit” ve son olarak şartlar uygun olduğu takdirde “grafit”e dönüşür. Bu gelişme sürecine “Kömürleşme” adı verilmektedir (Anonim, 2015).

Kömür kalitesine göre iki temel sınıfa ayrılmaktadır ve bu durum Şekil 3.2’de gösterilmektedir (Anonim, 2015). Şekil 3.2’de parantez içerisinde verilen değerler Dünya rezervlerinin yüzdesini göstermektedir.



Şekil 3.2. Kömürlerin sınıflandırması

Düşük dereceli kömürler genelde yumuşak, kırılğan, mat ve toprak görünümlü malzemelerdir. Ayrıca, yüksek nem içeriği ve düşük karbon içeriğinden dolayı düşük enerji içeriğine sahiptirler. Yüksek derece kömürleri ise genellikle daha sert, daha dayanıklı, siyah ve parlak malzemelerdir. Düşük nem içeriği ve yüksek karbon içeriği ile karakterizedirler. Bu nedenle, enerji içerikleri düşük dereceli kömürlerden daha yüksektir.

Düşük dereceli kömürler karbon içeriğine göre linyit ve alt-bitümlü kömür olarak iki gruba ayrılır. Linyit %25-35 karbon içerirken, alt-bitümlü kömür %35-45 karbon içermektedir. Benzer şekilde, yüksek dereceli kömürler, karbon içeriğine göre bitümlü kömür ve antrasit olarak kategorize edilir. Bitümlü kömür %45-86 karbon içerirken, antrasit %86-97 karbon içermektedir (Bayrak, 2014).

Diğer bir sınıflandırma UN-ECE tarafından yapılmıştır ve kömürü iki gruba ayırmışlardır (Anonim, 2015).

- **Taşkömürü:** Üst ısıl değeri 5732 kcal/kg'dan (24 MJ/kg) daha fazla olan, külsüz ancak nemli ve mutlak vitrinite değeri en az 0.6 olan kömür tipi.

- **Kahverengi kömür:** Üst ısıl değeri 5732 kcal/kg'dan (24 MJ/kg) daha az olan, yığın olmayan ve uçucu madde miktarı %31'den daha az olan kömür tipi.

Literatürde ortak bir dil oluşturmak amacıyla Eurostat ve Birleşmiş Milletler İstatistik Bölümü ile işbirliği içerisinde çalışan Uluslararası Enerji Ajansı (UEA),

2010 yılında alınan kararlar çerçevesinde yayınladığı istatistiki verilerde değişikliğe gitmiştir. Bu bağlamda UEA, kömürleri UN-ECE gibi taşkömürü ve kahverengi kömür olmak üzere iki kategoride sınıflandırmıştır.

- **Taşkömürü**, antrasit ve bitümlü kömürün toplamından oluşmaktadır.

- Kömürleşme derecesi yüksek olan *antrasit* genellikle sanayide ve alan ısıtmasında kullanılmaktadır.

- Kömürleşme derecesi orta ve yüksek olan *bitümlü kömürler* ise gazlaştırmanın dışında sanayide koklaşmada ve ısıyı yükseltmede kullanılır. Yüksek fırınlarda kullanılan kokun üretilmesine uygun kömürler kokluk kömür olarak adlandırılır. Diğer bitümlü kömürler (kokluk kömür içermeyen) ise daha çok termik kömür olarak da adlandırılır. Ajans, filtrasyon ürünlerini ve tanımlayamadığı diğer düşük dereceli kömürleri de bu grupta süzüntü (recovered slurries) adı altında toplamaktadır.

- **Kahverengi kömür**, alt bitümlü kömürler ile linyit kömür toplamından oluşmaktadır.

- Üst ısı değeri 4777 kcal/kg (20 MJ/kg) ile 5732 kcal/kg (24 MJ/kg) aralığında külsüz fakat nem bazlı ve yığın olmayan kömürler, *alt bitümlü kömür*

- Üst ısı değeri 4777 kcal/kg (20 MJ/kg)'dan daha az olup, yığın olmayan kömür tipi ise *linyit* olarak adlandırılmaktadır (Anonim, 2015).

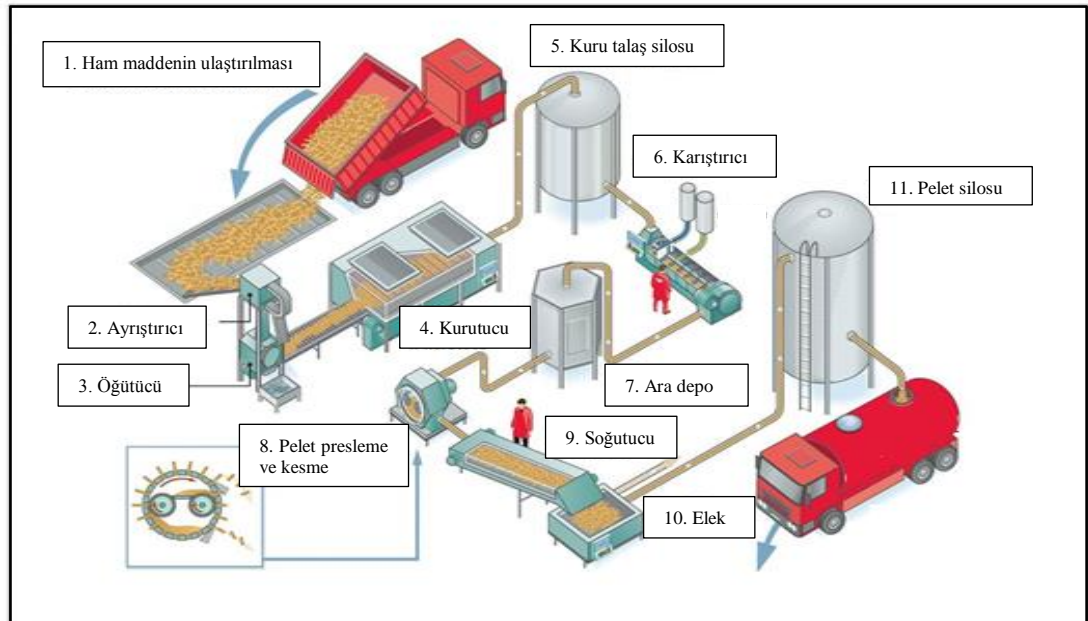
3.1.2. Pelet

Talaş, ağaç kabuğu, odun yongaları, atık, fındık, badem, ceviz kabukları, zirai ürünler, ekin sapları, atık kağıt gibi maddelerin öğütüldükten sonra yüksek basınç altında sıkıştırılması sonucu elde edilen pelet, genellikle 6-8 mm çapında, 10-11 mm arası uzunlukta, silindirik yapılı tamamen doğal bir yakıttır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Pelet yakıtı

Pelet üretiminde öncelikle ham maddenin depoya ulaştırılması gerekir. Depoya ulaştırılan ham madde ayrıştırıcı cihazından geçirilerek pislikler vs. ayrıştırılır. Daha sonra öğütücüden geçirilerek küçük parçalar haline getirilir ve kurutma işlemi yapılır. Ham madde kurutulduktan sonra preslenir, kesilir ve soğutma işlemi uygulanarak kullanıma hazır hale getirilir. Şekil 3.4’te pelet üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Pelet üretim aşamaları

Pelet yakıtının sürdürülebilir bir kaynak olması, fosil kaynaklı yakıt bağımlılığının azaltılması ve ülke ekonomisine katkı sağlaması, kullanımı sonrası atık miktarının az olması, zararlı egzoz emisyonlarının kabul edilebilir sınırlarda olması, nakliyesinin çok kolay olması, bireysel ve merkezi sistemler için pratik kullanıma sahip olması, otomatik besleme yapılabilmesi gibi birçok avantajı vardır. Pelet yakıtının farklı maddelerden üretilmesi sebebiyle özellikleri de farklılıklar göstermektedir. Çizelge 3.2’de farklı atıklardan elde edilen pelet yakıtlarının analizleriyle ilgili bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çeşitli pelet yakıtı analizleri (González vd, 2004)

Analiz	Atıklar			
	Orman peleti	Domates peleti	Zeytin çekirdeği	Kenger peleti
Elementel analiz (%)				
C	46.5	52.3	46.5	39.1
H	6.8	7.6	6.4	6.0
N	1.9	3.4	0.4	2.0
S	0	0.074	0	0.14
Cl	0.03	0.12	0.34	1.21
Yaklaşık analiz (%)				
Sabit karbon	13.8	9.4	16.2	14.9
Uçucu madde	76.4	80.1	72.7	62.9
Kül	1.0	3.5	2.3	11.3
Nem	8.8	7.0	8.8	10.9
Üst Isıl Değer (MJ/kg)	18.4	22.7	19.4	14.8

Pelet yakıtın kimyasal ve mekanik özellikleri, iyi yanma, yüksek verim, düşük emisyon ve partikül salınımı ile kül ve cüruf atığı açısından büyük önem arz etmektedir. Yüksek yanma verimi, düşük emisyon değerleri ve yakıt tasarrufu sağlaması amacıyla Çizelge 3.3’te belirtilen standartlara göre pelet üretilmeli ve kullanılmalıdır. Pelet standartları çoğu Avrupa ülkelerinde mevcuttur (Anonymous, 1998; Anonymous, 1999; Anonymous, 2001). İsveç ve Almanya standartları birbirine denktir. Pelet yakıtta düşük nem içeriği yüksek ısıl değer için iyidir; ayrıca, baca gazı kanallarında ve eşanjör yüzeylerinde cüruf oluşmasını önlemek için kül oluşumu olabildiğince az olmalıdır. Bunun için pelet ham maddesine bazı mısır veya mısır nişastası gibi doğal maddeler ilave edilir. Kimyasal tutkallar da kullanılabilir, fakat İsveç standartları bunu belirli ölçülerde tolere etmektedir. Yüksek yoğunluklu pelet yüksek ısıl değer ve kararlı yanma sağlamaktadır. Değişen yoğunluklar özellikle sabit hava kaynağı ve hacimsel pelet yükleme durumunda önemli problemlere sebep olur.

Peletin depodan yanma odasına taşınması için pelet boyutları önemli rol oynar. Avusturya ve Almanya pazarındaki çoğu transport sistemleri için optimum pelet çapı yaklaşık 6 mm'dir (Holz, 2003). İsveç'te ise 8 mm'dir (Oberberger ve Thek, 2002). Önemli bir kalite parametresi de peletin mekanik dengesini gösteren aşınmadır. Avusturya standartları lingo-test adında bir aşınma değerinin belirlenmesini gerektirir (Golser, 2001). Bu testte pelet mekanik strese maruz bırakılır ve dökülen küçük pelet parçacıkları ölçülür.

Avusturya'da Ö-Norm, Almanya'da ise DIN plus normları pelet kalitesini yükseltmek için bir pazarlama ögesi olarak düzenlenmektedir, fakat zorunluluk yoktur. Çizelge 3.3'te Alman DIN normları, Avusturya Ö-normları ve ülkemizde de kullanılan Avrupa EN normları karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Fiedler, 2004; Schütte, 2006).

Çizelge 3.3. Odun peleti standartları (Fiedler, 2004; Schütte, 2006)

Parametre	Birim	DIN 51731	DIN Plus	ÖNORM 7135	ISO 17225-2		
					ENplus A1	ENplus A2	ENplus B
Çap	mm	4-12	-	4-10	6±1 ya da 8±1		
Uzunluk	mm	<50	< 5xD	< 5xD	3.15<L≤40 ¹		
Yoğunluk	kg/m ³	1.0-1.4	>1.12	>1.12	-		
Su içeriği	%	<12	<10	<10	≤10		
Kül	%	<1.5	<0.5	<0.5	≤0.7	≤1.2	≤2.0
Alt ısı değeri	MJ/kg	17.5-19.5	>18	>18	≥16.56		
Sülfür	%	<0.08	<0.04	<0.04	≤0.04	≤0.05	
Azot	%	<0.3	<0.3	<0.3	≤0.3	≤0.5	≤1.0
Klor	%	0.03	<0.02	<0.02	≤0.02		≤0.03
Kum taşı	%	-	<2.3	<2.3	-		
Bağlayıcı madde	%	-	<2	<2	-		

¹Peletlerin maksimum% 1'i 40mm'lik uzunluğu aşabilir. Uzunlukları 45 mm'ye eşit veya daha fazla olan peletlere izin verilmez

3.1.3. Dizel

Dizel yakıtı, ham petrolün 200-380 °C arasında damıtılmasından elde edilen ve yapısındaki hidrokarbonlardaki karbon sayısı 8 ile 16 arasında değişen fosil bir yakıt türüdür. Hidrokarbonların dışında %1 kükürt, %0.02 kül miktarına ve az miktarda azota müsaade edilir.

Dizel yakıtı genellikle, ASTM tarafından (ASTM D 975) No.1, No.2 ve No.4 şeklinde sınıflandırılmaktadır. Ulaşım sektöründe dizel motorlarda yakıt olarak dizel No.2 kullanılmaktadır ve bu yakıtın genel özellikleri Çizelge 3.4’te gösterilmiştir (Tillem, 2005).

Çizelge 3.4. Dizel yakıtı No.2 özellikleri (ASTM D 975)

Yakıt Özelliği	Değer
Kinematik viskozite (mm ² /s, 40 °C’de)	1.9-4.1
Yoğunluk (kg/m ³ , 15 °C’de)	850
Su ve tortu miktarı (% hacimce, mak.)	0.05
Toplam kükürt (% kütlece, mak.)	0.05
Alevlenme noktası (°C, min.)	52
Bulutlanma noktası (°C)	(-15) - 5
Setan sayısı	40-55
Kül (% kütlece)	0.01

Sıvıların akmaya karşı gösterdiği dirence viskozite adı verilmektedir. Sıvı yakıtlarda viskozite, atomizasyon ve iyi bir yanma açısından önemli bir parametredir. Çok yüksek viskozite, pompalama işini zorlaştıracağından ve püskürtme sonrası iri taneli damlacık oluşumuna neden olacağından tutuşma gecikmesini artırır. Ayrıca yanma kalitesi azalacağından dolayı is miktarı da artar. Düşük viskozite ise iyi bir atomizasyon sağlar ancak sızdırmazlık sorunlarına ve pompa elemanlarının aşınmasına neden olur (Anonim, 2013).

3.1.4. Biyodizel

Biyodizel kavramı, Rudolf Diesel’ in 1898’de dizel motorda ilk olarak fıstık yağını yakıt olarak kullanmasına kadar dayanmaktadır. Bitkisel yağların dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabilmesi için motor enjektöründe veya püskürme sisteminde değişiklikler yapılması yerine yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilerek, dizel yakıt No.2’ye yaklaştırılması tercih edilmektedir. Biyodizel; hayvansal ya da bitkisel (kanola, soya, fındık, ayçiçeği, pamuk, mısır vb. bitkilerin) kökenli yağların bir katalizör eşliğinde kısa zincirli metanol veya etanol gibi bir alkol ile reaksiyonu sonucunda açığa çıkan, yakıt amaçlı kullanılan ürünün adıdır.

Biyodizel, mevcut dizel motorlarda değişikliğe gerek kalmadan belli oranlarda karıştırılarak kullanılabilir. Çizelge 3.5’te TSE EN 14214 standardının

belirlediği genel özellikler (Akçay, 2006) ve Çizelge 3.6’da çeşitli yağlardan elde edilen biyodizellerin yakıt özellikleri verilmiştir (Barnwal ve Sharma, 2005).

Çizelge 3.5. Yağ asidi metil esterlerine ait TSE 14214 standardının belirlediği genel özellikler

Özellik	Birim	Sınırlar	
		En az	En çok
Ester muhtevası	% (m/m)	96.5	---
Yoğunluk 15 °C’de	kg/m ³	860	900
Viskozite 40 °C’de	mm ² /s	3.5	5
Parlama noktası	°C	120	---
Kükürt muhtevası	mg/kg	---	10
Karbon kalıntısı (%10 damıtma kalıntısında)	mg/kg	---	0.3
Setan sayısı		51	
Sülfatlanmış kül muhtevası	% (m/m)	---	0.02
Su muhtevası	mg/kg	---	500
Toplam kirlilik	mg/kg	---	24
Oksidasyon kararlılığı 110 °C’de	saat	6	---
Asit sayısı	mg KOH/g	---	0.5
İyot sayısı	g iyot/100 g	---	120
Linolenik asit metil esteri	% (m/m)	---	12
Çoklu doymamış metil esteri	% (m/m)	---	1
Metanol muhtevası	% (m/m)	---	0.2
Monogliserit	% (m/m)	---	0.8
Diğliserit	% (m/m)	---	0.2
Trigliserit	% (m/m)	---	0.02
Serbest gliserin	% (m/m)	---	0.02
Toplam gliserin	% (m/m)	---	0.25
Grup I metaller (Na+K)	mg/kg	---	0.5
Grup II metaller (Ca+Mg)	mg/kg	---	0.5
Fosfor muhtevası	mg/kg	---	10

Çizelge 3.6. Çeşitli yağlardan elde edilen biyodizellerin yakıt özellikleri

Bitkisel yağ metil esteri (biyodizel)	Kinematik viskozite (mm ² /s)	Setan sayısı	Alt ısıtıl değer (MJ/kg)	Bulutlanma sıcaklığı (°C)	Akma sıcaklığı (°C)	Tutuşma sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)
Fıstık	4.9	54	33.6	5	-	176	883
Soya fasülyesi	4.5	45	33.5	1	-7	178	885
Babassu	3.6	63	31.8	4	-	127	875
Palm	5.7	62	33.5	13	-	164	880
Ayçiçek	4.6	49	33.5	1	-	183	860
Donyağı (iç yağ)	-	-	-	12	9	96	-
Dizel	3.06	50	43.8	-	-16	76	855
Dizel(% 80)- Biyodizel(% 20)	3.2	51	43.2	-	-16	128	859

Biyodizel bitkilerden elde edilir ve bu nedenle biyolojik karbon döngüsü içinde fotosentez ile CO₂'i kullanarak sera etkisini arttırıcı yönde etki göstermez. Ayrıca CO, SO_x, yanmamış hidrokarbon (UHC) ve partikül madde (PM) emisyonlarının da dizel yakıtına göre genelde daha az olduğu belirlenmiştir (Acaroğlu, 2003).

3.1.5. Ayçiçek yağı

Bitkisel yağlar, %90-98 oranında trigliserit (üç mol yağ asidi ve bir mol gliserinden oluşmuş esterler) ve az miktarda monogliserit ve digliserit içeren hidrofobik karakterli maddelerdir. Trigliseritler, yapılarında önemli miktarda oksijen ve uzun zincirli hidrokarbon kısmında doymamışlık içerirler.

Bitkisel yağlar alternatif yakıtların geliştirilmesinde önemli bir paya sahiptir ancak dizel motorlarda veya sıvı yakıtlı kazanlarda direkt kullanımı birçok probleme sebep olmaktadır. Bunların en bilinenleri, içten yanmalı motorlarda direkt kullanımlarında yakıtın atomizasyonunun uygun olmayışı sebebiyle karbon tortusu oluşması, motorda vuruntu oluşması, zamlaşma, bitkisel yağ tarafından oluşturulan kirlilik sebebiyle yağlama yağının viskozitesinin artması ve jelleşmesi, yağların viskozitesinin yüksek olması ve yağın yetersiz buharlaşması sebebiyle yanmanın tam olarak gerçekleşmemesidir. Bu sorunlar genellikle, trigliserit molekülünün büyük ve yüksek kütleli bir molekül olmasından dolayı kaynaklanmaktadır (Akçay, 2006).

Türkiye'de yağlı tohum denilince akla ilk gelen bitki ayçiçeğidir. Ayçiçeği, dünyada ve ülkemizde en önemli yağ bitkilerinden birisi olup, genellikle yağlık olarak yetiştirilir. Tanelerinde yüksek oranda ve kaliteli yağ içeren ayçiçeği, çoğu bölgemizde yetişebilen ve ülkemizde yağ bitkileri ekim alanında pamuktan sonra ikinci sırayı alan bir bitki özelliğini taşımaktadır.

Ayçiçeği, tohumunda içerdiği yüksek orandaki (%22-50) yağ miktarı nedeniyle beslenme değeri en yüksek olan yağlardan birisidir. Dünya bitkisel ham yağ üretiminin %11'i ayçiçeğinden karşılanmaktadır. Türkiye'de ise bu değer %47 civarındadır (Anonim, 2014). Çizelge 3.7'de bazı bitkisel yağlara ait yakıt özellikleri dizel yakıtla karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Srivastava ve Prasad, 2000).

Çizelge 3.7. Bazı bitkisel yağların yakıt özellikleri

Bitkisel yağ adı	Kinematik viskozite 38 °C'de (mm ² /s)	Setan sayısı	Isıl değer (MJ/kg)	Bulutlanma sıcaklığı (°C)	Akma sıcaklığı (°C)	Tutuşma sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)
Mısır	34.9	37.6	39.5	-1.1	-40.0	277	909
Pamuk	33.5	41.8	39.5	1.7	-15.0	234	915
Crambe	53.6	44.6	40.5	10.0	-12.2	274	905
Keten	27.2	34.6	39.3	1.7	-15.0	241	924
Fıstık	39.6	41.8	39.8	12.8	-6.7	271	903
Kolza	37.0	37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	912
Aspir	31.3	41.3	39.5	18.3	-6.7	260	914
Susam	35.5	40.2	39.3	-3.9	-9.4	260	913
Soya fasülyesi	32.6	37.9	39.6	-3.9	-12.2	254	914
Ayçiçek	33.9	37.1	39.6	7.2	-15.0	274	916
Palm	39.6	42.0	-	31.0	-	267	918
Babassu	30.3	38.0	-	20.0	-	150	946
Dizel	3.06	50.0	43.8	-	-16.0	76	855

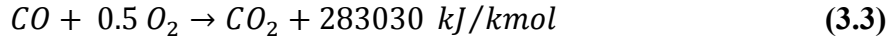
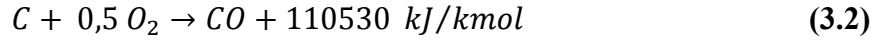
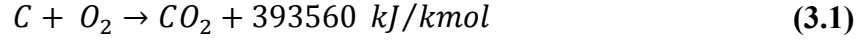
3.2. Katı ve Sıvı Yakıtların Yanma Hesapları

3.2.1. Stokiyometrik yanma hesapları

Yanma, yakıt içerisindeki yanabilen elementlerin havanın oksijeni ile birleşerek ısı açığa çıkarması olayıdır. Yakıt içerisindeki temel yanabilir elemanlar karbon, hidrojen ve bunların bileşikleridir. Yanma işleminde bu yanabilen elemanlar ve bileşikler tam yanma durumunda karbondioksit ve su buharına dönüşürler. Kazanlarda yanma için gerekli oksijenin kaynağı havadır. Hava; oksijen, azot ve az miktarda su buharı, karbondioksit, argon ve diğer elemanların karışımı olmakla beraber yanma hesaplamalarında havanın hacimsel olarak %21 oksijen ve %79 azot içerdiği kabul edilir.

Verimli bir yanma, yanmadaki verimsizlikler ve fazla hava sebebi ile olan kayıpları en aza indirmek için yakıtın ısı enerjisinin tamamının açığa çıkarılması ile gerekmektedir. Yanabilen elemanlarla oksijenin birleşmesi, tutuşma için yeteri kadar yüksek sıcaklığa, çok iyi bir karışma veya türbülansa ve yanmanın tamamlanması için yeterli bir zamana bağlıdır. Bu üç faktör, yani sıcaklık, türbülans ve zaman iyi bir yanmanın temel şartlarıdır (Onat, 2007).

Yanma hesaplamalarında yanabilen elemanların oksijenle birleşerek açığa çıkardığı ısı enerjisi, sadece yanma sonucu oluşan son ürünlere bağlıdır. Bu kanun basitçe karbon ile oksijen arasındaki reaksiyonlarda gösterilebilir.



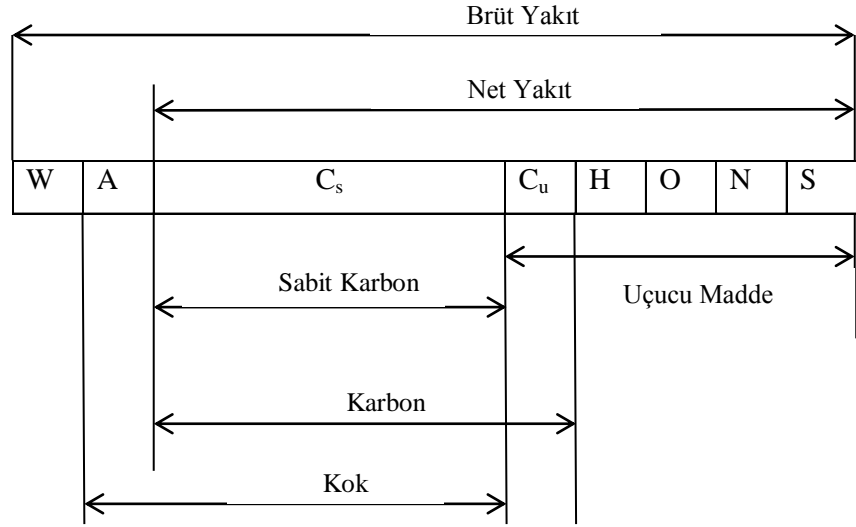
Görüldüğü gibi yakma sisteminin amacı karbonu tamamen karbondioksit'e dönüştürmek olmalıdır. Bu durum gerçekleşmediği takdirde yanma veriminde ve açığa çıkan ısıda eksik yanmadan dolayı önemli kayıplar meydana gelmektedir. Çizelge 3.8'de bazı yakıtların reaksiyon ısıları verilmiştir.

Çizelge 3.8. Yakıtların reaksiyon ısıları (Onat, 2007)

Yakıt	Reaksiyon ısısı	
	kJ/kg	kJ/Nm ³
Karbon	32796	-
Hidrojen	141886	12109
Kükürt	9300	-
Metan	55590	37743
Etan	51870	66768
Propan	50000	96500
Bütan	49540	125562
Karbonmonoksit	10108	11990

Katı yakıtların ve benzin, dizel, fuel-oil gibi petrol türevi sıvı yakıtların kimyasal yapısı gaz yakıtlara göre karmaşıktır ve bu nedenle basit formüllerle gösterimleri güçtür. Dolayısıyla bu tür yakıtların elementer analizi yapılarak bu elementlerin kütle oranları belirlenebilir. Bu oranlar yardımıyla katı yakıtların yanma hesapları yapılır. Prensip olarak bu kütle oranlarından mol kütlelerini dikkate alarak atom sayıları oranları belirlenip kimyasal formüller elde edilebilir, ancak bu yöntem pek tercih edilmemektedir.

Katı yakıtları oluşturan başlıca elementler karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N), kükürt (S), nem (W) ve kül (A)'dür. C, sabit karbon (C_s) ve uçucu karbon (C_v) olarak iki şekilde bulunmaktadır. Şekil 3.5'te katı yakıtların içeriği şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Katı yakıt içeriği

Bu analiz kimyasal yollarla yapılır. Brüt yakacağı nem ve kül dahil edilen toplam yakacak oluşturur. Nem ve kül dışında kalanlara net yakıt denir. Elementer analiz brüt yakacağına göre, kurutma işlemi yapılarak kuru yakacağına göre (W=0) veya net yakacağına (W=0, A=0) göre de verilebilir. Ayrıca yakıtın nem, uçucu madde ve kül miktarları basit bir yöntem olan yaklaşık analiz ile yapılabilir. Bu durumda yakacak önce ısıtılarak kurutulur ve kütle azalması nem miktarını verir. Daha sonra oksijensiz veya nötr ortamda yüksek sıcaklıkta ısıtılması sonucu hidrokarbonlar gazlaşır ve kütle azalması uçucuların miktarını verir. Geride kalan katının yakılması sonucu kül belirlenir ve buradan da sabit karbon elde edilir.

Yakıt ısı değeri genellikle kalorimetrede yanma sırasında ortaya çıkan ısının doğrudan ölçülmesi ile tespit edilir. Ayrıca yakıtın elementel analizi biliniyorsa ısı değeri hesaplamak mümkündür. Katı yakıt analizi,

$$C + H + O + S + N + W + A = 1 \text{ kg} \quad (3.4)$$

şeklinde verildiğine göre Çizelge 3.9'daki yanma denklemlerinden yanabilen elemanlar (karbon, hidrojen, kükürt) göz önüne alınırsa üst ısı değeri (H_h),

$$H_h = 32796 C + 141886 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 9300 S \text{ kJ/kg} \quad (3.5)$$

yazılabilir. Alt ısı değeri (H_u) ise, üst ısı değerinden, mevcut su buharının gizli buharlaşma ısıyla hesaplanır.

$$H_u = H_h - 2440(W + 9H) \quad \text{kJ/kg} \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanır.

C, H, N, S gibi saf elementlerin yanması için gerekli oksijen ve hava ihtiyacı temel reaksiyonlarla kolaylıkla hesaplanabilir. Çizelge 3.9'da elementlerin mol kütleleri, reaksiyonlar, spesifik oksijen ihtiyaçları ve reaksiyon ürün miktarları verilmiştir. Ayrıca tabloda O, W (nem) ve A (kül) için de ilgili değerler verilmiştir. Baca gazı hesabı yapılırken baca gazı miktarı bu elementer maddelerin reaksiyonların toplamından elde edilir. Böyle bir hesaplama yakıt içeriğindeki bağlı kükürt ve azotun tamamen SO₂ ve NO şeklinde dönüştüğünü varsaymaktadır (Topaloğlu, 2009).

Çizelge 3.9. Elementlerin mol kütle, reaksiyon, spesifik oksijen ihtiyacı ve reaksiyon ürün miktarları (Topaloğlu, 2009)

i	Mol kütle (kg/kmol)	Reaksiyon	Oksijen ihtiyacı (kg O ₂ /kgi)	Oksijen ihtiyacı (kmol/kgi)	Reaksiyon ürünü (kg ürün/kgi)	Reaksiyon ürünü (kmol/kgi)
C	12	C + O ₂ → CO ₂	8/3	1/12	11/3 kg CO ₂ /kg C	1/12 kmol CO ₂ / kg C
H	2	H ₂ + 0.5 O ₂ → H ₂ O	8	1/4	9 kg H ₂ O/kg H	0.5 kmol H ₂ O/kg H
S	32	S + O ₂ → SO ₂	1	1/32	2 kg SO ₂ /kg S	1/32 kmol SO ₂ /kg S
N	28	N ₂ + O ₂ → 2NO	8/7	1/28	15/7 kg NO/kg N	1/14 kmol NO/kg N
O	16	-	-1	-1/32	0	0
W	-	-	0	0	W kg H ₂ O/kg W	W/18 kmol H ₂ O/kg W
A	-	-	0	0	A	-

Buna göre stokiyometrik (minimum) O₂ ihtiyacı,

$$O_{min} = \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} - \frac{O}{32} \left(\frac{\text{kmol}O_2}{\text{kg}Y} \right) \quad (3.7)$$

olur. Böylece minimum hava ihtiyacı,

$$H_{min} = \frac{O_{min}}{0.21} \left[\frac{\text{kmolhava}}{\text{kg}Y} \right] \quad (3.8)$$

gerçek hava ihtiyacı ise

$$H = \lambda H_{min} \quad (3.9)$$

olur. Burada λ hava fazlalık katsayısıdır.

Yanma ürünlerinin mol sayıları kolayca hesaplanabilir.

$$n_{CO_2} = \frac{C}{12} \quad (3.10)$$

$$n_{H_2O} = \frac{H}{2} + \frac{W}{18} \quad (3.11)$$

$$n_{NO} = \frac{N}{14} \quad (3.12)$$

$$n_{SO_2} = \frac{S}{32} \quad (3.13)$$

$$n_{O_2} = (\lambda - 1) O_{min} \quad (3.14)$$

$$n_{N_2} = 0.79 \lambda H_{min} \quad (3.15)$$

Böylece toplam mol sayısı

$$n = \sum n_i \quad (i = CO_2, H_2O, NO, SO_2, N_2, O_2) \quad (3.16)$$

olur. Baca gazı bileşenlerinin konsantrasyonu:

$$y_i = \frac{n_i}{n} \quad (3.17)$$

ile hesaplanabilir.

3.2.2. Termokimyasal denge ve reaksiyon kinetiği

Tüm kimyasal reaksiyon sistem şartlarına bağlı olarak sınırlı bir hızda meydana gelirler. Bazı önemli koşullar şunlardır; kimyasal bileşenlerin konsantrasyonları, sıcaklık, basınç, inhibitör ya da katalizör oranı ve ışımsal etkiler. Reaksiyon hızı, reaktant konsantrasyonunun tüketim hızıyla ya da ürün konsantrasyonunun oluşum hızıyla ifade edilebilir. Reaksiyon hızının birimi genellikle ($\text{mol/m}^3\text{s}$) ile belirtilir.

Tek adımlı stokiyometrik kimyasal reaksiyon mekanizması en genel haliyle aşağıda verilmiştir.



burada v'_i reaktantların stokiyometrik katsayısını, v''_i ürünlerin stokiyometrik katsayısını, X_i i'inci kimyasal bileşenin moleküler özelliğini, N toplam bileşen sayısını, $k_{f,r}$ ileri reaksiyon hız sabitini ve $k_{b,r}$ geri reaksiyon hız sabitini ifade etmektedir.

Reaksiyon hızı en genel haliyle şu şekilde tanımlanabilir.

$$R_{i',k} = \frac{dX_{ürün}}{dt} = \frac{dX_{reaktant}}{dt} = k \prod_{i=1}^N X_i^{v'_{i,r}} \quad (3.19)$$

Reaksiyon hız sabiti (k) genellikle Arrhenius formunda aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad (3.20)$$

Bu denklemden A ifadesi Arrhenius faktörünü, T sıcaklığı, E_a aktivasyon enerjisini, R_u ise universal gaz sabitini sembolize etmektedir.

Örnek olarak A ve B reaktantlarından, P ve Q ürünlerinden oluşan bir reaksiyon aşağıdaki gibi tanımlanırsa:



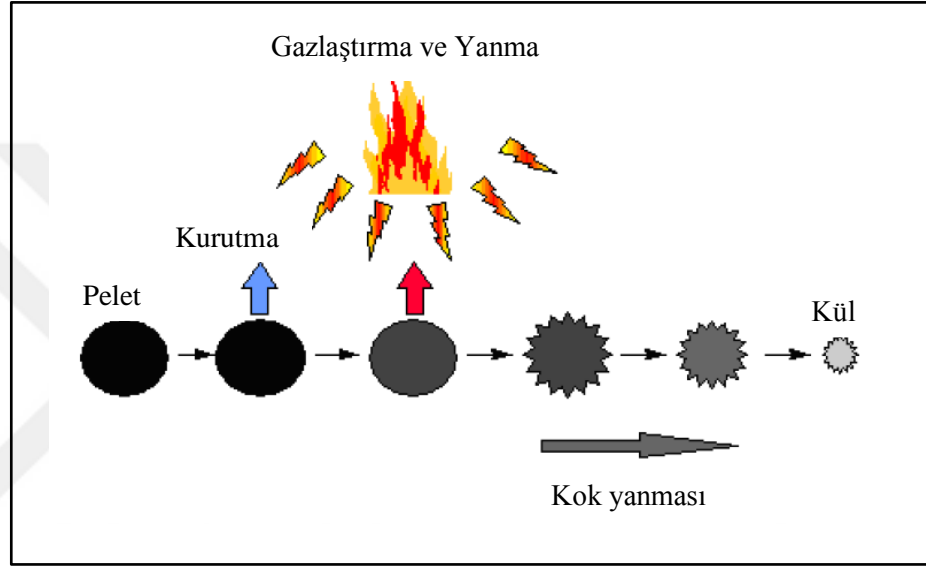
burada s_A ve s_B A ve B reaktantları için stokiyometrik katsayıları, s_P ve s_Q P ve Q ürünleri için stokiyometrik katsayıları göstermektedir.

Kimyasal reaksiyonun davranışını miktar olarak belirlemek için ürünlerin konsantrasyon ve oran sabitleri biçiminde, kimyasal türlerin konsantrasyonlarındaki değişim aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\frac{-1}{s_A} \frac{d[A]}{dt} = \frac{-1}{s_B} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{s_P} \frac{d[P]}{dt} = \frac{1}{s_Q} \frac{d[Q]}{dt} = k[A]^a[B]^b \quad (3.22)$$

burada k reaksiyon hız sabitini, a ve b reaksiyon derecesinin göstermektedir.

Pelet yakıtının yanması diğer katı yakıtlarda olduğu gibi dört aşamada gerçekleşir (Şekil 3.6); 1) Suyun buharlaşması ile kuruma, 2) Gazlaştırma (piroliz) ile uçucu bileşenlerin ayrılması, 3) Uçucu (gaz) bileşenlerin yanması, 4) Kok (sabit karbon) yanması.



Şekil 3.6. Pelet yakıt yanma aşamaları

Pelet yanmasında düşük emisyon ve düşük cüruf ile tam yanmayı sağlamak için, yanma havasının miktarı ve temin yöntemi aşırı öneme sahiptir. Yanmayı optimize etmek için yanma ortamını birincil ve ikincil yanma bölümleri olarak ikiye ayırmak gereklidir. Her iki bölgenin de kendi hava temini olmalıdır. Birincil yanma bölgesinde yanma, önce kurutma aşaması, ardından piroliz ve son yanma aşaması olmak üzere iki aşamada gerçekleşir. Kurutma aşamasında peletlerin bünyesinde kalan nemin buharlaşması ve peletleri terk etmesi sağlanır. Ardından ısı etkisiyle kuru peletler piroliz ile bozularak yanıcı ve uçucu gaz bileşenleri ve kok oluşur. Birincil yanma enerji girişi gerektirir ve buradaki yanma stokiyometrik oranın altında, yani eksik hava ile gerçekleşir. Bu sırada ikincil yanma bölgesinde yanıcı gazlar hava fazlalığı ile yakılmaktadır. Eşzamanlı olarak kok birincil yanma bölgesinde yakılır. Her iki oksitlenme sırasında, enerji salınır. Aynı zamanda birincil yanma bölgesine sürekli olarak yanmamış pelet beslenir. Optimal bir yanma için

oluşan yanma ürünleri ile ikincil havanın uygun bir şekilde karışmaları gereklidir. Bu husus, yanma odasının geometrisi ve sekonder hava nozullarının uygun düzenlenmesi ve tasarımı ile elde edilebilir. Mümkün olduğu kadar uzun baca gazı bekleme süreleri yanmanın tam olmasını sağlar (Holz, 2003).

İkinci yanma bölgesindeki fazla hava miktarı, sadece karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbonlar (UHC) için değil, aynı zamanda azot oksitler (NO_x) için de önem taşımaktadır. NO_x emisyonları ile CO ve UHC emisyonları arasında ters bir ilişki mevcuttur. Fazla havanın düşük olması CO ve UHC emisyonlarını artırırken, NO_x emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır. Buna karşılık fazla havanın yüksek olması NO_x emisyonlarının artmasına, diğerlerinin ise azalmasına neden olmaktadır. Yapılan ölçümler pelet brülörlerinin konvansiyonel sıvı yakıt brülörlerine oranla genellikle 2-4 kat daha fazla NO_x emisyonu yaydığını göstermiştir. Pelet kazan ve brülörleri, örneğin İsveç piyasasında, ağırlıklı olarak yüksek hava fazlalığı ile çalışmak üzere geliştirilmiştir. Değişken hızlı fan kullanarak hava temini sağlayan sistemler de mevcuttur. Bu amaçla CO veya bir lambda sensörü kullanılmakta, böylece bu emisyonların azaltılması da sağlanmaktadır. Almanya ve Avusturya piyasasında bu tür kazanlar üretilmektedir (Sungur vd, 2018). Buna karşılık İsveç piyasasındaki kazanlarda hava ayarı daha çok manuel olarak yapılmaktadır (Fiedler, 2004).

Düşük karbon monoksit, yanmamış hidrokarbonlar ve azot oksitler için diğer iki önemli parametre yanma odasındaki yanma ürünlerinin sıcaklığı ve kalma süresidir. Yüksek sıcaklık ve uzun kalma süresi, CO ve UHC emisyonlarını neredeyse sıfır seviyesine düşürürken, azot oksitleri arttırmaktadır. Bu durumda azot oksitleri azaltmak için kademeli yakma yöntemi uygun bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır (Pettersson, 1996).

3.3. Katı Yakıtlı Kazanlarda Verim

Prensip olarak bir yakma sisteminin veriminin ve ısı gücünün hesaplanmasında direkt ve endirekt olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır.

Direkt yöntemde soba/kazan ısı gücü, direkt olarak akışkana (suya) ve havaya geçen ısının ölçülmesi ile belirlenir. Kazan ısı verimi ise toplam soba/kazan ısı gücünün, kullanılan yakıt ısıl debisine bölünmesi ile elde edilir.

Endirekt yöntemde ise kazan ısı verimi; en temel haliyle tüm kayıpların belirlenmesiyle Eş. (3.23)'e göre hesaplanır (Onat, 2007).

Isıl verim için,

$$\eta = 1 - \sum q = 1 - (q_y + q_d + q_e + q_s + q_b + q_a) \quad (3.23)$$

eşitliği yazılabilir. Burada toplam ısı kayıp $\sum q$ ile, yanmamış yakacak kaybı (q_y), cüruftan gelen duyulur ve gizli ısı kaybı (q_d), eksik yanma kaybı (q_e), sıcak cidar kaybı (q_s), baca kaybı (q_b) ve aralıklı çalışma kaybı (q_a) ile sembolize edilmiştir. Kayıplar ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

Yanmamış yakacak kaybı (q_y):

Bu kayıp cüruftaki yanmamış kömür kaybı, uçan kok kaybı ve ızgara aralıklarından düşen kömür kayıplarından oluşur ve detaylar aşağıda verilmiştir.

Cüruftaki yanmamış kömür kaybı (q_f):

$$q_f = \frac{a C H_{kok}}{H_u} \quad (3.24)$$

Burada C birim miktar yakacağın yanması sonunda meydana gelen, ızgaranın üstünde kalan cüruftaki miktarı (kg/kg), a cüruftaki yanmamış kömür yüzdesi, H_u yakacağın alt ısı değeri (kJ/kg), H_{kok} cürufta koklaşmış halde bulunan kömürün ısı değeri (kJ/kg) anlamındadır. H_{kok} için 33000 kJ/kg alınabilir. $a \approx 0.05-0.20$ civarındadır, yanmanın iyileşmesi oranında a için küçük değerlerin seçilmesi gerekir.

Uçan kok kaybı (q_u):

Duman gazları ile sürüklenen kömür ve kül taneciklerinden meydana gelen uçan kokun yol açtığı ısı kaybı,

$$q_u = \frac{b U H_{kok}}{H_u} \quad (3.25)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. U yakacağın birim miktarının yanması sonunda oluşan uçan kok (kül+kömür) miktarı (kg/kg), b uçan koktaki kömür oranı anlamındadır. b değeri genellikle 0.30-0.60 arasında seçilebilir. Ocakta, gaz hızı arttıkça, tane çapı küçüldükçe, kömürün kuruluğu artıp hamurlaşması azaldıkça b için büyük değerlere doğru gidilir.

Izgara aralıklarından düşen kömür kaybı (q_{yd}):

Kömür tanelerinden bir kısmı yanmadan ızgara aralıklarından aşağıya düşerek,

$$q_{yd} = \frac{c D H_{kok}}{H_u} \quad (3.26)$$

değerinde bir ısı kaybına yol açar. Burada D birim yakacak miktarı için düşen cüruf (kül+kömür) miktarını (kg/kg), c düşen cüruftaki kömür yüzdesini gösterir.

O halde yanmamış yakacak kaybı,

$$q_y = q_f + q_u + q_{yd} \quad (3.27)$$

şeklindedir.

Curuftan gelen duyulur ve gizli ısı kaybı (q_d):

Curuf sıcak olarak atıldığından bir miktar duyulur ısıyı da beraberinde götürür. Külün ergimiş olarak alındığı ocaklarda ise aynı zamanda ergime ısısı da cürufle birlikte atılmış olur. Buna göre cürufun atılması ile doğan kayıp,

$$q_d = \frac{C(\theta + i_{ks})}{H_u} \quad (3.28)$$

şeklinde değerlendirilebilecektir. Burada c cürufun özgül ısısını (kJ/kg C), θ cürufun çevreye göre sıcaklık fazlalığını (C), i_{ks} ergime gizli ısısını (kJ/kg) gösterir. c özgül ısısı 0.8 kJ/kg C ve θ , cürufun katı olması halinde 800 °C kabul edilebilir. Curuf katı ise $i_{ks}=0$ olacaktır.

Eksik yanma kaybı (q_e):

Yakacağın karbonunun bir kısmının karbonmonoksit şeklinde yanması sonucunda doğan kayıptır ve

$$q_e = \frac{(1 - y)v_{gk}CO H_{CO}}{H_u} \quad (3.29)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Bu bağtıda (1-y) efektif olarak yanan yakacak yüzdesini, v_{gk} özgül kuru duman miktarını (Nm³/kg), CO duman gazının içerdiği karbonmonoksit oranını, H_{CO} karbonmonoksitin ısıl değerini gösterir.

Sıcak cidar kaybı (q_s):

Kazanın sıcak dış yüzeylerinden çevreye ışıınım ve taşınım yolu ile ısı kaybı olur. Yüzeyler gelişigüzel geometrilere olduğundan bu kaybın hesaplanması çok güç, hatta pek çok halde imkansızdır, ancak deneysel sonuçlarla bulunabilir.

Baca kaybı (q_b):

Baca kaybı,

$$q_b = \frac{(1 - y)v_g (i_b - i_a)}{H_u} \quad (3.30)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada i_b , i_a duman gazının karşılıklı olarak baca ve çevre sıcaklığındaki entalpilerini (kJ/kg) ifade eder.

Aralıklı çalışma kaybı (q_f):

Bu kayıp durma veya yük değişmesi sonunda soğuyan yüzeylerin tekrar ısıtılması yüzünden meydana gelir ve hesaplanması için aşağıdaki deneysel bağıntıdan yararlanılabilir:

$$q_f = \frac{24 - z}{z} \quad (3.31)$$

Burada z kazanın günlük çalışma süresini (h) göstermektedir.

Endirekt yöntemde ısı verim hesabı, Eş. (3.23)'teki bazı terimler göz ardı edilerek daha basit hale getirilebilir. Carvalho ve ark. (Carvalho vd, 2013) yaptıkları çalışmada kazan ısı veriminin belirlenmesinde; baca gazı kaybı, baca gazı içerisindeki yanmamış karbon kaybı, küldeki yanmamış karbon kaybı ve kazan yüzeylerinden radyasyonla ısı kaybı gibi kayıpları dikkate alarak Eş. (3.32)'de belirtildiği gibi hesaplamışlardır.

$$\eta = 1 - (q_b + q_u + q_f + q_s) \quad (3.32)$$

Bu denklemde, q_b baca gazı kaybını, q_u baca gazı içerisindeki yanmamış karbon kaybını, q_f küldeki yanmamış karbon kaybını ve q_s kazan yüzeylerinden radyasyonla ısı kaybını sembolize etmektedir.

$$q_b = (V_{exh,d}c_{p,exh} + V_w c_{p,su})(T_{exh} - T_0) \frac{1}{H_u} \quad (3.33)$$

$$q_u = 10^{-6} [\text{CO}] V_{exh,d} \frac{12640}{H_u} \quad (3.34)$$

Burada, $V_{exh,d}$ ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) yanma sırasında oluşan yakıt kg başına kuru baca gazı hacmini, V_w ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) baca gazındaki nem miktarını, T_{exh} ($^{\circ}\text{C}$) ve T_0 ($^{\circ}\text{C}$), baca gazı ve ortam havası sıcaklıklarını, $c_{p,exh}$ ($\text{kJ} (\text{kg K})^{-1}$) ve $c_{p,su}$ ($\text{kJ} (\text{kg K})^{-1}$), baca gazı ve suyun özgül ısılarını, $[\text{CO}]$ (ml m^{-3}) baca gazı içerisindeki CO miktarını sembolize etmektedir.

Odun peletleri ve diğer tarımsal yakıtlar için küldeki yanmamış karbon nedeniyle oluşan kaybın (q_f) %0.02'nin altında olduğunu belirlemişlerdir. Bu kaybın verim üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu ve dolayısıyla verimlilik hesaplarında q_F değerinin sıfır olarak kabul edildiğini belirtmişlerdir (Carvalho vd, 2013).

Eşitlik (3.33)'deki baca gazı duyulur ısısı (q_b) hariç diğer kayıplar ihmal edilirse en basit hale indirgenir ve aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\eta = 1 - (1 + \lambda A_{sto})(T_{exh} - T_0)c_{p,exh} / H_u \quad (3.35)$$

Burada λ hava fazlalık katsayısı, A_{sto} stokiyometrik hava ihtiyacı (kg hava/kg yakıt), $c_{p,exh}$ baca gazı özgül ısısı (kJ/kgK), T_{exh} baca gazı çıkış sıcaklığı (K), T_0 ortam havası sıcaklığı (K), H_u ise yakıtın alt ısı değeri (kJ/ kg yakıt) dir (Sungur vd, 2016).

3.4. Pelet Yakıtlı Kazanlar ve Yakma Teknolojileri

Kazanlar; yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan ısı enerjisini bir akışkana verecek şekilde imal edilmiş ve basınç altında çalışan ısı değiştiriciler olarak da tanımlanabilir. Kazanlar en temel haliyle alev/duman borulu ve su borulu olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Bir kazanın temel parçaları; yanma odası/brülör/ateşleme sistemi, besleme sistemi ve ısı değiştiricileridir. Isı değiştiriciler, pelet yakıtlı kazanlarda büyük oranda (yaklaşık %90) duman borulu olarak tasarlanırlar. Su borulu ısı değiştiriciler, talaş ve odun kütüğü yakan kazanlarda daha çok tercih edilir.

Genellikle (%80) pelet yakıtlı kazanlarda duman boruları dikey olarak yerleştirilirler (Míguez vd, 2012).

Pelet yakıtlı kazan (boyler) ve soba olarak iki tip sistem bulunmaktadır. Kazanda yanmış gazların ısı enerjisi bir eşanjör (ısı değiştirici) yardımıyla tesisat suyuna aktarılır. Bu sistemler tek veya çoklu konutların kalorifer tesisatı ile ısıtılmasında kullanılırlar. Bu sistemlerin maksimum ısı gücü aralığı 10-40 kW'dır ve ısı talebine göre %30-100 kapasite aralığında otomatik kontrole sahiptirler. Şekil 3.7'de pelet yakıtlı bir kazanın şematik görünümü verilmiştir.



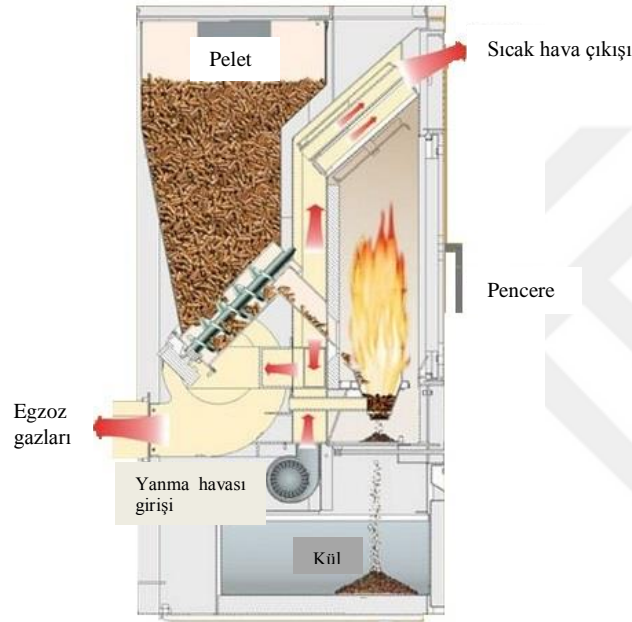
Şekil 3.7. Pelet yakıtlı kazan görünümü (Anonymous, 2018)

Pelet yakıtlı kazanlar temel olarak konvansiyonel sıvı yakıtlı kazanlar gibi tasarlanırlar. Yakıt, depodan yanma odası içindeki yakıcı görevini üstlenen hazneye beslenir ve burada tutuşma ve yanma gerçekleşir. Yakıtın yanmasıyla açığa çıkan gazlar ısı değiştirici etrafındaki birkaç kanaldan iletilir ve ısı enerjisi ısı değiştirici içindeki suya aktarılır. Isınan su bir sirkülasyon pompası vasıtasıyla kalorifer tesisatına pompalanır. Isı transferini iyileştirmek ve yeterli miktarda yanma havasını sağlamak için bir fan kullanılır. Yanma odasının ve ısı değiştiricinin boyutu uygun yanma ve yeterli ısı transferinin sağlanması bakımından önem arz etmektedir. Ayrıca, kazan yerleştirildiği mahale ısı kaybını önlemek için tamamen izole edilir.

Kazanlar, sistem verimliliğini artırmaya yönelik yeterli miktarda hava sağlamak amacıyla bir emme fanı ve optimum yanma ve ısıl enerji modülasyonu

amacıyla bir lambda sensörü ile donatılabilir. Bu özelliklerle donatılmış sistemlerin verimi %94'lere kadar artmaktadır. Bu özelliklere sahip olmayan standart sistemlerin verimleri %85'den daha düşüktür ve daha yüksek emisyonlar vermektedir.

Sobalar ise tek bir odanın ısıtılması için kullanılır ve açığa çıkan ısının taşınım ve ışınım yolu ile mahale transferi ile ısıtma gerçekleşir. Şekil 3.8'de pelet yakıtlı bir sobanın şematik görünümü verilmiştir. Bazı sobalar kalorifer tesisatına bağlı su ceketleri ile donatılmıştır. Isıtma gücü en fazla yaklaşık 10 kW'dır ve manuel ya da otomatik olarak oda sıcaklığına göre kontrol edilebilirler.

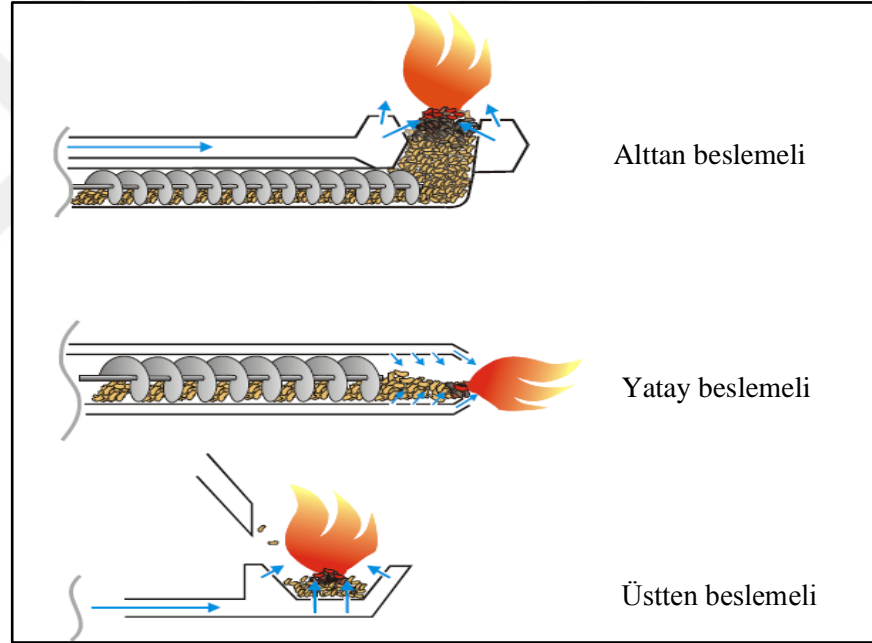


Şekil 3.8. Pelet yakıtlı soba görünümü (Anonymous, 2016)

Pelet sobaları da kazanlara benzer prensibe sahiptirler. Teori ve konstrüksiyon olarak oldukça benzerdirler. Genelde kapasiteleri ile sınıflandırılırlar. Sobalar, genellikle bir-iki günlük yeterli miktarda pelet yakıt deposuna sahiptirler. Az da olsa pelet yakıt deposu kazanlarda olduğu gibi ayrı olan tipleri de mevcuttur (Ecotec, 2016). Kazanlarda olduğu gibi pelet yakıt sobaya entegre brülör ile yakılır. Yanma için gerekli birincil hava ve otomatik yanma için gerekli sıcak hava pelet potası altındaki açıklıklardan sağlanır. Bu işlem için yakıcının altına bir emme fanı yerleştirilir. Kül uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak için pelet manuel veya otomatik hareket ettirilebilen bir plaka yardımıyla kül haznesine dökülür.

3.4.1. Pelet besleme sistemleri

Pelet besleme sistemleri kazana veya ocağa beslenme şekline göre prensip olarak üçe ayrılır; alttan beslemeli, yatay beslemeli ve üstten beslemeli (Şekil 3.9). Alttan beslemeli ve yatay beslemeli durumda pelet yakıtları yanma odasına alttan girerler ve tasarım şekline göre yatay veya yukarı doğru alev oluşur. Üstten beslemeli durumda peletler depolama tankından helezonlar yardımıyla ızgaraya düşerler. Böylece güç ihtiyacına göre daha hassas bir besleme elde edilebilir. Soba ve kazanlarda en çok kullanılan tip üstten beslemeli brülörlerdir. Bu tiplerin avantajı pelet deposunun yanma odasından ayrı olması ve böylece geri yanma tehlikesinin düşük olmasıdır. Ancak üstten düşen peletler toz artışına ve sürekli olmayan yanmadan dolayı yanmayan partikül oluşumuna sebep olurlar (Fiedler, 2004).



Şekil 3.9. Pelet yakıtların kazana veya ocağa beslenme şekilleri

3.4.2. Pelet yakma hazneleri ve ocakları

Pelet yakmada kullanılan teknolojiler, sorunsuz ve tüketiciye yüksek konfor sağlayan sistemler olmalıdır. Bu kapsamda, uygun ve dayanıklı malzemelerin kullanılması (servis ömrü gibi sebeplerden dolayı) yakma sistemi için oldukça önemlidir. Yanma odası paslanmaz çelik, ateş tuğlası ve silikon karbür gibi malzemelerden yapılabilir. Paslanmaz çelik, düşük ısı depolama kapasitesine sahip, ucuz ve paslanmaya dirençli

bir malzemedir. Paslanmaz çeliklerin cüruf oluşturma tehlikesi ateş tuğlalarından daha düşüktür. Ateş tuğlaları paslanmaz çeliklere göre daha pahalıdır ve daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptir. Silikon karbürler, kül ile reaksiyona girmezler dolayısıyla tortu ve cüruf oluşumuna karşı dirençlidir ve bu nedenle yanma odalarında kullanmak için çok uygundur. Ancak silisyum karbürlerin fiyatları daha pahalıdır (Oberberger, 2006).

Pelet brülörlerinde helezon taşıyıcılar kullanılır ve bu taşıyıcılar peleti brülör borusu içinden taşır ve yanma yatağı (haznesi) içine iter ve burada yanma gerçekleşir. Yanma havası pelet ile beraber veya yanma haznesindeki açıklıklardan sağlanır. Kül ise pelet ile yer değiştirir ve yanma haznesindeki açıklıklardan kül haznesine veya kül transport sistemine düşer. Bu tip brülör ile yanma oldukça uygundur, fakat pelet besleme tipine bağlı olarak yanma sonrası periyodu uzun olabilir. Geri tutuşmayı minimize etmek için ilave önlemler gerekmekte olup daha fazla geliştirme çalışmaları yapılmaya ihtiyaç vardır (Holz, 2003).

Alttan beslemeli brülörler daha çok talaş yakıtlar için tasarlanmış olmakla beraber pelet için de uygun olabilir. Yatay beslemeli brülörler de alttan beslemelilere oldukça benzerdir, tek fark yanma yatağının şeklidir ve bu tip brülörlerde ilave olarak sürekli olarak kül uzaklaştırma gereklidir.

Pelet yakıcıları, tasarımına göre hazneli ocak ve ızgaralı ocak olarak ikiye ayrılabilirler. Izgaralı ocaklar ayrıca sabit ızgaralı, açılır kapanır ızgaralı ve kademeli ızgaralı sistemlere ayrılabilirler ve bu durum Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Hazneli ocaklar daima alttan beslemeli yakıcı olarak tasarlanırlar. Izgaralı ocaklar ise yatay ve üstten beslemeli yakıcı olarak tasarlanırlar (Oberberger, 2006).



Şekil 3.10. Pelet yakıtı yakma teknolojileri (Oberberger, 2006)

3.4.3. Pelet ateşleme sistemleri

Yakıt ateşlemesi, aşağıdaki tekniklerden biri kullanılarak incelenen kazanların %94'ünde otomatik olarak gerçekleştirilir:

-*Sıcak havanın kullanılması (%35)*: Sıcak hava jeneratörü, ekipmanın elektronik kartında bulunan bir mikro işlemci tarafından kontrol edilir ve ateşleme alevini üretir.

-*Elektrik kullanımı (%53)*: Elektrik ateşlemesi, çalışılan kazanlardan yarısında kullanılır ve elektrik rezistansı kullanılarak üretilir.

-*Seramik ateşleme kullanma*: Seramik akkor bir çubuktan oluşan seramik ateşleme de kullanılabilir. Bu ateşleyici sadece 250 W elektrik tüketir ve 1500-1800 W tüketen bir sıcak hava ateşlemesine göre avantaj sağlar.

Pelet yakıtlı kazanların %56'sında ve sobaların %66.9'unda seramik ateşleme tercih edilir (Míguez vd, 2012).

3.4.4. Kontrol teknikleri

Piyasadaki en gelişmiş kazanlar, üreticiye bağlı olarak uygulanan çeşitli kontrol parametreleriyle birlikte otomatik bir kontrol sistemine sahiptir. Bu kontrol, mümkün olan en iyi performansı garanti etmek ve her durumda mümkün olan en düşük

emisyonları sağlamak için çok önemlidir. Bu performans hem yanmanın başlangıcında hem de sonunda nominal (tam) ve kısmi güçte sağlanmalıdır.

Yanma için en yaygın kontrol cihazı lambda probudur. Bu prob baca içine yerleştirilir ve oksijen konsantrasyonunu belirleyerek kontrol eder. Amaç, tam yanma sağlamak için oksijen seviyelerini ayarlamaktır. Azaltılmış oksijen seviyesine ulaşıncaya kadar ikincil hava temini artırılır veya azaltılır.

Modüler kontrol teknikleri, pelet kazanlarında ve sobalarında önemli oranda uygulanmaktadır. Pelet yakıtlı kazanlarda modüler kontrol kullanımı %40.1 iken sobalarda bu değer %43.3'tür. Lambda probu ile kontrol ise pelet yakıtlı kazanlarda %42.0 iken sobalarda bu değer %4.5 değerindedir (Míguez vd, 2012).

3.4.5. Güvenlik

Pelet yakıtlı ısıtma sistemlerinde en önemli problem yanma odasından pelet taşıyıcı ve deposuna geri tutuşma (yanma) tehlikesidir. Bu problemi çözenin en basit yolu sıcaklık kontrollü kapaklı üstten beslemeli brülör kullanmaktır. Yatay ve alttan beslemeli brülörlerde ise çark tipi hücre kilit mekanizması kullanılmaktadır. Bu mekanizmada peleti taşıyan çark alevin pelete ulaşmasını önler. Diğer bir önleme mekanizması da helezon taşıyıcıyı pelet deposundan ve brülörden ayıran düşen mil sistemidir. Bazı kazanlarda belirlenen sıcaklık aşıldığında alevi söndürmek için sprej sistemi kullanılır (Fiedler, 2004). Ayrıca, pelet deposunun bağlantı borularının yanmaz malzemeden olması gereklidir.

3.4.6. Bakım

Pelet yakıtlı kazanlar genel olarak konvansiyonel kazanlara kıyasla daha çok bakıma ihtiyaç duyarlar. En yaygın bakım ve temizlik gereksinimleri şunlardır:

- Peletin doldurulması
- Baca kanallarının temizlenmesi
- Brülörün kül ve cürufan temizlenmesi
- Kül haznesinin boşaltımı
- Soba pencere ve kapaklarının temizlenmesi

Baca gazı kanallarının periyodik olarak temizlenmesi gerekir. Aksi takdirde kül ve cüruf kalıntılarının boru ve kanal kesitlerini daraltması nedeniyle hava çekişi azalmakta, yetersiz yanma ve CO artışı gözlemlenmektedir (Fiedler, 2004).

Dikey duman borulu kazanlar genellikle küçük çaplı pelet yakma sistemlerinde kullanılır. Tam otomatik kazan temizleme sistemlerinde, duman boruları bir elektrik motoruyla tahrik edilen spiral kazıyıcılarla, yarı otomatik sistemlerde ise bir kol vasıtasıyla dışarıdan çalıştırılan spiral kazıyıcılarla temizlenmektedir. Otomatik kazan temizleme sistemleri verimi arttırmakta ve toz emisyonlarını düşürmektedir.

Modern biyokütle kazanları, çok temiz ve verimli yanma nedeniyle çok düşük bir kül hacmi üretir. Brülörde biriken kül ve yanma odasındaki uçucu kül düşünülmelidir. Bu küller, kazan için özel olarak bu amaçla yerleştirilen depo kutularında toplanır. Brülörde toplanan kül otomatik olarak bertaraf edilir. Bu brülörler sıklıkla titreşimli ızgaralar, menteşe cihazları, salıncak ızgaraları gibi bu külün ortadan kaldırılması için özel mekanizmalarla oluşturulurlar.

Pelet yakıtlı soba/kazanlarda çeşitli kül giderme sistemleri kullanılmaktadır. Izgaradaki veya haznedeki küller genellikle kül sandığında toplanır. Bu kül sandığı periyodik olarak boşaltılmalıdır (Oberberger, 2006). Çoğu sistemlerde haftada bir boşaltılır. Büyük sistemlerde ise kül, yanma odasından helezon taşıyıcı ile çekilir ve kül deposunda sıkıştırılarak depolanır. Bu tip sistemlerde sadece yılda 3 kez boşaltım yeterli olabilir.

Otomatik ısı eşanjörü temizleme sistemlerinin kullanımı son yıllarda %78'e yükselmiştir. İncelenen kazanların %63'ünde tercih edilen temizleme cihazı, türbülötörlerdir. Kazanların % 22'sinde yaylar veya spiraller kullanılırken, kazanların sadece % 9'unda akış devirdaim sistemleri kullanılmaktadır (Míguez vd, 2012).

3.4.7. Pelet yükleme sistemleri ve depoları

Çoğu sistemlerde kazanlar depolardan ayrı yerleştirilir. Depodan peleti kazana taşımak için genellikle iki tip sistem kullanılır: helezon konveyör taşıyıcılar ile vakumlu sistemler. Konveyör taşıyıcılar depo ile kazan arasındaki mesafenin az, vakumlu sistemler ise mesafenin fazla olduğu durumlarda tercih edilir. Yıllık ısı enerjisi ihtiyacı 20000 kWh olan bir ev için (yılda bir dolum yapıldığı takdirde) 6-8 m³ pelet deposu gereklidir (Fiedler, 2004).

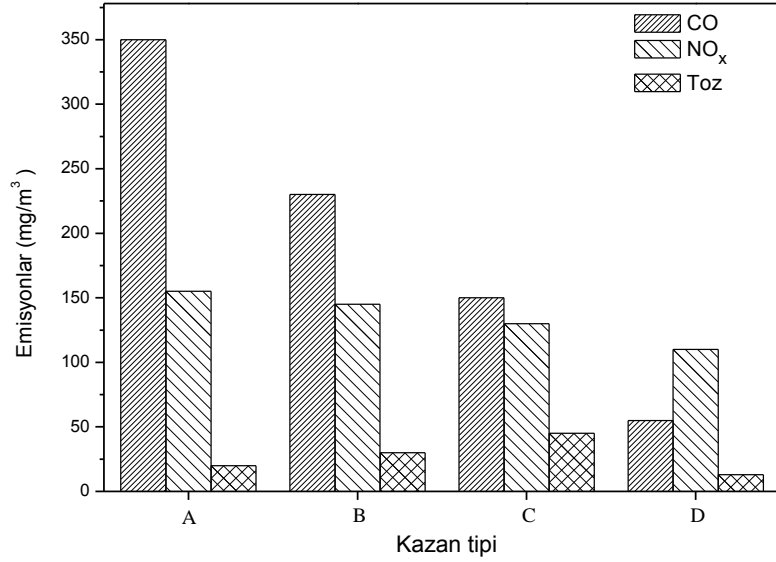
3.4.8. Baca

Pelet yakıtlı soba ve kazanlar egzoz gazlarının atmosfere atımı için bir bacaya ihtiyaç duyarlar. Avrupa’da yasal düzenlemelere göre de pelet yakıtlı ısıtma sistemlerinin bacasız ve direkt olarak duvardan dışarıya egzoz edilmesine müsaade edilmemektedir. Buna ilaveten düzenlemeler baca malzemesi ve boyutlarını da belirlemektedir. Bacaya bağlanan baca gazı kanalları ve boruları yüzey sıcaklıkları 100 °C’yi geçmemelidir. Fakat bacada yoğuşmayı önlemek için egzoz gazlarının minimum sıcaklığının ne olması ile ilgili bir düzenleme mevcut değildir. Yoğuşmalı kazanlar için standart tuğla bacalar uygun değildir, neme dirençli bacalar kullanılmalıdır (Dağsöz, 1993).

3.4.9. Emisyon düzenlemeleri

Yoğun yerleşim bölgelerinde ısınma amaçlı olarak aşırı katı yakıt kullanımı, uygun olmayan kullanımlar ve yetersiz bakıma bağlı olarak hava kalitesini düşürmekte ve sağlık riskleri artmaktadır. Tehlikeli egzoz gazlarından ve partiküllerden korunmak için yasal düzenlemeler gereklidir ve ayrıca bu düzenlemeler üreticileri daha düşük emisyonlar için ürünlerini optimize etmeye (iyileştirmeye) teşvik etmektedir. Pelet kazanların diğer tip kazanlara kıyasla daha düşük miktarlarda emisyon ve partikül salınımına sebep olduğu Şekil 3.11’de görülmektedir (Sungur vd, 2018).

Bazı Avrupa ülkelerinde ve ülkemizde de yürürlükte olan EN 303-5 normuna göre karbonmonoksit (CO), organik karbon gazları (Organic Gaseous Carbon-OGC) ve partikül madde (toz) için emisyon sınır değerleri Çizelge 3.10’da verilmiştir (Anonim, 2017).



Şekil 3.11. Farklı tip odun yakıtlı kazanlerin emisyonları, A: Odun kütüğü kazanı, doğal çekişli, 20-50 kW; B: Odun kütüğü kazanı, mikroişlemci kontrollü hava beslemeli, 20-50 kW; C: Odun yongası kazanı, 40-70 kW; D: Pelet kazanı, 15 kW (Sungur vd, 2018)

Çizelge 3.10. Emisyon sınır değerleri (Anonim, 2017)

Yükleme	Yakıt	Güç (kW)	CO*			OGC*			Toz*				
			Sınıf 3	Sınıf 4	Sınıf 5	Sınıf 3	Sınıf 4	Sınıf 5	Sınıf 3	Sınıf 4	Sınıf 5		
Manuel	Canlı kökenli	≤ 50	5000	1200	700	150	50	30	150	75	60		
		>50 ≤150	2500									100	150
		>150 ≤500	1200									100	150
	Fosil	≤ 50	5000									150	125
		>50 ≤150	2500									100	125
		>150 ≤500	1200									100	125
Otomatik	Canlı kökenli	≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	150	60	40		
		>50 ≤150	2500									80	150
		>150 ≤500	1200									80	150
	Fosil	≤ 50	3000									100	125
		>50 ≤150	2500									80	125
		>150 ≤500	1200									80	125

*Emisyon sınır değerleri 0°C, 1013 mbar ve %10 O₂ kuru baca gazı şartlarında mg/m³ olarak verilmiştir.

Almanya, İsveç gibi bazı Avrupa ülkelerinin pelet sistemlerinin emisyonları ile ilgili özel düzenlemeleri de mevcuttur. Yasal düzenlemelere ilaveten bazı sertifikalar da mevcuttur. Ürün bir dizi teste tabi tutulur ve sonuçlara göre sertifikalandırılır. Bu sertifika pazarda önemli bir avantaj sağlar. Benzer bir yöntem de yüksek verimli ve düşük emisyonlu kazanların ekolojik etiketlenmesidir. Örneğin, Almanya'da

Blauer Engel (Mavi Melek), Avrupa genelinde Eco-Label çevre dostu ürünler için yaygın kullanılan etiketlendirmedir. Ayrıca bazı Avrupa Birliği ülkeleri düşük emisyonlu ve yüksek verimli sistemler için finansal teşvik vermektedir (Sungur vd, 2018).

3.5. Pelet Yakıtlı Kazanların Piyasa Değerlendirmesi

Piyasada çok sayıda pelet yakma sistemi üreten firma mevcut olup, buna bağlı olarak çok farklı tasarımlar ve teknik detaylar bulunmaktadır. Örnek olarak incelenen bu üretici firmaların bilgilerinden derlenen teknik veriler Çizelge 3.11’de sunulmuştur. Çizelgede tam yükleme ve kısmi yükleme olmak üzere iki grupta inceleme yapılmıştır. Dikkat edilirse genel olarak pelet yakıtlı kazanların verimleri %90’ın üstünde çıkmıştır. Kazan ısı gücü arttıkça baca gazı sıcaklığının da genelde arttığı görülmektedir. Yoğuşmalı kazanların yoğuşmasız kazanlara göre yaklaşık olarak %13’lük bir verim artışı sağladığı görülmektedir. Emisyonlar açısından incelenecek olursa genelde tam yükleme durumunda oluşan CO emisyonları kısmi yükleme durumunda oluşan CO emisyonlarına göre daha düşük seviyededir ve bu durum Çizelge 3.11’de görülmektedir. Bunun sebebi genellikle katı yakıtların yüksek hava fazlalık katsayıları ile yakılması gösterilebilir. Bunun neticesinde oluşan CO₂ emisyonlarının da tam yükleme durumunda daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak, her firmanın emisyon değerlerine ulaşamamıştır (Sungur vd, 2018).

Pelet yakıtlı sistemlerle ilgili yeni teknoloji araştırmaları da yapılmaktadır. Bunlardan biri kojenerasyon sistemleridir. Kojenerasyon sistemleri, güç ve ısının birlikte üretildiği sistemlerdir. Ev tipi mikro kojenerasyon sistemlerinin kullanılması ile elektrik üretiminde enerji tasarrufu sağlanmakta, üretim ile tüketimin aynı yerde olmasından dolayı şebeke kayıplarının önüne geçilmekte ve enerji kaynağı olarak yenilenebilir yakıt kullanılması durumunda enerjide dışa bağımlılık azaltılmaktadır (Sungur vd, 2017). Son yıllarda pelet yakıtı ile stirling motorlarının kombine edildiği sistemler üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır (Sungur vd, 2018). Ülkemizde ise bu konuda pek fazla çalışma bulunmamaktadır.

Çizelge 3.11. Piyasada üretilen bazı pelet kazanlarının teknik verileri (Sungur vd, 2018)

Üretici Firma	Model	Güç aralığı (kW)	Tam yükleme				Kısmi yükleme			
			CO ₂ (%hacim)	CO (mg/m ³)	Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	Verim (%)	CO ₂ (%hacim)	CO (mg/m ³)	Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	Verim (%)
Evergreen	Biotech	2,4-9,2	13,1	---	95,0	92,0	10,5	---	54,0	92,2
Evergreen	Biotech	4,1-14,5	13,3	---	94,4	93,6	7,8	---	50,1	96,3
Evergreen	Biotech	4,5-14,9	13,5	---	125,0	93,0	9,9	---	79,0	93,5
ETA	PC20	6,0-20,0	13,0	7,0 (13%O ₂)	130,0	94,8	10,0	25,0 (13%O ₂)	90,0	91,8
ETA	PC25	7,3-25,0	13,5	7,0 (13%O ₂)	135,0	95,2	10,5	21,0 (13%O ₂)	95,0	92,2
ETA	PC32	7,3-32,0	13,5	7,0 (13%O ₂)	140,0	94,5	10,5	21,0 (13%O ₂)	95,0	92,2
İfyıl	GT 25	8,3-25,0	---	---	118,0	91,5	---	---	---	---
Brunner	Pelletini12	3,6-12,0	---	---	90,0	---	---	---	---	---
Brunner	Pelletini15	4,5-15,0	---	---	90,0	---	---	---	---	---
Fröling	P4 8	3,1-10,5	---	---	---	90,0-95,7	---	---	---	90,0-95,7
Fröling	P4 15	3,1-14,9	---	---	---	90,0-95,7	---	---	---	90,0-95,7
Fröling	P4 20	6,0-20,0	---	---	---	90,0-95,7	---	---	---	90,0-95,7
Guntamatic	Biostar12	3,3-12,0	---	---	---	94,7	---	---	---	94,7
Guntamatic	Biostar15	3,5-15,0	---	---	---	94,8	---	---	---	94,8
Arıkazan	Lesta12	3,6-12,0	---	---	170,0	>%90,0	---	---	120,0	>%90,0
Arıkazan	Lesta18	5,4-18,0	---	---	170,0	>%90,0	---	---	120,0	>%90,0
Hargassner	Classic12	3,5-12,	13,7	45,0 (mg/MJ)	---	93,6	7,1	---	31,0 (mg/MJ)	90,4
Hargassner	HSV15	4,5-16,8	15,1	18,0 (mg/MJ)	---	94,3	12,0	26,0 (mg/MJ)	---	93,2
ÖkoFEN	PE(S)10	3,0-10,0	---	58,0 (13%O ₂)	160,0	92,0-93,0	---	142,0 (13%O ₂)	100,0	91,0-93,0
ÖkoFEN	PE(S)12	3,4-12,0	---	69,0 (13%O ₂)	160,0	92,0-93,0	---	123,5 (13%O ₂)	100,0	91,0-93,0
ÖkoFEN	Condens10	3,0-10,0	---	4,0 (13%O ₂)	38,0-80,0	105,5	---	8,0 (13%O ₂)	38,0-80,0	103,4
ÖkoFEN	Condens12	4,0-12,0	---	5,2 (13%O ₂)	38,0-80,0	106,0	---	7,2 (13%O ₂)	38,0-80,0	103,7
Solarfocus	Octoplus 10	2,9-9,9	---	---	---	%94,0'a kadar	---	---	---	---
Solarfocus	Octoplus 15	2,9-14,9	---	---	---	%94,0'a kadar	---	---	---	---
Sunsystem	PLB15	5-15	---	---	160,0	---	---	---	130	---

3.6. Hava Kirletici Emisyonlar

Yanma sonucu ortaya çıkan emisyonlar sağlık ve çevresel açıdan önemli bir toplumsal sorun haline gelmiştir. Hava kirleticileri spesifik ve konvansiyonel olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Spesifik kirleticiler daha çok bölgesel ve düşük konsantrasyonlarda olurlar ve genellikle kanserojendirler. Bunlara örnek olarak asbest, benzen, nitrosamin gibi maddeler gösterilebilir.

Konvansiyonel kirleticiler daha yaygın ve nispeten yüksek konsantrasyonlarda bulunanlardır ve en önemlileri şunlardır: partiküller, karbonmonoksit (CO), hidrokarbonlar (C_xH_y), kükürt oksitler (SO_x), azot oksitler (NO_x), halojenler (HF, HCl) ve Ozon (O₃).

3.6.1. Partiküller (Tozlar)

Partikül madde, ortalama gaz molekül büyüklüğü 0.0002 µm çaptan iri olan ve havada bir süre asılı kalabilen katı veya sıvı her türlü maddeye verilen addır. Yapılan tanımlama dikkate alınarak, maddenin yoğunluğuna ve geometrisine de bağlı olmakla birlikte en iri partikülün 500 µm (0.5 mm) kadar çapta olması gerekir. (Seven vd, 2018).

Toz, duman, is gibi bazı partiküller gözle görülebilecek kadar büyüktür. Ancak mikroskopla görülebilen boyutlarda partiküller de bulunmaktadır. Daha çok öğütme işlemleri, kırma, yol tozlarından kaynaklanan ve çapları 2.5 µm -10 µm aralığında bulunan partikül maddeler “kaba partiküller” olarak adlandırılır. Çapları 2.5 µm’den daha küçük partiküller ise “ince partiküller” olarak adlandırılır (Seven, 2014).

Tozluluk, insan, hayvan, bitki gibi canlıların sağlığına olumsuz etki yapan bir kirlilik türüdür ve görüş mesafesini kısaltır. Tozluluk konsantrasyonuna bağlı olarak oluşan çevresel etkileri ilişkilendirmek güçtür. Genelde tozu teşkil eden maddenin türü, taneciklerin boyutları, tozluluğa maruz kalma süresi ve havada bulunan diğer gaz, su buharı gibi maddelerin varlığı da çevresel etkilerde katkıda bulunmaktadır (Topaloglu, 2009).

3.6.2. Karbonmonoksit

Karbonmonoksit (CO), renksiz, kokusuz ve eksik yanma sonucu oluşan bir gazdır. Mol kütlesi havanın mol kütlesine yakındır ve bu sebeple oluştuğu bölge etrafında iyi dağılmayarak varlığı kolay fark edilmez. Zehirli bir gazdır ve atmosferde yok olması kolay değildir. CO zehirlenmeleri, kandaki hemoglobinin CO ile tercihli olarak bir kompleks (COHb=karboksihemoglobin) yapıp dokulara oksijen gönderimini engellemesiyle meydana gelir. Kanın COHb oluşturma hızı, oksijenle O₂Hb oluşum hızından yaklaşık 210 kat daha fazladır. Böylece hava içinde CO konsantrasyonu, oksijen konsantrasyonunun en az 1/210 kadarına ulaştığında CO hemoglobini büyük oranda bağlar. Havadaki oksijen konsantrasyonu hacimsel olarak yaklaşık %21 kabul edilirse buradan kritik CO konsantrasyonunun yaklaşık olarak $0,21/210=0.001=1000$ ppm civarında olduğu ortaya çıkar. Gerçekten de 750 ppm CO içeren havanın öldürücü olduğu belirlenmiştir (Topaloglu, 2009).

3.6.3. Hidrokarbonlar

Gaz haldeki hidrokarbonlar da CO gibi eksik yanma sonucunda oluşurlar. Bunların doğrudan etkileri yerine, atmosferdeki fotokimyasal reaksiyon ürünleri oldukça önem taşır. Atmosferdeki fotokimyasal ürünleri, kendilerinden çok daha etkili ve zararlı olan ikincil kirleticilere dönüşmektedir.

Atmosferde en önemli oksitleyicilerden biri ozon (O₃) dur. Ozon atmosferde çeşitli kirleticilerin yan etkileriyle ve güneşin morötesi ışınlarının yardımıyla meydana gelen reaksiyonların ürünüdür.



Burada hv güneş enerjisini ifade etmektedir. M ise reaksiyon ortamında bulunan üçüncü bir çarpışma bileşenidir. Reaksiyon sonucu oluşan bu ozon başka şartlarda bozunur:



Bu reaksiyona göre aktif atomik oksijenler ortaya çıkar. Bu aktif atomlar atmosferde bulunan çeşitli organik veya inorganik kimyasal kirleticileri oksitleyerek tüketirler. Bu mekanizmanın özellikle benzinli motor eksozlarından kaynaklanan yanmamış hidrokarbonlarla gerçekleştiği düşünülmektedir:

3.6.4. Kükürtoksitler

Havadaki kükürtoksitler (SO_x) içerisinde en önemli pay kükürt dioksit (SO_2) gazına aittir. Bu gaz yanmayan özellikte olup, renksizdir ve 0.3-1 ppm konsantrasyonlarında ağızda karakteristik bir tat bırakmaktadır. 3 ppm'in üstünde ise boğucu bir hisse yol açmaktadır.

Kükürtlü maddeler malzemelere ve bitkilere zarar verirler. Örneğin, yağlı boyaların kuruma süresini artırır ve boya ömrünü azaltır, metal yüzeylerin korozyonla aşınmasına neden olurlar.

Kükürtlü gazların en önemli etkisi asit yağışları meydana getirmesidir. Asit yağışları bulutlar içerisinde bulunan CO_2 , SO_2 , NO_x gibi gaz kirleticilerin suyla birleşerek asit oluşturması sonucu yağın asitli yağmurlardır. Yapılan çalışmalar, asit yağışlarının %60-70'nin SO_2 , kalanının ise NO_x gazları etkisiyle oluştuğunu göstermiştir. Burada SO_2 'nin özellikle ağır sanayi ve termik santrallerden ve kömür gibi fosil yakıtlar ile yapılan ısıtmadan, NO_x 'in ise daha çok içten yanmalı motorlu araçlardan kaynaklandığı söylenebilir.

Asit yağışlarının temel olarak iki kötü etkisi vardır. Birincisi, yere düşen asitli yağmur suları doğal dengeyi bozarak özellikle tatlı su göllerinde, göl suyunun pH değerinin 5.5'tan aşağıya düşmesine sebep olmakta ve kütleli balık ölümleri, flora ve fauna değişimlerine yol açmaktadır. İkinci zararı ise toprakta gözükmektedir. Asidik yağışlarla yıkanan topraktaki besin maddeleri bu suda daha çok çözünerek suyla birlikte topraktan akarak giderler. Bu durum toprağın verimini düşürmekte ve bitki yaşamını olumsuz yönde etkilemektedir.

3.6.5. Azotoksitler

Azot oksitler (NO_x) en önemli kirletici gazlardandır ve asit yağışlarındaki katkılarının yanı sıra, fotokimyasal sisin oluşumunda da etkilidirler. Ayrıca NO_2 gerek insan sağlığı, gerekse bitki örtüsünde zehir etkisi bulunan bir gazdır.

Azotoksitler yakma sistemlerinde hem NO, hem de NO₂ formunda çıkmaktadır ve bu ikisinin toplamı NO_x olarak adlandırılmaktadır. Alev bölgesinde yüksek sıcaklık ortamında oluşan NO gazları, bacada hareket ederken ve daha sonra atmosferde hızla soğuyarak seyrelirken oksitlenerek NO₂'ye dönüşmektedir. Böylece atmosferde NO_x formunun en çok NO₂ olarak bulunduğu görülmektedir.

NO_x bileşenlerinin oluşumu yakıt içeriğinden başka önemli ölçüde hava fazlalığı, yakma sisteminin yapısı, işletme şartları gibi faktörlere bağlıdır. NO_x oluşumu çeşitli mekanizmalarla gerçekleşmektedir ve aşağıda bu mekanizmaların detayları verilmiştir:

- Isıl NO_x mekanizması
- Ani (Prompt) NO_x mekanizması
- Yakıtsal NO_x mekanizması
- N₂O mekanizması

Isıl NO_x Oluşumu

Isıl NO_x yakma havasındaki oksijen ve azottan yüksek sıcaklıkta Zeldovich reaksiyonları olarak bilinen aşağıdaki reaksiyonlara göre oluşmaktadır:



(3.39) reaksiyonunun aktivasyon enerjisi (3.40) reaksiyonunun aktivasyon enerjisine göre çok yüksektir (yaklaşık 10 kat) ve bu nedenle (3.40) reaksiyonu (3.39) reaksiyonuna göre çok hızlı olmakta ve (3.39) reaksiyonu tüm mekanizmayı kontrol etmektedir. (3.39) reaksiyonuna göre oluşan N (3.40) reaksiyonu ile hemen tüketilmektedir. Böylece N için sanki denge durumu kabul edilebilir ($d[N]/dt \approx 0$).

Bu varsayımlara göre NO oluşum hızı,

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2[O] \frac{\left(k_1[N_2] - \frac{k_{-1}k_{-2}[NO]^2}{k_2[O_2]} \right)}{\left(1 + \frac{k_{-1}[NO]}{k_2[O_2]} + k_3[OH] \right)} \quad (3.42)$$

olur. Burada k_1 ve k_2 ileri reaksiyonlar için hız sabitlerini, k_{-1} ve k_{-2} geri reaksiyonlar için hız sabitlerini, $[i]$ ise i bileşenin molar konsantrasyonunu (birimi mol/m³) göstermektedir (Khelil vd, 2009). Karışımın çok zengin olmadığı varsayılırsa (3.41) reaksiyonu ihmal edilebilir. Ayrıca sürenin kısalığı dikkate alınarak geri reaksiyonlar ihmal edilirse (Topaloğlu, 2009),

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N_2][O] \quad (3.43)$$

olur. Burada $k_1 = A_1 \exp(-E_1/RT)$ ileri hız sabiti olup literatürde A_1 için $A_1 = 0.76 \times 10^{11} - 1.8 \times 10^{11} \text{ m}^3/(\text{kmol s})$ arasında değerler verilmektedir (Topaloğlu, 2009).

Ani (Prompt) NO_x Oluşumu

Alevin başlangıcında termal NO_x ile açıklanamayacak seviyede yüksek NO_x oluşumu gözlenmiştir. Bu oluşum Fenimore tarafından ani (prompt) NO_x olarak adlandırılmıştır. Fenimore'a göre bu safhada mevcut olan yüksek konsantrasyondaki C_xH_y radikallerinin havadaki moleküler azotu parçalaması ile ortaya çıkan N radikallerinden de Zeldovich mekanizmasındakine benzer şekilde NO oluşmaktadır.



De Soete'nin geliştirmiş olduğu modele göre NO oluşum hızı aşağıdaki şekilde belirlenebilir (Fluent, 2006):

$$\frac{d[NO]}{dt} = f k'_{pr} [O_2]^a [N_2] [Yakıt] e^{-E'_a/RT} \quad (3.48)$$

Denklemdaki f katsayısı, yakıt tipine ve hava/yakıt oranına göre elde edilen bir düzeltme faktörünü göstermektedir ve aşağıdaki şekilde bulunur.

$$f = 4.75 + 0.0819 n - 23.2 \phi + 32\phi^2 - 12.2 \phi^3 \quad (3.49)$$

Bu denklemlerde n karbon atomu sayısını, ϕ ekivalans oranını göstermektedir (Fluent, 2006). Burada yer alan ekivalans oranı (ϕ) hava fazlalık katsayısının tersidir ve $\phi = 1/\lambda$ eşitliği ile hesaplanabilir.

Yakıtsal NO_x Oluşumu

Yakıtta bağlı bulunan azottan da ani NO_x oluşumuna benzer şekilde NO_x oluşmaktadır. Alevin reaksiyon bölgesinde yakıtın parçalanması sonucu ortaya çıkan HCN radikalleri takip eden reaksiyonlarla NO'ye dönüşmektedir. Ancak bu dönüşüm yakıtın azot konsantrasyonuna bağlıdır. Azot konsantrasyonu düşük olan sıvı yakıtlarda bağlı azotun hemen tamamı NO'ye dönüşürken azot konsantrasyonu yüksek olan sıvı veya katı yakıtlarda konsantrasyon arttıkça dönüşüm azalmakta ve geri kalan N moleküler N₂ şeklinde dönüşmektedir.

N₂O Oluşum Mekanizması

Çok fakir karışımlarda ve düşük hava giriş sıcaklıklarında (buna göre düşük yanma sıcaklıklarında) N₂O oluşmaktadır:



Burada M herhangi bir üçlü çarpışma bileşenidir (Topaloglu, 2009).



4. MATERYAL VE METOD

Yanma problemlerin çözümünde, analitik, deneysel ve nümerik yöntemler uygulanabilir. Bu yöntemler ayrı ayrı kullanılabilirdiği gibi, birlikte de kullanılabilirler. Son yıllarda bilgisayar alanındaki gelişmeler ile nümerik yöntemler oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada deneysel ve nümerik yöntemler birlikte kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Nümerik çözüm için bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Fluent 6.3.26 paket programı kullanılmıştır ve programda kullanılan modellerin detayları hakkında bilgiler verilmiştir. Çalışmada kullanılan deney düzeneği ile ilgili bilgiler de bu bölüm kapsamında verilmiştir.

4.1. Deneysel Çalışma

Çalışma kapsamında ham pelet yakıtına dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı gibi sıvılar emdirilerek pelet yakıtının sıvıları emebilme kapasiteleri araştırılmıştır. Ham pelet yakıt taş kömürü ve meşe mangal kömürüyle de belirli oranlarda karıştırılarak incelemeler yapılmıştır. Hazırlanan bu karışımlar İFYIL firmasında üretilen deney kazanlarında yakılarak verim ve baca gazı emisyonları gibi testler yapılmıştır ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneylerde iki farklı kazan kullanılmıştır. Bu kapsamda birinci geçişte duman borusuz (Kazan-1) ve birinci geçişte duman borulu kazan (Kazan-2) incelenmiştir. Böylece kazana eklenen duman borularının da kazan verimine ve emisyonlarına olan etkisi irdelenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmada elde edilen veriler sayısal modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde, yakıt karışımlarının hazırlanması, deney kazanları, deney düzeneği, ölçümlerde kullanılan cihazların özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

4.1.1. Yakıt karışımlarının hazırlanması

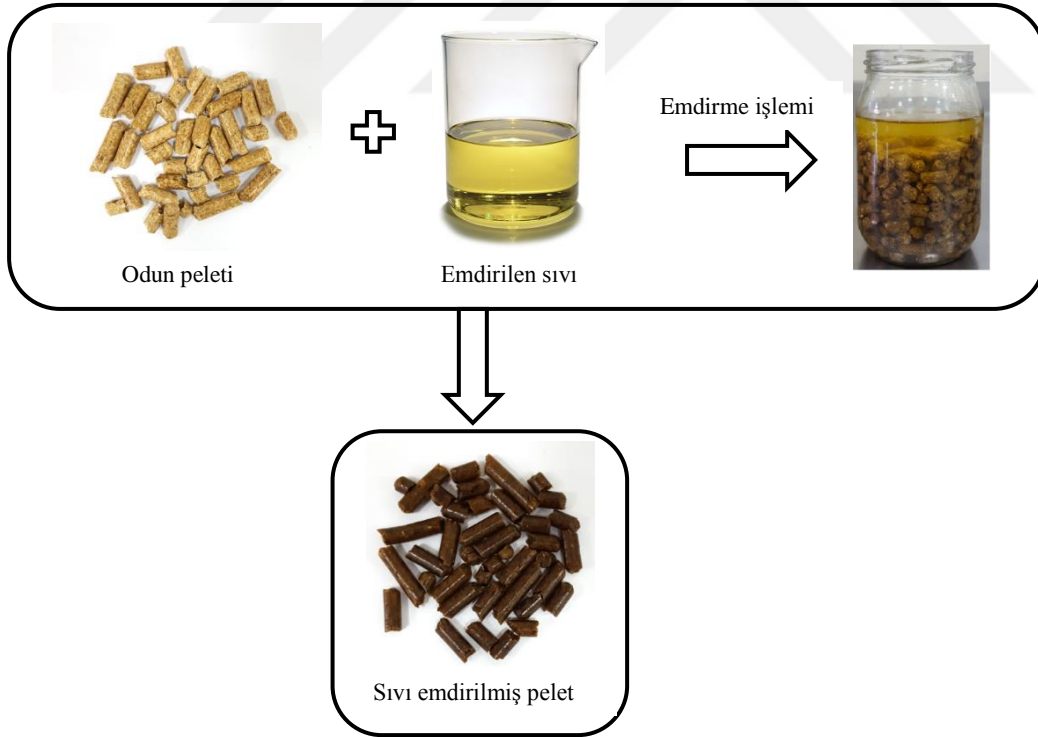
Çalışma kapsamında pelet yakıtına dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı gibi sıvılar emdirilerek pelet yakıtının sıvıları emebilme kapasiteleri araştırılmıştır. Dizel ve ayçiçek yağı piyasadan temin edilmiştir, biyodizel yakıtı ise Ondokuz Mayıs

Üniversitesi Makine Müh. Bölümü Enerji Laboratuvarında üretilmiştir. Üretim süreci ile ilgili detaylar (Kilic vd, 2018) kaynağında verilmiştir. Ayrıca biyokütleden elde edilen pelet yakıtı, piyasadan temin edilen taş kömürü ve meşe odunundan elde edilmiş mangal kömürleri ile belirli oranlarda karıştırılmış ve pelet haline getirilmiştir.

4.1.1.1. Pelet yakıtına sıvıların emdirilme işlemi

Pelet yakıtı 100 g numuneler şeklinde hazırlanmış, farklı sıvılar emdirme işlemi için kullanılmış, kapta farklı bekleme sürelerinde bekletilmiş, zamanla kütle değişimi kayıt altına alınmıştır.

Kazanda yakmak için hazırlanacak deney numuneleri (ham peletler) öncelikle 20 lt'lik kaplara yerleştirilmiştir. Daha sonra kapların içerisine sıvılar dökülerek emdirme işlemi gerçekleştirilmiştir ve bu durum Şekil 4.1'de özet olarak anlatılmıştır. Her bir kaba, hassas terazi ile ölçümleri yapılan 6 kg pelet yerleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Ham pelet yakıtına sıvı emdirme işlemi özet gösterimi

4.1.1.2. Pelet-Kömür karışımlarının hazırlanması

Biyokütleden elde edilmiş pelet yakıtı, taş kömürü ve meşe odunundan elde edilmiş mangal kömürleri bir değirmende toz hale öğütülmüştür. Öğütülme işleminden sonra %80 Pelet-%20 Taşkömürü, %60 Pelet-%40 Taşkömürü, %80 Pelet-%20 Mangal kömürü ve %60 Pelet-%40 Mangal kömürü karışımları hazırlanmıştır. Daha sonra bu karışımlar nemlendirilerek 7.5 kW motorlu, 40x90x50 cm boyutlarında, 100 kg kütleli ve saatte 150-300 kg pelet üretme kapasitesine sahip Atlas marka pelet makinesi yardımıyla (Şekil 4.2) pelet haline dönüştürülmüştür (Şekil 4.3). Peletler üretilirken motor gücünün yanı sıra kullanılan disk ve röleler (Şekil 4.4) önemli bir yere sahiptir.



Şekil 4.2. Pelet üretim makinesi

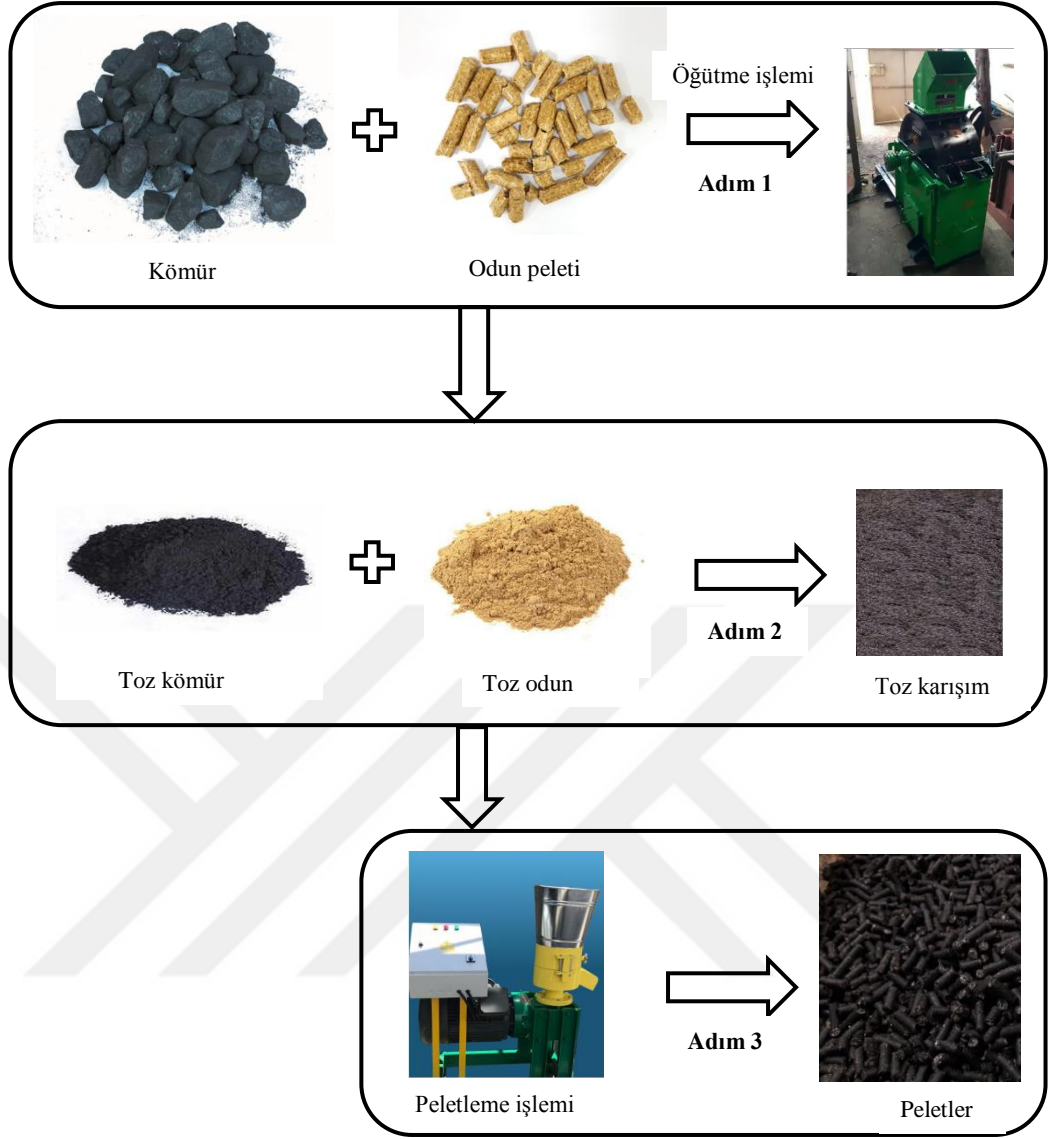


Şekil 4.3. Toz karışımlar (solda) ve pelet hali (sağda)



Şekil 4.4. Pelet yapımında kullanılan disk ve röle

Odun-Kömür karışımlarından pelet üretim sürecinin özeti Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Odun-Kömür karışımlarından elde edilen peletlerin üretim sürecinin özet gösterimi

Yakıt karakteristikleri belirlenirken peletler küçük parçalara ayrılmış, daha sonra öğütülerek elenmiştir. Yakıt içeriğindeki nem miktarı belirlenirken, numune 105°C de etüvde yaklaşık 3 saat bekletilmiştir. Kül miktarı TS 1042 standartına, uçucu madde miktarı ise TS 1711 standartına göre belirlenmiştir. Tüm bu deneyler sonucunda, numuneler ısıtılmadan önceki ve sonraki kütleleri ölçülerek nem, kül ve uçucu madde miktarları tespit edilmiştir (Koc, 2006). Yakıtların üst ısıl değerlerinin belirlenmesinde İKA C200 bomba kalorimetre cihazından (Şekil 4.6) faydalanılmıştır ve cihazın teknik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.6. IKA C200 bomba kalorimetresi

Çizelge 4.1. IKA C200 bomba kalorimetre cihazı teknik özellikleri

Maksimum ölçüm aralığı	0-40000 J
Dinamik Ölçüm Modu 25 °C	Var
Isoperibol Ölçüm Modu 25 °C	Var
Dinamik Tekrarlanabilirlik (1gr benzoik asit NBS39i)	%0.1 RSD
Isoperibol Tekrarlanabilirlik (1gr benzoik asit NBS39i)	%0.1 RSD
Maksimum Çalışma Sıcaklığı	25 °C
Sıcaklık Ölçüm Çözünürlüğü	0.0001 K
Oksijen Dolum	Yok
Arındırma	Yok
Ayrışım Algılama	Yok
Ayrışım damarı C510	Var
Ayrışım damarı C512	Var
DIN 51900 Göre Analiz	Var
ISO 1928 Göre Analiz	Var
Boyutlar (G x Y x D)	400x400x400
Ağırlık	21 kg
İzin Verilen Ortam Sıcaklığı	20-25 °C
İzin Verilen Bağıl Nem	%80
DIN EN 60529 Uyarınca Koruma Sınıfı	IP 20
Voltaj	100-240 V
Frekans	50/60 Hz
Güç Girişi	120 W

Yakıtların C, H, N, S ve O gibi elementel bileşenlerinin belirlenmesinde Flash 2000 cihazından yararlanılmıştır (Şekil 4.7).



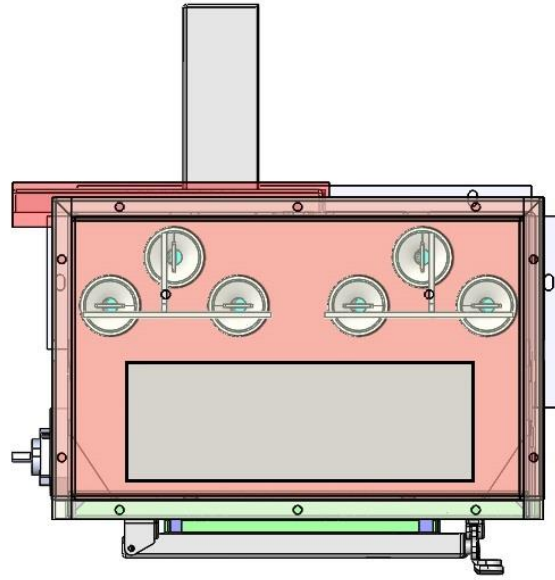
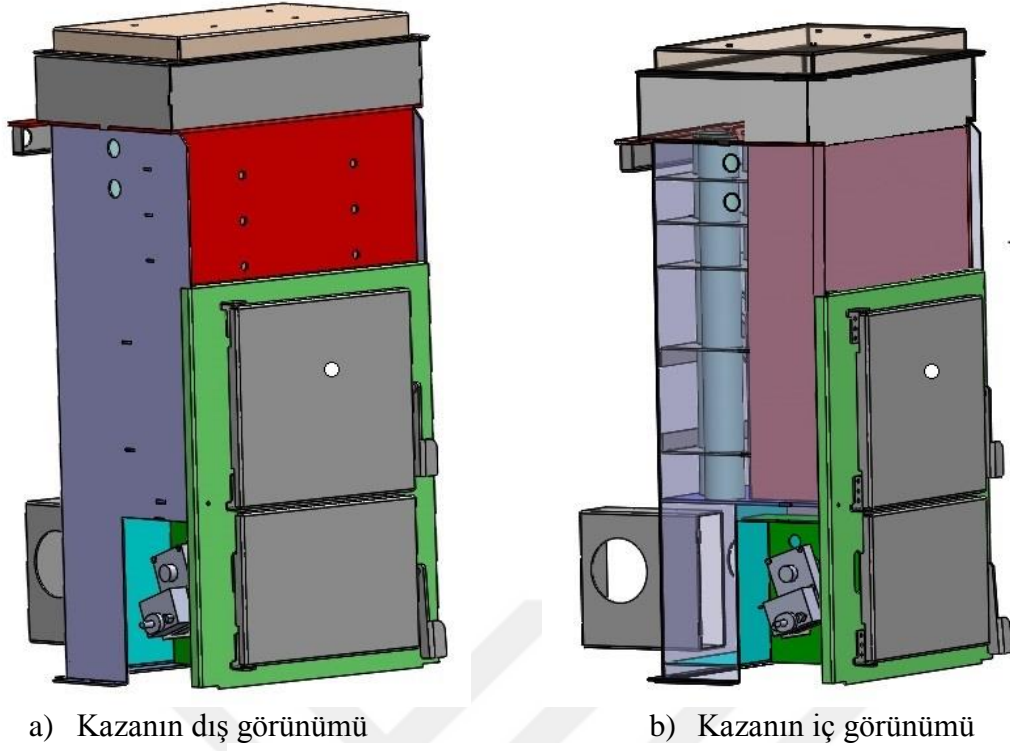
Şekil 4.7. Elementel analiz cihazı

Biyokütleden elde edilen peletlerin fiziksel özelliklerinin bilinmesi taşıma, depolama ve nakliye işlemleri açısından önemlidir. Peletlerin son kullanıcıya kadar parça bütünlüğü bozulmadan (kırılmadan) ulaştırılması gerekir. Bu kapsamda peletlerin basınç dirençleri önemli bir parametredir. Peletlerin basınç direnci belirlenirken 20 ton kapasiteye sahip, üzerinde yük hücreleri bulunan ve piston ilerleme hızı 1 mm/s olan hidrolik tip basınç test cihazı kullanılmıştır. Yapılan testte, öncelikle pelet ayrı halde bulunan iki plaka arasına yerleştirilerek yukarıdan tek yönlü sıkıştırma kuvveti uygulanmıştır. Uygulanan sıkıştırma kuvveti sabit oranda arttırılarak pelet kırılıncaya kadar devam etmiş ve uygulanan yük miktarı test süresince bilgisayar ortamına aktarılarak kayıt altına alınmıştır. Emdirilmiş peletlerde kırılma işlemi tam gerçekleşmediğinden cihazın kırılmaya yakın andaki değeri kayıt edilmiştir.

4.1.2. Deney kazanları

4.1.2.1. Kazan-1 geometrisi

Üstten beslemeli, alev/duman borulu ve iki geçişli olarak tasarlanan deney kazanının dış, iç ve üstten görünüşleri Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Kazan-1 geometrisi

Pelet yakıt, belirlenen besleme miktarına göre helezon taşıyıcı vasıtasıyla depodan alınarak yanma haznesine taşınır. Pelet yakıtı otomatik ateşleyici yardımıyla tutuşturularak yanma odasında alev oluşumu sağlar. Bu kazanda yanma ürünleri önce yanma odasının üzerinden direkt olarak (duman borusuz) geçmekte (1.geçiş) ve üst duman sandığına gelmektedir. Daha sonra ise buradan 6 adet duman borularına yönelerek (2.geçiş) alt duman sandığına ulaşmakta ve bacadan dışarı atılmaktadır. Yanma odası ve duman borularının etrafı su ile çevrili olduğundan sıcak gazlar

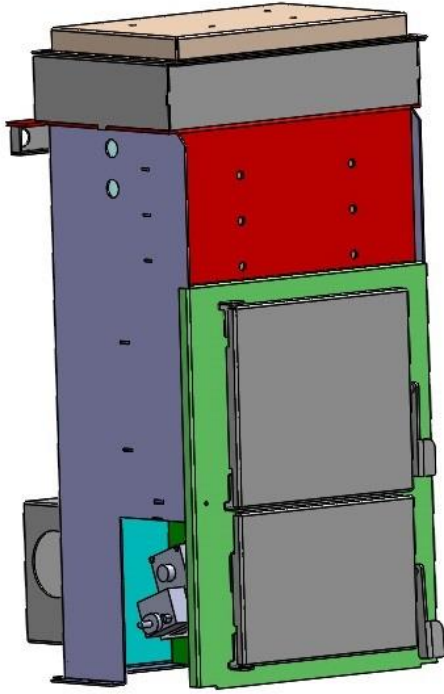
enerjisini suya aktarırlar. Tasarlanan kazanın teknik özellikleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Kazan-1 teknik özellikleri

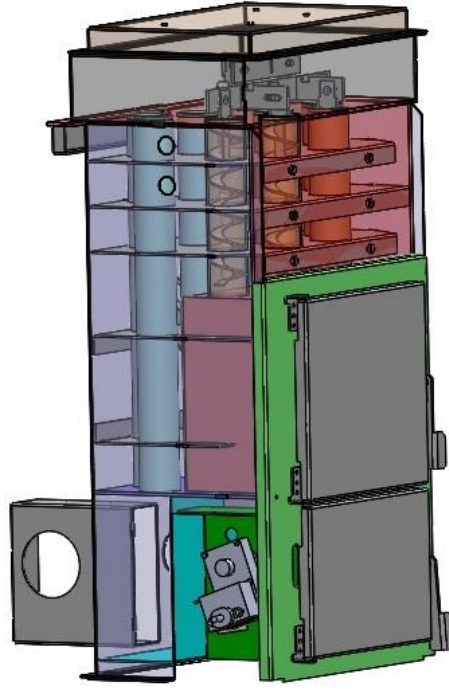
Özellikler	Kazan-1
Kazan Tipi	Alev/Duman Borulu Kazan
Yükleme Tipi	Otomatik Yükleme
Yakma Düzenegi	Çanak
İkincil Duman Borusu Boyu (mm)	555
Duman Boru Sayısı	6
Türbülötör Sayısı	6
Çalışma Basıncı (bar)	3
Test Basıncı (bar)	5
Isıl Kapasite (kW)	25
Fan motor gücü (W)	40-80
Tank kapasitesi (kg)	50

4.1.2.2. Kazan-2 geometrisi

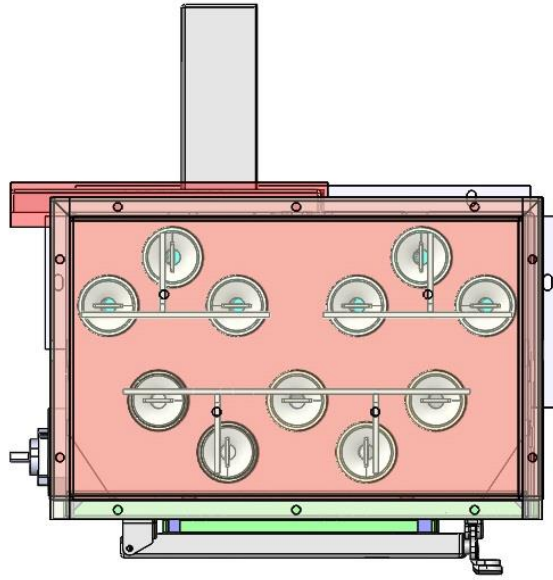
Kazan-1 ile aynı besleme şekline (üstten beslemeli) ve genel olarak aynı geometriye sahiptir. Kazan-1’den farklı olarak birinci geçişte duman borusuna sahiptir. Kazan-2’nin dış, iç ve üstten görünümü Şekil 4.9’da verilmiştir. Pelet yakıt, belirlenen besleme miktarına göre helezon taşıyıcı vasıtasıyla depodan alınarak yanma haznesine taşınır. Pelet yakıtı otomatik ateşleyici yardımıyla tutuşturularak yanma odasında alev oluşumu sağlanır. Oluşan gazlar öncelikle birinci duman borularına girerler (5 adet boru) ve daha sonra ikincil duman borularına (6 adet boru) girerek bacaya yönelirler. Yanma odası ve duman borularının etrafı su ile çevrili olduğundan sıcak gazlar enerjisini suya aktarırlar. Tasarlanan kazanın teknik özellikleri Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.



a) Kazanın dış görünümü



b) Kazanın iç görünümü



c) Kazanın üstten görünümü

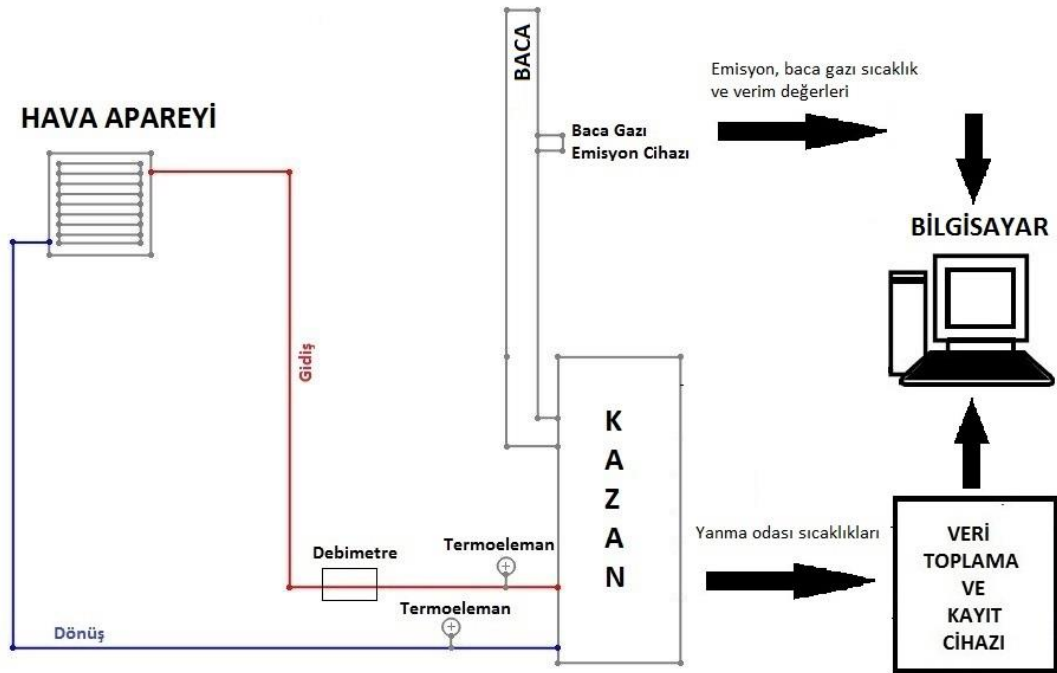
Şekil 4.9. Kazan-2 geometrisi

Çizelge 4.3. Kazan-2 teknik özellikleri

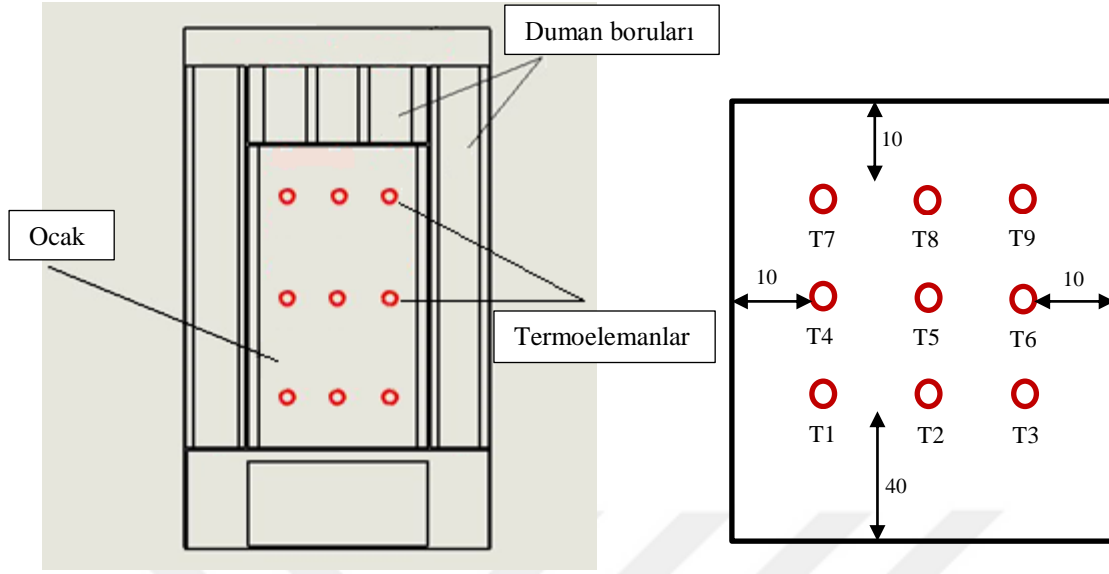
Özellikler	Kazan-2
Kazan Tipi	Alev/Duman Borulu Kazan
Yükleme Tipi	Otomatik Yükleme
Yakma Düzenegi	Çanak
Birincil Duman Borusu Boyu (mm)	267
İkincil Duman Borusu Boyu (mm)	555
Duman Boru Sayısı	11
Türbülötör Sayısı	11
Çalışma Basıncı (bar)	3
Test Basıncı (bar)	5
Isıl Kapasite (kW)	25
Fan motor gücü (W)	40-80
Tank kapasitesi (kg)	50

4.1.3. Deney düzeneği

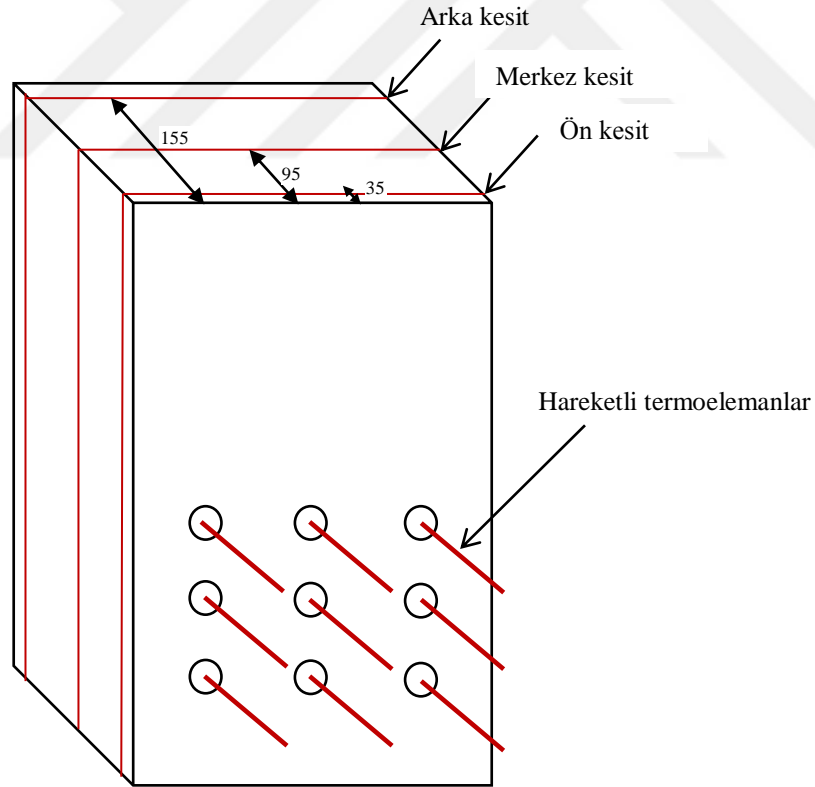
Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4.10'da verilmiştir. Yanma odası içerisindeki alev sıcaklıklarının ölçülebilmesi amacıyla kazanın ön duvarında 9 adet (3x3) delik açılmıştır (Şekil 4.11) ve bu açılan deliklere K tipi termoelemanlar yerleştirilerek sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Sıcaklık ölçümlerinin alındığı noktalar ön, merkez ve arka kesit olarak adlandırılmıştır ve bu durum Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 4.11. Kazan ön kapağında termoelemanların yerleşim pozisyonları şematik gösterimi



Şekil 4.12. Yanma odasında sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı kesitler

Suya olan ısı transferi kalorimetre cihazıyla, baca gazı emisyonları ve baca gazı sıcaklıkları Testo 350-XL cihazıyla ölçülmüştür. Cihaz özellikleri ile ilgili teknik bilgiler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Belirsizlik analizi deneysel sonuçların hassasiyeti hakkında yöntemsel bir yaklaşım sunar. Yapılan deneylerde belirsizlik analizinin tespitinde sıcaklık ve gaz analiz cihazı için üretici firmaların katalog verileri, verim için ise kare toplamalarının karekökü (RSS) metodu uygulanmıştır (Moffat, 1988) ve Çizelge 4.4'te bu değerler verilmiştir.

Çizelge 4.4. TESTO 350 XL gaz analiz cihazı ve K tipi termoelemanın teknik özellikleri

	Aralık	Doğruluk	Hassasiyet
O ₂	0-25% Hac.	± 0.8%	0.1% Hac.
CO ₂	0-50% Hac.	± 0.3% Vol. +1% (0-25% Vol.) ± 0.5% Vol. +1.5% (>25...50% Vol.)	0.01% Hac.
CO	0-500 ppm	± 2 ppm (0-39.9 ppm) ± 5% of mv (40-500ppm)	0.1 ppm
NO	0-3000 ppm	± 5 ppm (0-99 ppm) ± 5% of mv (100-1999.9 ppm) ± 10% of mv (2000-3000 ppm)	1 ppm
NO ₂	0-500 ppm	± 5 ppm (0-99.9 ppm) ± 5% of mv (100-500 ppm)	0.1 ppm
SO ₂	0-5000 ppm	± 5 ppm (0-99 ppm) ± 5% of mv (100-2000 ppm) ± 10% of mv (2001-5000 ppm)	1 ppm
Sıcaklık	-40-1200 °C	± 0.5 °C (-40-99.9 °C) ± 0.5% of mv (100-1200 °C)	0.1 °C
K tipi termoeleman	0-1200 °C	± 1 °C	1 °C
Termal verim (hesaplanan)		± 1%	

Deneyde pelet yakıt beslemesi 3.2 kg/h olacak şekilde ayarlama yapılmıştır. Baca çekişi 8 Pa olarak ayarlanmıştır. Deney kazanı ilk çalıştırmada ısıtma, tutuşturma, yakıt beslemesini arttırarak tutuşturma gibi evreleri vardır ve bu seviyeler %20-100 (Power 1-5) aralığında kodlanmıştır. Yakıtın ısınma durumuna göre kazan, otomatik olarak bu seviyeleri arttırarak pelet beslemesini yapmaktadır ve son seviye olan tam yükleme (%100) (ayarlanmış olunan yakıt debisi) durumunda çalışmaya devam etmektedir. Yapılan çalışmada kazan duvarlarının yalıtılmasından dolayı (10

cm yalıtım malzemesi) radyasyon ve taşınım kayıpları ihmal edilmiştir ve endirekt verim hesaplamalarında dikkate alınmamıştır.

4.2. Nümerik Modelleme

Temel anlamda akışkan hareketlerinin ve davranışlarının etkili olduğu problemlerin sayısal metot ve algoritmalar ile bilgisayar üzerinde çözülerek analiz edildiği programlara Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) adı verilir. Bilgisayar teknolojisinde meydana gelen hızlı ilerlemeler HAD yazılımlarının önemini giderek arttırmıştır. Günümüzde mühendislikte geliştirilen problemlerin çözüm yöntemleri HAD yazılımları ile daha kolay hale gelmiştir. HAD programları genelde elle çözülmesi mümkün olmayan ya da çok karmaşık olan kısmi diferansiyel denklemleri sonlu elemanlar, sonlu farklar, sonlu hacimler gibi metodlar kullanarak cebirsel denklem takımına dönüştürmekte ve çözmektedir.

Uygulamada çok sayıda HAD programı mevcuttur. FLUENT programı da bunlardan birisidir. FLUENT akışkan hareketleri, ısı transferi, partikül hareketleri, yanma gibi çok değişik akışkan proseslerini modelleyebilmektedir. FLUENT kısmi diferansiyel denklemleri sonlu hacimler metoduna dayanarak cebirsel denklem takımına dönüştürmekte ve çözmektedir.

4.2.1. Genel korunum denklemleri

Akış problemlerinin hesaplanmasında; kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri ile çözüm yapılmaktadır. Bu diferansiyel denklemler problemlere uygun sınır şartları kullanılarak çözülmektedir. Genel korunum denklemi en genel haliyle şu şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) = S_{\Phi} \quad (4.1)$$

Burada Φ bağımlı değişkeni, Γ_{Φ} Φ değişkeninin taşınım katsayısını ve S_{Φ} Φ taşınım eşitliğinin kaynak terimini ifade etmektedir. Φ , Γ_{Φ} ve S_{Φ} ifadelerinin anlamı kartezyen koordinatlar için Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kartezyen koordinatlar için eşitlikler

Eşitlik	Φ	Γ_Φ	S_Φ
Süreklilik	1	0	0
Momentum	v	μ_e	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$
Entalpi	h	$\frac{\mu_e}{\sigma_h}$	$+ \rho g_i$ S_{rad}
Türbülans kinetik enerji	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \varepsilon$
Türbülans kinetik enerji dağılımı	ε	$\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon)$
Türlerin kütle korunumu	Y_k	$\frac{\mu_e}{\sigma_h}$	

Daimi, sıkıştırılmaz ve türbülanslı akış için süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemleri kartezyen koordinatlarda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (4.3)$$

$$U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_j t} \right) \quad (4.4)$$

Bu ifadede, U_i , ortalama hız vektörünü, P , ortalama basıncı, T , sıcaklığı, ρ , akışkanın yoğunluğunu, ν , kinematik viskoziteyi ve α ise ısı yayılım katsayısını ifade etmektedir.

Enerjinin korunum eşitliğindeki türbülans ısı akısı ($\overline{u_j t}$) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\overline{u_j t} = \alpha_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (4.5)$$

Burada, α_t , türbülans ısı yayılım katsayısı olarak adlandırılır ve aşağıdaki bağıntı ile belirlenir:

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad (4.6)$$

Bu eşitlikte, Pr_t , türbülanslı Prandtl sayısıdır ve değeri 0.85 olarak alınmıştır (Özdoğan vd, 2016).

4.2.2. Türbülans modelleri

Pratikte karşılaşılan akışların neredeyse tamamı türbülanslıdır. Akışın türbülanslı olması akışkan hareketinin rastgele, kararsız ve üç boyutlu olması anlamına gelmektedir. Bu kompleksliklerden dolayı türbülans hareketlerini ve ısı-kütle transferlerini bir arada tanımlamak ve teorik olarak tahmin etmek oldukça zordur (Rodi, 1993).

Türbülanslı akışlar çalkantı hız alanları ile karakterize edilir. Bu çalkantılar momentum, enerji, bileşenlerin konsantrasyonu gibi taşınan niceliklerin karışmasını sağlar. Çalkantıların küçük ölçekli ve yüksek sıklıkta olmasından dolayı direkt olarak simüle edilmesi hesaplama açısından oldukça pahalıdır. Bunun yerine, korunum eşitlikleri zaman ortalamalı olabilir, Reynolds ortalamalı olabilir, ya da küçük ölçekli çalkantıları silmek için başka bir seçenek olabilir ve böylece eşitlikler hesaplama açısından daha az zaman alır. Bununla birlikte düzeltilmiş eşitlikler bilinmeyen ek terimler içerir ve türbülans modelleri bu bilinmeyen değişkenleri bilinen niceliklerle belirlemeye yarar.

Türbülanslı akışlarda herhangi bir skaler nicelik ϕ için,

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (4.7)$$

yazılabilir. Burada $\bar{\phi}$ basınç, sıcaklık veya bileşenlerin konsantrasyonu gibi terimler olabilir.

Reynolds ortalamalı çözümde, Navier Stokes eşitliklerindeki çözüm değişkenleri ortalama ve çalkantı hız bileşenine dönüşür. Hız bileşeni için;

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (4.8)$$

yazılabilir. Burada \bar{u}_i i yönündeki ortalama hız, u_i' aynı yöndeki çalkantı hız bileşenidir (i=1,2,3).

O halde Reynolds ortalamalı momentum denklemi aşağıdaki forma dönüşür.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (4.9)$$

Denklemden görüldüğü gibi türbülans etkisini gösteren ilave terimler gelmiştir. Bu Reynolds gerilmelerinin $(-\rho \overline{u_i u_j})$, modellenmesi gerekmektedir. Modelleme için genel metod olarak Reynolds gerilmeleri ile ortalama hız gradyanlarının orantılı olduğu Boussinesq hipotezi kullanılır.

Momentum korunum eşitliğindeki Reynolds gerilmeleri $(\overline{u_i u_j})$, Boussinesq'in girdap viskozitesi hipotezinde aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (4.10)$$

Burada, ν_t türbülans viskozitesidir ve aşağıda verilen Prandtl-Kolmogorov eşitliği yardımıyla hesaplanır.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.11)$$

Boussinesq hipotezi Spalart-Allmaras model, k-ε model ve k-ω modelde kullanılır. Türbülans modeli olarak; Spalart Allmaras, Standart k-ε, Renormalization Group (RNG) k-ε, Realizable k-ε, Standart k-ω, SST k-ω, v²-f (addon), Reynolds Stress (RSM), Detached Eddy Simulation (DES) ve Large Eddy Simulation (LES) modelleri mevcuttur.

Bu çalışmada türbülans modeli olarak Standart k-ε model ve RNG k-ε model kullanıldığından dolayı aşağıda kullanılan modellerin ayrıntılı bir şekilde açıklaması verilmiştir.

Standart k-ε Model

Standart k-ε model, türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans kinetik enerjinin yutulma miktarı (ε) için taşınım eşitliklerini modellemeye dayanan yarı ampirik iki eşitlikli bir modeldir. Bu modelde türbülans viskozitesinin, türbülans hızı ve uzunluk

ölçeği ile orantılı olduğu kabul edilir. Bu hız ve uzunluk ölçekleri türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun yutulma miktarından (ε) elde edilir (Özdoğan vd, 2016).

Türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans kinetik enerjinin yutulma miktarı (ε) aşağıdaki eşitliklerden elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.13)$$

Bu denklemlerde G_k ortalama hız gradyentinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi, G_b kaldırma kuvvetleri etkisinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi, Y_M toplam yutulma oranına sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantı ayrılmasından dolayı oluşan katkı, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ sabitlerdir. σ_k ve σ_ε , k ve ε için türbülans Prandtl sayıları, S_k ve S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir.

Türbülans kinetik enerji üretim miktarı, G_k , aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.14)$$

Kaldırma kuvvetleri etkisinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi, G_b , aşağıdaki denklemden elde edilir.

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4.15)$$

Burada Pr_t türbülans Prandtl sayısıdır. Standart k- ε modelde $Pr_t = 0.85$ olarak alınır.

β termal genişleme faktörüdür ve aşağıdaki bağıntıdan elde edilir:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (4.16)$$

Yutulma oranına, sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantı ayrılmasından dolayı oluşan katkı, Y_M , aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (4.17)$$

Burada M_t , türbülanslı Mach sayısıdır ve şu şekilde tanımlanmıştır.

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{c^2}}$$

Burada c ses hızıdır (Fluent, 2006).

Türbülans viskozitesi, μ_t , k ve ε terimleri kullanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.18)$$

burada C_μ sabittir.

Standart k- ε modelde kullanılan sabitlerin değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Standart k- ε modelde kullanılan sabitler ve değerleri (Özdoğan vd, 2016)

Sabit	Değer
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
C_μ	0.09
σ_k	1.0
σ_ε	1.3

RNG k- ε Model

RNG k- ε model, yeniden normalleştirme grup metodları olarak adlandırılır ve matematiksel teknikler kullanılarak anlık Navier-Stokes denklemlerinden türetilmiştir. Standart k- ε modelle aynı formda olmasına karşın, RNG model k ve ε eşitliklerinde ek terimler içerir ve bu terimler ani gerilmeli akışlarda iyileştirmeler sağlar. RNG k- ε model ayrıca dönme (swirl)'nin türbülansa etkisini içerir ve dönmeli olan akışlarda daha doğru sonuçlar verir (Özdoğan vd, 2016).

Bu modelde k ve ε terimleri aşağıdaki eşitliklerden elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4.20)$$

Bu denklemlerde α_k ve α_ε , k ve ε terimleri için ters efektif Prandtl sayılarını, μ_{eff} efektif viskoziteyi simgelemektedir.

Efektif viskozite şu bağıntıyla verilir:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4.21)$$

Türbülans viskozitesi, μ_t , k ve ε terimleri kullanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\mu_{t0} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.22)$$

Türbülans genel olarak dönme hareketi ya da swirl'den etkilenir. FLUENT RNG model swirl etkisini aşağıdaki şekilde hesaba katar:

$$\mu_t = \mu_{t0} f \left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon} \right) \quad (4.23)$$

Bu denklemde μ_{t0} , swirl modifikasyonu olmadan (3) eşitliğiyle hesaplanan türbülans viskozite değeridir. Ω karakteristik swirl sayısı, α_s swirl sabitidir.

Ters efektif Prandtl sayıları, α_k ve α_ε , analitik olarak RNG teoriden türetilir.

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (4.24)$$

Burada $\alpha_0 = 1.0$ 'dir. Yüksek Reynolds sayıları limitinde $\left(\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \ll 1 \right)$,

$\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1.393$ olur.

RNG k-ε ve Standart k-ε modelleri arasındaki temel fark ε denklemindeki ek terimlerdir.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.25)$$

Burada $\eta = Sk/\varepsilon$ formülü ile elde edilir. S ortalama şekil değişim oranını ifade etmektedir ve aşağıdaki formül yardımı ile bulunur:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.26)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.27)$$

RNG k- ε modelde kullanılan sabitlerin değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. RNG k-ε modelde kullanılan sabitler ve değerleri (Özdoğan vd, 2016)

Sabit	Değer
$C_{1\varepsilon}$	1.42
$C_{2\varepsilon}$	1.68
C_μ	0.0845
α_k	1.393
α_ε	1.393

4.2.3. FLUENT programında yanmanın modellenmesi

FLUENT programında yanmanın modellenmesi için çeşitli seçenekler mevcuttur. Bunlar;

- Türlerin Taşınımı (Species Transport)
- Ön Karışimsız (Non-premixed) Model
- Ön Karışımli (Premixed) Model
- Kısmen Ön Karışımli (Partially Premixed) Model
- Bileşim (Composition) PDF Modelleridir.

Bu çalışmada yanma için türlerin taşınımı modeli kullanılmış olduğundan modelin kısaca detayları aşağıda verilmiştir.

Türlerin Taşınımı (Species Transport): Bu yaklaşım türlerin kütleles kesirlerinin korunumu için kullanıcı tarafından tanımlanan kimyasal reaksiyonların çözümünü içerir. Reaksiyon hızları Arrhenius denkleminde, türbülans reaksiyon ilişkisi Magnussen ve Hjertager denklemleri ile hesaba katılır. Türbülans ve reaksiyon arasındaki ilişkinin belirlenmesi için çeşitli modeller mevcuttur;

Laminar Finite Rate: Türbülans etkileri göz önüne alınmaz ve reaksiyon hızı Arrhenius denkleminde çözülür.

Finite-Rate/Eddy Dissipation: Türbülanslı akışlarda geçerlidir. Arrhenius hızını ve karışma hızını hesaplar ancak bunlardan hangisinin değeri küçükse onu kullanır.

Eddy Dissipation: Türbülanslı akışlarda geçerlidir. Sadece karışma hızını hesaplar. (Magnussen ve Hjertager Eşitliği)

EDC (Eddy Dissipation Concept): Türbülanslı akışlarda geçerlidir. Zaman sabiti ve hacim kesri sabiti gibi değerleri değiştirmemize imkan tanır.

Girdap ayrışma modeli (Magnussen model), ön karışimsız yanma, ön karışimli yanma ve kısmen ön karışimli yanma gibi problemlerin çözümünde kullanılabilir (Fluent, 2006). Bu modelde, tahminlerin iyi sonuç verebilmesi türbülans modelinin performansına bağlıdır. Eğer, kullanılan türbülans modeli akış modellemede yeterli değilse yanma da iyi modellenemeyecektir.

Türbülanslı yanma reaksiyonunun nümerik çözümlenmesinde hem reaksiyon oranını (k) hem de türbülanslı karışım zamanını içermesi için türbülans karışım oranı Magnussen model ile hesaplandı. Reaksiyon hızları Arrhenius denkleminde, türbülans reaksiyon ilişkisi Magnussen denklemleri ile aşağıda gösterildiği şekilde hesaba katılır. Bölüm 3.2'de verilen (3.20) denklemindeki reaksiyon hız sabiti k türbülanslı durumlar için yeniden düzenlenirse bir i reaksiyonunda reaksiyon oranı aşağıdaki ifadede elde edilir:

$$R_{i'k} = -v'_{i,k} M_i T^{\beta_k} A_k \prod_{j' \text{ ürünler}} C_{j'}^{v_{j'k}} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \quad (4.28)$$

Bu denklemdaki $R_{i,k}$ reaksiyon oranını ($\text{kg/m}^3\text{s}^{-1}$), A_k Arrhenius üs faktörünü, $v'_{i,k}$ i türünün molar stokiyometrik katsayısını, M_i i türünün molekül kütesini (kg/kmol), β^k sıcaklık üssünü, C_j tepkimeye giren her bir j türünün molar konsantrasyonunu (kmol/m^3), $v'_{j,k}$ j türünün molar stokiyometrik katsayısını, E_k aktivasyon enerjisini (J/kmolK), R universal gaz sabitini, T sıcaklığı (K) göstermektedir (Yılmaz, 2006).

Reaksiyon oranına türbülansın etkisi Magnussen model ile dikkate alınır. Magnussen modelde reaksiyon oranı reaksiyona girenler ve ürünler için hesaplanır.

$$R_{i,k} = -v_{i,k} M_i C \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{m_R}{v_{R,k} M_R} \quad (4.29)$$

$$R_{i,k} = -v_{i,k} M_i C \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p m_p}{v_{P,k} M_P} \quad (4.30)$$

Burada $R_{i,k}$, reaksiyon oranını ($\text{kg/m}^3\text{s}^{-1}$), ε türbülans kinetik enerji dağılım oranını, k türbülans kinetik enerjisi, m_p herhangi bir yanma ürününün kütle kesrini, m_R reaksiyona giren türlerin kütle kesrini, $v_{i,k}$ k reaksiyonunda i türünün molar stokiyometrik katsayısını, M_i i türünün molekül ağırlığını, C reaksiyona girenler için A değerine ve ürünler için AxB değerine eşit ampirik sabit, A ve B ise Magnussen sabitlerini göstermektedir.

Türbülanslı reaksiyon akışlarında yapılan hesaplamalarda, reaksiyon oranı (4.28), (4.29) ve (4.30) denklemlerinden hesaplanan en yavaş reaksiyon oranı değeri hangisi ise o değer kullanılır (Fluent, 2006).

Yanma olayında radyasyonun da modellenmesi gerekir. FLUENT radyasyon modeli olarak; Rosseland, P1 yaklaşımı, Discrete Transfer, Surface to Surface ve Discrete Ordinates (DO) modellerini sunmaktadır.

Yanma odaları içerisinde gaz alev sıcaklığı, stokiyometrik karışım oranlarına yakın şartlarda oldukça yüksektir ($1000-1600\text{ }^\circ\text{C}$) ve radyasyonla ısı transferi meydana gelmektedir. Bu nedenle, yanma odası içerisinde sıcaklık dağılımının daha doğru tahmini için radyasyon modelin dikkate alınması gereklidir. Bu çalışmada, sıcaklık bölgesinin daha doğru olarak tahmin edilmesi amacı ile nümerik

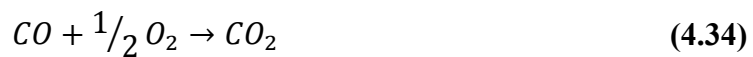
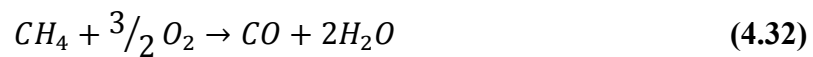
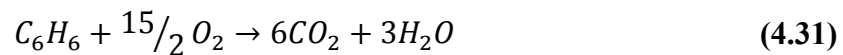
hesaplamalarda iyi yakınsayan çözümler vermesi, hesaplama süresinin çok uzun olmaması ve kullanılan model yakıcı için uygun olması nedeniyle P-I radyasyon modeli kullanılmıştır. Bu modelin detayları (Fluent, 2006; Yılmaz, 2006) kaynaklarında bulunabilir. P-I model, radyasyon yoğunluğunun (I) genişlemesine dayanan P-N modelin en basit durumudur. Bu model radyasyonun bütün yüzeylere yayıldığını kabul eder. Geometrinin karmaşıklığına bağlı olarak optik kalınlık eğer küçük ise doğruluğunda azalmalar olabilir (Fluent, 2006; Yılmaz, 2006).

4.2.4. Pelet yanmasının modellenmesi

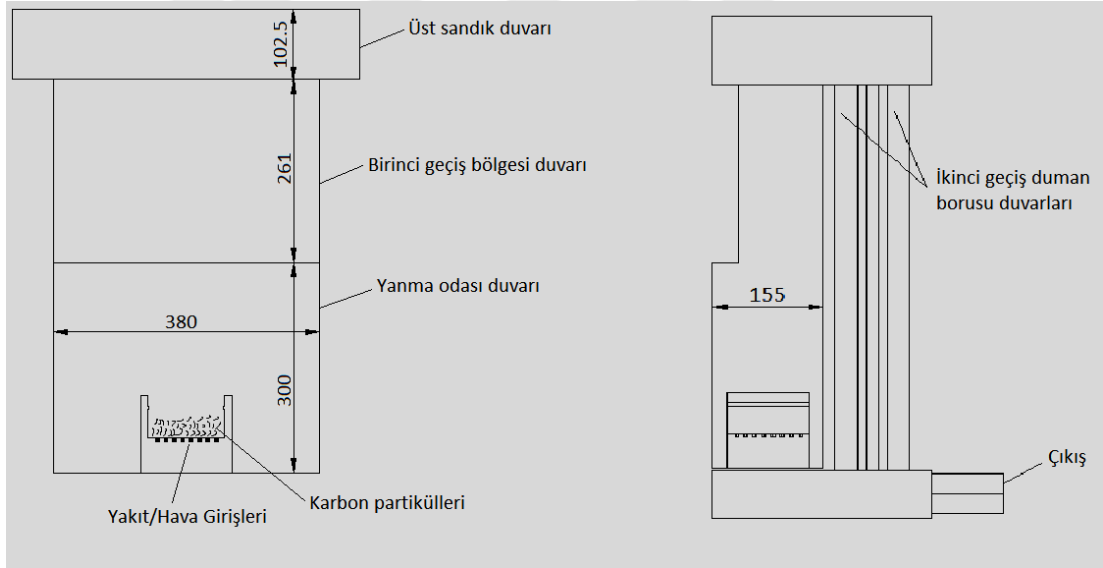
Pelet yakıt yanması Bölüm 4.1’de özellikleri verilen kazanlarda üç boyutlu olarak hesaplanmıştır ve kıyaslamalar yapılmıştır. Nümerik hesaplamalar Fluent 6.3 paket programında gerçekleştirilmiştir. Türbülans modeli olarak RNG k-ε, yanma modeli olarak finite rate/eddy dissipation modeli, radyasyon modeli olarak P1 radyasyon modeli kullanılmıştır. Basınç-hız çiftinin çözümünde SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Çözümlerde basınç denklemlerinin dışındaki denklemlerin ayrıklaştırılması için birinci dereceden Upwind Şema kullanılmıştır.

Hesaplamalar sonucu elde edilen sıcaklık konturları, hız vektörleri ve baca gazı çıkış sıcaklıkları incelenerek elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, modelleme sonucu elde edilen bulgularla deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada pelet yakıtının uçucu bileşenleri gaz fazında, sabit karbon kısmı ise yakıt besleme haznesinin (ızgara) hemen üzerinde karbon partikülleri enjekte edilerek modellenmiştir. Reaksiyon modelinde aşağıdaki reaksiyonlar programa girilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir (Gómez vd, 2012):



Yapılan hesaplamalarda ham pelet durumu baz alınmış ve hava fazlalık katsayısı $\lambda = 2.75$ olarak alınmıştır. Su ile temas eden tüm yüzeyler (yanma odası duvarları, duman boruları, üst sandık duvarı gibi), kazana giren ve çıkan suyun sıcaklıkları dikkate alınarak 333 K sabit sıcaklıkta duvar (wall) olarak kabul edilmiştir. Çıkış bölgesi basınç çıkışı (pressure outlet), hava girişi ve yakıt girişi hız girişi (velocity inlet) olarak alınmıştır. Ayrıca karbon partikülleri de yanma haznesi tabanının üzerinden çıkacak şekilde ayrık faz modeli (discrete phase model- DPM) ile modellenmiştir. Şekil 4.13'te Kazan-1 geometrisinin ön ve yan görünüşleri, ölçüleri ve sınır adlandırmaları verilmiştir. Kazan-2 geometrisi için de benzer görüntüler olduğundan ayrıca gösterilmemiştir. Kazan-2 geometrisindeki tek fark, daha önce belirtildiği gibi birinci geçiş bölgesi duvarı kısmında duman borularının olmasıdır. Kazan ısı gücü ham pelet durumu baz alınarak ve 15 kW olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Çözümlerinin tümünde süreklilik ve enerji yakınsama kriterleri, 10^{-6} mertebesine yakınsayana kadar iterasyonlar sürdürülmüştür.



Şekil 4.13. Kazan-1 geometrisi ön ve yan kesit görünüşleri, ölçüleri ve sınır adlandırmaları

Çalışmada kullanılan pelet yakıtın özellikleri Çizelge 4.8'te verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken yakıt içeriğindeki nem miktarı da gaz fazına eklenmiştir. Uçucu bileşenlerin CO, CO₂, H₂, H₂O, NH₃, hafif hidrokarbonlar (CH₄) ve katrandan (C₆H₆) oluştuğu kabul edilmiştir (Gómez vd, 2012).

Çizelge 4.8. Pelet yakıt özellikleri

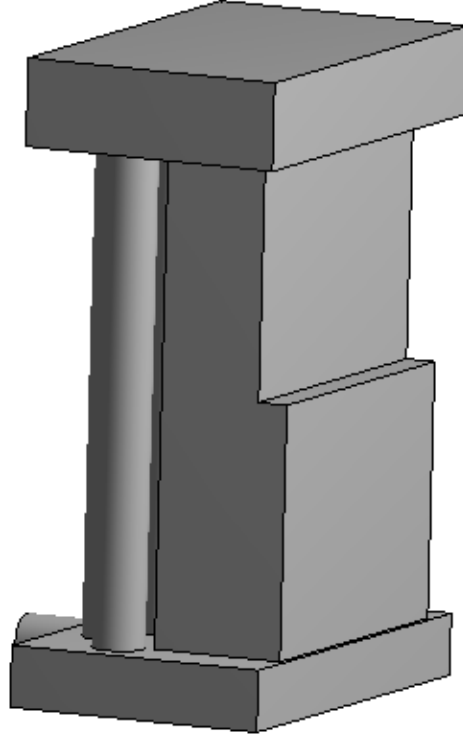
Yaklaşık analiz	
Nem [küt.%]	6.8
Kül [küt.%]	1.1
Sabit karbon [küt.%]	16.2
Uçucu madde [küt.%]	79.0
Alt ısı değeri [kJ/kg]	17150.8

Çalışma kapsamında ham peletle karıştırılmış kömür ve ham pelete emdirilen sıvılar için de bir yaklaşım ve modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kömür yakıtının sabit karbon kısmı, yanma haznesi tabanının üzerinden karbon partikülleri enjekte edilerek ayrık faz modeli (discrete phase model- DPM) ile modellenmiştir.

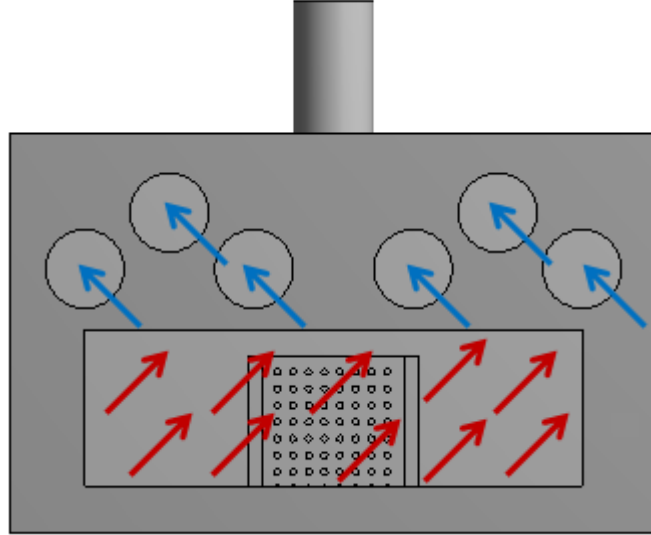
Ham pelete emdirilen sıvılardan yalnızca dizel emdirilmesi durumu modellenmiştir. Bu bağlamda ham pelet yanmasına ek olarak yanma haznesi içerisinde dizel yakıtı gaz fazında gönderilmiştir ve programdaki reaksiyonlara ek olarak (4.36) eşitliğinde verilen reaksiyon girilmiştir:



Şekil 4.14'te birinci geçişte duman borusuz kazanın (Kazan-1) izometrik görünüşü verilmiştir. Dikkat edilirse bu kazanda yanma ürünleri önce yanma odasının üzerinden direkt olarak (duman borusuz) geçmekte (1.geçiş) ve üst duman sandığına gelmektedir. Daha sonra ise buradan 6 adet duman borularına yönelerek (2.geçiş) alt duman sandığına ulaşmakta ve bacadan dışarı atılmaktadır (Şekil 4.15). Yanma ürünlerinin ısısı yine radyasyon ve konveksiyon ile duman borularını çevreleyen suya geçmektedir.



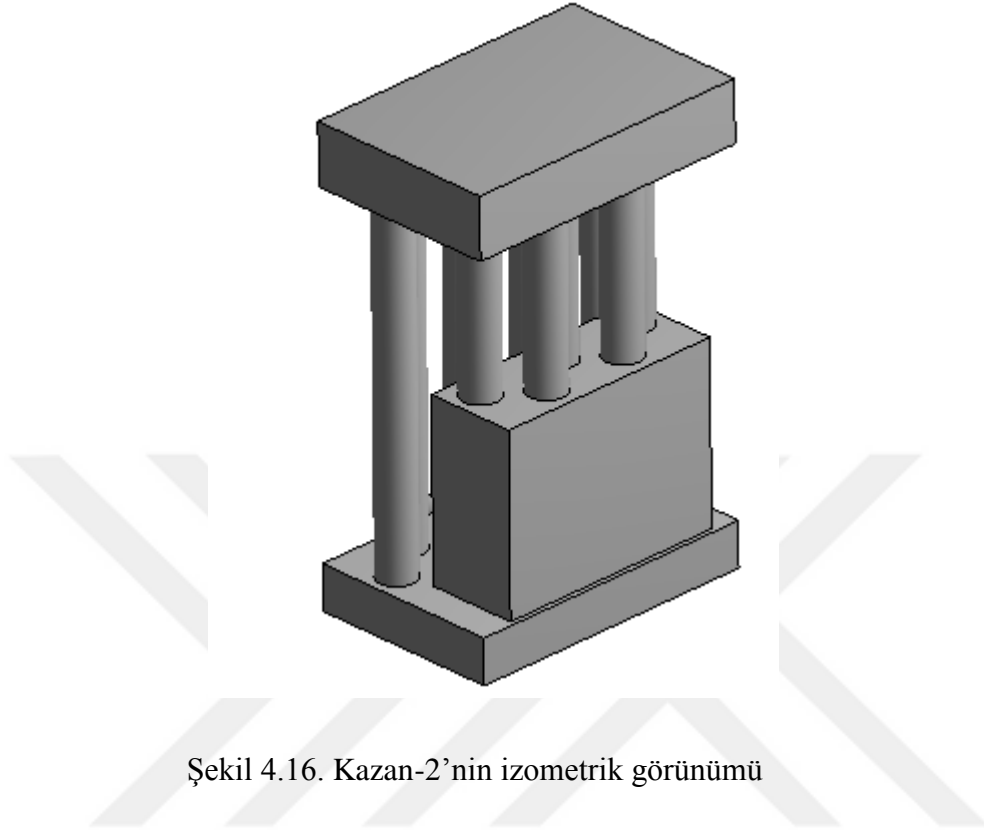
Şekil 4.14. Kazan-1'in izometrik görünümü



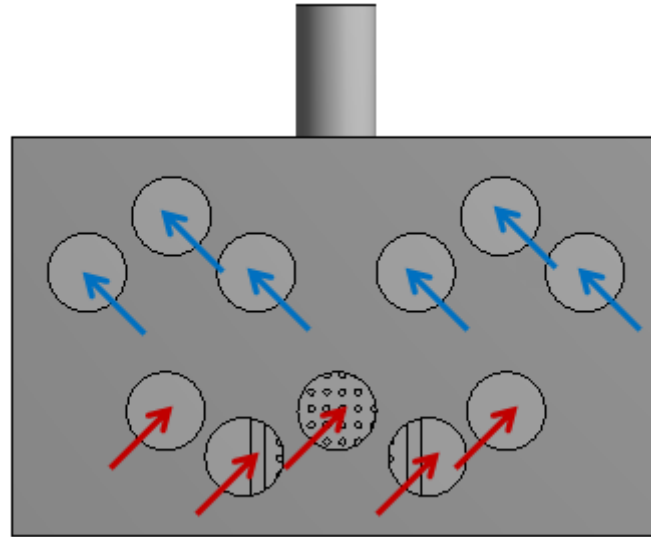
Şekil 4.15. Kazan-1 gaz geçiş yolları; kırmızı ok: Yanma odasından çıkan gaz, mavi ok : İkincil duman borusuna giren gaz

Birinci geçişte duman borulu kazanın (Kazan-2) izometrik görünümü Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Yanma sonucu oluşan alevin ısı radyasyon ve konveksiyon yoluyla yanma odasını çevreleyen suya geçmektedir. Yanma ürünleri önce yanma odasının üzerindeki 5 adet duman borularından geçmekte (1.geçiş) ve üst duman sandığına gelmektedir. Daha sonra ise buradan 6 adet duman borularına yönelerek (2.geçiş) alt duman sandığına ulaşmakta ve bacadan dışarı atılmaktadır (Şekil 4.17).

Yanma ürünlerinin ısısı yine radyasyon ve konveksiyon ile duman borularını çevreleyen suya geçmektedir.



Şekil 4.16. Kazan-2'nin izometrik görünümü



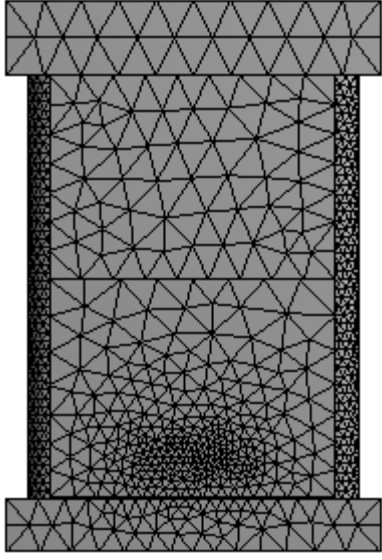
Şekil 4.17. Gaz geçiş yolları; kırmızı ok: Birinci duman borusundan çıkan gaz, mavi ok : İkinci duman borusuna giren gaz (Kazan-2)

Şekil 4.18'de kazanın duman borularına yerleştirilmiş helisel türbülötör geometrisi verilmiştir. Her iki kazanda da tüm duman borularına türbülötörler yerleştirilmiştir.

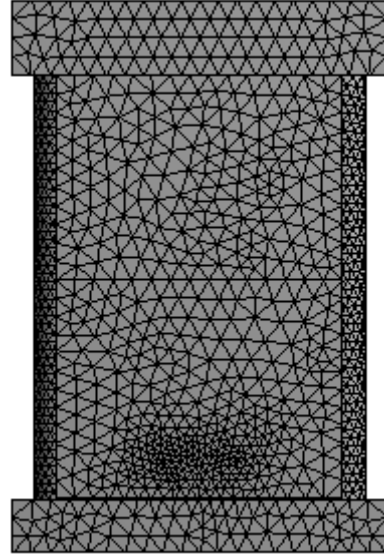


Şekil 4.18. Helisel türbülator geometrisi

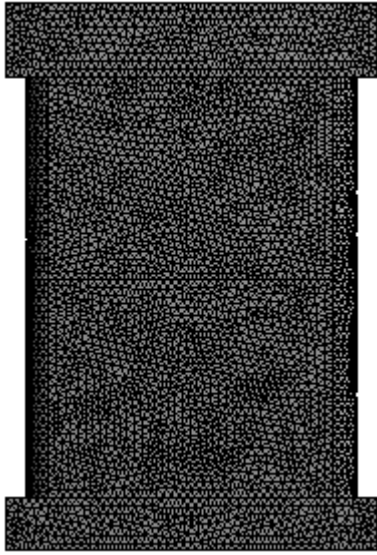
Hesaplamaların yapılabilmesi için geometrinin bir ağ ile örülmesi gerekmektedir. Her iki kazan da benzer ağ yapısı ile örülmüştür. Ayrıca çözümün ağ yapısından bağımsızlığını test etmek amacıyla Kazan-1 için daha sık ve daha kaba olmak üzere toplamda beş farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Beş ağ yapısında da fiziksel ve kimyasal büyüklüklerin hızla değiştiği bölgeler (yanma haznesi çevresi) daha sık ağ yapısı ile donatılmıştır. Ağ yapılarının önden görünümü Şekil 4.19’da verilmiştir. Ağ-4 ile örülmüş Kazan-1’in izometrik görünümü Şekil 4.20’de verilmiştir. Kazan-2, Kazan-1 için uygun bulunan ağ yapısı ile örülmüştür. Kazan-2 geometrisinin ağ yapısının izometrik görünümü Şekil 4.21’de verilmiştir.



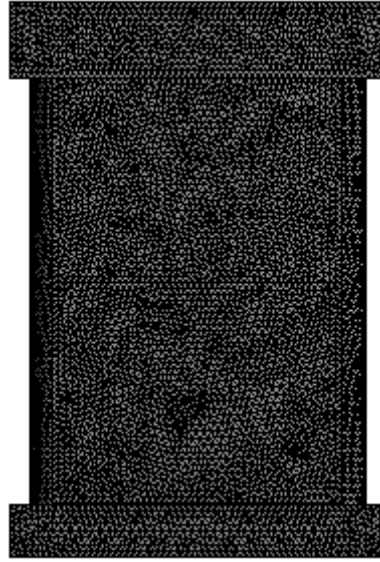
Ağ-1



Ağ-2

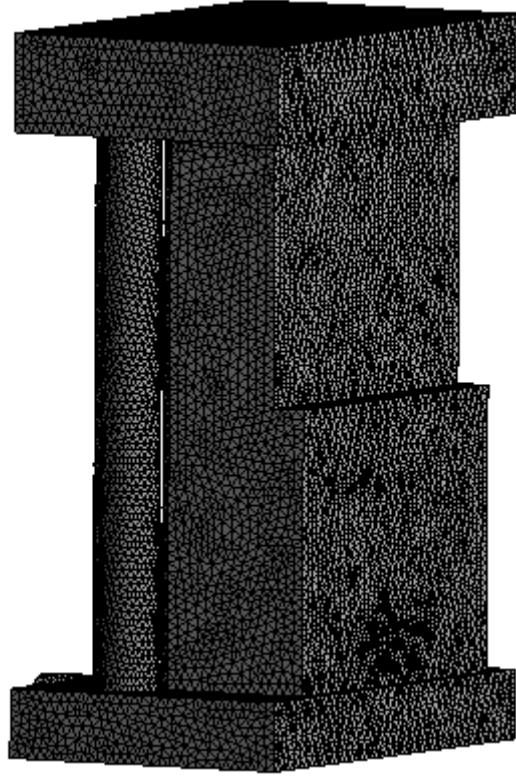


Ağ-4

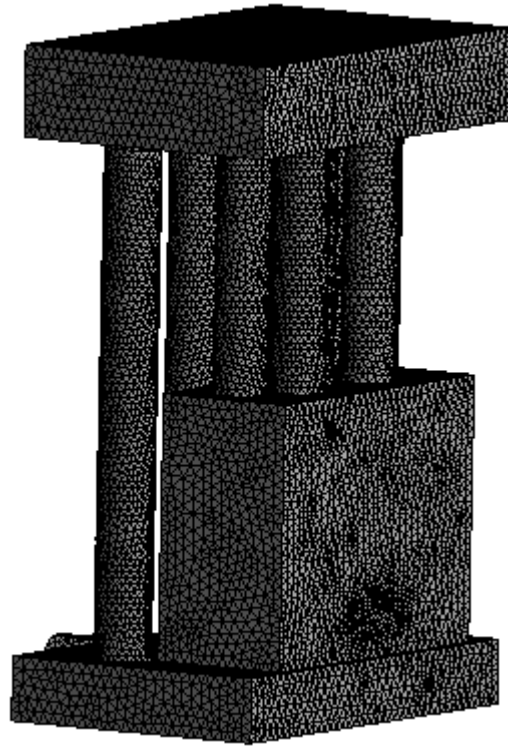


Ağ-5

Şekil 4.19. Kazan-1 için kullanılan farklı ağ yapılarının önden görünümü



Şekil 4.20. Kazan-1 ağ yapısı izometrik görünümü



Şekil 4.21. Kazan-2 ağ yapısı izometrik görünümü



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Deneysel Sonuçlar

DeneYlerin yorumlanması, yakıt karışımlarının hazırlanması, yakıtların karakterizasyon ve performans sonuçları olmak üzere üç ana kısma ayrılmıştır. Ayrıca performans sonuçları kendi içerisinde üç kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda ham pelet, ham pelet-kömür karışımları ve emdirilmiş peletlerin Kazan-1 durumunda kararlı haldeki ortalamaları alınarak baca gazı konsantrasyonları, baca gazı sıcaklıkları ve verim değerleri sonuçları değerlendirilmiştir. İkinci kısımda Kazan-2 durumu için ham pelet ve emdirilmiş peletlerin baca gazı konsantrasyonları, baca gazı sıcaklıkları ve verim değerleri deney başlangıcından itibaren zamanla değişimleri birbirleriyle kıyaslamalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca Kazan-2 durumunda ham pelet ve emdirilmiş peletlerin baca gazı konsantrasyonları, baca gazı sıcaklıkları, verim değerleri ve alev sıcaklıklarının kararlı haldeki ortalamaları alınarak birbirleriyle kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Üçüncü kısımda ise Kazan-1 ve Kazan-2 performans sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

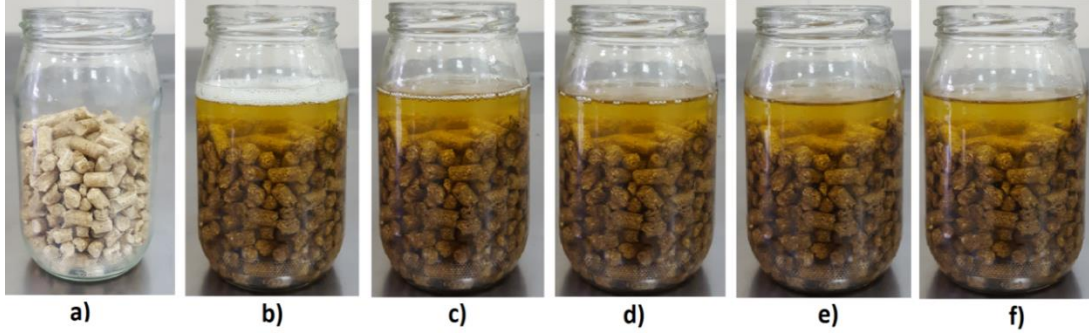
5.1.1. Yakıt karışımlarının hazırlanması

5.1.1.1. Pelet yakıtına sıvı emdirme deney sonuçları

Pelet yakıtı 100 g numuneler şeklinde hazırlanmış, farklı sıvılar emdirme işlemi için kullanılmış, kapta farklı bekleme sürelerinde bekletilmiş, zamanla kütle değişimi kayıt altına alınmıştır.

Pelet yakıtının üzerine sıvı yakıt dökülmesi sonucu oluşan görüntünün zamanla değişimi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Sıvı ilk döküldüğünde pelet yakıtının içerisindeki gözenekli yapı sebebiyle üst tarafta kabarcıklar oluşmuş, bu kabarcıklar zamanla azalmış ve kısa bir sürede kabarcıkların neredeyse yok denecek kadar az kaldığı görülmüştür. Havuzda bekletme süresinin emilim işlemine ne kadar etki ettiğini belirleyebilmek amacıyla farklı bekletme sürelerinde de (30 sn., 60 sn., 2 dk., 3 dk., 15 dk., 30 dk., 60 dk., 120 dk. ve 1 gün) denemeler yapılmıştır. Farklı

bekletme sürelerinde emme miktarının çok fazla değişmediği, 2 dakikalık sürenin emdirme işlemi için yeterli olduğu görülmüştür. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletin görüntüleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Pelet yakıtına sıvı emdirildikten sonra karardığı ve koyu bir hal aldığı görülmektedir.

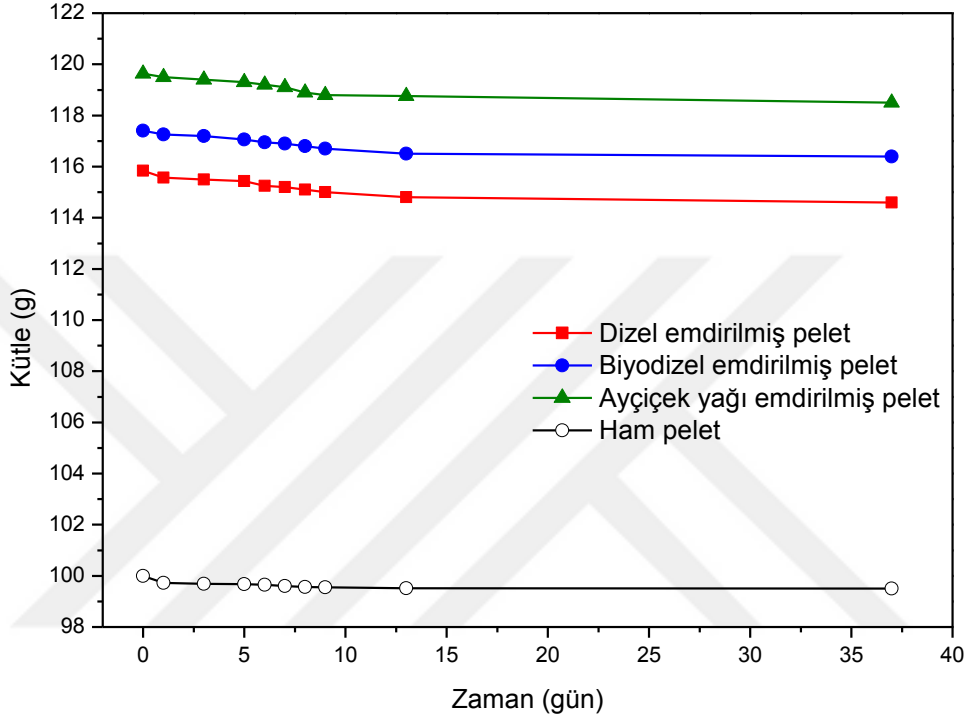


Şekil 5.1. Deneyde kullanılan peletler: a) ham pelet, b) biyodizel emdirilme sonucu 0. saniye, c) biyodizel emdirilme sonucu 30. saniye, d) biyodizel emdirilme sonucu 60. saniye, e) biyodizel emdirilme sonucu 120. saniye, ve f) biyodizel emdirilme sonucu 300. saniye



Şekil 5.2. Ham pelet ve emdirilmiş pelet görüntüleri

Şekil 5.3'te peletin sıvıları emdikten sonra zamana göre kütle değişimi verilmiştir. Emdirilmiş peletler oda ortamında yere serilerek bekletilmiştir. Bunun sonucunda bekleme süresine bağlı olarak önce kütleler bir miktar azalmış daha sonra yaklaşık olarak 10.günden itibaren değişmemiştir. Şekilden de görüleceği gibi en çok sıvı emilimi ayçiçek yağı ile gerçekleşmiş, bunu sırasıyla biyodizel ve dizel takip etmiştir.



Şekil 5.3. Zamana göre kütle değişim miktarları

Kazanda yakmak için hazırlanacak deney numuneleri (ham peletler) öncelikle 20 lt'lik kaplara yerleştirilmiştir. Daha sonra kapların içerisine sıvılar dökülerek emdirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir kaba, hassas terazi ile ölçümleri yapılan 6 kg pelet yerleştirilmiştir. Emdirme sonuçları şu şekildedir: Pelet-dizel karışımı 6.928 kg, Pelet-biyodizel karışımı 7.022 kg ve Pelet-ayçiçek yağı karışımı 7.144 kg olmuştur. Emilim kapasitesi Eş. (5.1) yardımıyla bulunabilir (Javier vd, 2016; Wang vd, 2017):

$$\text{Emilim kapasitesi} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (5.1)$$

Bu denklemde W_2 emilimden sonraki ağırlığı W_1 ise emilimden önceki ağırlığı temsil etmektedir.

Testlerde pelet yakıtının (hacim değişimi olmaksızın) kütlesel bazda %15 dizel, %17 biyodizel ve %19 ayçiçek yağı emdiği tespit edilmiştir. Birim hacim başına ısıl değer, dizel emdirilmesi sonucu %36.7, biyodizel emdirilmesi sonucu %36.9 ve ayçiçek yağı emdirilmesi sonucu %40.9 arttığı tespit edilmiştir.

Sıvı yakıtın viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi gibi bazı parametreleri emilim kapasitesini etkilemektedir (Javier vd, 2016; Wang vd, 2017). Viskozitesi ve yüzey gerilimi daha yüksek olan sıvıların pelet yakıtına daha iyi emilim sağladığı görülmüştür. Ayrıca, emilim gerçekteştikten sonra emici maddenin (pelet) gözeneklerine dolan sıvıyı salmaması gerekir ve pelet yakıtı bu konuda başarılı olmuştur.

5.1.1.2. Pelet-Kömür karışımlarının hazırlanması ile ilgili deney sonuçları

Pelet-Kömür karışımlarının %40 kömür kullanımına kadar herhangi bir sorun çıkarmadığı görülmüştür. %50 Pelet-%50 Kömür karışımları motor, röle ve disk zorlanmaları sebebiyle üretilememiştir. Toz haldeki materyaller yaklaşık %14 nemlendirilerek pelet üretimi gerçekteştirilmiştir. Materyallerin az nemli olması birbirlerine tutunmayı zorlaştırmakta ve pelet üretimi tam olarak gerçekteşmemektedir. Fazla nem ise pelet kalitesi (yakıt ısıl değeri, kırılma direnci vs.) anlamında olumsuzluklara yol açmaktadır (Mock vd, 2017). Şekil 5.4'te Ham pelet-Mangal kömürü ve Ham pelet-Taşkömürü karışımlarından elde edilen yakıtların görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.4. Ham pelet-Kömür karışımlarının görüntüsü

5.1.2. Yakıtların karakterizasyon test sonuçları

Deneyde kullanılan pelet yakıtı piyasadan temin edilmiştir ve üretici firmanın vermiş olduğu yakıt özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Pelet yakıt özellikleri (Anonim, 2018)

Ölçülen Parametreler	Değerler
Malzeme (Kayın-Çam) (%)	70-30
Çap (mm)	6
Uzunluk (mm)	10-30
Nem oranı (%)	< 9
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	4200-4600
Kül oranı (%)	< 0.9
Yoğunluk (kg/m ³)	650

Dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı sıvı yakıtlarının karakterizasyon test sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Sıvı yakıtların karakterizasyon test sonuçları

Analiz	Dizel	Biyodizel	Ayçiçek yağı
H _u (kJ/kg)	42000	37500	37000
Yoğunluk 15°C (kg/m ³)	830	870	920
Kinematik viskozite (mm ² /s)	3.3	5.3	32
Elementel analiz (%)			
C	87	78	-
H	13	12	-
N	0.2	0.2	-
S	<0.1	<0.1	-
O	-	10	-

Ham pelet ve emdirilmiş pelet yakıtlarının elementel analiz ve yaklaşık analiz sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü elementel analiz sonuçları değerlendirildiğinde ham pelet yakıtına sıvı emdirilmesiyle birlikte C ve H içeriğinin arttığı; O içeriğinin ise düştüğü belirlenmiştir. Yaklaşık analiz sonuçlarına bakıldığında ise ham pelet yakıtına dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı gibi sıvıların emdirilmesiyle birlikte nem, kül ve sabit karbon içeriğinin azaldığı; uçucu madde ve ısı değer özelliklerinin ise arttığı görülmüştür.

Çizelge 5.3. Emdirilmiş pelet yakıt özellik sonuçları

Analiz	Ham pelet	Dizel emdirilmiş pelet	Biyodizel emdirilmiş pelet	Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet
Elementel analiz (%)				
C	50.8	55.2	54.8	55.9
H	6.8	7.9	7.5	7.6
N	0.2	0.2	0.2	0.2
S	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
O	42.1	36.6	37.4	36.2
Yaklaşık analiz (%)				
Nem	6.8	6.3	6.4	6.1
Kül	1.1	0.8	0.9	0.9
Uçucu madde	79	80	80.5	82.6
Sabit karbon	13.1	12.9	12.2	10.4
H _b (kJ/kg)	18810.0	22300.0	21936.6	22150.0
H _u (kJ/kg)	17150.8	20392.0	20065.1	20320.0

Ayrıca ham pelet ve emdirilmiş pelet yakıtlarının basınç dirençleri belirlenmiştir. Basınç direnci, peletin kırılmadan (parçalanmadan) önceki dayanabileceği maksimum kırılma yükü olarak tanımlanmakta ve pelet sertliği çoğunlukla basınç direnci (sıkıştırma direnci) testi yoluyla belirlenmektedir. Sertlik

değerinin artması pelet kalitesi açısından olumludur. Yapılan testler sonucunda ham pelet, dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş peletlerin basınç direnç değerlerinin sırasıyla 546.5 N, 436.6 N, 500.7 N ve 429.6 N olduğu belirlenmiştir. Ancak emdirilmiş peletlerde kırılmanın tam olarak gerçekleşmediği, malzemenin daha sünek bir davranış sergilediği ve ezilmeye daha yatkın hale geldiği görülmüştür. Bu nedenle emdirilmiş peletlerde basınç direnç değerleri olarak cihazda okunan maksimum değerler verilmiştir.

Ham pelet ile harmanlanan ve piyasadan temin edilen taş kömürü ve mangal kömürü yakıtlarının elementel analiz, yaklaşık analiz ve ısıl değer sonuçları Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Taş kömürü ve mangal kömürünün yakıt özellik sonuçları

Analiz	Taş kömürü	Mangal kömürü
Elementel analiz (%)		
C	77.3	75.5
H	4.9	4.6
N	1.5	0.5
S	<0.2	<0.1
O	16.1	19.4
Yaklaşık analiz (%)		
Nem	3	4.8
Kül	6.2	7.5
Uçucu madde	20	25
Sabit karbon	70.8	62.7
H _n (kJ/kg)	29977	28715
H _u (kJ/kg)	28852	27588

Ham pelet-Taşkömürü ve Ham pelet-Mangal kömürü karışımlarından elde edilen yakıtların elementel analiz, yaklaşık analiz ve ısıl değer sonuçları Çizelge 5.5'te verilmiştir. Ham pelet yakıtta kömür eklenmesiyle, nem, kül, sabit karbon ve ısıl değer miktarlarının arttığı, uçucu madde miktarının ise düştüğü görülmektedir. Taşkömürü ile harmanlanan ham pelet, mangal kömürüyle harmanlanana kıyasla daha düşük nem, kül ve uçucu maddeye sahipken, daha yüksek sabit karbon ve ısıl değere sahiptir.

Çizelge 5.5. Pelet-kömür karışımlarının yakıt özellik sonuçları

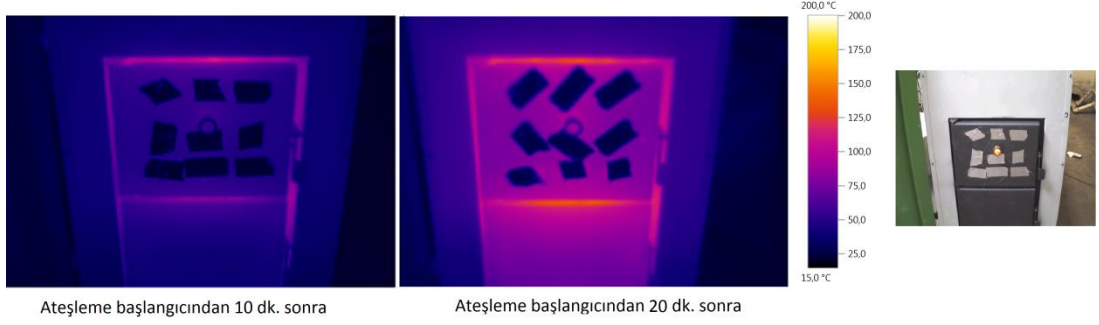
Analiz	HP100	HP80TK20	HP60TK40	HP80MK20	HP60MK40
Elementel analiz (%)					
C	50.8	55.9	61.0	55.4	60.1
H	6.8	6.4	6.0	6.4	5.9
N	0.2	0.5	0.7	0.4	0.5
S	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
O	42.1	37.1	32.8	37.7	33.4
Yaklaşık analiz (%)					
Nem	6.8	9.6	11.0	9.8	11.2
Kül	1.1	2.1	3.1	2.4	3.7
Uçucu madde	79	63.4	49.3	64.8	52.2
Sabit karbon	13.1	24.8	36.6	23.0	32.9
H _n (kJ/kg)	18810.0	20943.2	23077.3	20691.1	22572.3
H _u (kJ/kg)	17150.8	19391.0	21631.3	19138.2	21125.7

5.1.3. Performans deney sonuçları

5.1.3.1. Kazan-1 sonuçları

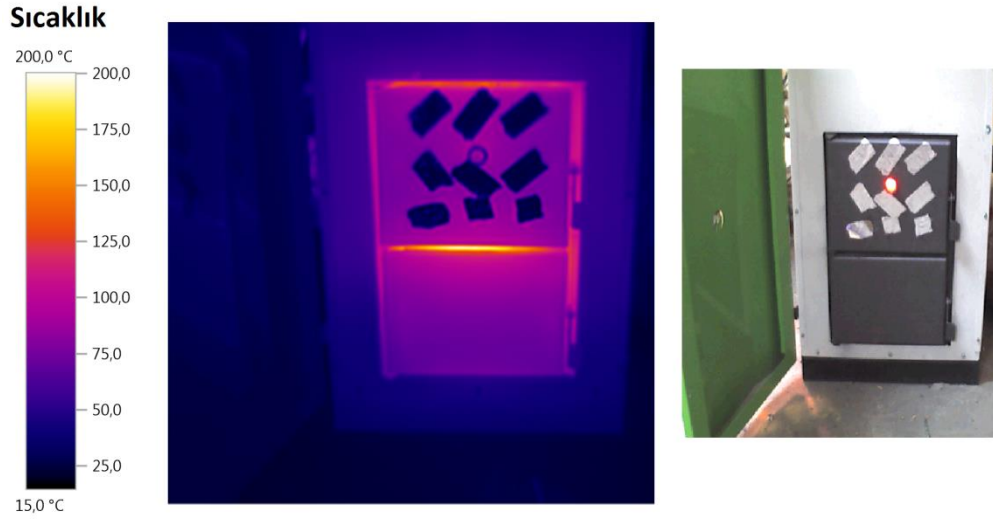
Kazanın başlangıçtan tam yüklemeye kadar gelmesi beş kademededir gerçekleşmektedir ve belirli bir zaman almaktadır. Deneylerde tam yükleme pelet yakıt beslemesi 3.2 kg/h olacak şekilde ayarlanmıştır. Ham pelet, ham pelet-kömür karışımları, emdirilmiş peletlerin baca gazı konsantrasyonları, baca gazı sıcaklıkları ve verim değerlerinin kararlı haldeki ortalamaları alınarak birbirleriyle kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, kararlı haldeki, suya olan ısı transferi de incelenmiştir.

Kazan duvarlarında oluşan sıcaklıkları görebilmek amacıyla termal kamera ile de ölçümler yapılmıştır (ham pelet yakıtı için). Şekil 5.5'te ateşleme başlangıcından 10 dk. sonra ve 20 dk. sonra oluşan sıcaklıklar gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kazan duvarları beklenildiği üzere zamanla ısınmıştır.



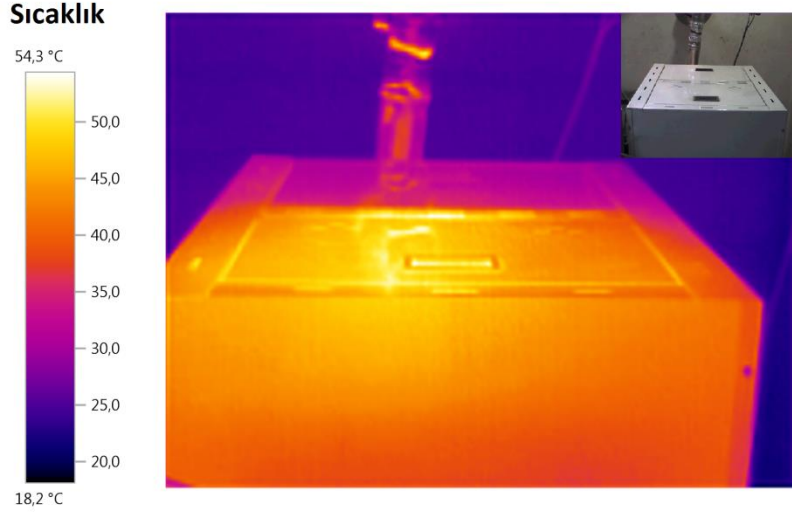
Şekil 5.5. Zamanla ön kısımda (kapakta) ölçülen sıcaklık dağılımı (Kazan-1)

Kararlı durumda oluşan sıcaklıkların görüntüsü ise Şekil 5.6'da verilmiştir. En sıcak bölgeler ön kapağın üst ve alt noktalarında oluşmuştur. Buralarda sıcaklıklar yaklaşık olarak 200 °C'lere ulaşmaktadır. Ancak genel itibariyle kapak bölgesi sıcaklıkları 75-100 °C civarlarındadır.



Şekil 5.6. Kararlı halde ön kısımda (kapakta) ölçülen sıcaklık dağılımı (Kazan-1)

Kazan üst kısmında oluşan sıcaklıklar Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Bu kısımda oluşan sıcaklıkların da düşük olduğu (max. 50 °C) görülmektedir. Yakıt deposunun olduğu kısım da 30-35 °C civarlarındadır.



Şekil 5.7. Kararlı haldeki üst kısımda ölçülen sıcaklık dağılımı (Kazan-1)

Ham pelete sıvı emdirme performans deneyi sonuçları

Emdirilmiş peletler ham pelete göre birim kütle başına daha yüksek ısıl değere sahiptir (Çizelge 5.3). Ayrıca ham peletin %15 dizel, %17 biyodizel ve %19 ayçiçek yağı emdiği belirtilmişti. Kazanda besleme ayarında hiçbir değişiklik yapılmadığı takdirde (aynı hacimsel debide besleme) ham pelet, dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş peletlerin ısıl güç giriş değerleri sırasıyla 15.2 kW, 20.8 kW, 20.9 kW ve 21.5 kW olmaktadır.

Şekil 5.8'de dizel ve biyodizel emdirilmiş peletlerin yanması durumunda gözetleme camından çekilen alev görüntüleri verilmiştir. Ham pelet yanmasında oluşan alev emdirilmiş sıvıların yanması sonucu oluşan alevden daha düşük şiddette ışık saçtığı, en yüksek alev parlaklığının dizel emdirilmiş pelet yanmasında olduğu görülmüştür.



Şekil 5.8. Ham pelet ve emdirilmiş peletler için gözetleme camından çekilmiş alev görüntüleri (Kazan-1)

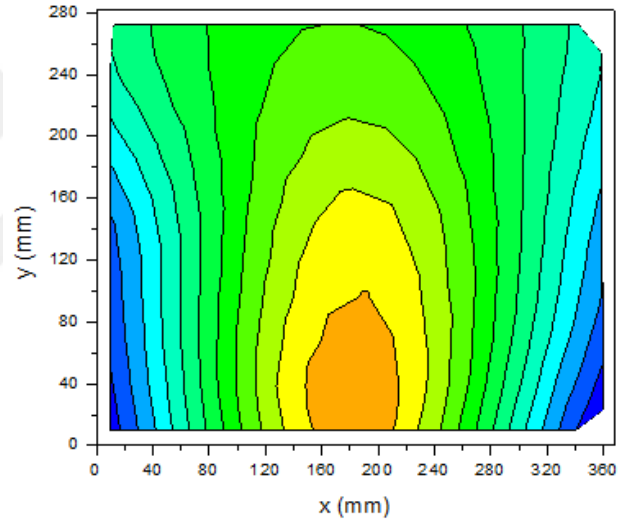
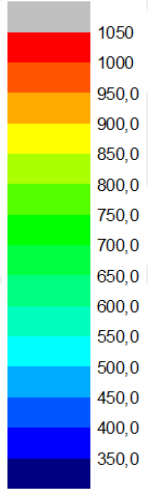
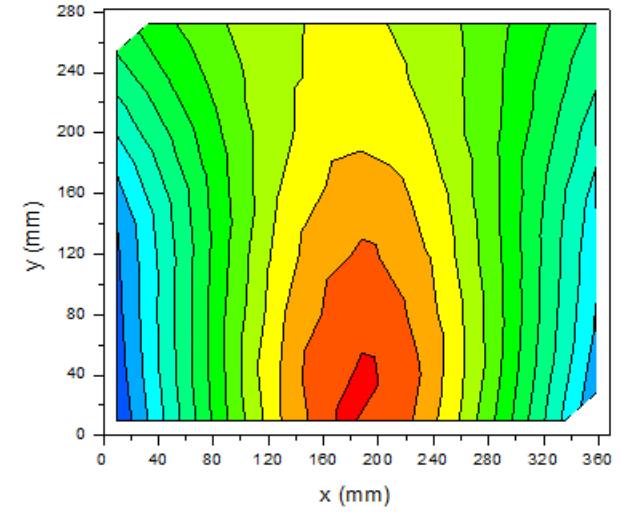
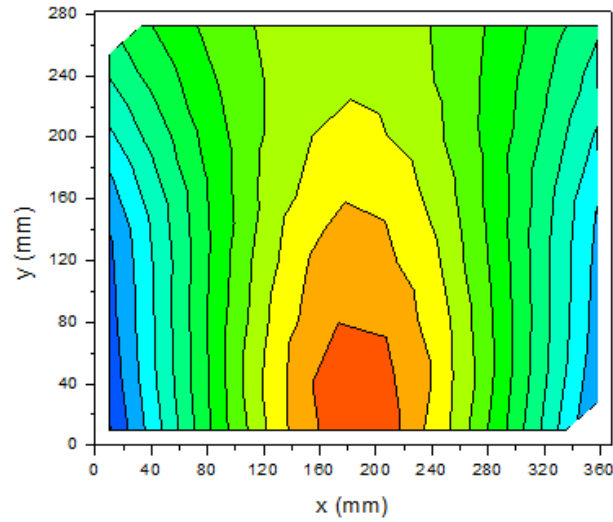
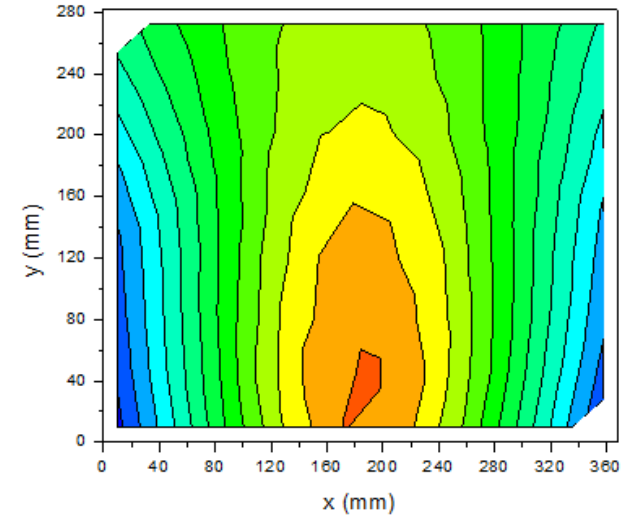
Şekil 5.9'da yanma odası merkez kesitindeki gaz sıcaklık konturları ham pelet ve emdirilmiş peletler için gösterilmiştir. Ham pelet yanması sonucu elde edilen maksimum sıcaklıklar emdirilmiş peletlere kıyasla daha düşüktür ve 900-950 °C civarlarındadır. Yanma odası genelinde de ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklıkların daha düşük olduğu görülmüştür. Dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu oluşan maksimum sıcaklıklar 1000-1050 °C arasında olup diğer yakıtlara oranla alev genişliği ve boyu daha fazladır. Biyodizel emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen maksimum alev sıcaklığının 950-1000 °C arasında olduğu, alev boyunun ve genişliğinin dizel emdirilmiş duruma kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen maksimum alev sıcaklığının biyodizel emdirilmiş pelete yakın olduğu, ancak alev boyunun ve genişliğinin biyodizel emdirilmiş pelete kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Yanma odası yan duvarlarına yakın bölgelerde (su ile çevrili yüzeylere yakın) sıcaklıkların ham pelette en düşük olduğu ve genel olarak 350-550°C civarlarında olduğu görülmüştür. Emdirilmiş peletlerde ise bu değer 400-650 °C civarında olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.10'de yanma odası arka kesitindeki gaz sıcaklık konturları verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu oluşan sıcaklıkların yanma odası merkezinde olduğu gibi, emdirilmiş peletlere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklıklar genel olarak 350-450 °C aralığındadır. Bu değer dizel ve biyodizel emdirilmiş pelet durumlarında 450-550 °C olmakla birlikte özellikle dizel emdirilmiş pelet durumunda geniş bir bölgenin 500-550 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet durumlarında ise geniş bir bölgenin 450-500 °C civarında olduğu görülmüştür.

Yanma odası ön kesitindeki gaz sıcaklık konturları Şekil 5.11'de verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu oluşan sıcaklıklar diğer kesitlerde olduğu gibi emdirilmiş peletlere göre daha düşüktür. Yanma odası ön kesitinde oluşan sıcaklıkların yanma odası arka kesitine kıyasla yaklaşık olarak ortalama 100 °C daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yanma odası sıcaklıkları genel olarak en yüksek dizel emdirilmiş pelette elde edilmiştir. Bunu sırasıyla biyodizel emdirilmiş pelet, ayçiçek yağı emdirilmiş pelet ve ham pelet izlemiştir.

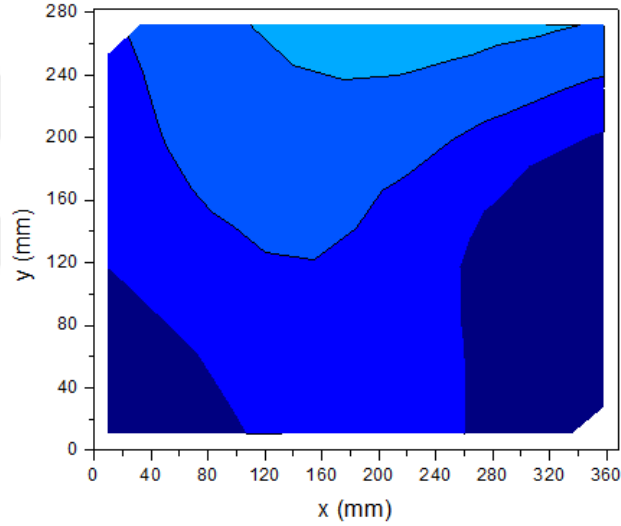
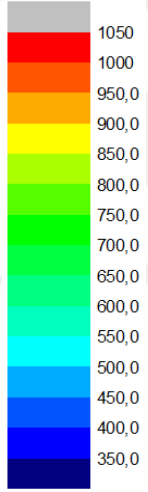
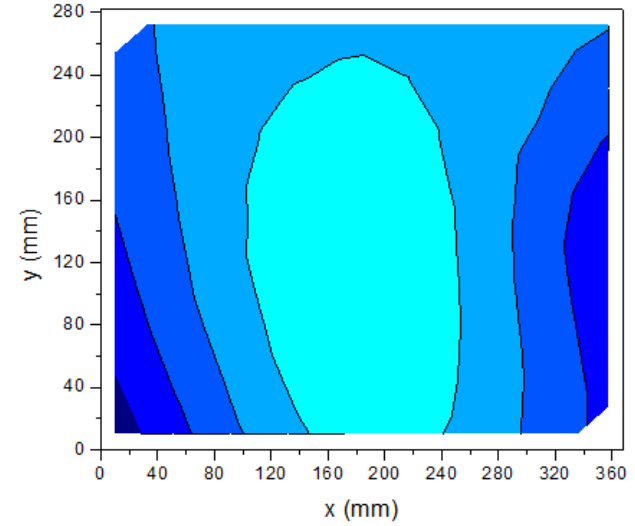
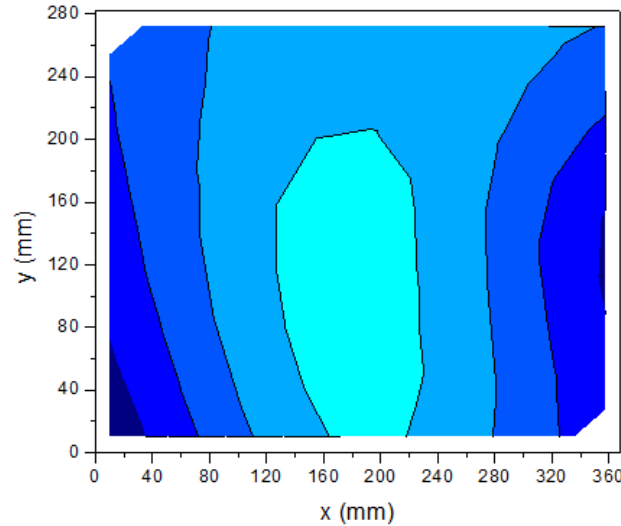
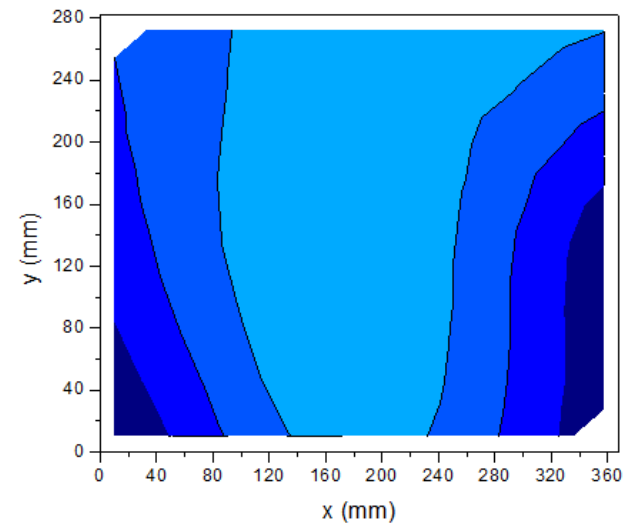
Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin ön, merkez ve arka kesitlerindeki sıcaklıkların hepsinin birlikte gösterildiği durum Şekil 5.12'de verilmiştir.

Sıcaklık (°C)

**Ham pelet****Dizel emdirilmiş pelet****Biyodizel emdirilmiş pelet****Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet**

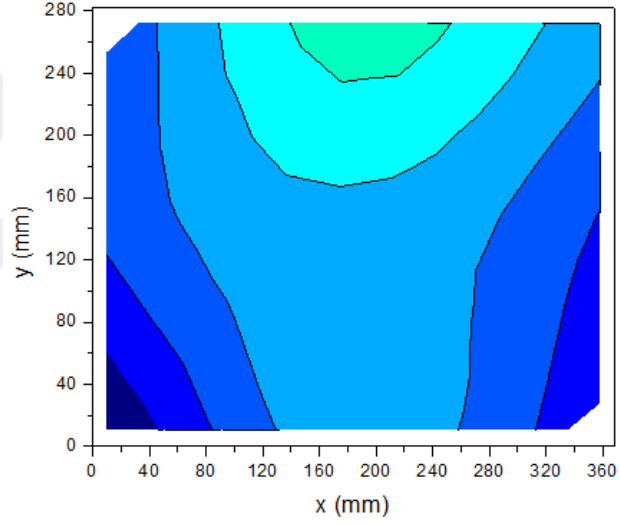
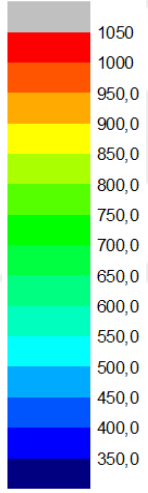
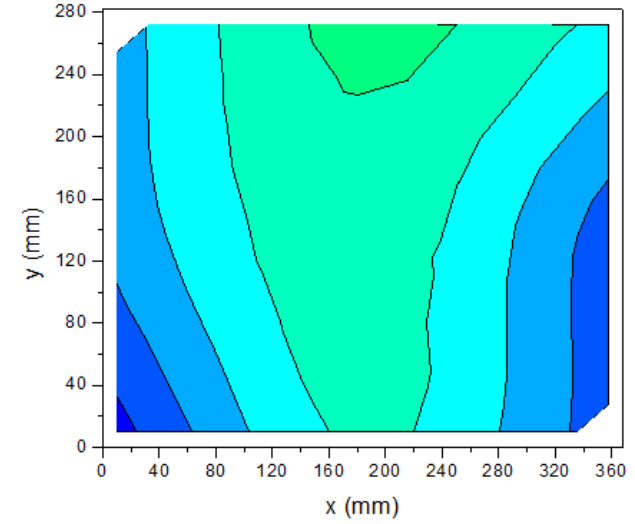
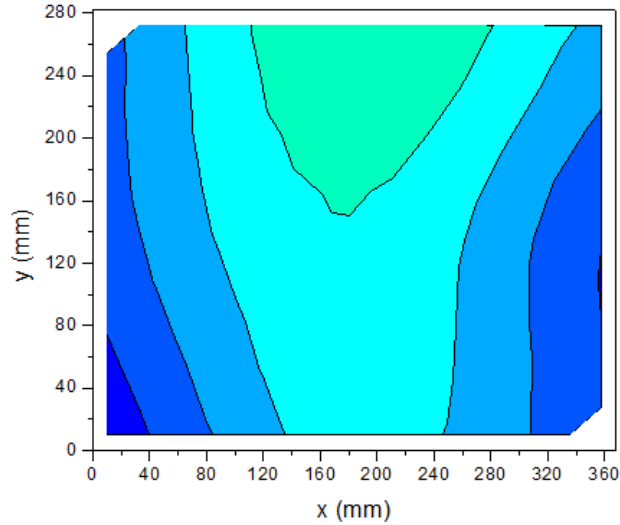
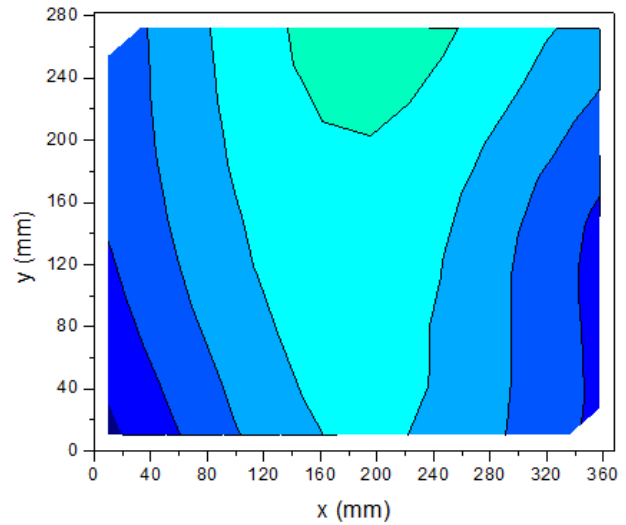
Şekil 5.9. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası merkez kesiti sıcaklık konturları (Kazan-1)

Sıcaklık (°C)

**Ham pelet****Dizel emdirilmiş pelet****Biyodizel emdirilmiş pelet****Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet**

Şekil 5.10. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası arka kesiti sıcaklık konturları (Kazan-1)

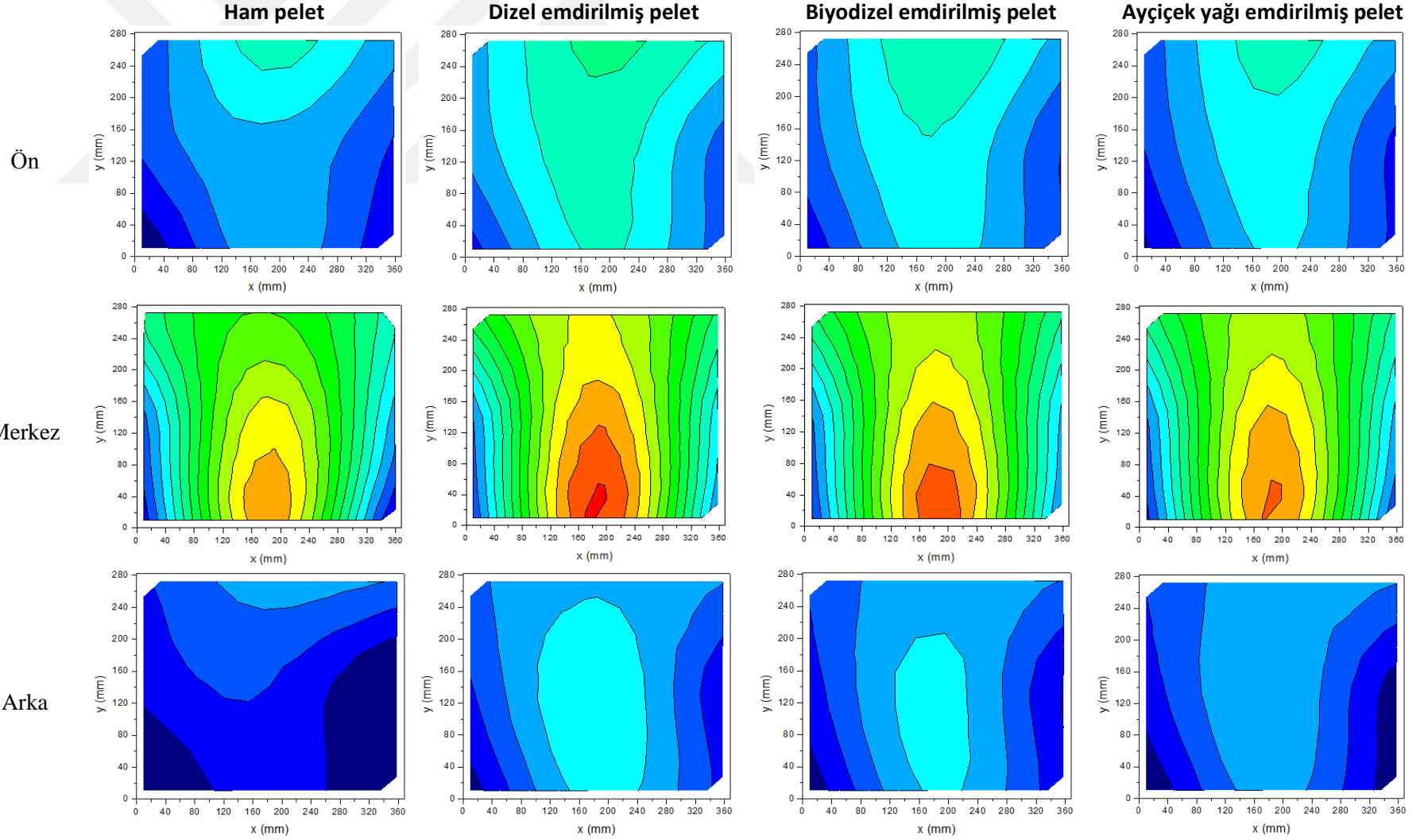
Sıcaklık (°C)

**Ham pelet****Dizel emdirilmiş pelet****Biyodizel emdirilmiş pelet****Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet**

Şekil 5.11. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası ön kesiti sıcaklık konturları (Kazan-1)

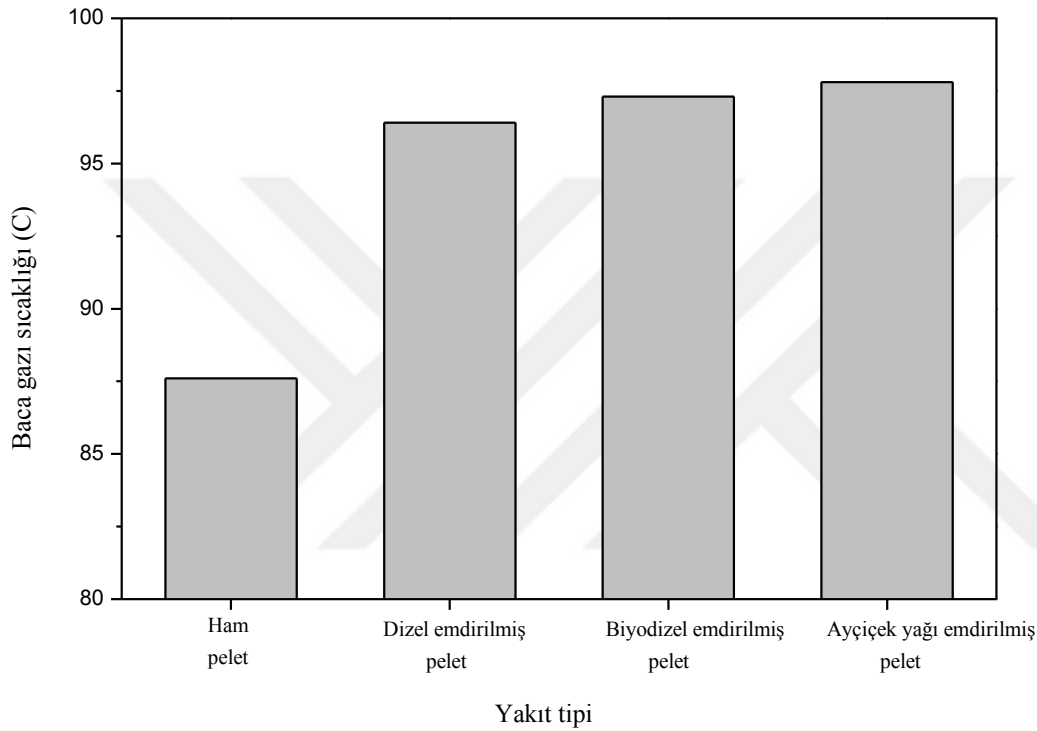
Sıcaklık (°C)

1050 1000 950 900 850 800 750 700 650 600 550 500 450 400 350



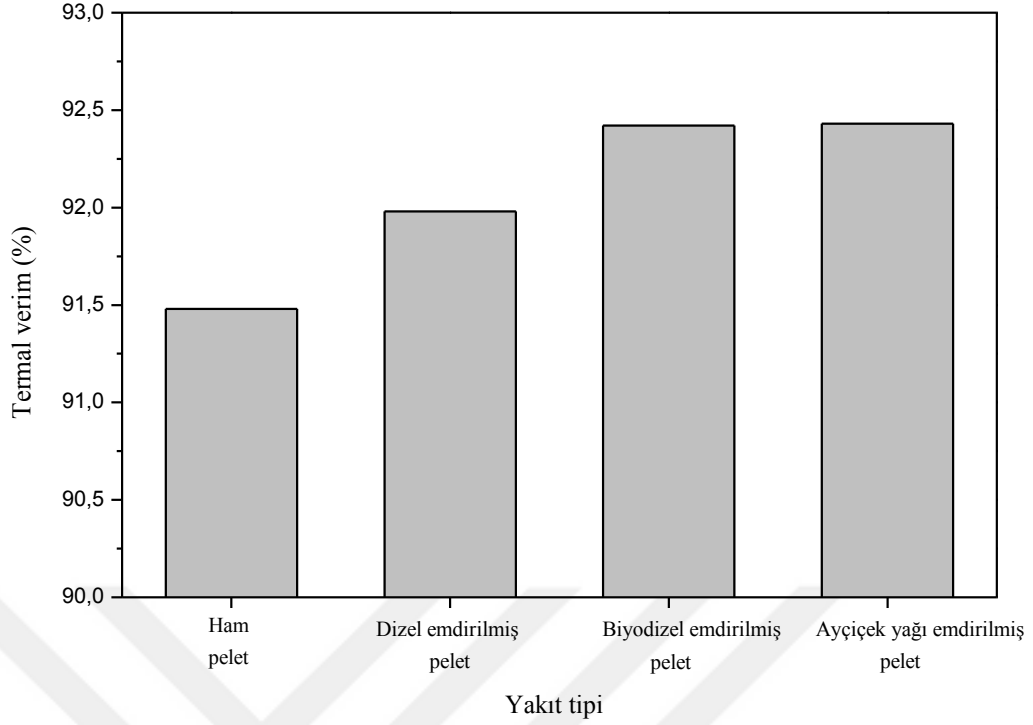
Şekil 5.12. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası ön, merkez ve arka kesit sıcaklık konturları (Kazan-1)

Kararlı durumda elde edilen baca gazı sıcaklıklarının ortalamasına bakıldığında (Şekil 5.13), en yüksek baca gazı sıcaklığının yaklaşık 98 °C olduğu ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yakıt yanması sonucunda oluştuğu görülmektedir. En düşük baca gazı sıcaklığı ise ham pelet yakıtın yanması sonucu elde edilmiştir ve 88 °C civarındadır. Emdirilmiş pelet yakıtların baca gazı sıcaklık değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ve ham pelet yakıtına göre yaklaşık 10 °C daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama baca gazı sıcaklıkları (Kazan-1)

Kazan verimleri açısından değerlendirme yapıldığında, en düşük verimin %91.5 değeriyle ham pelet yanması sonucu elde edildiği görülmüştür. Kazan verimlerinin karşılaştırılması Şekil 5.14’te verilmiştir. Emdirilmiş pelet yakıtlarının yanması sonucu elde edilen verim değerlerine bakıldığında dizel emdirilmiş peletin biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş peletten daha düşük verime sahip olduğu, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş peletlerin verimlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.14. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama termal verimleri (Kazan-1)

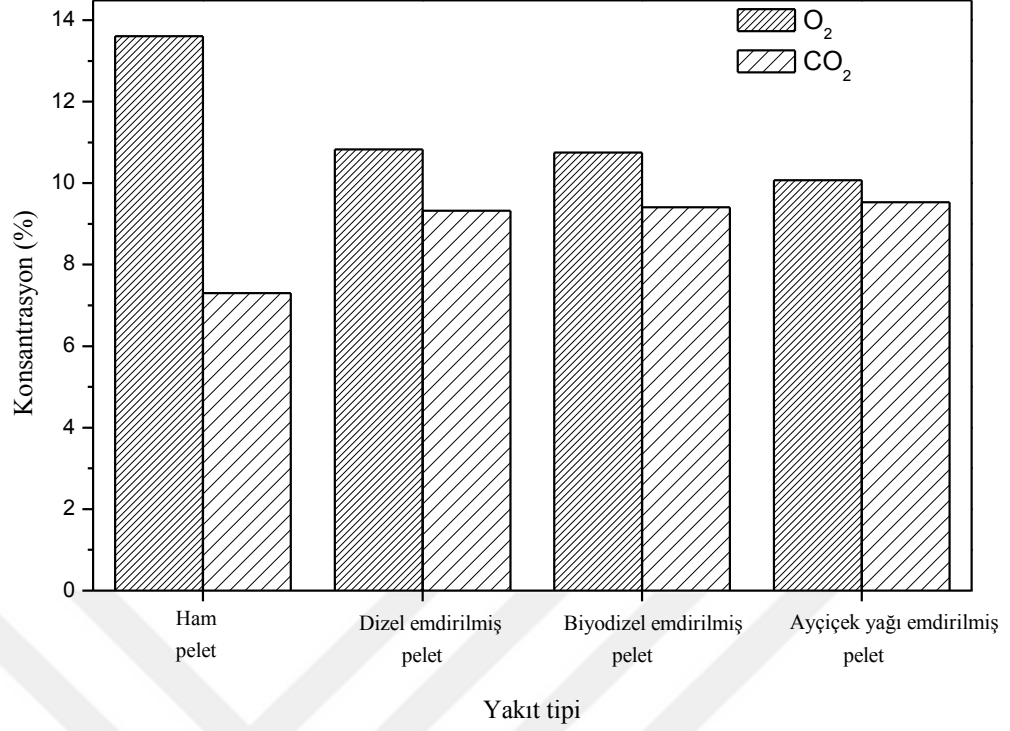
Daha önce belirtildiği gibi suya olan ısı transferi de ölçülerek direkt yöntemle de verim hesaplanmıştır. En yüksek ısı transferi ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yakıtında olmakta, bunu sırasıyla biyodizel emdirilmiş pelet, dizel emdirilmiş pelet ve ham pelet izlemektedir. Ham pelet yanması sonucu suya olan ısı geçişi yaklaşık 13.0 kW iken, bu değer dizel emdirilmiş pelette 18.0 kW, biyodizel emdirilmiş pelette 18.1 kW ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelette 18.4 kW'tır. Görüleceği gibi kazanın yakıt besleme ayarında hiçbir değişiklik yapılmaksızın suya olan ısı geçişi sırasıyla dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirme işlemleri sonucunda %38.5, %39.2 ve %41.5 artmıştır. Çizelge 5.6'da kalorimetrede ölçülen su giriş-çıkış sıcaklık değerleri, su debisi ve suya geçen ısı verilmiştir. Su debisi tüm durumlarda sabittir, ancak su giriş-çıkış sıcaklıkları değişmiştir. Direkt ölçüm sonucu elde edilen verim değerleri ham pelet, dizel emdirilmiş pelet, biyodizel emdirilmiş pelet ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelet için sırasıyla %85.5, %86.5, %86.6 ve %85.6 olmaktadır. Bu değerler indirekt ölçüm sonucu elde edilen değerlerde yaklaşık %4-5 daha düşüktür. Bu farklılık daha önce de belirtildiği gibi, kazan yüzeylerinden olan kayıplar, yanmamış karbon kaybı gibi kayıpların indirekt yöntemde dikkate alınmamasından dolayı kaynaklanmış olabilir.

Çizelge 5.6. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu kalorimetrede ölçülen ortalama sıcaklıkları (Kazan-1)

Parametre	Ham pelet	Dizel emdirilmiş pelet	Biyodizel emdirilmiş pelet	Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet
Su debisi (kg/s)	0.33	0.33	0.33	0.33
Su giriş sıcaklığı (°C)	54.6	55.7	54.8	56.0
Su çıkış sıcaklığı (°C)	64.0	68.7	67.9	69.3
Sıcaklık farkı	9.4	13.0	13.1	13.3
Suya geçen ısı (kW)	13.0	18.0	18.1	18.4

Ham pelet ve emdirilmiş peletlere ait O₂ ve CO₂ baca gazı konsantrasyonları Şekil 5.15'te verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu oluşan O₂ konsantrasyonu %13.5 civarındadır ve emdirilmiş peletlere kıyasla daha yüksektir. Dizel emdirilmiş pelet ve biyodizel emdirilmiş pelet yanması sonucu oluşan O₂ konsantrasyonu birbirlerine yakın değerdedir ve yaklaşık olarak %10.8 civarındadır. Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen O₂ konsantrasyonu en düşük değere sahiptir. Bu durum ayçiçek yağının ham pelet yakıtına en çok emilen sıvı olması ile açıklanabilir.

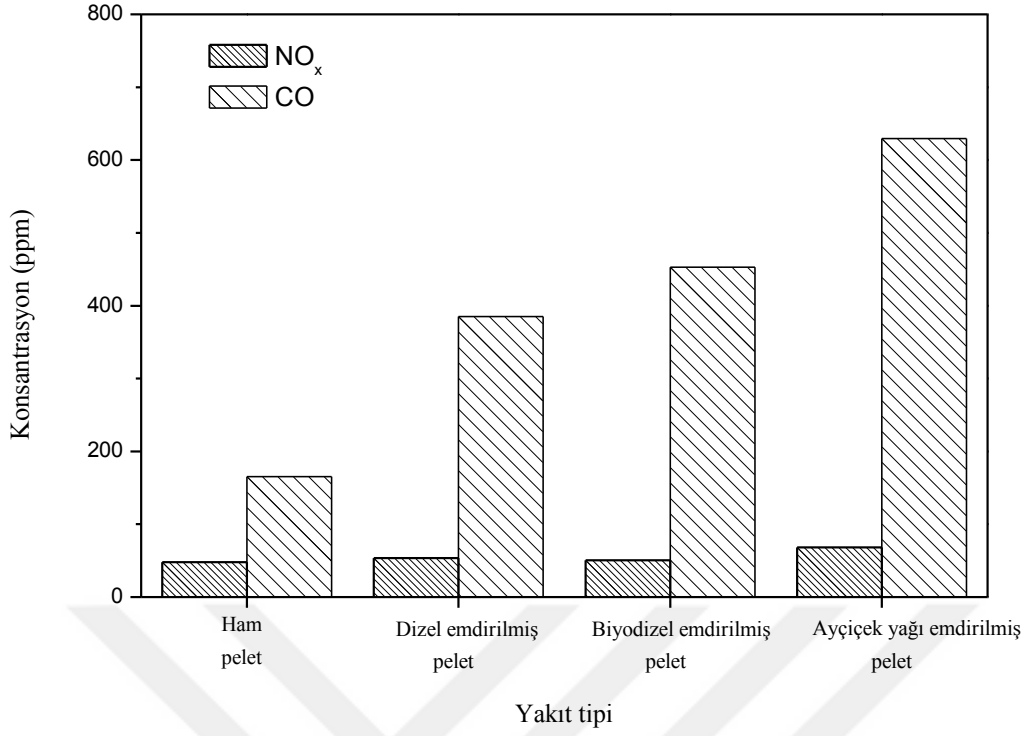
CO₂ konsantrasyonları incelendiğinde ise emdirilmiş peletlerin ham pelete kıyasla daha yüksek CO₂ emisyonu yaydığı görülmüştür. Bunun sebebi, emdirilmiş peletlerin karbon içeriğinin ham pelete kıyasla daha yüksek olması ile açıklanabilir. Ham pelet yanması sonucu oluşan CO₂ oranı %7.5 civarındayken, bu değer emdirilmiş peletlerde yaklaşık olarak %9.5'tir.



Şekil 5.15. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama O₂ ve CO₂ konsantrasyonları (Kazan-1)

Şekil 5.16'da ham pelet ve emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan NO_x ve CO konsantrasyonları verilmiştir. Ham pelet, dizel emdirilmiş pelet ve biyodizel emdirilmiş peletlerde NO_x emisyonları 47-53 ppm aralığındadır. Ayçiçek yağı emdirilmiş pelette ise bu değer 70 ppm civarındadır ve diğer yakıtlara kıyasla daha yüksektir. En düşük NO_x emisyonu ham pelet yanması sonucu oluşmuştur.

CO emisyonlarına bakıldığında ham pelet yakıtın emdirilmiş peletlerden daha düşük CO emisyonu yaydığı görülmüştür. Özellikle emdirilmiş peletlerde yanma odasında daha düşük oksijen konsantrasyonu bulunmasının da etkisiyle baca gazında daha yüksek CO emisyonu yaydıkları görülmektedir. En düşük CO emisyonu ham pelet yanması sonucu elde edilirken, en yüksek ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yanması sonucu oluşmuştur.



Şekil 5.16. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama NO_x ve CO konsantrasyonları (Kazan-1)

Ham pelet-Kömür karışımı performans deneyi sonuçları

Ham peletin kömürle harmanlanmasıyla, kömürün yüksek ısı değeri sebebiyle (Çizelge 5.4) kazana daha yüksek ısı güç girişi olmaktadır. HP80TK20 durumunda kazan ısı güç girişi 17.2 kW, HP60TK40 durumunda 19.2 kW, HP80MK20 durumunda 17.0 kW ve HP60MK40 durumunda 18.8 kW olmaktadır.

Kazanın ön kapak kısmındaki gözetleme camından yararlanarak yakıtın tutuşup tutuşmadığı, ne şekilde yandığı ile ilgili bilgi sahibi olunabilir. Şekil 5.17’de ham pelet ve ham pelet-kömür karışımlarının yanması durumunda gözetleme camından çekilen alev görüntüleri verilmiştir. Ham pelet yanmasında oluşan alevin ham pelet-kömür karışımlarının yanması sonucu oluşan alevden çok daha şiddetli olduğu görülmüştür.



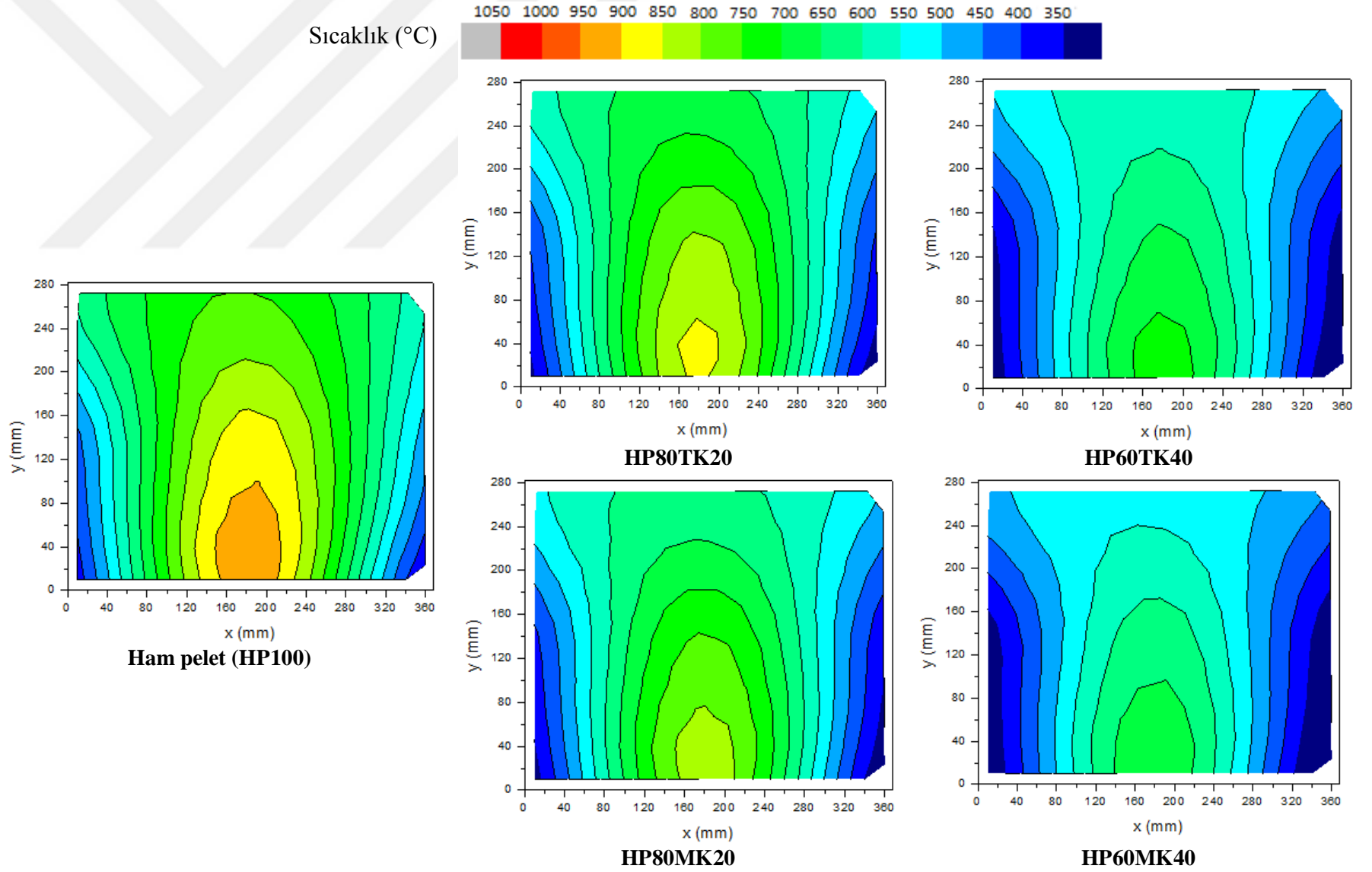
Şekil 5.17. Ham pelet-Kömür karışımlarının gözetleme camından çekilmiş alev görüntüleri (Kazan-1)

Yanma odası içerisinde oluşan alev sıcaklıkları da Bölüm 4.1.3'te belirtildiği gibi ölçülmüştür. Ham pelet-Kömür karışımlarının yanması sonucu elde edilen sıcaklıklar da bu bölüm kapsamında değerlendirilmiştir. Şekil 5.18'de yanma odası merkez kesitindeki gaz sıcaklık konturları ham pelet-kömür karışımları için gösterilmiştir. Ham pelet yanması sonucu elde edilen maksimum sıcaklıklar ham pelet-kömür karışımlarına kıyasla daha yüksektir ve 900-950 °C civarlarındadır. Ham peletle harmanlanan kömür oranı arttırıldığında yanmanın kötüleştiği ve alev sıcaklıklarının giderek düştüğü belirlenmiştir. Yanma odası genelinde de ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklıkların daha yüksek olduğu görülmüştür. %80 Ham pelet-%20 Taş kömür (HP80TK20) ve %80 Ham pelet-%20 Mangal kömür (HP80MK20) yanması sonucu oluşan maksimum sıcaklıklar 800-900 °C arasında olup, HP80TK20 durumunda alev sıcaklığı, genişliği ve yüksekliği HP80MK20 durumuna göre daha fazladır. Taş kömür oranının %40'a çıkarılması durumunda alev sıcaklıklarının daha da düştüğü ve maksimum alev sıcaklığının 700-750 °C değerlerine gerilediği görülmüştür. Mangal kömür oranının %40'a çıkarılması durumunda ise alev sıcaklıklarının daha da düştüğü ve maksimum alev sıcaklık değerinin 650-700 °C değerine düştüğü görülmüştür. Yanma odası yan duvarlarına yakın bölgelerde (su ile çevrili yüzeylere yakın) sıcaklıkların ham pelette en yüksek olduğu ve genel olarak 350-550°C civarlarında olduğu görülmüştür. Ham pelet-kömür karışımlarında ise alev sıcaklıklarının da düşmesinin etkisiyle yan duvara yakın bölgelerde sıcaklıkların düştüğü, özellikle kömür oranının %40'a çıkarıldığı durumlarda çok düşük sıcaklıkların oluştuğu belirlenmiştir.

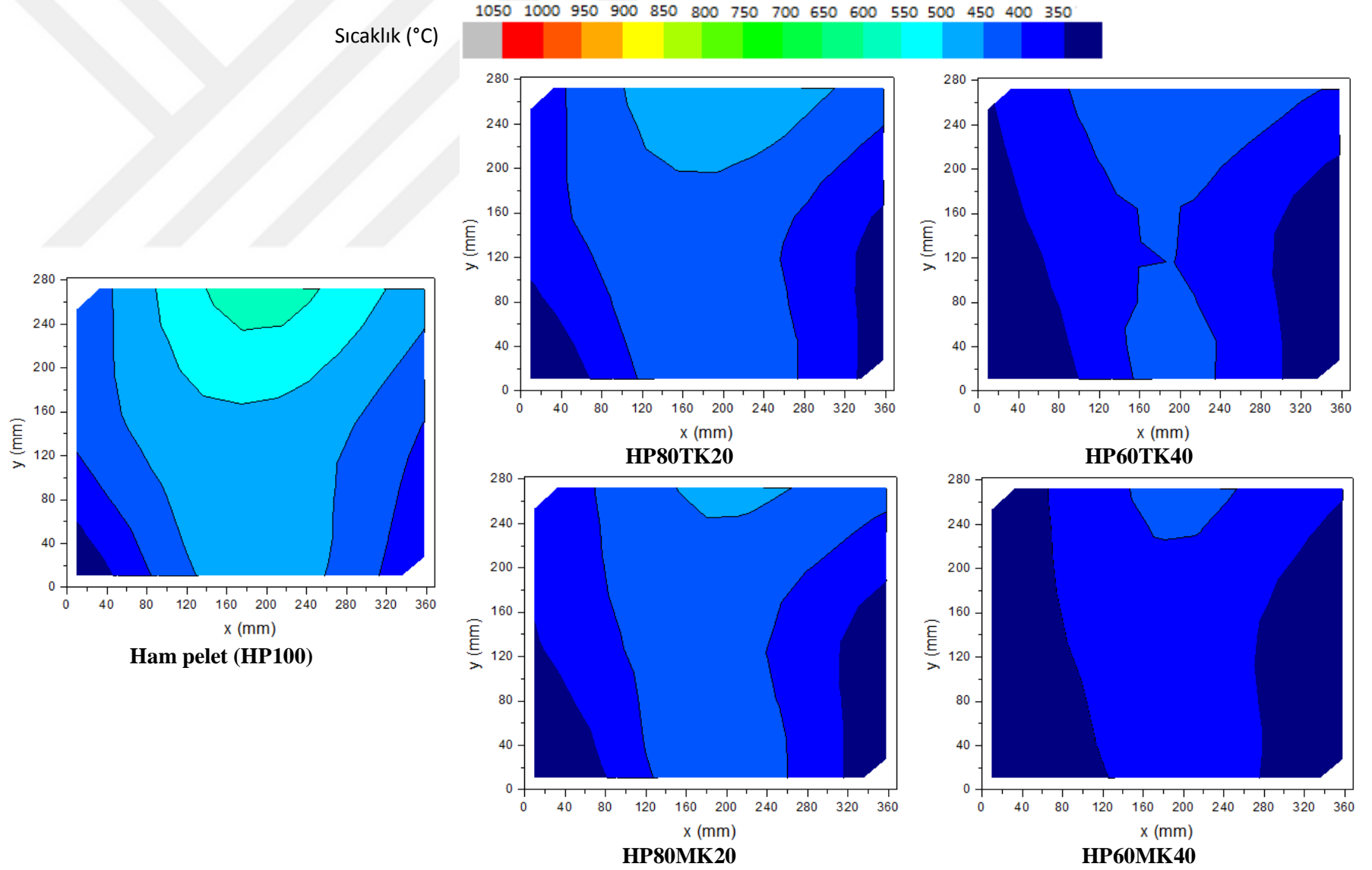
Şekil 5.19'da yanma odası ön kesitindeki ve Şekil 5.20'de yanma odası arka kesitindeki gaz sıcaklık konturları verilmiştir. Her iki kesitte de ham pelet yanması

sonucu oluşan sıcaklıklar yanma odası merkezinde de olduğu gibi, ham pelet-kömür karışımlarına göre daha yüksektir.

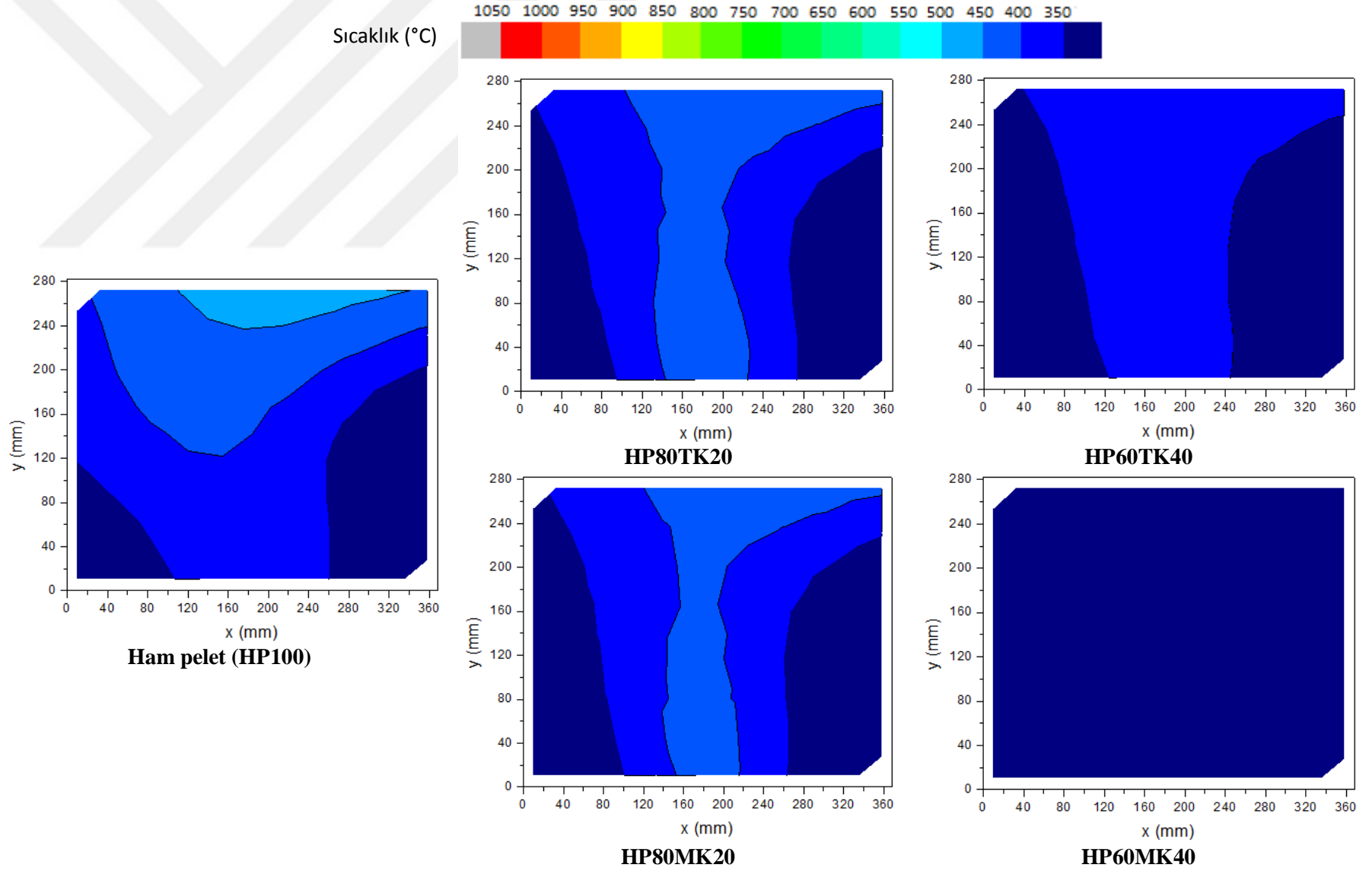




Şekil 5.18. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan yanma odası merkez kesitindeki sıcaklık konturları (Kazan-1)

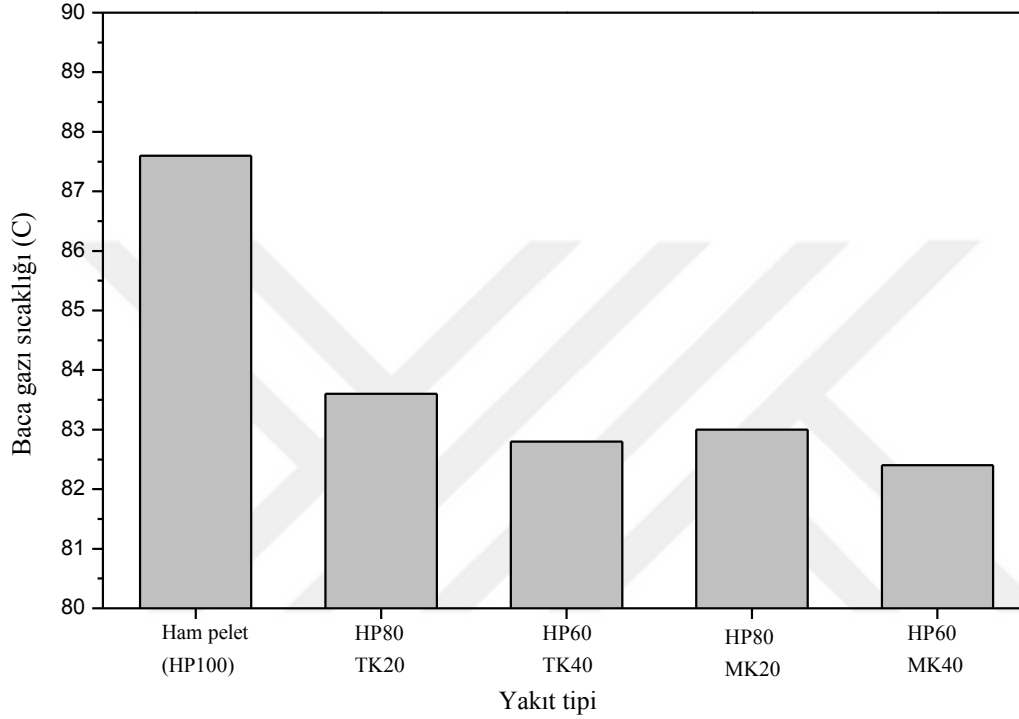


Şekil 5.19. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan yanma odası ön kesitindeki sıcaklık konturları (Kazan-1)



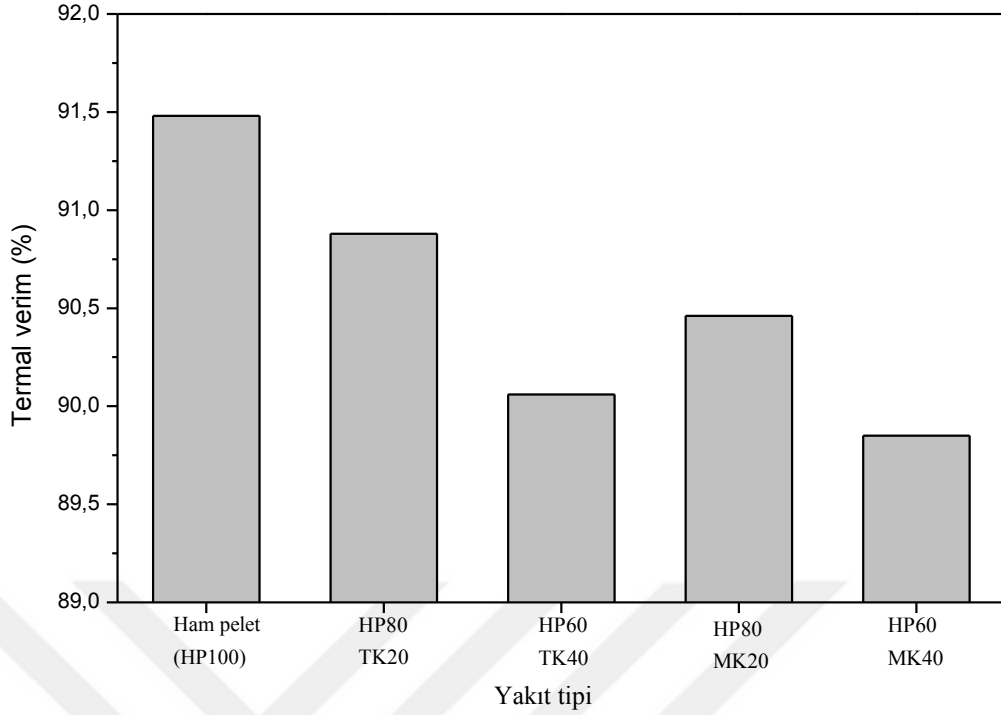
Şekil 5.20. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan yanma odası arka kesitindeki sıcaklık konturları (Kazan-1)

Kazanın kararlı hale geldikten sonraki kısmın baca gazı sıcaklıklarının ortalamasına bakıldığında (Şekil 5.21), en yüksek baca gazı sıcaklığının ham pelet, en düşük sıcaklığın ise %60 Ham pelet-%40 Mangal kömür (HP60MK40) yakıt yanması sonucunda olduğu görülmektedir. Ancak bu sıcaklık farkları birbirlerine çok yakındır ve aralarında yaklaşık 5°C fark vardır. Baca gazı sıcaklık değerleri yaklaşık olarak 82.5-87.5°C aralığındadır.



Şekil 5.21. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan ortalama baca gazı sıcaklıkları (Kazan-1)

Kazan verimlerine bakıldığında, %60 Ham pelet-%40 Mangal kömür yanması sonucu elde edilen verimin (%90 civarı) en düşük olduğu Şekil 5.22'den görülmektedir. En yüksek termal verim ise ham pelet yanması sonucu elde edilmiştir ve %91.5 civarındadır.



Şekil 5.22. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan ortalama termal verimleri (Kazan-1)

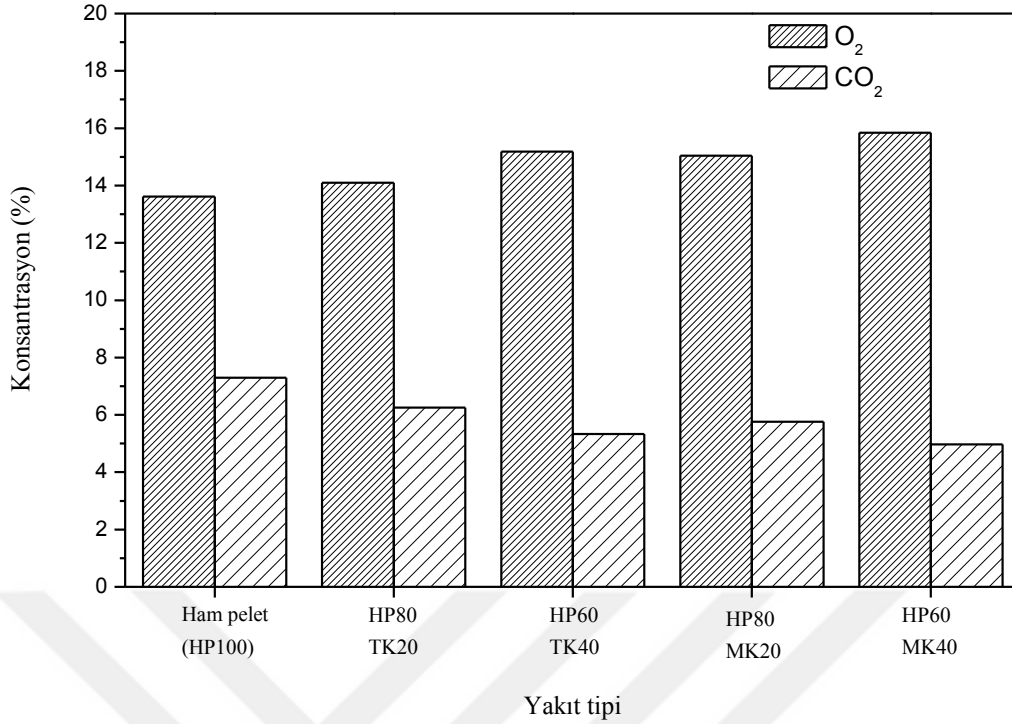
Daha önce belirtildiği gibi suya olan ısı transferi de ölçülerek direkt yöntemle de verim hesaplanmıştır. En yüksek ısı transferi HP60TK40 yakıtında olmakta, bunu sırasıyla HP60MK40, HP80TK20, HP80MK20 ve HP100 yakıtları izlemektedir. Ham pelet yakıtının kömürle harmanlanması sonucu suya olan ısı transferi artmıştır ancak termal verim değeri düşmüştür. Çizelge 5.7’de kalorimetrede ölçülen su giriş-çıkış sıcaklık, su debisi ve suya geçen ısı değerleri verilmiştir. Su debisi tüm durumlarda sabittir, ancak su giriş-çıkış sıcaklıkları değişmiştir. Direkt ölçüm sonucu elde edilen verim değerleri HP100, HP80TK20, HP60TK40, HP80MK20, HP60MK40 yakıtları için sırasıyla %85.5, %78.5, %73.4, %77.1 ve %72.9’dur. Bu değerler endirekt ölçüm sonucu elde edilen değerlerden çok daha düşüktür. Bu farklılık, kazan yüzeylerinden olan kayıplar, yanmamış karbon kaybı (özellikle kömür karışımlarında) gibi kayıpların endirekt yöntemde dikkate alınmamasından dolayı kaynaklanmış olabilir. Yüzey kayıpları, kazan suyunun ortalama sıcaklığına, kazan boyutuna, yalıtılmamış yüzeylerin büyüklüğüne ve azalan ısı güce bağlı olarak değişir. Küçük ölçekli kazanlarda (yaklaşık 40 kW ısı gücü) yüzey kayıpları %2-5 arasındadır (Schramek ve Recknagel, 2007).

Çizelge 5.7. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu kalorimetrede ölçülen ortalama sıcaklıklar (Kazan-1)

Parametre	HP100	HP80TK20	HP60TK40	HP80MK20	HP60MK40
Su debisi (kg/s)	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Su giriş sıcaklığı (°C)	54.6	51.6	50.6	51.2	50.1
Su çıkış sıcaklığı (°C)	64.0	61.4	60.8	60.7	60.0
Sıcaklık farkı	9.4	9.8	10.2	9.5	9.9
Suya geçen ısı (kW)	13.0	13.5	14.1	13.1	13.7

Kömür ile harmanlanmış ham pelet yanması sonucu elde edilen O₂ ve CO₂ konsantrasyonları Şekil 5.23'te verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu oluşan O₂ emisyonu %13.6 civarındadır ve kömürle harmanlanmış peletlere kıyasla daha düşüktür. Taş kömürüyle harmanlanmış pelet mangal kömürüyle harmanlanmış pelete kıyasla daha düşük oksijen emisyonuna sahiptir. %80 Ham pelet-%20 Taş kömür yanması sonucu oluşan oksijen konsantrasyonu %14 civarındayken, taş kömürü oranının %40'a çıkarılmasıyla bu değer %15 değerini geçmiştir. %80 Ham pelet-%20 Mangal kömür yanması sonucu oluşan oksijen konsantrasyonu %15 civarındayken, mangal kömür oranının %40'a çıkarılmasıyla bu değer %16 civarlarına yaklaşmıştır. Bu durum yanmanın tam gerçekleşmemesi ve kötü yanma ile açıklanabilir.

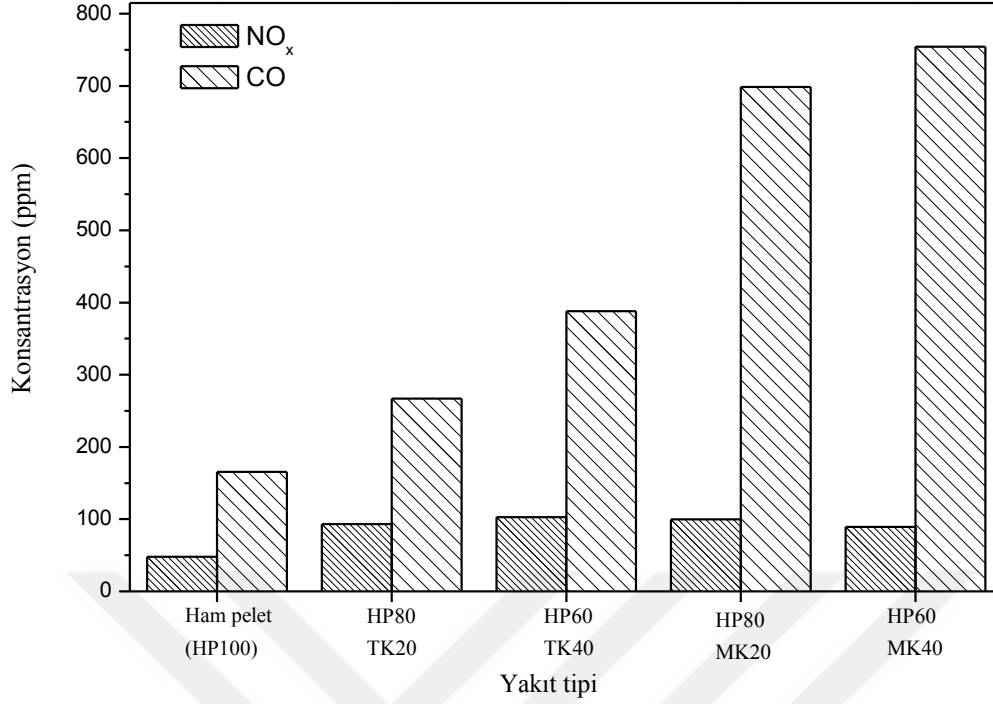
CO₂ konsantrasyonları incelendiğinde ise kömürle harmanlanmış peletlerin ham pelete kıyasla daha düşük CO₂ emisyonu yaydığı görülmüştür. Bunun sebebi daha önce de belirtildiği gibi yanmanın iyi olmaması, ürünlerin CO₂'e dönüşmemesi ile açıklanabilir. Ham pelet yanması sonucu oluşan CO₂ oranı %7 civarındayken, bu değer %60 Ham pelet-%40 Mangal kömür yanması sonucu yaklaşık olarak %5 değerlerine kadar düşmüştür.



Şekil 5.23. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan ortalama O₂ ve CO₂ konsantrasyonları (Kazan-1)

NO_x ve CO emisyonları Şekil 5.24'te verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu oluşan NO_x emisyonu 48 ppm civarındadır. Kömürle harmanlanan peletlerin tümünde NO_x emisyonları ham pelete kıyasla daha yüksektir ve yaklaşık olarak 90-100 ppm aralığındadır. Bu durum kömür içeriğinde ham pelete kıyasla daha yüksek olan azot miktarı ile açıklanabilir.

CO emisyonlarına bakıldığında ham pelet yanması sonucu en düşük CO emisyonlarının olduğu ve 165 ppm civarında olduğu belirlenmiştir. Taş kömürüyle harmanlanmış peletin CO emisyonlarını arttırdığı, %80 Ham pelet-%20 Taş kömür yanması sonucu oluşan CO emisyonunun 265 ppm civarında olduğu görülmüştür. Bu değer %60 Ham pelet-%40 Taş kömür yanması sonucunda 390 ppm değerine kadar yükselmiştir. Mangal kömürüyle harmanlanan peletlerde CO emisyonunun dramatik bir şekilde arttığı ve 700-750 ppm civarlarına kadar yükseldiği görülmüştür. Kömürle harmanlanan peletlerde, özellikle fazla oksijen konsantrasyonunun da etkisiyle yanmanın beklenenden daha kötüye gittiği görülmüştür.



Şekil 5.24. Ham pelet-Kömür karışımları yanması sonucu oluşan ortalama NO_x ve CO konsantrasyonları (Kazan-1)

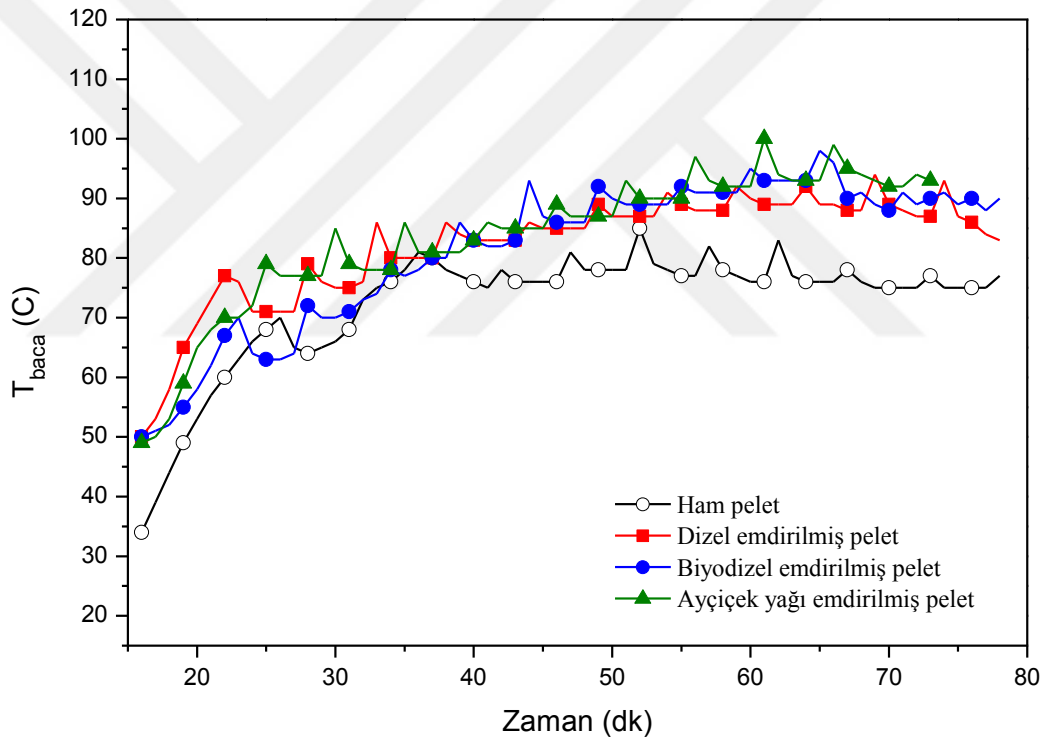
5.1.3.2. Kazan-2 sonuçları

Kazanın başlangıçtan tam yüklemeye kadar gelmesi beş kademede gerçekleşmektedir ve belirli bir zaman almaktadır. Deneylede tam yükleme pelet yakıt beslemesi 3.2 kg/h olacak şekilde ayarlanmıştır. Çizelge 5.8’de yakıtların başlangıçtan itibaren yükleme durumlarındaki geçiş süreleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde geçiş sürelerinin, biyodizel emdirilmiş pelette ham pelete yakın olduğu, dizel emdirilmiş peletin daha hızlı tutuşma sebebiyle daha hızlı geçiş sürelerine sahip olduğu, ayçiçek yağı emdirilmiş peletin ise daha farklı davrandığı ve ham pelete göre daha uzun geçiş süresine sahip olduğu (tutuşmanın daha zor olmasının da etkisiyle) görülmektedir.

Çizelge 5.8. Ham pelet ve emdirilmiş peletlerin yükleme durumlarına geçiş süreleri (Kazan-2)

Yakıt tipi	%0	%25	%50	%75	%100
Ham pelet	0 dk.	15 dk.	25 dk.	27 dk.	29 dk.
Dizel emdirilmiş pelet	0 dk.	12 dk.	22 dk.	24 dk.	26 dk.
Biyodizel emdirilmiş pelet	0 dk.	14 dk.	24 dk.	26 dk.	28 dk.
Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet	0 dk.	24 dk.	34 dk.	36 dk.	38 dk.

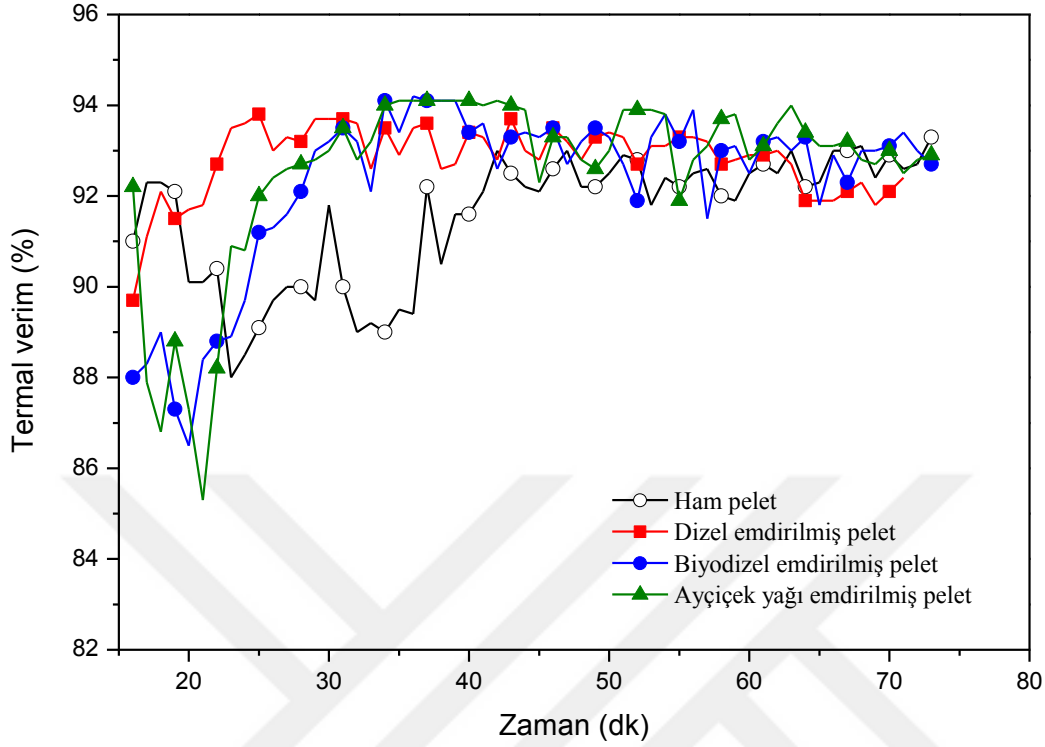
Kazan-2 durumu için ham pelet ve emdirilmiş peletlerin baca gazı konsantrasyonları, baca gazı sıcaklıkları ve verim değerleri deney başlangıcından itibaren kayıt altına alınmıştır ve zamanla değişimleri birbirleriyle kıyaslamalı olarak gösterilmiştir. Baca gazı sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 5.25'te verilmiştir. Ham pelet baca gazı sıcaklığı tüm durumlarda emdirilmiş peletlerden daha düşük sıcaklıklara sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca kazanın çalıştırılmaya başladığı andan itibaren emdirilmiş peletlerin, uçucu madde miktarlarının ve ısıl değerlerinin yüksek olmasının da etkisiyle baca gazı sıcaklığının daha hızlı yükseldiği görülmektedir. Ham pelette maksimum baca gazı sıcaklığı yaklaşık 82 °C, dizel emdirilmiş pelette 88 °C, biyodizel emdirilmiş pelette 92 °C ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelette 100 °C değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 5.25. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı baca gazı sıcaklık değişimi (Kazan-2)

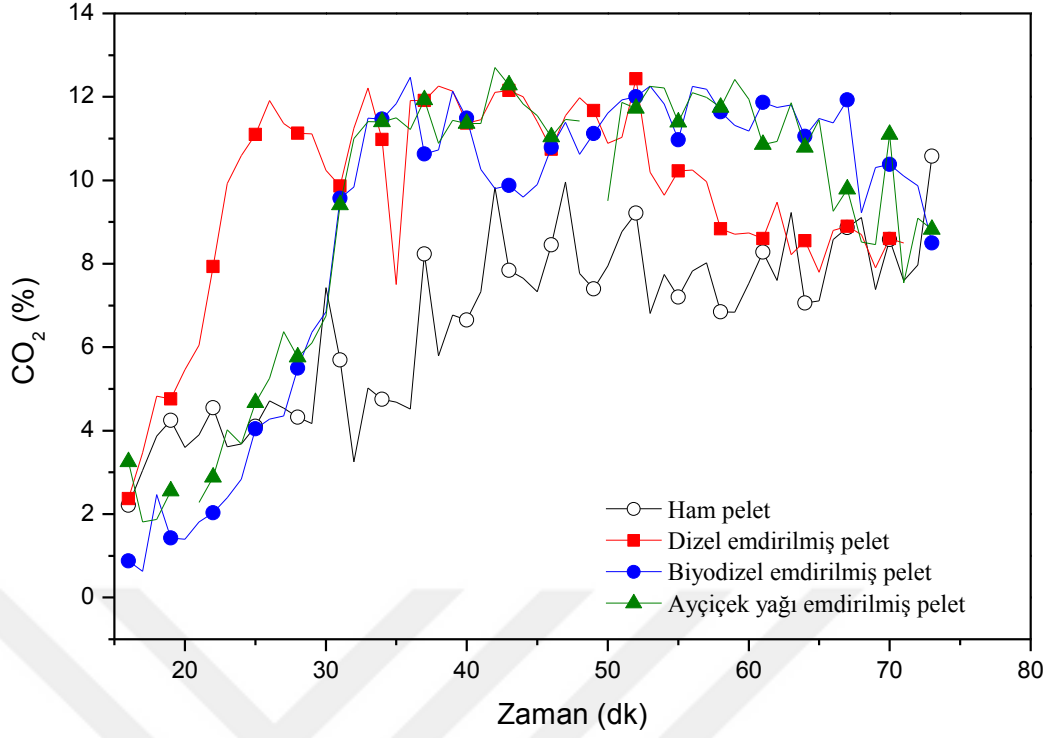
Kazanlarda termal verimi etkileyen birçok parametre vardır (Bkz. Bölüm 3.3). Emdirilmiş peletlerde oluşan baca gazı sıcaklığı ham pelete göre yüksek olmasına rağmen, termal verimlerinin de daha yüksek olduğu görülmüştür. İlk dakikalardaki verim değerleri yanmanın henüz tam kararlı hale gelmemesi sebebiyle yanıltıcı olabilir. Sistem yaklaşık kararlı hale geldikten sonraki kısım incelendiğinde; ham pelet yanması sonucu elde edilen verim değeri %90-93, dizel emdirilmiş pelette

%92-94, biyodizel emdirilmiş pelette %92-94 ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelette genellikle %93-94 civarında dalgalanmıştır (Şekil 5.26).



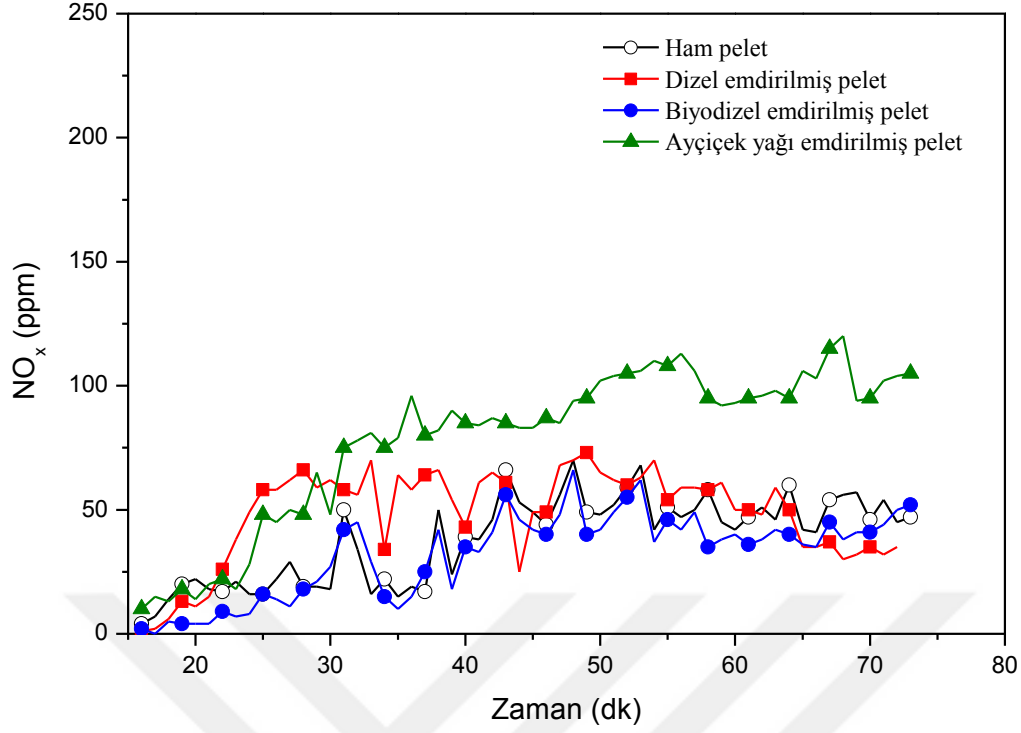
Şekil 5.26. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı ısı verim değişimi (Kazan-2)

Bu kısımda baca gazı emisyonlarını açısından, pelet yakıtı ve pelet yakıtına emdirilen çeşitli sıvıların zamana bağlı olarak birbirleriyle karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Şekil 5.27’de CO₂ emisyonlarının zamanla değişimi verilmiştir. Emdirilmiş peletler ham pelete göre daha fazla hidrokarbon içerdiğinden CO₂ emisyonları da daha yüksek olmuştur. Özellikle yanmanın ilk başlarında dizel emdirilmiş peletin diğer yakıtlara kıyasla daha yüksek CO₂ emisyonu yaydığı göze çarpmaktadır. Ancak zamanla dizel emdirilmiş peletin yaydığı CO₂ emisyonu düşmekte ve biyodizel emdirilmiş pelet ile ayçiçek yağı emdirilmiş peletin altında kaldığı görülmektedir. Bunun sebebi dizel emdirilmiş peletin diğer yakıtlara oranla daha hızlı tutuşma eğilimine sahip olması ve bu sebeple yanma işleminin erken başlaması ile açıklanabilir.



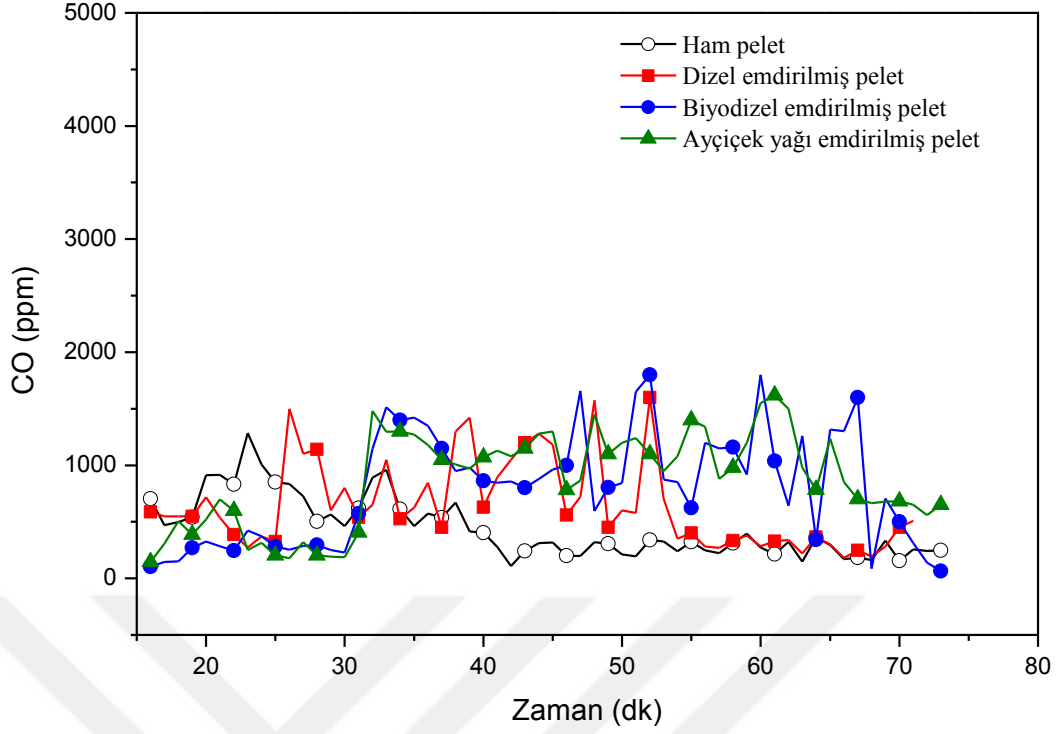
Şekil 5.27. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı CO₂ değişimi (Kazan-2)

NO_x emisyonlarının zamana göre değişimi Şekil 5.28’de verilmiştir. Yanma başlangıcından itibaren artan alev sıcaklığıyla da birlikte NO_x emisyonlarının arttığı görülmektedir. Genel olarak NO_x emisyonlarının; ham pelette 40-50 ppm, dizel emdirilmiş pelette 50-70 ppm, biyodizel emdirilmiş pelette 40-50 ppm ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelette 80-100 ppm bandında gezdiği görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi ayçiçek yağı emdirilmiş peletin NO_x emisyonlarının yüksekliğidir.



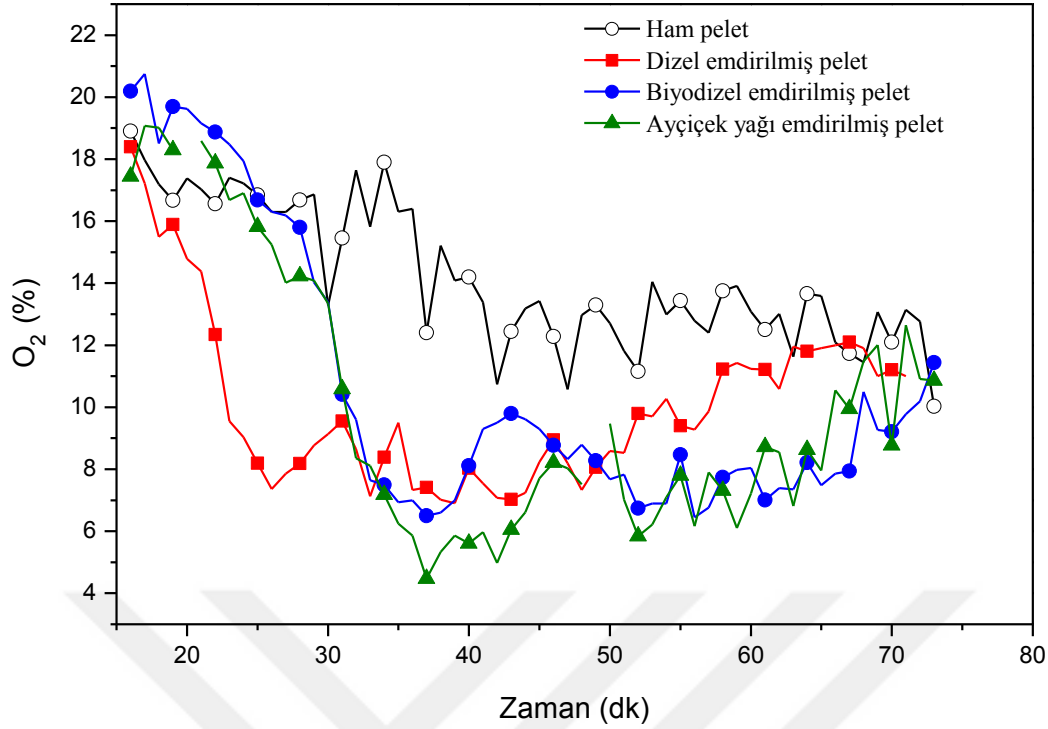
Şekil 5.28. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı NO_x değişimi (Kazan-2)

Zamana bağlı CO emisyon değişimi Şekil 5.29'da gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere emdirilmiş peletler ham pelete göre daha yüksek CO emisyonları yaymaktadır. Bu durum, çalışma şartlarının değiştirilmemesi sebebiyle aynı hava beslemesinde sistemin çalıştırılması ve emdirilen sıvılar için yetersiz oksijenin olması ile açıklanabilir. Genel olarak CO emisyonlarının; ham pelette 300-400 ppm, dizel emdirilmiş pelette 400-700 ppm, biyodizel emdirilmiş pelette 800-1200 ppm arasında ve çok dalgalı olduğu, ayçiçek yağı emdirilmiş pelette ise 800-1500 ppm bandında gezdiği görülmektedir.



Şekil 5.29. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı CO değişimi (Kazan-2)

Şekil 5.30'da O_2 konsantrasyonunun zamanla değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde emdirilmiş peletlerde oksijen konsantrasyonunun ham pelete göre daha düşük olduğu görülmektedir. Dizel emdirilmiş peletin yanmanın ilk etabında, özellikle daha hızlı buharlaşmasının da etkisiyle daha fazla oksijen tükettiği görülmektedir. İlerleyen zamanda ise dizel emdirilmiş peletin biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş peletlerden daha yüksek oksijen konsantrasyonuna sahip olduğu görülmektedir. Biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş oksijen konsantrasyonlarının birbirlerine benzer seviyelerde olduğu grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 5.30. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin zamana bağlı O₂ değişimi (Kazan-2)

Emdirilmiş peletler ham pelete göre birim kütle başına daha yüksek ısı değere sahiptir. Ayrıca ham peletin %15 dizel, %17 biyodizel ve %19 ayçiçek yağı emdiği belirtilmişti. Kazanda besleme ayarında hiçbir değişiklik yapılmadığı takdirde (aynı hacimsel debide besleme) ham pelet, dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş peletlerin ısı güç girişi değerleri sırasıyla 15.2 kW, 20.8 kW, 20.9 kW ve 21.5 kW olmaktadır.

Kazan-2 durumunda ham pelet ve emdirilmiş peletlerin alev sıcaklıklarının kararlı haldeki ortalamaları alınarak birbirleriyle kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Alev görüntülerinin daha detaylı görülmesi amacıyla, kazanın ön kapak kısmına bir cam yerleştirilmiş, ham pelet ve biyodizel emdirilmiş pelet yakıtları yakılarak Şekil 5.31'deki görüntüler elde edilmiştir. Ham pelet yanmasında oluşan alevin biyodizel emdirilmiş peletin yanması sonucu oluşan alevden daha düşük şiddette ışık saçtığı, daha az yayıldığı ve daha az hacim kapladığı görülmüştür.



Ham pelet

Biyodizel emdirilmiş pelet

Şekil 5.31. Ham pelet ve biyodizel emdirilmiş pelet alev görüntüleri (Kazan-2)

Alev sıcaklıklarının belirlenmesi daha önce belirtildiği gibi ön kapak kısmına termoelemanlar yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.32’de yanma odası merkez kesitindeki gaz sıcaklık konturları ham pelet ve emdirilmiş peletler için gösterilmiştir. Ham pelet yanması sonucu elde edilen maksimum sıcaklıklar emdirilmiş peletlere kıyasla daha düşüktür, 950-1000 °C civarlarındadır ve alev genişliği (x eksenı boyunca maksimum sıcaklık bölgesi) daha küçüktür ve 2.5 cm civarındadır. Alev boyu (y eksenı boyunca maksimum sıcaklık bölgesi) ise 5 cm civarındadır. Yanma odası genelinde de ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklıkların daha düşük olduğu görülmüştür. Dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu oluşan maksimum sıcaklıklar 1000-1050 °C arasında olup alev genişliği 6 cm civarındadır. Alev boyu ise 8 cm civarı olup en yüksek değere sahiptir. Biyodizel emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen maksimum alev sıcaklığı dizel yakıtıyla aynı değerlerde olduğu ancak alev boyunun ve genişliğinin dizel emdirilmiş duruma kıyasla daha küçük olduğu görülmüştür. Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen alev sıcaklığının 950-1000 °C bandında olduğu, alev boyu ve genişliğinin ham pelet durumuna göre daha fazla olduğu görülmüştür. Yanma odası yan duvarlarına yakın bölgelerde (su ile çevrili yüzeylere yakın) alev sıcaklıklarının 500-650 °C civarlarında olduğu görülmüştür.

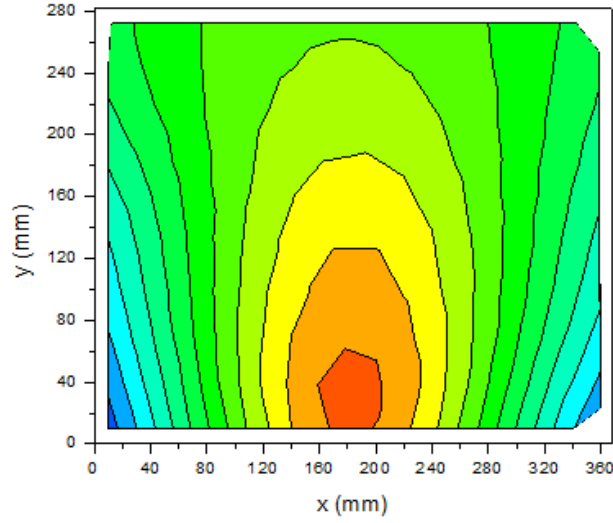
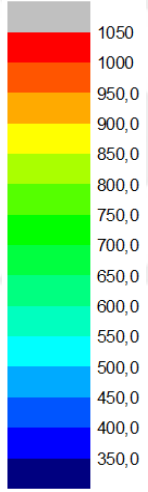
Şekil 5.33’te yanma odası arka kesitindeki gaz sıcaklık konturları verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu oluşan sıcaklıklar emdirilmiş peletlere göre daha düşük

olduğu görülmüştür. Tüm durumlarda yanma odası üst kısımlarının alt kısımlara göre daha sıcak olduğu belirlenmiştir. Ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklıklar genel olarak 450-500 °C civarındayken, bu değer dizel emdirilmiş pelet durumunda 550-600 °C, biyodizel emdirilmiş ve ayııecek yağı emdirilmiş pelet durumlarında 500-550 °C civarında olduğu görülmektedir.

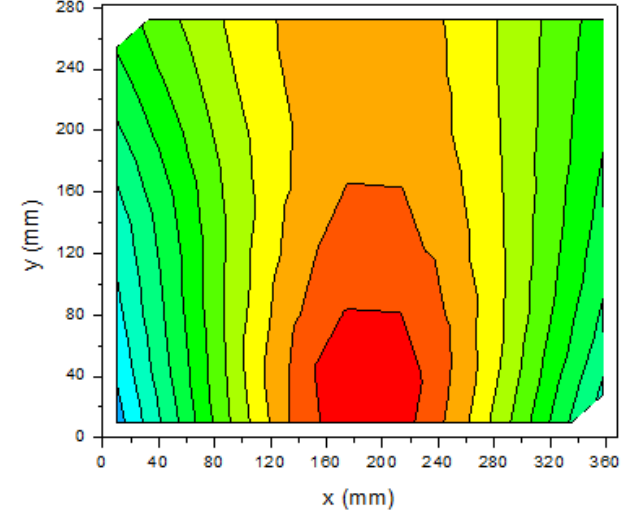
Yanma odası n kesitindeki gaz sıcaklık konturları şekil 5.34'te verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu oluşan sıcaklıklar diğer kesitlerde olduğu gibi emdirilmiş peletlere göre daha düşüktür. Yanma odası n kesitinden elde edilen sıcaklıkların yanma odası arka kesitine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Oluşan sıcaklıklar incelendiğinde en yüksek sıcaklığın dizel emdirilmiş pelette olduğu, bunu sırasıyla biyodizel emdirilmiş pelet, ayııecek yağı emdirilmiş pelet ve ham peletin takip ettiği görülmektedir.

Ham pelet ve emdirilmiş peletlerin n, merkez ve arka kesitlerindeki sıcaklıkların hepsinin birlikte gösterildiği durum şekil 5.35'te verilmiştir.

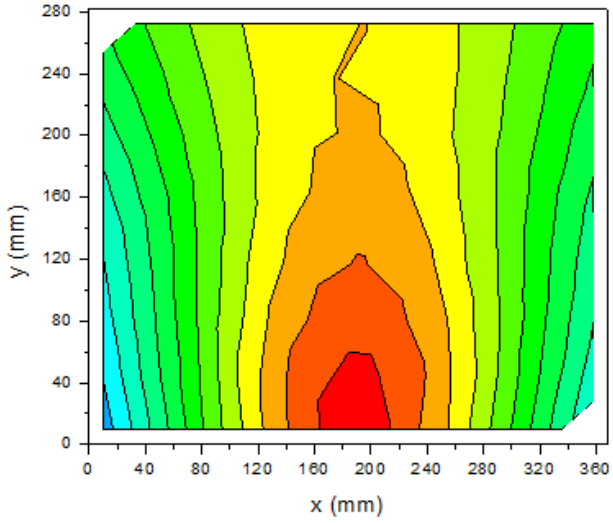
Sıcaklık (°C)



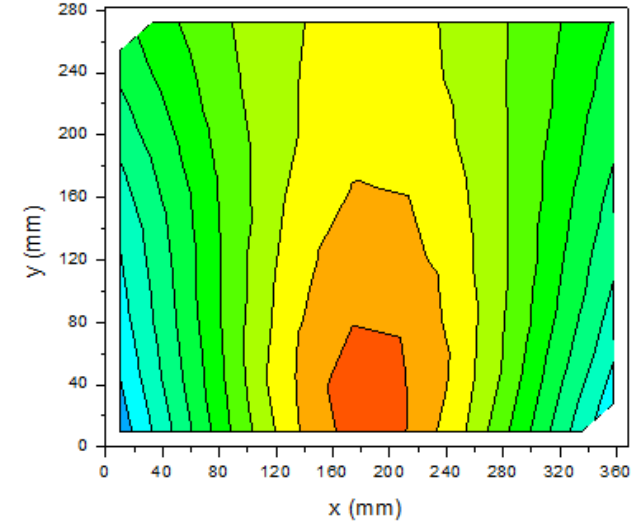
Ham pelet



Dizel emdirilmiş pelet



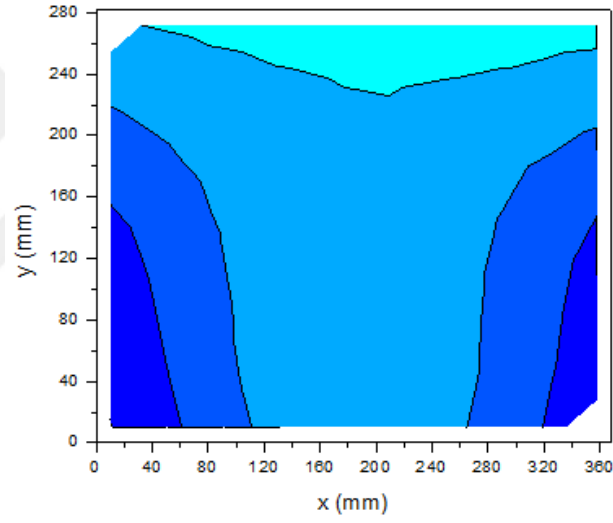
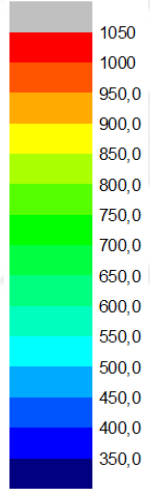
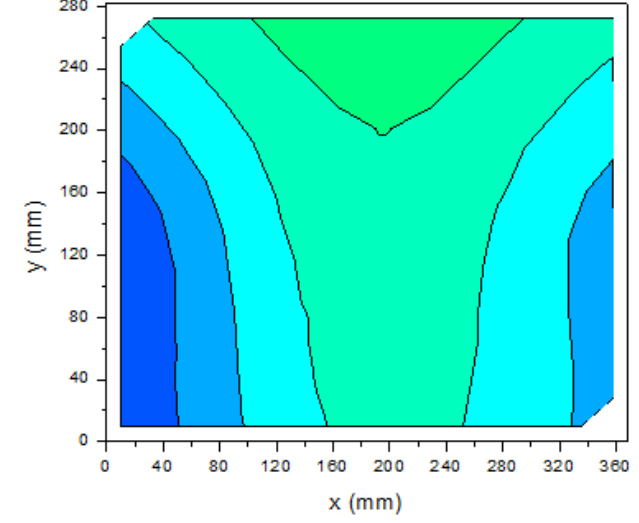
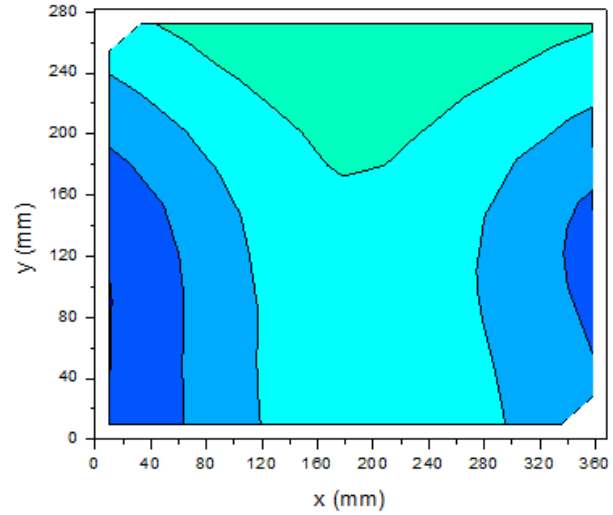
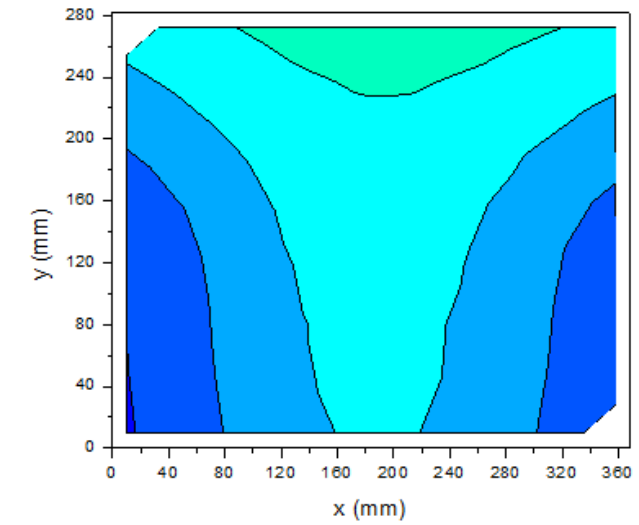
Biyodizel emdirilmiş pelet



Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet

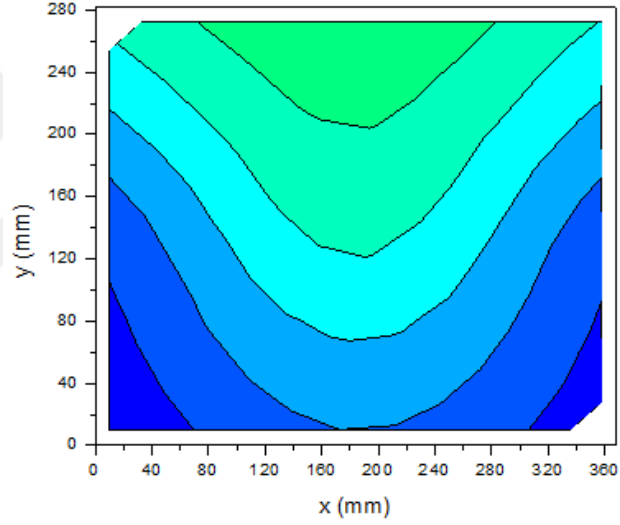
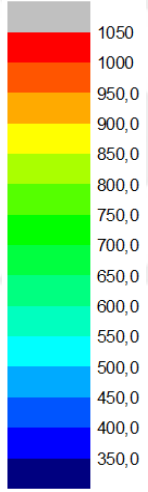
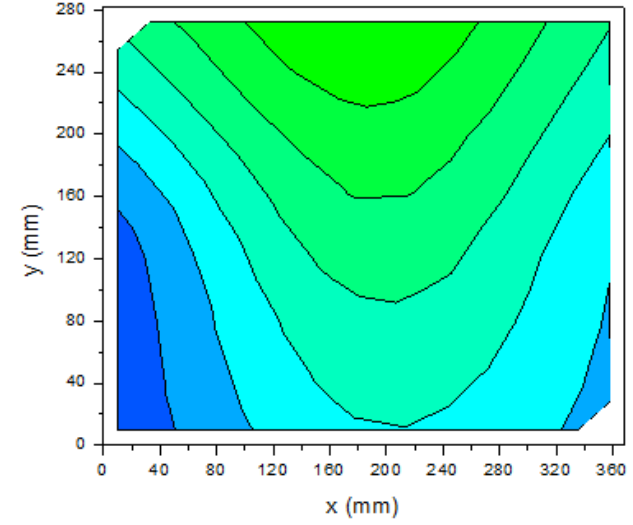
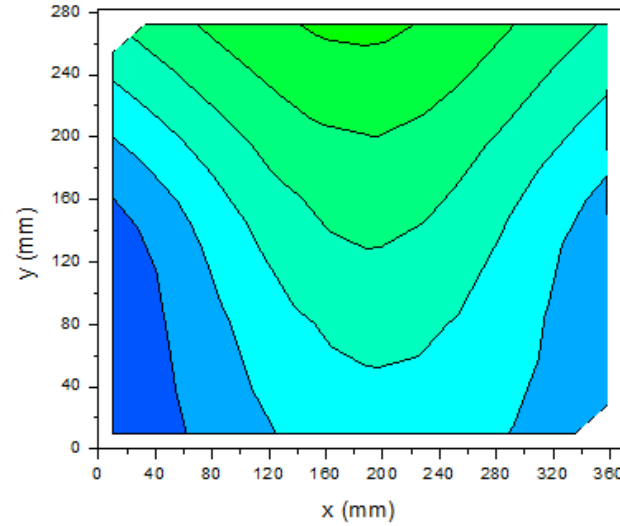
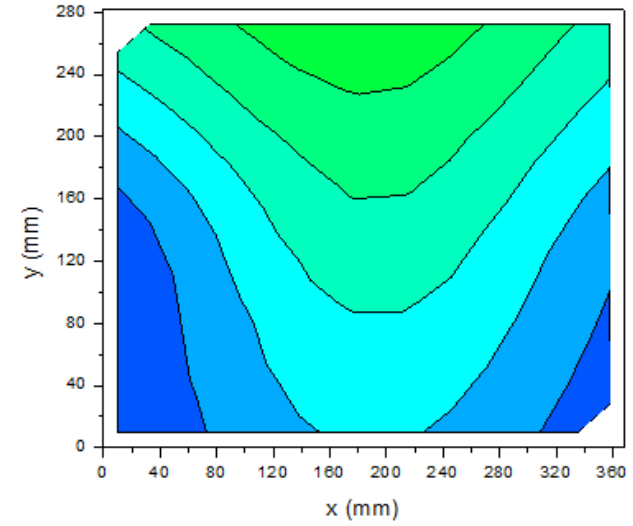
Şekil 5.32. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası merkez kesiti sıcaklık konturları (Kazan-2)

Sıcaklık (°C)

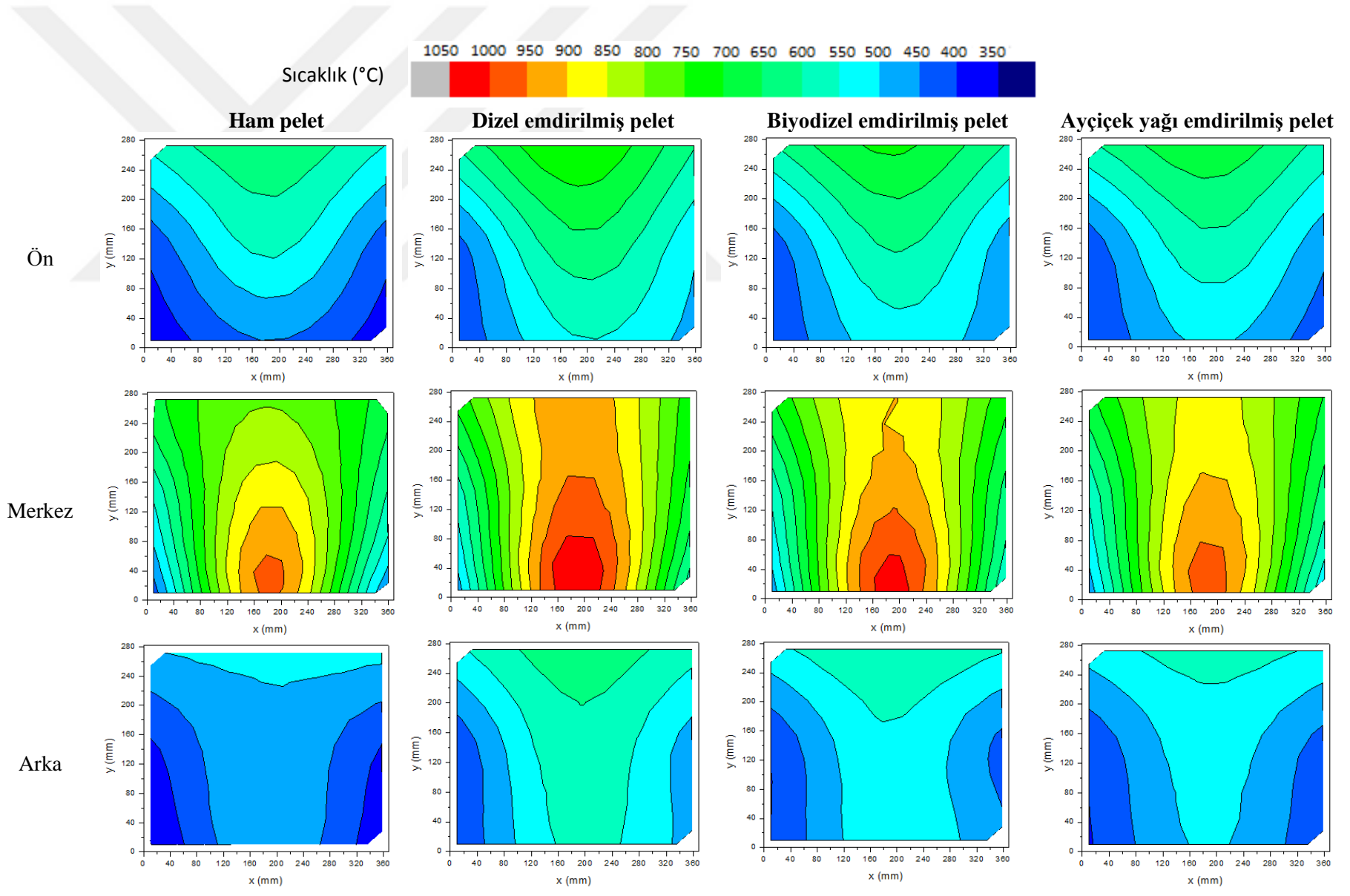
**Ham pelet****Dizel emdirilmiş pelet****Biyodizel emdirilmiş pelet****Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet**

Şekil 5.33. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası arka kesiti sıcaklık konturları (Kazan-2)

Sıcaklık (°C)

**Ham pelet****Dizel emdirilmiş pelet****Biyodizel emdirilmiş pelet****Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet**

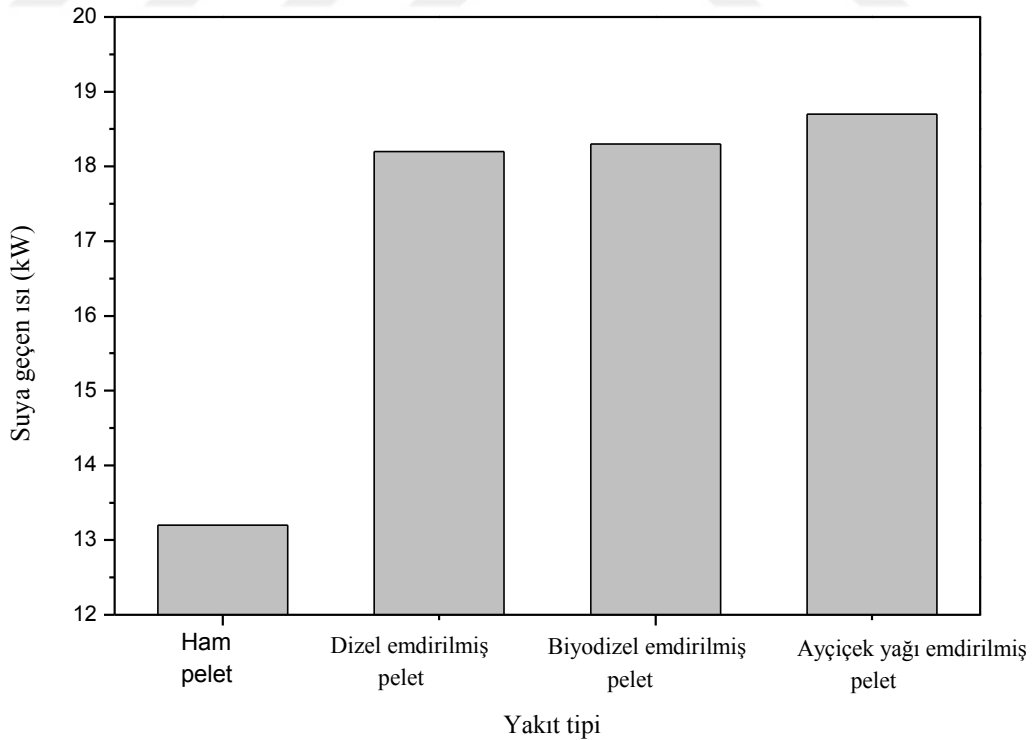
Şekil 5.34. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası ön kesiti sıcaklık konturları (Kazan-2)



Şekil 5.35. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanma odası ön, merkez ve arka kesit sıcaklık konturları (Kazan-2)

Ham pelet ve emdirilmiş peletlerin baca gazı konsantrasyonları, baca gazı sıcaklıkları ve verim değerlerinin kararlı haldeki ortalamaları alınarak birbirleriyle kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, kararlı haldeki, suya olan ısı transferi de incelenmiştir.

Suya olan ısı transferinin yakıt tipine göre değişimi Şekil 5.36'da verilmiştir. Görüldüğü gibi en yüksek ısı transferi ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yakıtında olmakta, bunu sırasıyla biyodizel emdirilmiş pelet, dizel emdirilmiş pelet ve ham pelet izlemektedir. Ham pelet yanması sonucu suya olan ısı geçişi yaklaşık 13.2 kW iken, bu değer dizel emdirilmiş pelette 18.2 kW, biyodizel emdirilmiş pelette 18.3 kW ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelette 18.6 kW'tır. Görüleceği gibi kazanın yakıt besleme ayarında hiçbir değişiklik yapılmaksızın suya olan ısı geçişi sırasıyla dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirme işlemleri sonucunda %37.9, %38.6 ve %40.9 artmıştır. Çizelge 5.9'da kalorimetrede ölçülen su giriş-çıkış sıcaklık, su debisi ve suya geçen ısı değerleri verilmiştir. Su debisi tüm durumlarda sabittir, ancak su giriş-çıkış sıcaklıkları değişmiştir. Direkt ölçüm sonucu elde edilen verim değerleri ham pelet, dizel emdirilmiş pelet, biyodizel emdirilmiş pelet ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelet için sırasıyla %86.8, %87.1, %87.6 ve %86.5 değerlerindedir.

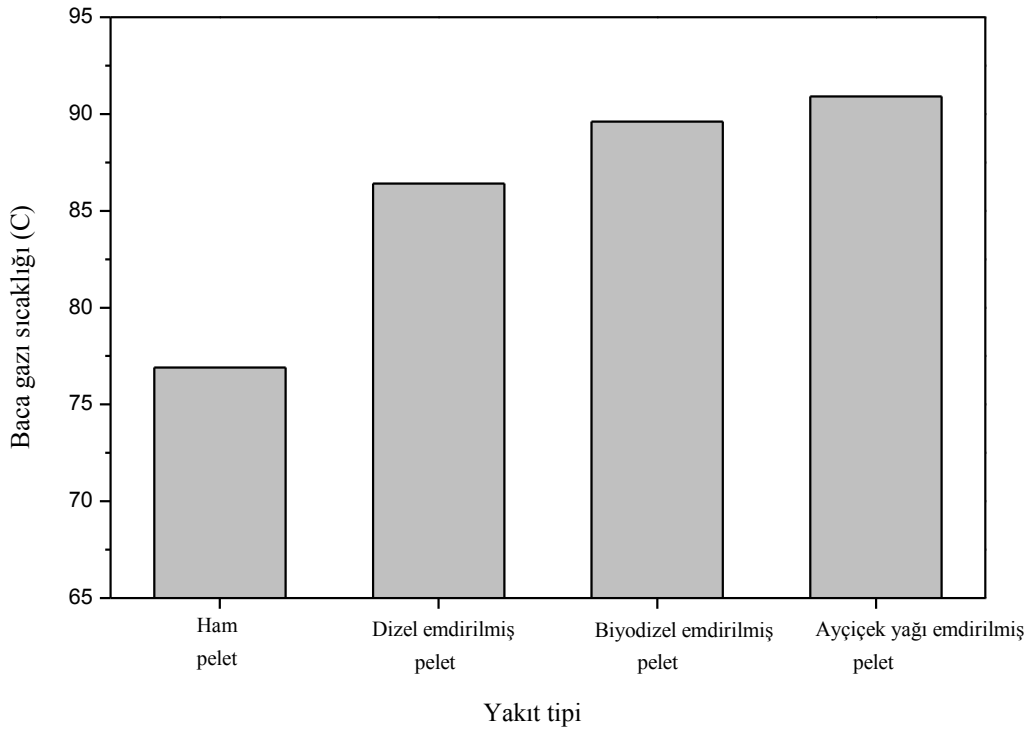


Şekil 5.36. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu suya olan ısı geçiş miktarları (Kazan-2)

Çizelge 5.9. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu kalorimetrede ölçülen ortalama sıcaklıkları (Kazan-2)

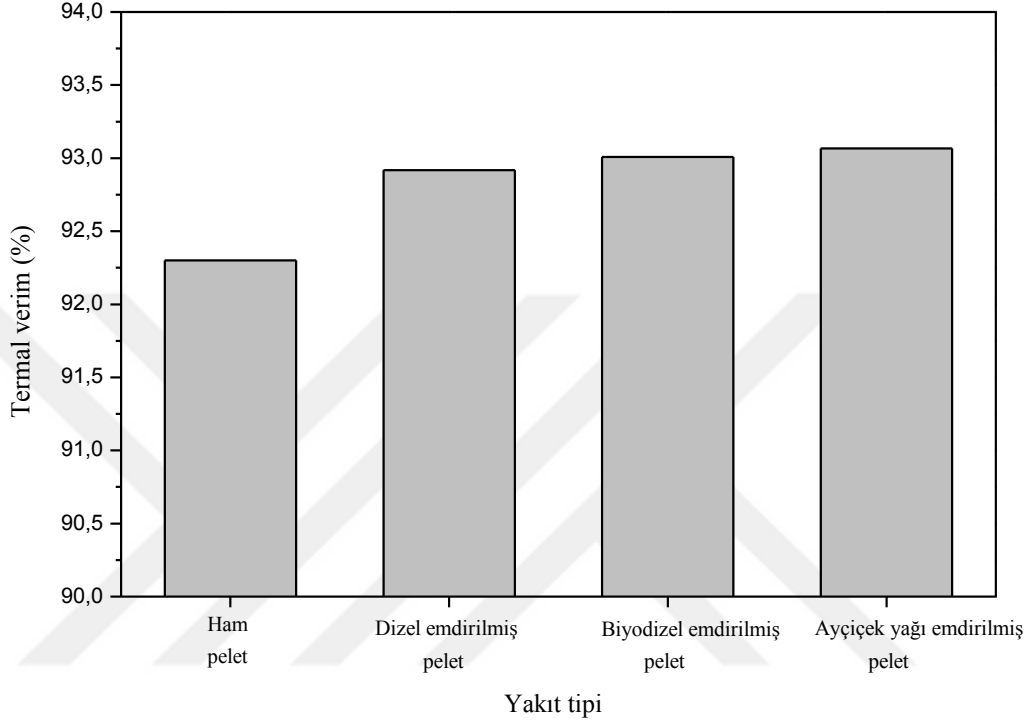
Parametre	Ham pelet	Dizel emdirilmiş pelet	Biyodizel emdirilmiş pelet	Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet
Su debisi (kg/s)	0.33	0.33	0.33	0.33
Su giriş sıcaklığı (°C)	56.5	57.6	56.0	56.9
Su çıkış sıcaklığı (°C)	66.1	70.8	69.3	70.4
Sıcaklık farkı	9.6	13.2	13.3	13.5
Suya geçen ısı (kW)	13.2	18.2	18.3	18.6

Kararlı haldeki baca gazı sıcaklıklarına bakacak olursak (Şekil 5.37), en yüksek baca gazı sıcaklığının ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yakıt yanması sonucunda olduğu görülmektedir. En düşük baca gazı sıcaklığı ise ham pelet yakıtın yanması sonucu elde edilmiştir. Baca gazı sıcaklık değerleri ham pelet, dizel emdirilmiş pelet, biyodizel emdirilmiş pelet ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelet için sırasıyla 76.9 °C, 86.4 °C, 89.6 °C ve 90.9 °C değerindedir. Görüldüğü gibi özellikle biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yakıtlarının baca gazı sıcaklık değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Ham pelet yanması sonucu elde edilen baca gazı değeri ise emdirilmiş peletlerden yaklaşık olarak 10-13 °C daha düşüktür.



Şekil 5.37. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama baca gazı sıcaklıkları (Kazan-2)

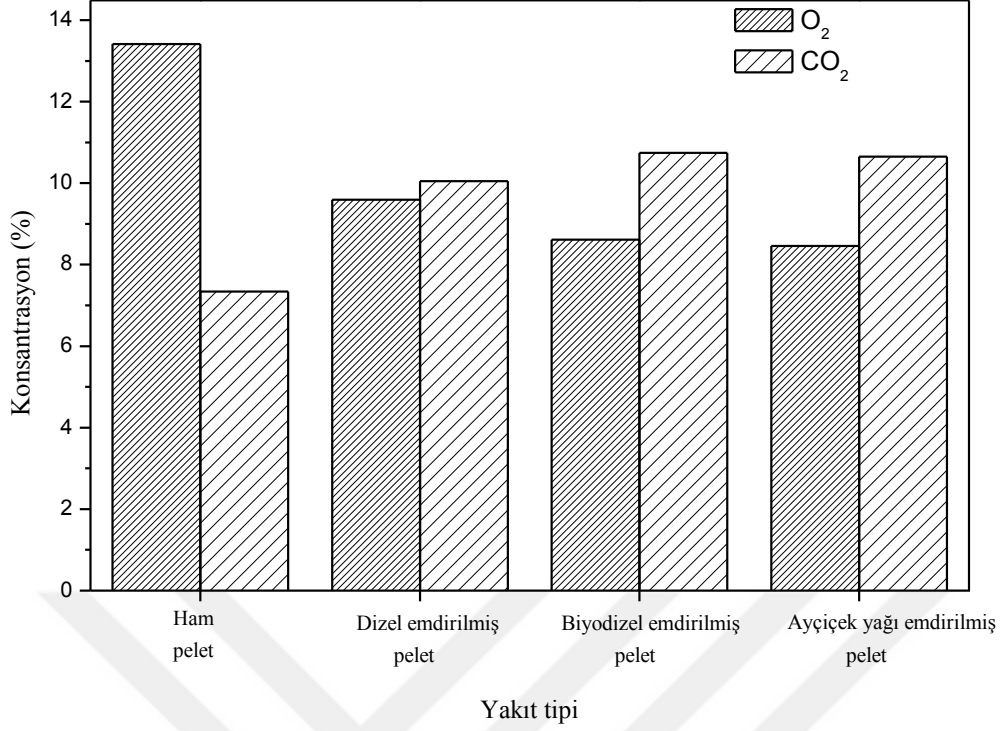
Kazan verimleri incelendiğinde, ham pelet yanması sonucu elde edilen verimin en düşük olduğu Şekil 5.38’den görülmektedir. Emdirilmiş pelet yakıtlarının yanması sonucu elde edilen verim değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ve %93 civarlarında olduğu, ham pelet yanması sonucu ise bu değerlerin yaklaşık %92 civarlarında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.38. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama termal verimleri (Kazan-2)

Yakıt tipine göre elde edilen O_2 ve CO_2 konsantrasyonları Şekil 5.39’da verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu oluşan O_2 konsantrasyonu %13 civarındadır ve emdirilmiş peletlere kıyasla daha yüksektir. Dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu oluşan O_2 konsantrasyonu yaklaşık olarak %9.5 değerindedir ve biyodizel ve ayçiçeği yağı emdirilmiş peletlere kıyasla daha yüksek değere sahiptir. Bu durum dizelin, biyodizel ve ayçiçeği yağına göre ham pelet yakıtına daha az emilmesi ile açıklanabilir.

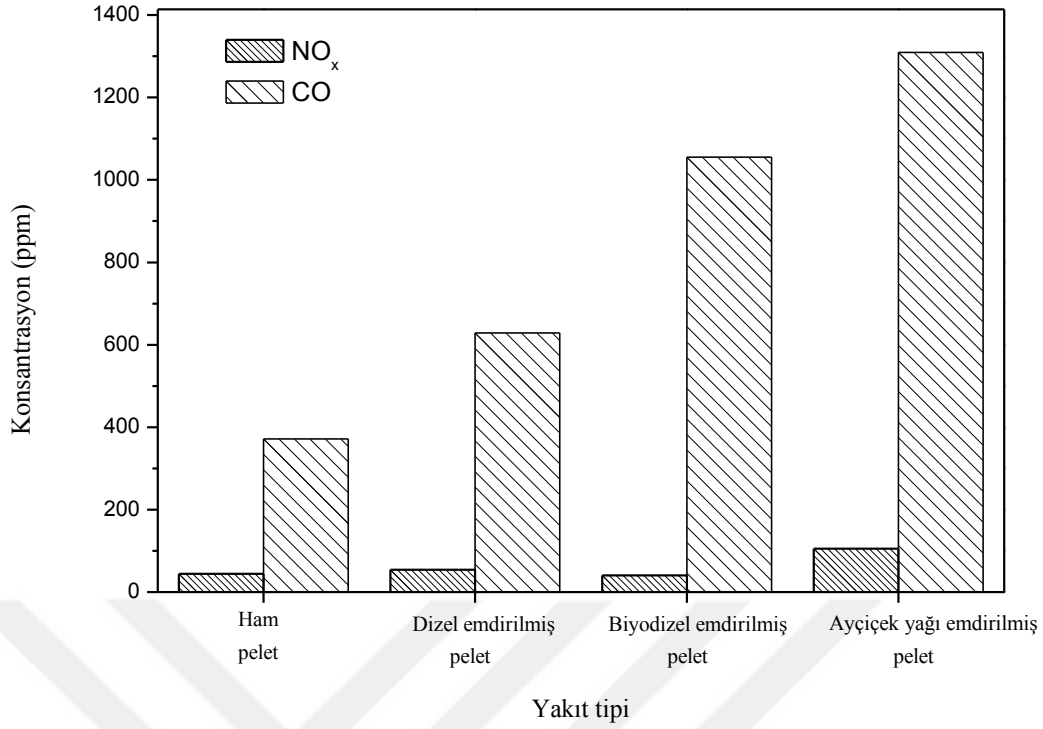
CO_2 konsantrasyonları incelendiğinde ise emdirilmiş peletlerin ham pelete kıyasla daha yüksek CO_2 emisyonu yaydığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak daha önce de belirtildiği gibi emdirilmiş peletlerin karbon içeriğinin ham pelete kıyasla daha yüksek olmasıdır. Ham pelet yanması sonucu oluşan CO_2 oranı %7 civarındayken, bu değer emdirilmiş peletlerde yaklaşık olarak %10’dur.



Şekil 5.39. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama O₂ ve CO₂ konsantrasyonları (Kazan-2)

Şekil 5.40'da yakıt tipine göre oluşan NO_x ve CO konsantrasyonları verilmiştir. Ham pelet, dizel emdirilmiş pelet ve biyodizel emdirilmiş peletlerde NO_x emisyonları 50 ppm civarındadır. Ayçiçek yağı emdirilmiş pelette ise bu değer 110 ppm civarındadır ve diğer yakıtlara kıyasla daha yüksektir.

CO emisyonları açısından değerlendirildiğinde ise ham pelet yakıtın emdirilmiş peletlerden daha düşük CO emisyonu yaydığı görülmüştür. Özellikle oksijen konsantrasyonunun da etkisiyle ayçiçek yağının yüksek CO emisyonu yaydığı görülmektedir. Ham pelet, dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan CO emisyonları sırasıyla 400 ppm, 650 ppm, 1050 ppm, 1300 ppm civarlarındadır.

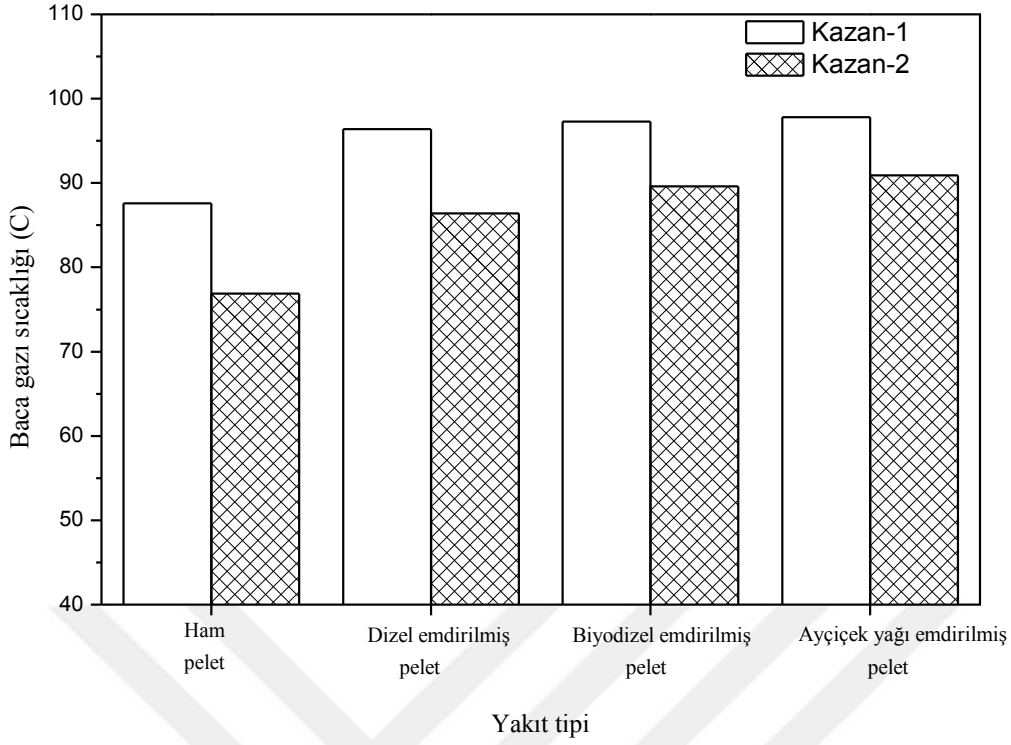


Şekil 5.40. Ham pelet ve sıvı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan ortalama NO_x ve CO konsantrasyonları (Kazan-2)

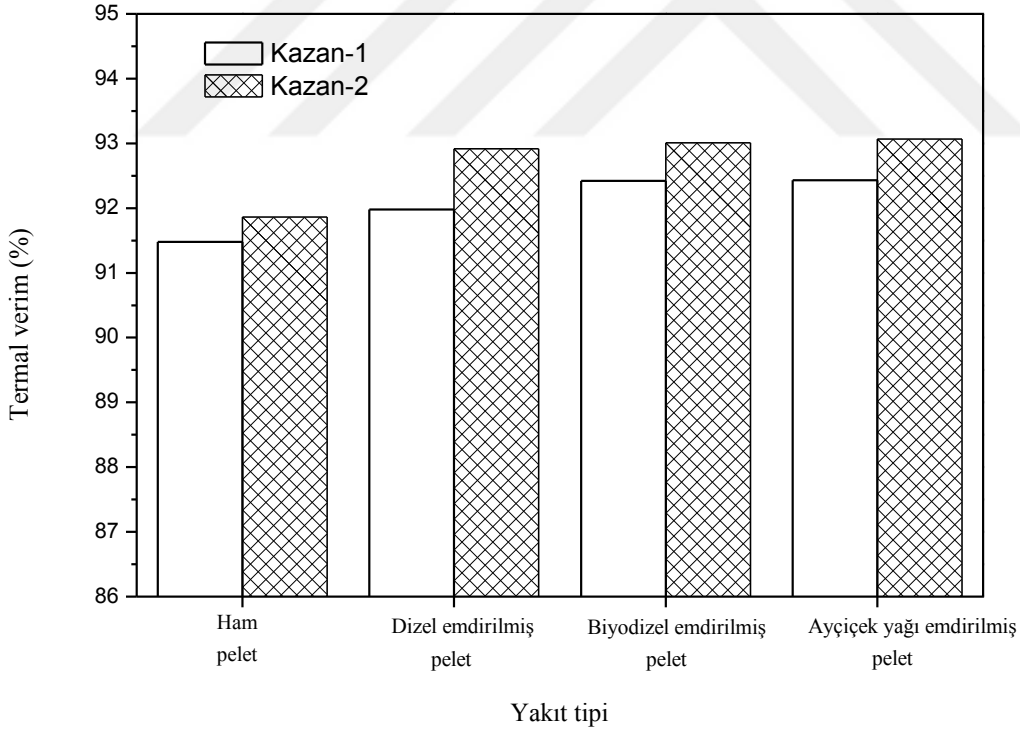
5.1.3.3. Kazan-1 ve Kazan-2'nin sonuçlarının karşılaştırılması

Bu kısımda birinci geçişte duman borusuz (Kazan-1) ve birinci geçişte duman borulu (Kazan-2) kazanda ham pelet ve emdirilmiş pelet yakılması sonucu oluşan baca gazı sıcaklıkları, verim ve emisyon değerleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.41'de ham pelet ve emdirilmiş pelet yakılması sonucu elde edilen baca gazı sıcaklıkları kazan tipine göre verilmiştir. Kazana duman borusu eklenmesiyle baca gazı sıcaklıklarının tüm durumlarda yaklaşık 7-10 °C düştüğü görülmektedir. Ham pelet yanması sonucu oluşan baca gazı sıcaklığı, Kazan-1 durumunda yaklaşık 87 °C iken, Kazan-2 durumunda 77 °C değerlerine kadar düşmüştür. Bu durum kazana eklenen duman boruları sayesinde suya olan ısı transferini artması ile açıklanabilir. Suya olan ısı transferinin artması termal verimin artması anlamına gelmektedir. Şekil 5.42'de ham pelet ve emdirilmiş pelet yakılması sonucu hesaplanan termal verim değerleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi Kazan-2 durumunda termal verim değerleri Kazan-1 durumuna göre yaklaşık %0.5-1 daha yüksektir.



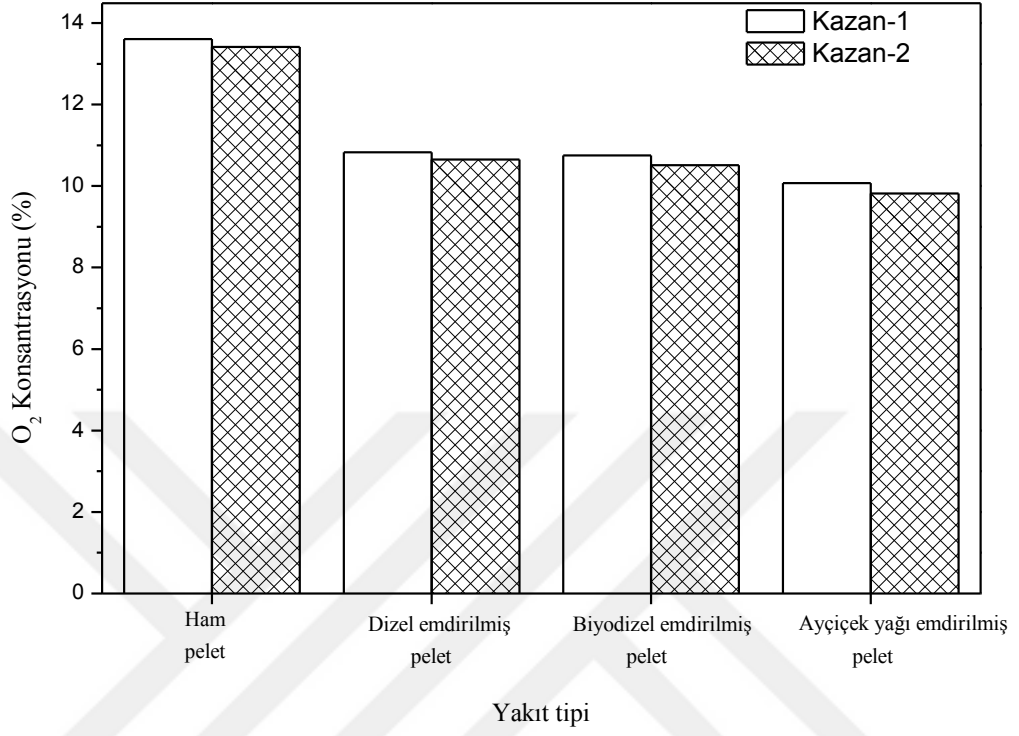
Şekil 5.41. Kazan tiplerine göre oluşan baca gazı sıcaklıkları (Kazan-2)



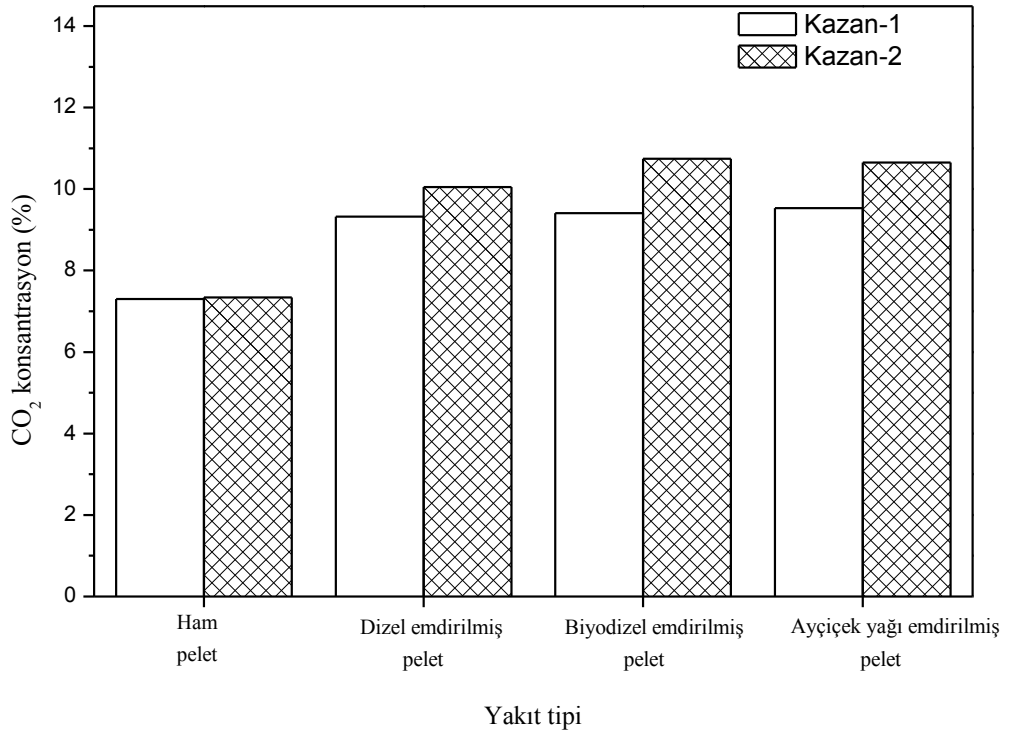
Şekil 5.42. Kazan tiplerine göre oluşan termal verimler (Kazan-2)

Şekil 5.43'te ham pelet ve emdirilmiş pelet yakılması sonucu elde edilen O_2 konsantrasyonları verilmiştir. Kazan-1 ve Kazan-2'nin neredeyse aynı O_2 konsantrasyonuna sahip olduğu görülmektedir. Hava beslemesi neredeyse sabit kalmıştır, bu nedenle oksijen konsantrasyonu ve fazla hava oranı yaklaşık sabit

kalmıştır ve ham pelet yanması durumunda hava fazlalık değeri yaklaşık 2.8 olmuştur. CO₂ emisyonları incelendiğinde ise Kazan-2 durumunda Kazan-1 durumuna göre nispeten daha yüksek CO₂ emisyonları oluşmuştur (Şekil 5.44).

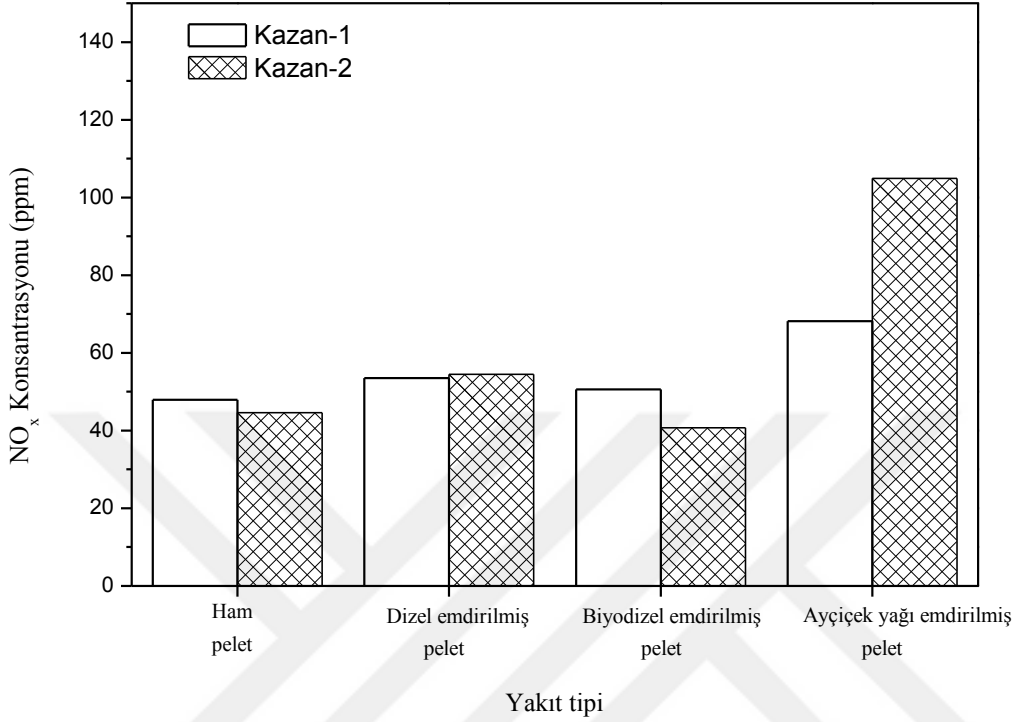


Şekil 5.43. Kazan tiplerine göre oluşan O₂ konsantrasyonları (Kazan-2)



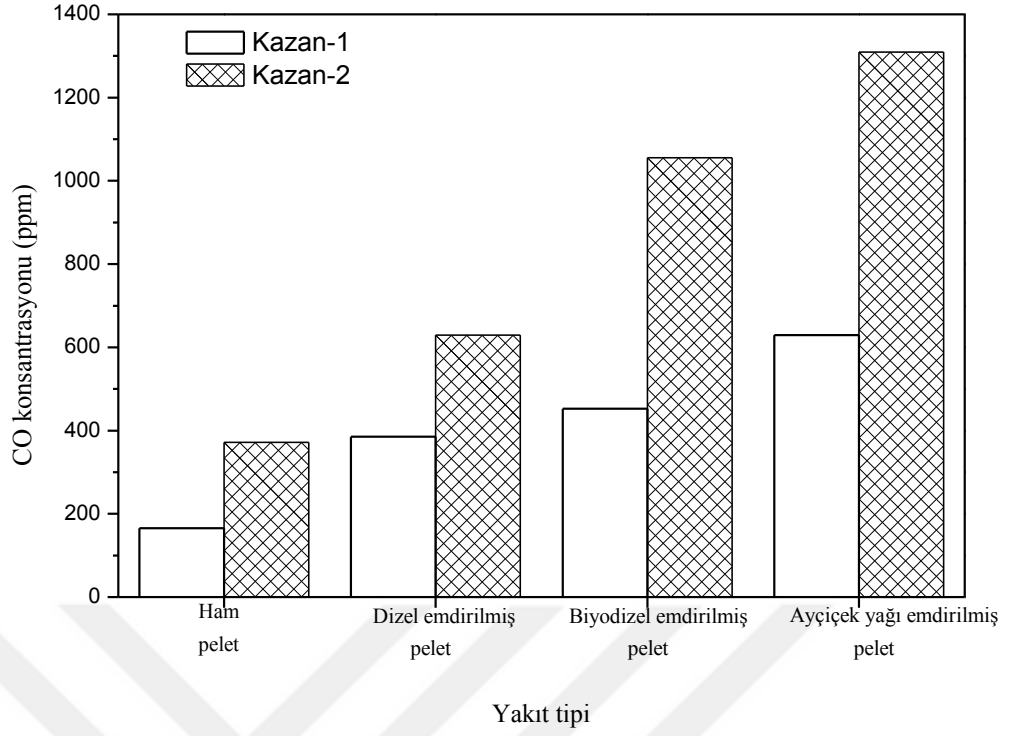
Şekil 5.44. Kazan tiplerine göre oluşan CO₂ konsantrasyonları (Kazan-2)

Kazan-1 ve Kazan-2 durumlarında ham pelet ve emdirilmiş pelet yanmaları sonucu oluşan NO_x emisyonları Şekil 5.45'te verilmiştir. NO_x emisyonları incelendiğinde iki kazan arasında net bir farklılık görülememiştir.



Şekil 5.45. Kazan tiplerine göre oluşan NO_x konsantrasyonları (Kazan-2)

Ham pelet ve emdirilmiş pelet yanmaları sonucu oluşan CO emisyonları kazan geometrilerine göre Şekil 5.46'da verilmiştir. Tüm yakıt durumlarında Kazan-1 geometrisinde Kazan-2 geometrisine göre daha az CO emisyonunun yayıldığı görülmüştür. Ham pelet yakıtının CO emisyonları karşılaştırıldığında; Kazan-1 geometrisinde yaklaşık 170 ppm olan bu değer, Kazan-2 geometrisinde 370 ppm civarındadır. Kazan-2'de, yanma gazları soğuk yüzeyler ile daha fazla temas halindedir ve özellikle birinci geçiş duman borularında gaz sıcaklıkları Kazan-1 durumuna göre daha düşüktür. Bu durum CO emisyon artışına sebep olmuştur.



Şekil 5.46. Kazan tiplerine göre oluşan CO konsantrasyonları (Kazan-2)

5.1.4. Tekno-Ekonomik Analiz

Kullanılan yakıt tipine göre elde edilen güç, yakıtların birim fiyatları ve birim güç başına harcanması gereken fiyatlar Çizelge 5.10'da verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi en düşük maliyet atık ayçiçek yağının ham pelet yakıtı emdirilmesi sonucu elde edilir. En yüksek ısınma maliyetinin odun yanması sonucu elde edildiği görülmüştür. Ayrıca ham pelet-kömür karışımları da alternatif oluşturması açısından tercih edilebilir.

Çizelge 5.10. Yakıt tipi ve kazan verimine göre yapılan tekno-ekonomik analiz

Yakıt	Yakıt debisi* (kg/h)	Alt ısııl değer** (kJ/kg)	Kazan verimi *** (direkt) (%)	Elde edilen ısııl güç (kW)	Birim kütle başına elde edilen güç (kWh/kg)	Yakıt fiyatı**** (TL/kg)	Maliyet (TL/kWh)
Doğalgaz	1.10	49264.0	93.0	13.9	12.6	1.90	0.15
Taş kömürü	1.87	28852.0	80.0	12.0	6.40	1.50	0.23
Odun	5.17	10450.0	80.0	12.0	2.32	0.72	0.31
Ham pelet	3.15	17150.8	85.3	12.8	4.06	0.80	0.19
Dizel ^a emdirilmiş pelet	2.65	20392.0	86.3	12.9	4.87	1.68	0.34
Biyodizel ^b emdirilmiş pelet	2.69	20065.1	86.8	13.0	4.83	1.73	0.36
Ayçiçek yağı ^{c,f} emdirilmiş pelet	2.66	20320.0	85.6	12.8	4.81	1.63 ^c 0.67 ^f	0.34^c 0.14^f
HP80TK ^d 20	2.78	19391.0	78.3	11.7	4.21	0.94	0.22
HP60TK ^d 40	2.50	21631.3	73.4	11.0	4.40	1.08	0.25
HP80MK ^e 20	2.82	19138.2	77.1	11.6	4.11	1.04	0.25
HP60MK ^e 40	2.56	21125.7	72.9	10.9	4.26	1.28	0.30

* Hesaplamalar 15 kW kazan ısııl güç girişi için gerçekleştirilmiştir.

** Doğalgaz ve odun için alt ısııl değerleri literatürden alınan değerlerdir. Diğer yakıtlar için kullanılan değerler deneyler sonucu elde edilen değerlerdir.

*** Doğalgaz, taş kömürü ve odun için verim değerleri piyasadan alınan ortalama değerlerdir. Diğer yakıtlar için kullanılan verim değerleri Kazan-1 ile elde edilen değerlerdir.

**** 06.08.2018 tarihindeki fiyatlardır.

^a Dizel yakıtın ısııl değeri 42000 kJ/kg, yoğunluğu 0.83 kg/lt, fiyatı 6.3TL/lt alınmıştır.

^b Biyodizel yakıtın ısııl değeri 37500 kJ/kg, yoğunluğu 0.87 kg/lt, fiyatı dizel fiyatından %14 daha yüksek (Anonymous, 2019) ve 7.2TL/lt alınmıştır.

^c Ayçiçek yağının ısııl değeri 37000 kJ/kg, yoğunluğu 0.92 kg/lt, fiyatı 6TL/lt alınmıştır.

^f Atık ayçiçek yağı olması halinde fiyat 0TL/lt alınmıştır.

^d Taşkömürü (TK) yakıtın ısııl değeri 28852 kJ/kg, fiyatı 1,5TL/kg alınmıştır.

^e Mangal kömürü (MK) yakıtın ısııl değeri 27588 kJ/kg, fiyatı 2TL/kg alınmıştır.

5.2. Nümerik Sonuçlar ve Deneysel Sonuçlarla Kıyaslama

Çözümün ağdan bağımsızlığının testi için kullanılan beş farklı ağ yapısının hücre sayıları ile analizler sonucu elde edilen bazı ortalama büyüklükler Kazan-1 geometrisi için Çizelge 5.11’de verilmiştir. Çizelgede elde edilen değerler RNG k-ε türbülans modeli ile yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen değerlerdir. Çözümün ağdan bağımsızlık kıyaslaması yapıldığında Ağ-4 ağ yapısının uygun olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple yapılan tüm hesaplamalarda geometriler (Kazan-1 ve Kazan-2) Ağ-4 ağ yapısındaki ölçüler baz alınarak örülmüştür.

Çizelge 5.11. Kazan-1 için karşılaştırılan ağ yapıları

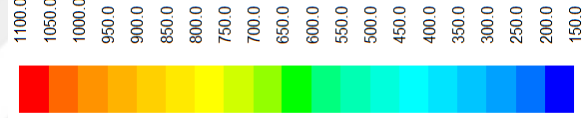
Ağ yapısı	Hücre sayısı	Mesh Kalitesi (%)	Maksimum sıcaklıklar (K)	Baca gazı çıkış sıcaklığı (K)
Ağ-1	160314	80.3	2040-2130	350.4
Ağ-2	301029	81.8	2040-2130	358.5
Ağ-3	466122	82.8	2060-2150	363.7
Ağ-4	770835	83.4	2050-2140	359.7
Ağ-5	825551	83.9	2050-2140	359.4

Türbülans modelinin hesaplamalar üzerindeki etkisi de bu bölüm kapsamında incelenmiştir. Bu bağlamda RNG k-ε ve Standart k-ε türbülans modelleri kullanılarak HP100 yakıtı için Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Şekil 5.47’de yanma odası merkez kesit sıcaklıkları, RNG k-ε türbülans modeli ve Standart k-ε türbülans modeli ile yapılan nümerik hesapların sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi Standart k-ε model kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda alev boyunun çok daha yüksek olduğu görülmüştür. RNG k-ε modelin deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Çizelge 5.12’de ham pelet yanması sonucu oluşan baca gazı sıcaklıkları da verilmiştir. Yanma odası sıcaklıklarına paralel olarak baca gazı sıcaklıklarında da RNG k-ε modelin deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağladığı görülmüştür.

Çizelge 5.12. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinin baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik türbülans modelleriyle kıyaslanması

Kazan Tipi	Yakıt	Deneysel	RNG k-ε model	St k-ε model
Kazan-1	Ham pelet (HP100)	87.6 °C	86.7 °C	89.5 °C
Kazan-2	Ham pelet (HP100)	76.9 °C	77.0 °C	80.1 °C

Sıcaklık (°C)

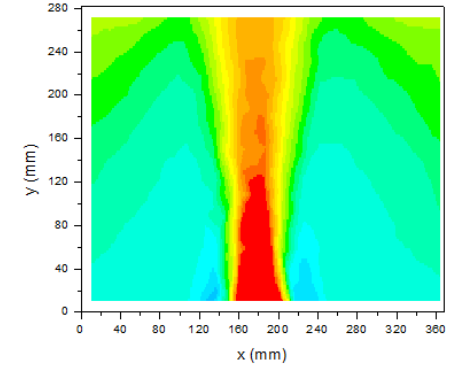
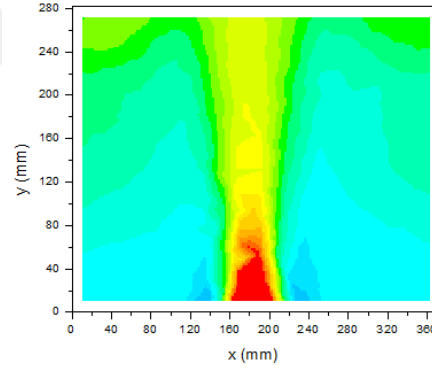
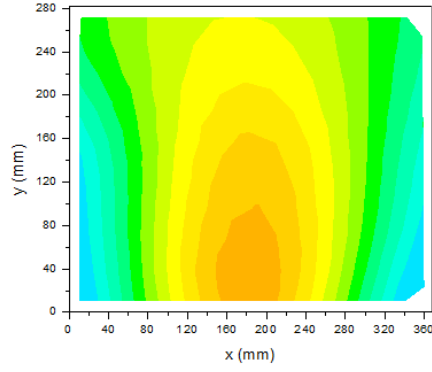


Deneysel

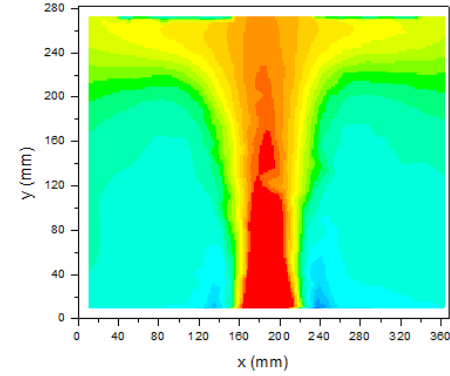
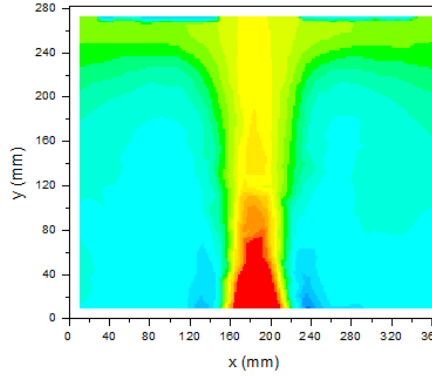
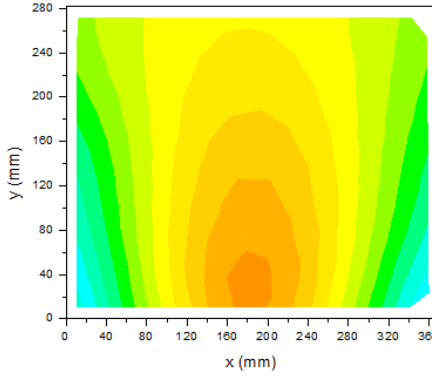
RNG k-ε model

Standart k-ε model

Kazan-1



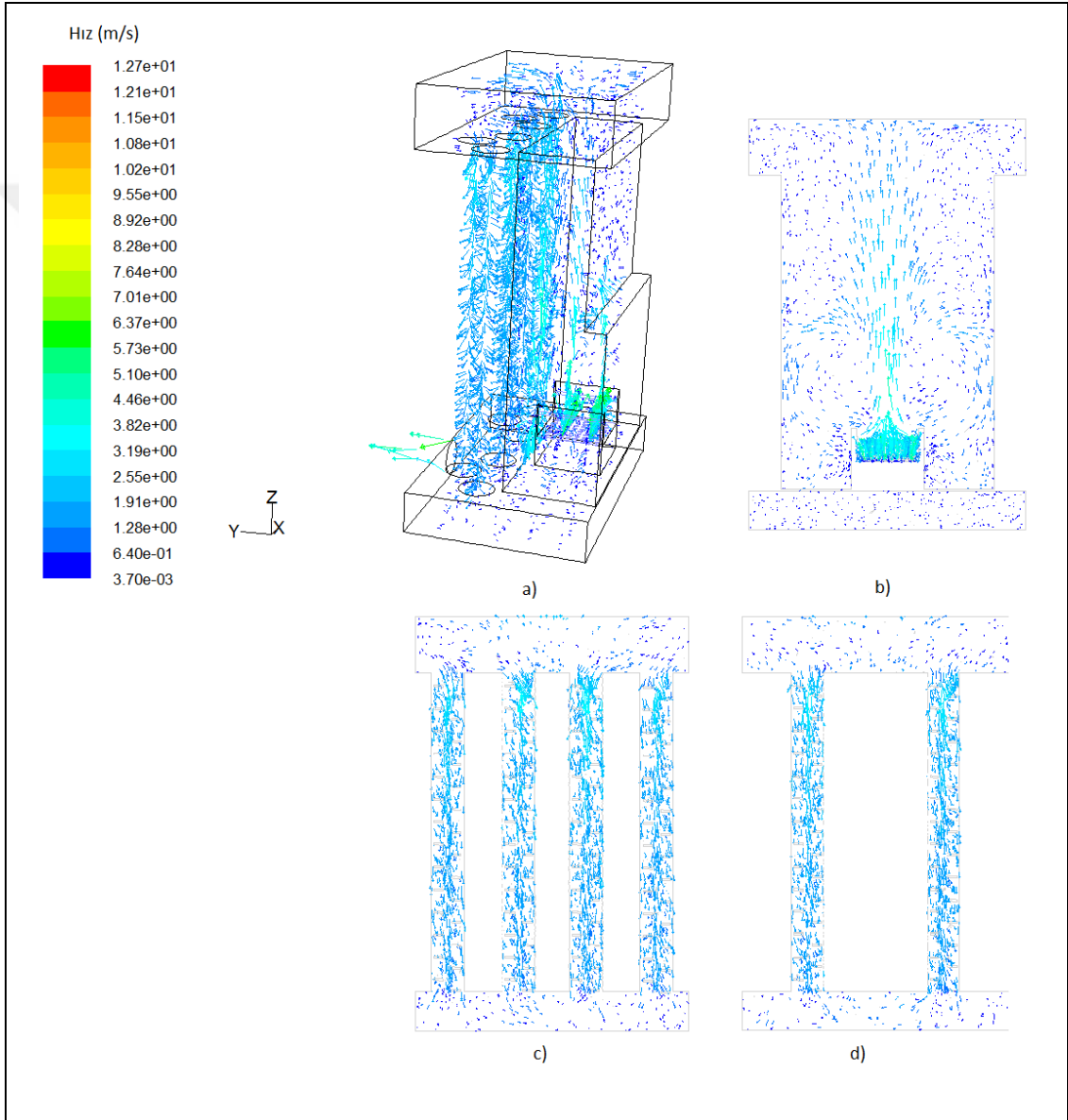
Kazan-2



Şekil 5.47. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrileri için deneysel ve nümerik yanma odası merkez kesit sıcaklıkları

RNG k- ϵ türbülans modeli Standart k- ϵ modele göre deneysel değerlere daha yakın çıkmıştır. Bu nedenle yapılan hesaplamaların tümünde RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu kısımdan sonra nümerik hesaplama sonucu olarak adlandırılan tüm değerlendirmeler RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılarak yapılan hesaplamalar için elde edilen değerlerdir.

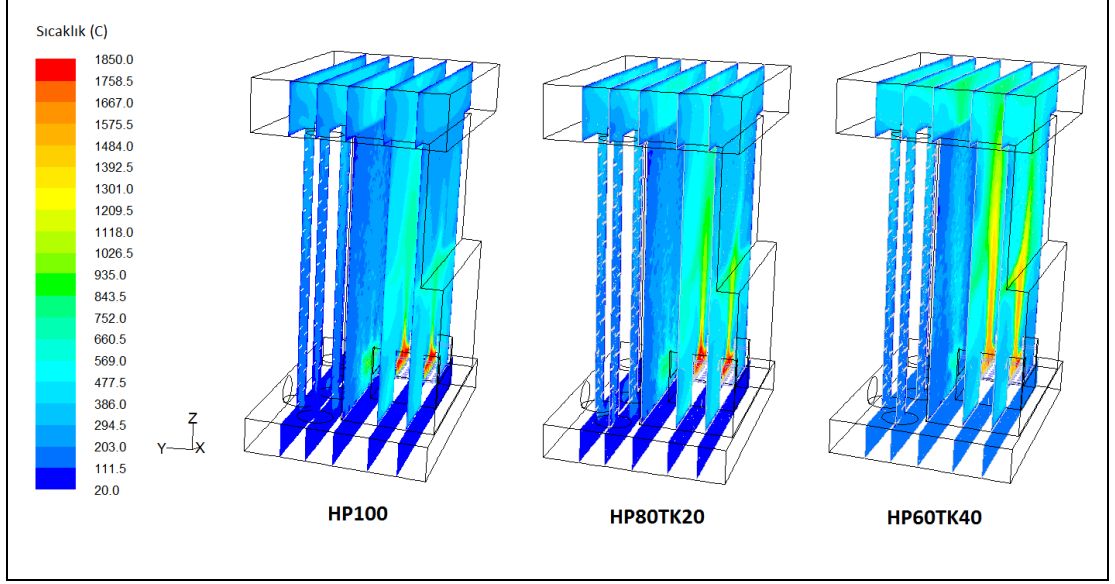
Şekil 5.48'te Kazan-1 geometrisinde ham pelet yanması sonucu elde edilen hız vektörleri farklı kesitlerden gösterilmiştir.



Şekil 5.48. Kazan-1 geometrisinde ham pelet yanması sonucu elde edilen hız vektörleri, a) izometrik görünüş, b) hazne merkez kesit görüntüsü, c) ikinci geçiş ön duman borusu merkez kesit, d) ikinci geçiş arka duman borusu merkez kesit

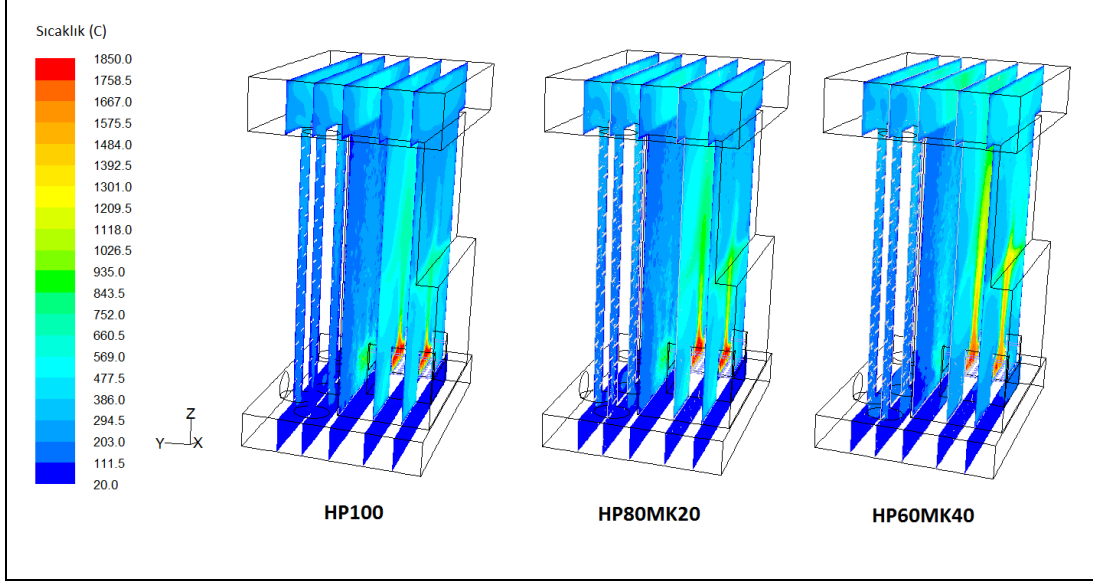
Yanma ürünü gazlar önce yanma odasının üzerinden direkt olarak geçmekte (1. Geçiş) ve üst duman sandığına gelmektedir. Daha sonra ise buradan 6 adet duman borularına yönelerek (2. Geçiş) alt duman sandığına ulaşmakta ve bacadan dışarı atılmaktadır. Dikkat edilirse duman borusunda bulunan türbülötörler sayesinde gaz hızları düzgün bir yol takip etmek yerine daha karmaşık hareketler sergilemektedir. Bu durum ısı transferi açısından gazların akış yolunu ve karışmasını arttırması sebebiyle olumlu bir etki oluşturmaktadır.

Kazan-1 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-taş kömür karışımlarının yanması sonucu oluşan sıcaklık konturları Şekil 5.49'da gösterilmiştir. Sıcaklık konturları yanma odası ön kesit, merkez kesit, arka kesit, ikinci geçiş ön duman borusu merkez kesit ve ikinci geçiş arka duman borusu merkez kesit olmak üzere 5 farklı kesit alınarak izometrik görünümleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm durumlarda hazne içerisinde ve hazneye yakın bölgelerde alev sıcaklığı maksimum değere ulaşmıştır. Yanma odası merkez kesitinde oluşan sıcaklıklar diğer kesitlere kıyasla daha yüksek değerdedir. Yanma odası ön kesit sıcaklıkları arka kesit sıcaklıklarına göre daha yüksek değerdedir. Sıcak gazların su ile çevrili bölgelerle temas etmesi dolayısıyla sıcaklıkların çıkışa doğru giderek düştüğü görülmüştür. Pelet yakıtının içeriğindeki taş kömürü miktarı arttığında alev boyunun ve yanma odası içerisindeki sıcaklıkların arttığı görülmüştür. Kazan ikinci geçiş arka duman borusu merkez kesitlerine bakıldığında, HP100 yakıtının yanması sonucu daha düşük sıcaklıkların oluştuğu, taş kömür miktarının artmasıyla sıcaklıkların arttığı ve HP60TK40 yakıtının yanması durumunda diğer durumlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.



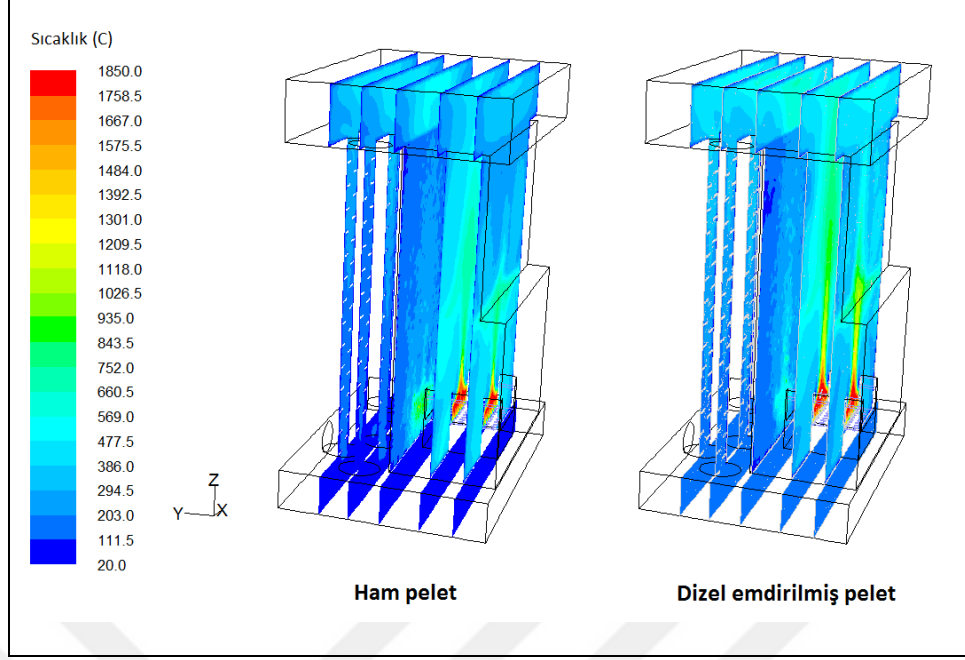
Şekil 5.49. Kazan-1 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-taş kömürü karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları

Ham pelet ve ham pelet-mangal kömür karışımlarının yanması sonucu oluşan sıcaklık konturları Şekil 5.50’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm durumlarda hazne içerisinde ve hazneye yakın bölgelerde alev sıcaklığı maksimum değere ulaşmıştır. Yanma odası merkez kesitinde oluşan sıcaklıklar diğer kesitlere kıyasla daha yüksektir. Yanma odası ön kesit sıcaklıkları ise arka kesite kıyasla daha yüksek değerdedir. Sıcak gazların su ile çevrili bölgelerle temas etmesi dolayısıyla sıcaklıkların çıkışa doğru giderek düştüğü görülmüştür. Pelet yakıtının içeriğindeki mangal kömürü miktarı arttığında alev boyunun ve yanma odası içerisindeki sıcaklıkların arttığı görülmüştür. Kazan ikinci geçiş kısımlarına bakıldığında mangal kömür ile harmanlanan ham peletin daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca ham peletle harmanlanan taş kömür ile mangal kömürü kıyaslandığında taş kömür ile harmanlanan ham peletin mangal kömürüne kıyasla nispeten daha yüksek sıcaklığa ve alev boyuna sahip olduğu belirlenmiştir.



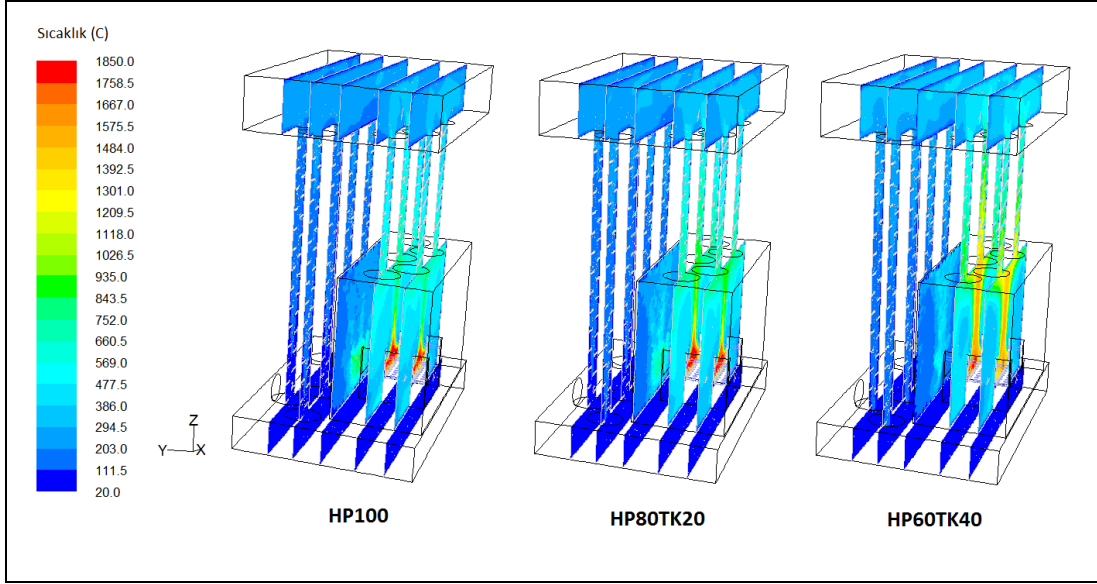
Şekil 5.50. Kazan-1 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-mangal kömürü karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları

Şekil 5.51’de ham pelet ve dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklık konturları Kazan-1 geometrisi için verilmiştir. Ham pelet yanması sonucu elde edilen maksimum sıcaklıklar dizel emdirilmiş pelete kıyasla daha düşüktür. Yanma odası genelinde de ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklıkların daha düşük olduğu görülmüştür. Özellikle dizel emdirilmiş peletin alev boyu ve alev genişliği ham pelete kıyasla daha yüksektir. Hazne bölgesinin hemen üzerindeki sıcaklıklara bakıldığında ise ham pelet durumunda 1000-1100 °C civarında olan sıcaklıklar dizel emdirilmiş pelet durumunda yaklaşık 1200-1300 °C civarındadır.

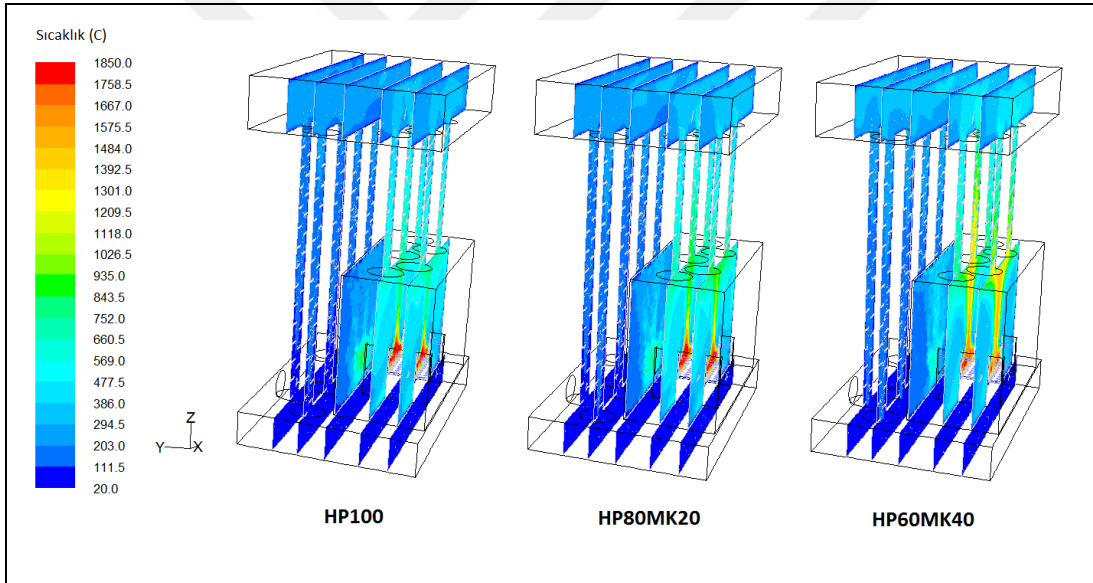


Şekil 5.51. Kazan-1 geometrisinde ham pelet ve dizel emdirilmiş pelet karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları

Ham pelet ve ham pelet-taş kömür karışımlarının Kazan-2 geometrisinde yanması sonucu oluşan sıcaklık konturları Şekil 5.52’de gösterilmiştir. Kazan-1 durumunda olduğu gibi Kazan-2 geometrisinde de hazne içerisinde ve hazneye yakın bölgelerde alev sıcaklığı maksimum değerdedir. En yüksek sıcaklıklar yanma odası merkezinde oluşmuştur. Yanma odası ön kesiti sıcaklıkları arka kesite göre daha yüksektir. Ham pelet yakıtın taş kömürü ile harmanlanması alev boyunu, genişliğini ve yanma odası sıcaklıklarını arttırıcı etkide bulunmuştur. Şekil 5.53’te ham pelet-mangal kömür karışımlarının sıcaklık konturları verilmiştir. Ham peletin mangal kömürüyle harmanlanması, taş kömüründe olduğu gibi yanma odası sıcaklıklarını arttırmıştır. Taş kömürüyle harmanlanan pelette oluşan sıcaklıkların mangal kömürüyle harmanlanan pelete kıyasla nispeten daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

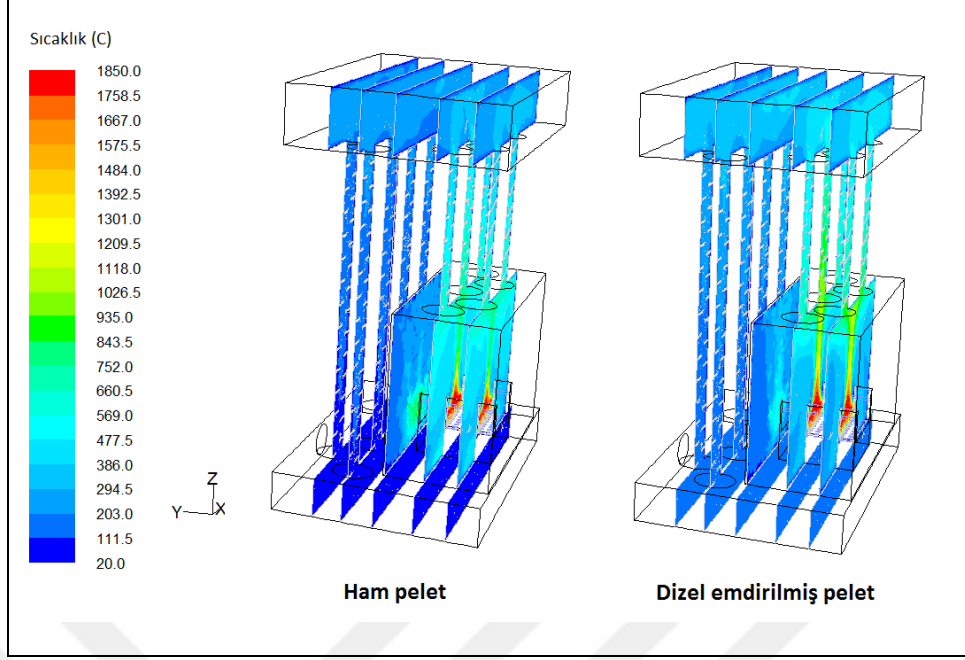


Şekil 5.52. Kazan-2 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-taş kömürü karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları



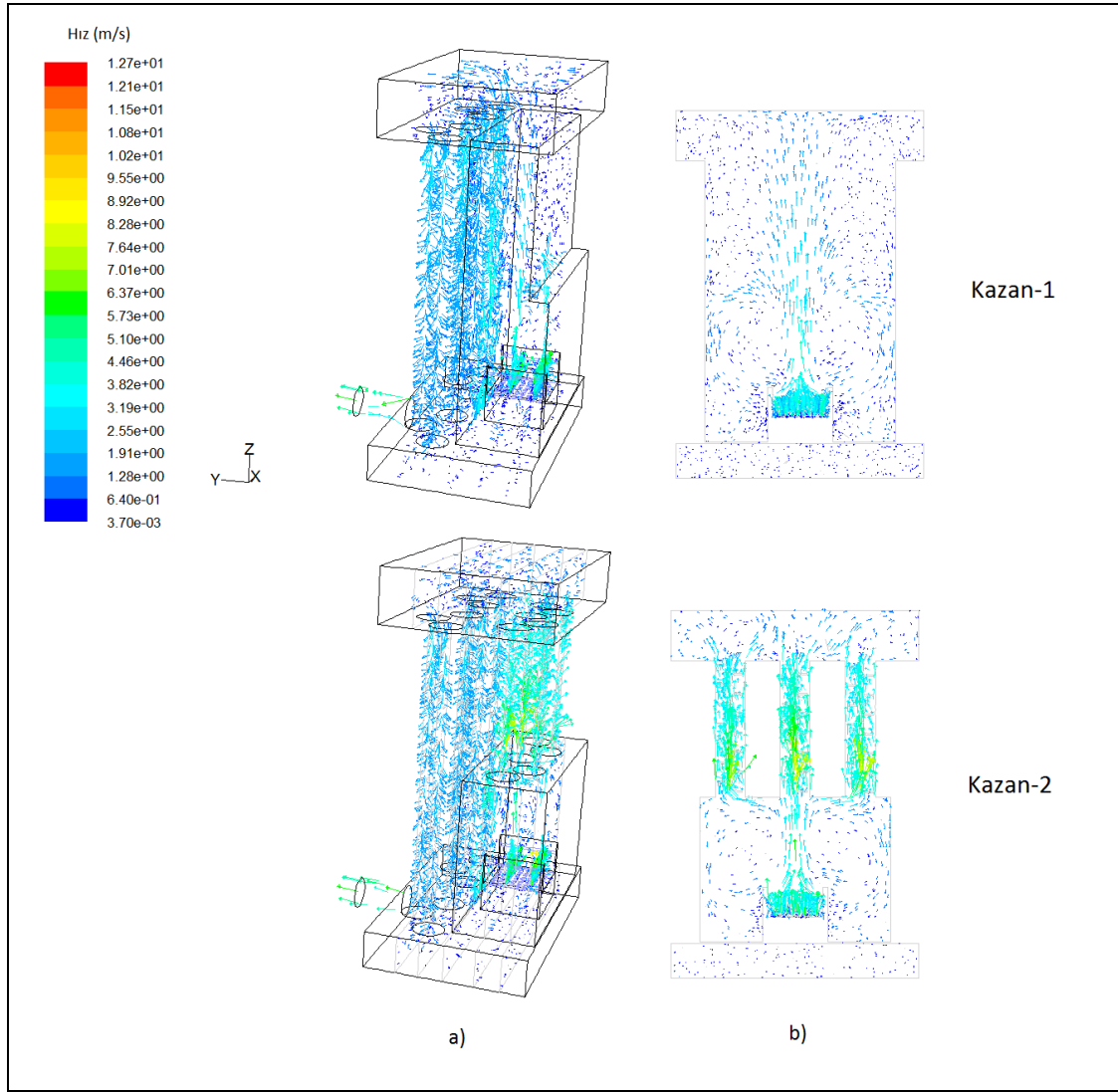
Şekil 5.53. Kazan-2 geometrisinde ham pelet ve ham pelet-mangal kömürü karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları

Kazan-2 geometrisi için ham pelet ve dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklık konturları Şekil 5.54'te verilmiştir. Yanma odasına giren ısı enerji miktarının artmasının da etkisiyle dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen maksimum sıcaklıklar ham pelete kıyasla daha yüksek olmuştur. Yanma odası genelinde de ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklıkların daha düşük olduğu görülmüştür. Özellikle dizel emdirilmiş peletin alev boyu ve alev genişliği ham pelete kıyasla daha yüksektir.



Şekil 5.54. Kazan-2 geometrisinde ham pelet ve dizel emdirilmiş pelet karışımlarının yanması sonucu farklı kesitlerde elde edilen sıcaklık konturları

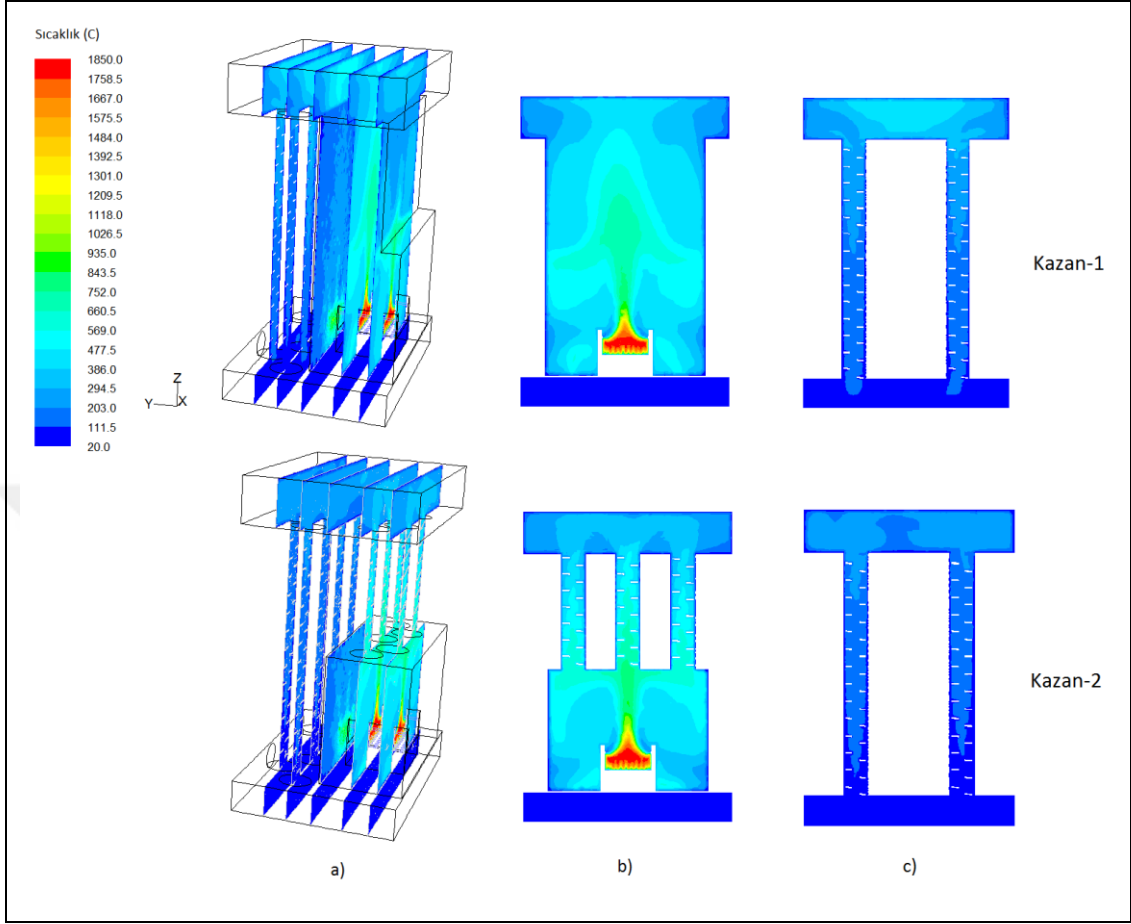
Şekil 5.55'te Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinden elde edilen hız vektörlerinin izometrik ve hazne merkez kesit görüntüleri verilmiştir. Kazan-1 geometrisinde, yanma ürünü gazlar yanma odasının üzerinden direkt olarak geçmekte (birinci geçiş) ve üst duman sandığına gelmektedir. Daha sonra ise buradan 6 adet duman borularına yönelerek (ikinci geçiş) alt duman sandığına ulaşmakta ve bacadan dışarı atılmaktadır. Kazan-2 geometrisinde ise Kazan-1 geometrisinden farklı olarak yanma ürünü gazlar birinci geçişte yanma odasının üzerindeki 5 adet duman borularından geçmekte ve üst duman sandığına gelmektedir. Daha sonra ise Kazan-1'de olduğu gibi 6 adet duman borularına yönelerek (ikinci geçiş) alt duman sandığına ulaşmakta ve bacadan dışarı atılmaktadır. Kazana birinci geçişte eklenen duman borularının gaz hızlarını arttırdığı görülmektedir. Böylece Kazan-2 geometrisinde oluşan gaz hızları birinci geçişte Kazan-1 geometrisine kıyasla daha yüksek olmuştur. Ancak üst sandığa ulaşıldığında Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerindeki gaz hızları arasındaki farkın azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.55. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde ham pelet yanması sonucu elde edilen hız vektörleri, a) izometrik görünüş, b) hazne merkez kesit görüntüsü

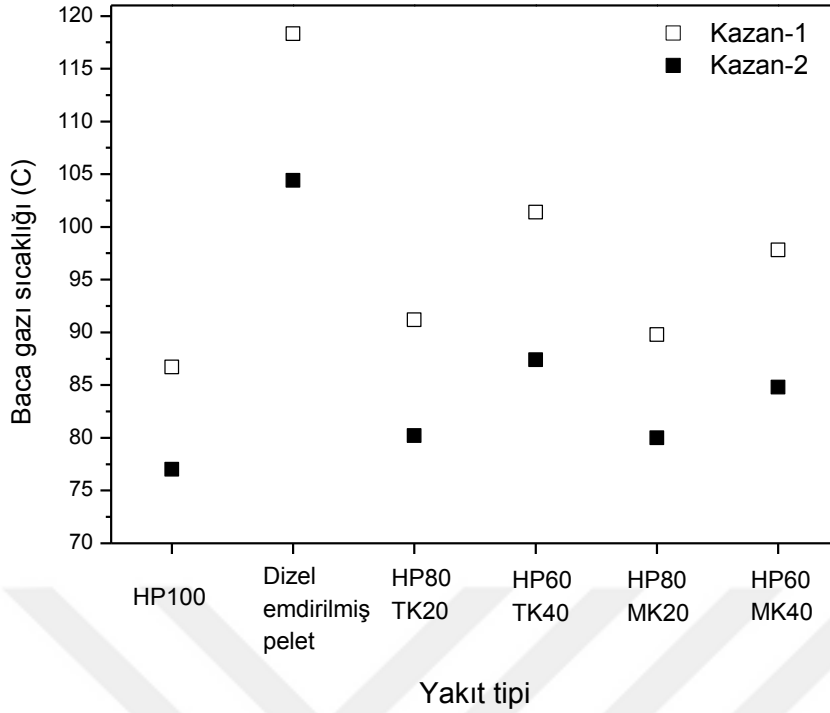
Şekil 5.56’da Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde ham pelet (HP100) yanması sonucu elde edilen sıcaklık konturlarının izometrik, hazne merkez kesit ve ikinci geçiş arka duman borusu merkez kesit görüntüleri verilmiştir. Kazan-1 geometrisi yanma odası ön kesiti incelendiğinde alev sıcaklığının ve alev boyunun Kazan-2 geometrisine göre daha düşük olduğu (gaz hızlarının da etkisiyle) görülmektedir. Haznenin hemen üzerindeki kısımda alev sıcaklıkları 1200-1300 °C civarındadır. Haznenin üzerinde birinci geçiş duman borularına yakın olan kısımdaki sıcaklıklar ortalama olarak yanma odası merkezinde 800-1200 °C civarındadır. Duvara yakın bölgelerde ise gaz sıcaklıkları 300-500 °C civarındadır. İkinci geçiş arka duman borusu merkez kesitlerine bakıldığında Kazan-2 geometrisinde üst sandıkta ve

duman borularında gaz sıcaklıklarının Kazan-1 geometrisinden daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.56. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde ham pelet yanması sonucu elde edilen sıcaklık konturları, a) izometrik görünüş, b) hazne merkez kesit görüntüsü, c) ikinci geçiş arka duman borusu merkez kesit

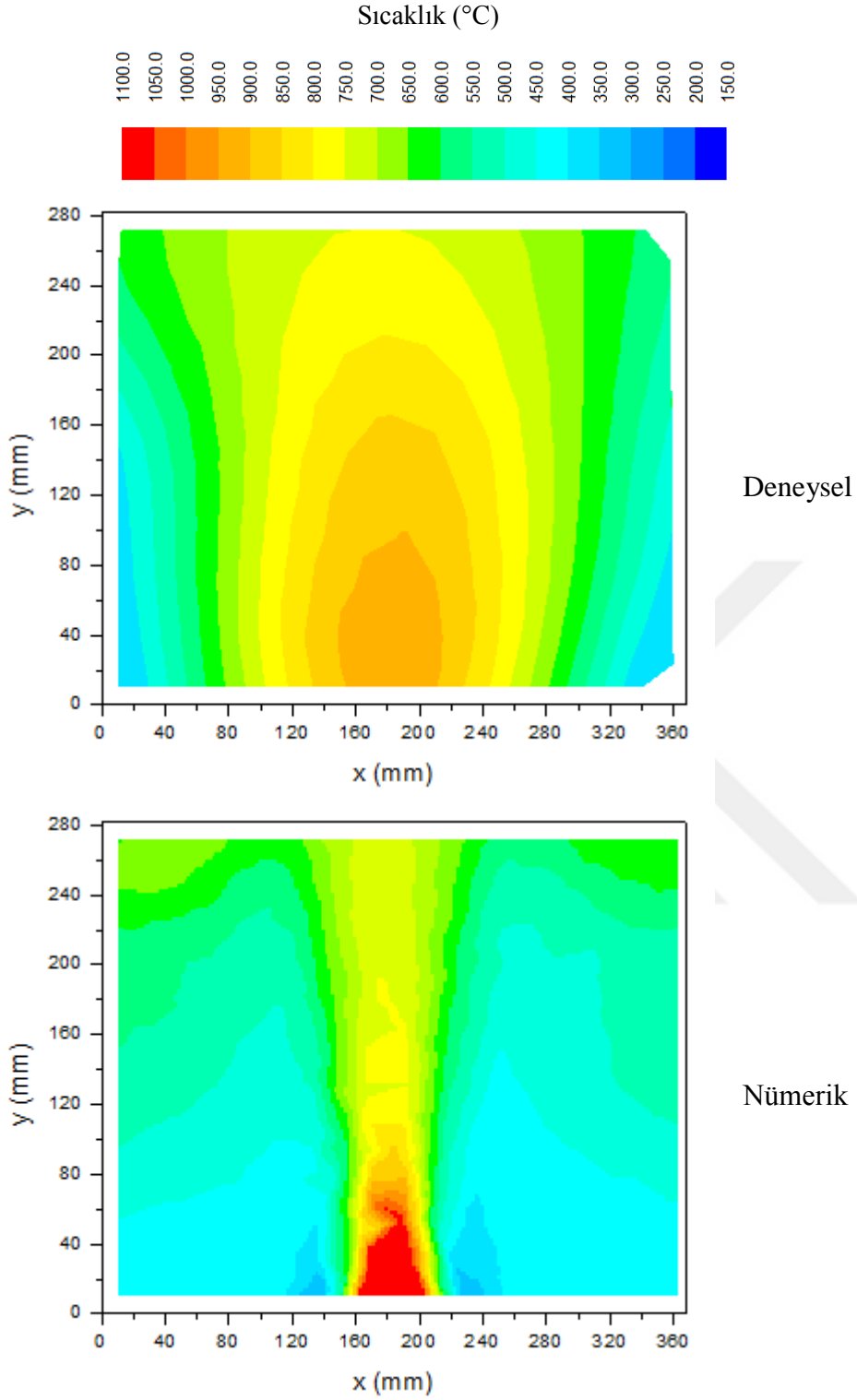
Bölüm 3.3'te belirtildiği gibi kazan verimleri hakkında yorum yapabilmesi için baca gazı sıcaklıklarına bakılabilir. En temel ifadeyle düşük baca gazı sıcaklığı yüksek verim anlamına gelmektedir. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde ham pelet, ham pelet-kömür karışımları ve dizel emdirilmiş pelet yakıtları için yapılan nümerik hesaplamalar sonucu elde edilen baca gazı sıcaklıkları Şekil 5.57'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kazana eklenen birinci geçiş duman boruları baca gazı sıcaklıklarını 10-14 °C düşürmüştür. En yüksek baca gazı sıcaklığı dizel emdirilmiş pelet durumunda oluşurken, bunu sırasıyla HP60TK40, HP60MK40, HP80TK20, HP80MK20 ve HP 100 takip etmektedir.



Şekil 5.57. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinin baca gazı sıcaklıklarının nümerik kıyaslanması

Yanma odası içerisinde ölçülen sıcaklıkların nümerik sonuçlarla kıyaslanması da bu bölüm kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık konturları ham pelet ve dizel emdirilmiş pelet durumlarında yanma odası merkez kesitleri için gösterilmiştir. Kömürle karıştırılmış pelet durumunda deneysel olarak yanma iyi gerçekleşmediği için nümerik sonuçla kıyaslanmamıştır.

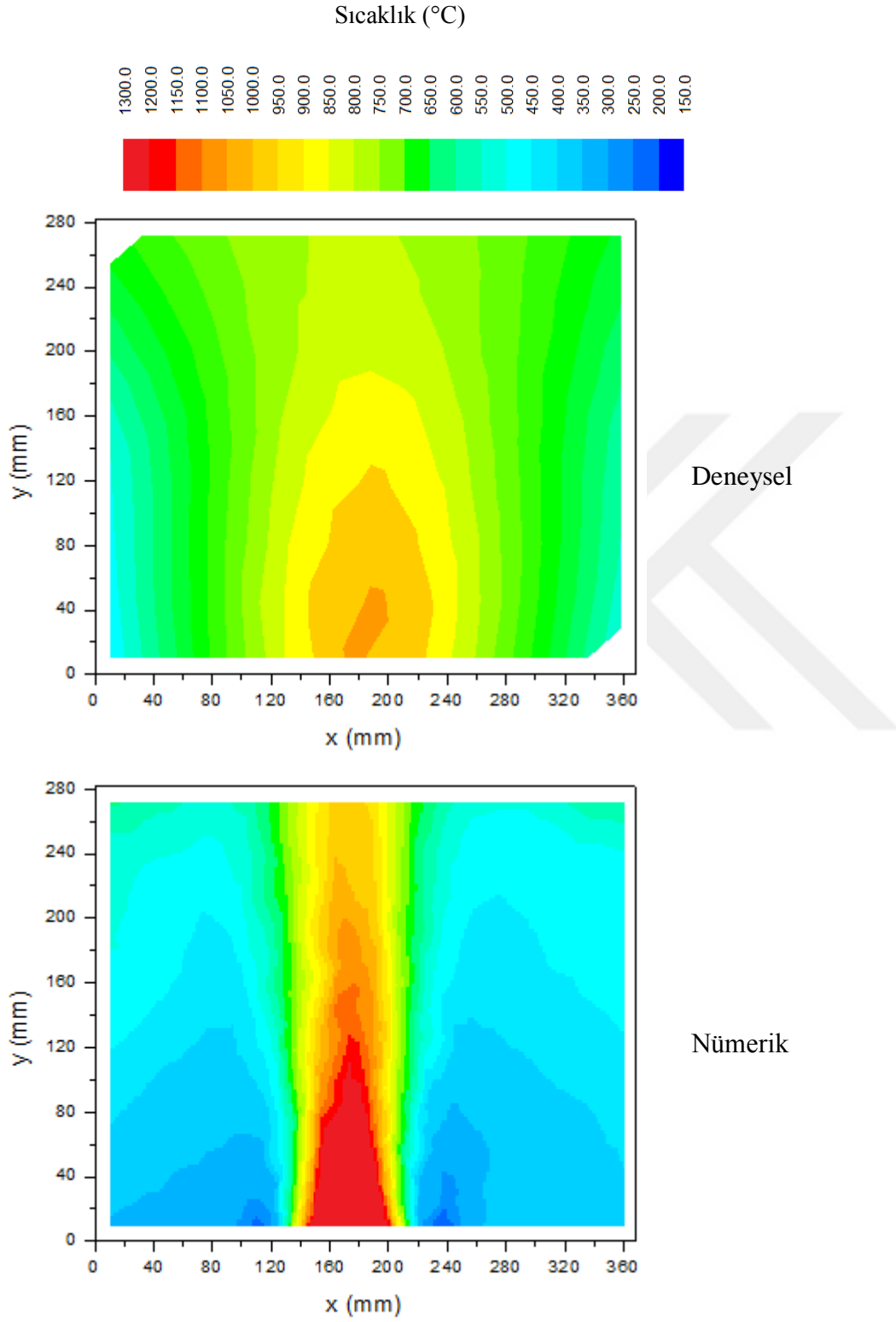
Şekil 5.58’de Kazan-1 geometrisinde ham pelet yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde oluşan sıcaklık konturları deneysel ve nümerik olarak kıyaslanmıştır. Her iki sonuçta da hazneye yakın bölgelerde maksimum sıcaklıklar elde edilmiştir. Nümerik hesaplamalar sonucu elde edilen maksimum sıcaklıklar 1050-1100 °C civarındadır ve deneysel sonuçlardan yaklaşık %15 daha fazladır. Alev genişliğine bakıldığında, nümerik hesaplamalarda dar bir alanı kapsayan alev, deneysel sonuçlarda daha yaygın bir alanı kapsamaktadır.



Şekil 5.58. Kazan-1 geometrisinde ham pelet (HP100) yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar

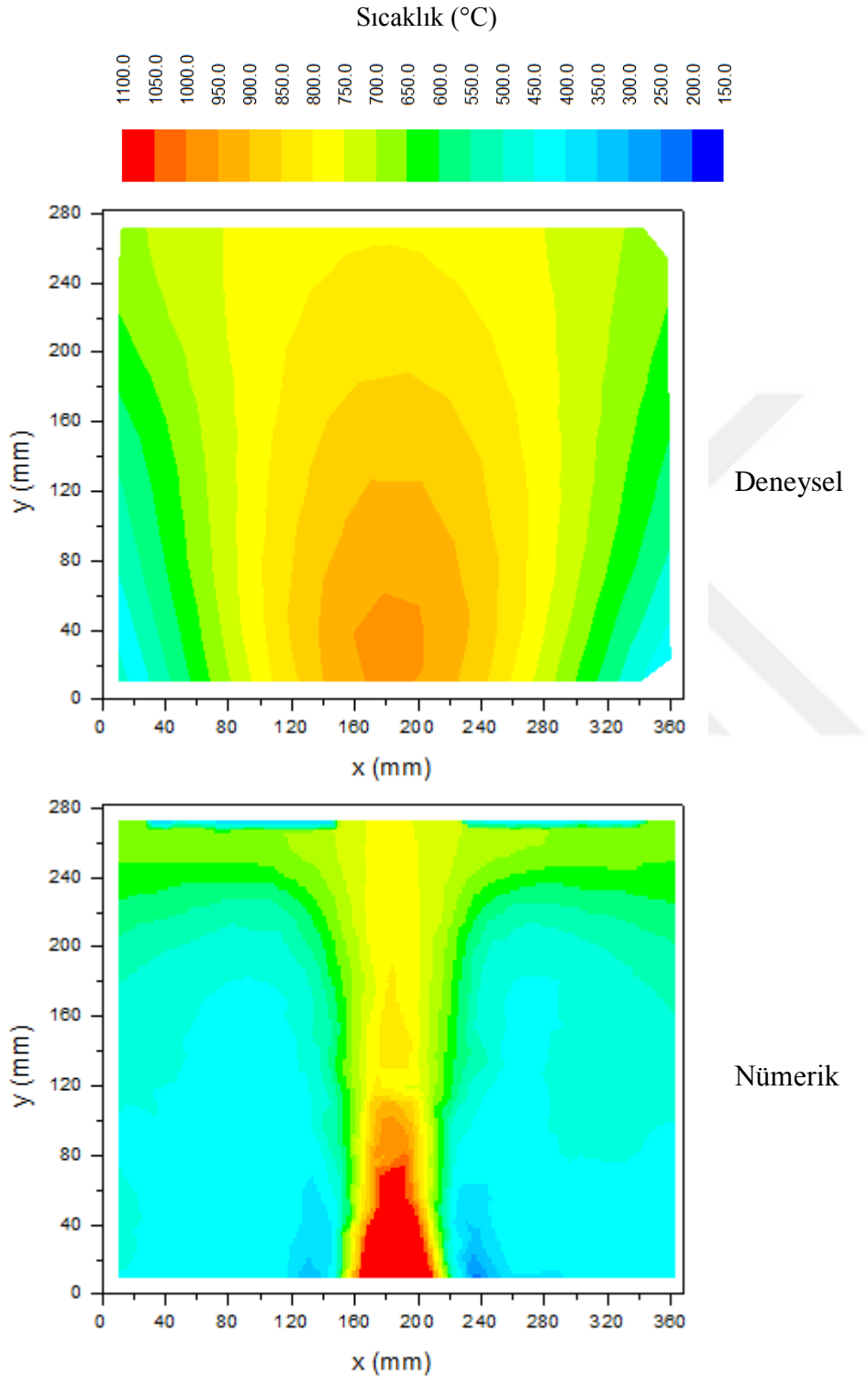
Kazan-1’de dizel emdirilmiş pelet duruma bakıldığında ise nümerik hesaplama sonucu oluşan alev sıcaklığının deneysel duruma göre çok daha fazla olduğu görülmüştür ve bu durum Şekil 5.59’da verilmiştir. Nümerik hesaplama sonucu oluşan hazne üzerindeki pik alev sıcaklığı 1200-1300 °C civarındayken deneysel

olarak bu değer 1000-1050 °C civarındadır. Ayrıca nümerik hesaplama sonucu elden edilen görüntüde alev boyunun daha uzun olduğu görülmektedir.



Şekil 5.59. Kazan-1 geometrisinde dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar

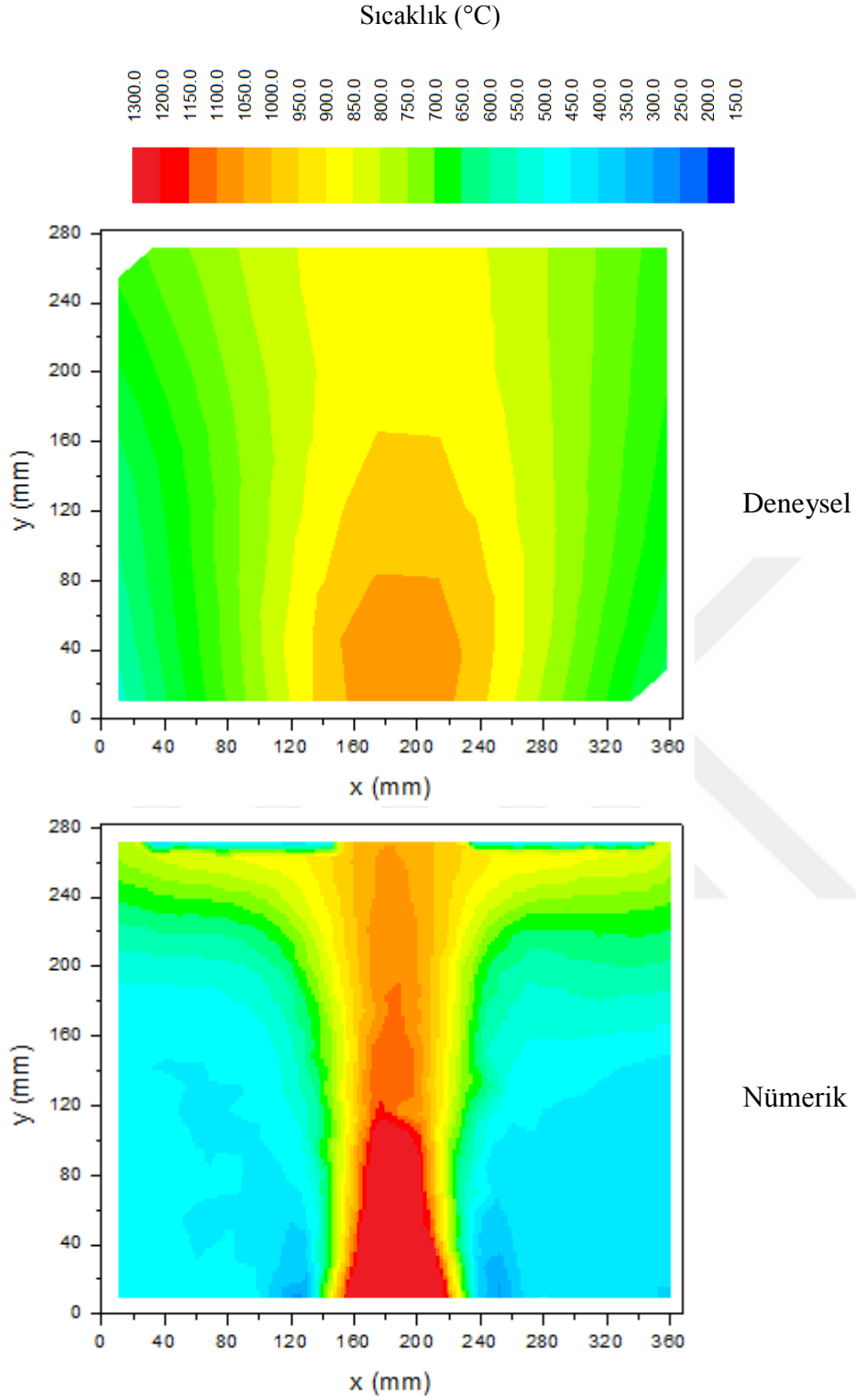
Kazan-2 geometrisinde ham pelet yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde oluşan sıcaklık konturları deneysel ve nümerik olarak kıyaslanmıştır ve bu durum Şekil 5.60'da gösterilmiştir.



Şekil 5.60. Kazan-2 geometrisinde ham pelet (HP100) yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar

Kazan-1 geometrisinde olduğu gibi her iki sonuçta da hazneye yakın bölgelerde maksimum sıcaklıklar elde edilmiştir. Nümerik hesaplamalar sonucu elde edilen maksimum sıcaklıklar 1050-1100  C civarındadır ve deneysel sonuçlardan yaklaşık %11 daha fazladır. Alev genişlikleri kıyaslandığında, nümerik hesaplamalarda dar bir alanı kapsayan alev deneysel sonuçlarda daha yaygın bir alanı kapsamaktadır. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi yanmanın çok kompleks bir yapıya sahip olması, yanma esnasında oluşan akışın ve türbülansın tam anlamıyla nümerik olarak modellenememesi gibi sebeplerle açıklanabilir.

Kazan-2'de dizel emdirilmiş pelet durumuna bakıldığında ise Kazan-1 durumuna benzer şekilde nümerik hesaplama sonucu oluşan alev sıcaklığının deneysel duruma göre daha fazla olduğu görülmüştür ve bu durum şekil 5.61'de verilmiştir. Nümerik hesaplama sonucu oluşan hazne üzerindeki pik alev sıcaklığı 1200-1300  C civarındayken deneysel olarak bu değer 1050-1110  C civarındadır. Ayrıca nümerik hesaplama sonucu elden edilen görüntüde alev boyunun daha uzun olduğu görülmektedir.

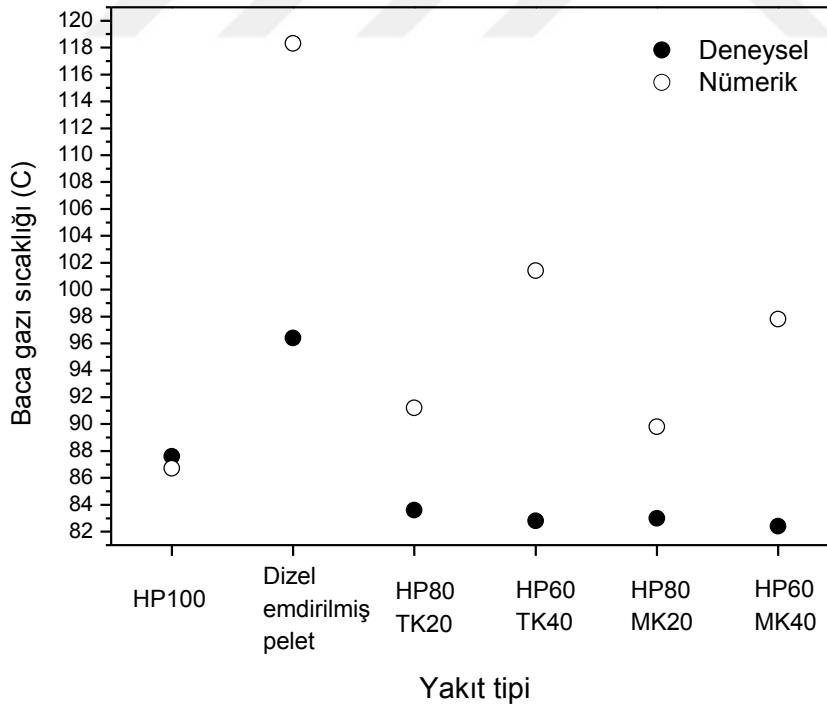


Şekil 5.61. Kazan-2 geometrisinde dizel emdirilmiş pelet yanması sonucu yanma odası merkez kesitinde elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar

Genel anlamda bakıldığında deneysel ve nümerik model sonuçlarının profil olarak birbirlerine yakın görüntüler verdiği görülmüştür. Ancak maksimum sıcaklıklarda %11-15'lik bir fark olduğu ve alev genişliklerinde farklılıkların olduğu

belirlenmiştir. Bu durum yanmanın çok kompleks bir yapıya sahip olması, yanma esnasında oluşan akışın ve türbülansın tam anlamıyla nümerik olarak modellenememesi gibi sebeplerle açıklanabilir. Kazan-2 geometrisinde oluşan alev boyunun Kazan-1 geometrisinden hem deneysel hem nümerik olarak daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu durum Kazan-2 geometrisinde birincil geçişte kazana yerleştirilen duman borularının gaz hızlarını arttırması ile açıklanabilir.

Kazan-1 geometrisinde ham pelet, ham pelet-kömür karışımları ve dizel emdirilmiş pelet yakıtları yanması sonucu elde edilen baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik sonuçları Şekil 5.62’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi özellikle ham pelet (HP100) yakıtının yanması sonucu oluşan baca gazı sıcaklığı deneysel ve nümerik olarak birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir ve aralarında yaklaşık %1’lik bir fark vardır. Ham pelet yakıt ile harmanlanan kömür miktarı arttıkça nümerik ve deneysel baca gazı sıcaklık değerleri arasındaki farkın açıldığı görülmektedir. Bu durum kömür ile harmanlanan ham peletin deneysel olarak iyi yanmaması ile açıklanabilir ve bu sebeple nümerik sonuçlarla yaklaşık %8-18 arasında farklılık göstermektedir.



Şekil 5.62. Kazan-1 geometrisinin baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik kıyaslanması

Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde ham pelet, ham pelet-kömür karışımları ve dizel emdirilmiş pelet yakıtları yanması sonucu elde edilen baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik sonuçları özet olarak Çizelge 5.13'te verilmiştir. Her iki kazan geometrisinde de HP100 yakıtının yanması sonucu oluşan baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik olarak birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği ve nümerik sonuç ile deneysel sonuç arasında yaklaşık %1'lik bir fark bulunduğu görülmüştür. Dizel emdirilmiş pelet yanması durumunda ise her iki kazanda da deneysel ve nümerik baca gazı sıcaklık sonuçları arasında yaklaşık %17-18'lik bir fark oluştuğu ve nümerik sonuçların daha yüksek çıktığı görülmektedir.

Çizelge 5.13. Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinin baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik kıyaslanması

Kazan Tipi	Yakıt	Deneysel	Nümerik
Kazan-1	Ham pelet (HP100)	87.6 °C	86.7 °C
	Dizel emdirilmiş pelet	96.4 °C	118.3 °C
	HP80TK20	83.6 °C	91.2 °C
	HP60TK40	82.8 °C	101.4 °C
	HP80MK20	83.0 °C	89.8 °C
	HP60MK40	82.4 °C	97.8 °C
Kazan-2	Ham pelet (HP100)	76.9 °C	77.0 °C
	Dizel emdirilmiş pelet	86.4 °C	104.4 °C
	HP80TK20	-	80.2 °C
	HP60TK40	-	87.4 °C
	HP80MK20	-	80.0 °C
	HP60MK40	-	84.8 °C

Literatürdeki nümerik çalışmaların baca gazı ve yanma odası sıcaklıklarına bakıldığında farklılıklar olduğu görülmüştür. Ayrıca kazanda yanma odası sıcaklıklarının deneysel ve nümerik uyumluluğu konusunda farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Chaney vd (2012) çalışmalarında 50 kW'lık pelet kazanının yanma performansını ve CO emisyonlarının optimizasyonunu araştırmışlardır. Simulasyonlarda FLUENT paket programından yararlanmışlardır. Pelet yakıtının termal dekompozisyonunu ve gaz fazıyla etkileşimini C programıyla yazmışlar ve HAD ile bağlantılı hale getirmişlerdir. Yatak içini (nemin buharlaşması, uçucuların ortaya çıkması, char oksidasyonu) ve dışını (gaz fazı) ayrı modellemişlerdir. Gaz fazının modellenmesinde Eddy Dissipation modeli kullanmışlardır. Maksimum sıcaklık değerinin 1550 °C civarlarında yatağa yakın bölgelerde olduğunu belirtmişlerdir. Chen vd (2015) çalışmalarında baca gazı resirkülasyonunun etkisini

500 kW'lık odun yongası kazanında deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Yatak içinin modellenmesinde FLIC kodunu, yatak dışının yani gaz fazının modellenmesinde ise Fluent programını kullanmışlardır. Maksimum alev sıcaklıklarının resirkülasyonsuz durumda 1200 °C, resirkülasyonlu durumda ise 1100 °C civarlarında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçlarının tatmin edici seviyede uyum sağladığını ifade etmişlerdir. Collazo vd (2012a) çalışmalarında 18 kW'lık evsel pelet kazanının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile simülasyonunu yapmışlardır. Yanma modeli olarak Finite rate/Eddy dissipation modelini, radyasyon modeli olarak Discrete Ordinates (DO) modeli ve türbülans modeli olarak Realisable k-ε modeli kullanmışlardır. Model sonuçlarıyla deneysel sonuçların iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir. Nümerik hesaplamalarının sonucu olarak %110 fazla hava ile yanma durumunda baca gazı sıcaklığının 150 °C, %125 fazla hava durumunda 155 °C, %160 fazla hava durumunda 170 °C ve %200 fazla hava durumunda 175 °C olduğunu belirtmişlerdir. Hava fazlalık katsayısının artmasıyla yanma odası boyunca sıcaklıkların arttığını belirtmişlerdir. Maksimum gaz sıcaklıklarının ise 1500 °C civarlarında ve ızgara yakınında olduğu görülmüştür. Gómez vd (2012), 18 kW'lık evsel tip pelet soba/kazanın performansını nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Türbülans ve kimyasal reaksiyon arasındaki ilişkiyi çözümlenmede Arrhenius Finite-Rate ve Magnussen ve Hijertager Eddy Dissipation modellerini, türbülansın modellenmesinde Realizable k-ε modelini kullanmışlardır. Dolaşım suyu sıcaklığının 60 °C olarak kabul edildiği, $\lambda=2.2$ durumu için nümerik hesaplama sonucu elde edilen maksimum sıcaklıkların yaklaşık 1500-1600 °C civarlarında olduğunu ve ızgaraya yakın olduğunu, baca gazı sıcaklığının 188 °C olduğunu ve verimin %77.3 olduğunu bildirmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçların iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir. Hussain (2012) çalışmasında kentsel katı atıkların fırında yanmasını modellemiştir. Yatakta yakıtın kuruma, gazlaşma gibi aşamalarını FLIC kodunu kullanarak modellemiş ve buradan çıkan sonuçları Fluent programına aktararak gaz fazının yanmasını modellemiştir. Yakma sisteminde üç farklı ızgara tipi kullanmıştır ve kıyaslamalar yapmıştır. Reaksiyon modeli olarak Eddy dissipation model, türbülans modeli olarak Standart k-ε model, Radyasyon modeli olarak P1 model kullanmıştır. Ocak içerisinde maksimum sıcaklıkların 1127 °C civarında olduğunu belirtmiştir. Klason ve Bai (2007) çalışmalarında 8-11 kW'lık pelet ocağında ikincil ve üçüncül havanın yanma performansı üzerindeki etkisini

deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Türbülans modeli olarak Standart k-ε modeli, yanma modeli olarak Eddy Dissipation Concept (EDC) modeli ve radyasyon modeli olarak P1 modeli kullanmışlardır. Nümerik hesaplamalar sonucu oluşan maksimum alev sıcaklığının 1500 °C civarında olduğunu belirtmişlerdir. Lee vd (2011) alışmalarında evsel ısıtma amaçlı olarak satılan 35 kW'lık pelet sobasında deneysel ve nümerik incelemeler yapmışlardır. Nümerik hesaplamalarda Fluent 6.3 programını kullanmışlardır. Yanma modeli olarak karışım kesri (mixture fraction) yaklaşımı, radyasyon modeli olarak Discrete Ordinates (DO) modeli ve türbülans modeli olarak standart k-ε modeli kullanmışlardır. Hava fazlalık katsayısı, $\lambda=1.7$ olarak kabul etmişlerdir. Oluşan maksimum alev sıcaklıklarının 1257-1487 °C arasında olduğunu belirtmişlerdir. Mevcut sobada baca gazı çıkış sıcaklıklarının ise 170 °C civarında olduğunu ifade etmişlerdir. Nosek vd (2011) alışmalarında 25 kW'lık evsel bir kazanda kömür yanmasını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Gaz fazının modellenmesinde Fluent programından yararlanmışlardır. Türbülans modeli olarak Standart k-ε model, RNG k-ε model ve Realizable k-ε modellerini, yanma modeli olarak Eddy dissipation model, radyasyon modeli olarak DO modeli kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarında ise kazanın belirli pozisyonlarına termoelemanlar yerleştirmişler ve alev sıcaklıklarını ölçmüşlerdir. Maksimum alev sıcaklıklarını 927-1127 °C arasında olduğunu deneysel olarak bulmuşlardır. Simülasyon sonuçlarıyla deneysel sonuçlar kıyaslandığında maksimum sıcaklıklar arasında 100-200 °C farklılıklar olduğu ancak genel anlamda birbiriyle uyum sağladığını belirtmişlerdir. Yang vd (2003) alışmalarında sabit yataklı bir reaktörde odun yongası yanmasını nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Maksimum sıcaklıkların deneysel ölçümlerde 920-980 °C arasında olduğu ve nümerik sonuçlarla 100 °C civarında bir farklılık olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlarla nümerik sonuçların genel olarak iyi uyum sağladığı, ancak pik alev sıcaklıklarında farklılıklar olduğu ve bu kısımda daha fazla çalışmanın yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütle ile ilgili çalışmalar son yıllarda büyük hız kazanmıştır. Özellikle sanayi ve konutlarda tüketilen enerjinin büyük çoğunluğunun ithal olması, araştırmacıları daha verimli sistemler tasarlamaya, mevcut sistemlerin verimini arttırmaya ve özellikle de alternatif enerji kaynaklarını kullanmaya zorlamaktadır. Alternatif enerji kaynaklarından birisi biyokütledir. Biyokütlenin ekonomik ve çevresel açıdan olumlu özellikleri de göz önüne alındığında, biyoenerji konusuna ilgi giderek artmaktadır. Pelet yakıtı da biyokütle kaynakları arasında yer almaktadır.

Yapılan çalışmada, evsel ısıtmada kullanılan, biyokütle kaynaklı pelet yakıtlı kazanlar performans ve emisyon açısından deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmada, ham pelet yakıtına çeşitli sıvılar emdirilmiş, ham pelet yakıtına çeşitli oranlarda kömür eklenmiş ve elde edilen peletler kazanlarda yakılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ham pelet yakıtının ısı değerleri yüksek olan sıvıları (dizel, biyodizel, ayçiçek yağı gibi) emebilme kapasiteleri araştırılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağı olan biyodizelin de bu sayede etkin kullanılabilmesi ve ayrıca atık yağların (gıda endüstrisi, lokantalar, evsel vb.) da bu kapsamda değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır. Kömür ile yapılan karışımlarda, ham pelet yakıtı %20 ve %40 oranlarında taş kömürü ve meşe mangal kömürüyle karıştırılmış ve incelemeler yapılmıştır. Hazırlanan bu karışımlar birinci geçişte duman borusuz (Kazan-1) ve birinci geçişte duman borulu (Kazan-2) olmak üzere iki farklı deney kazanlarında yakılarak verim ve baca gazı emisyonları gibi testler yapılmıştır ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca, kazana eklenen duman borularının da kazan verimine ve emisyonlarına olan etkisi irdelenmiştir.

Nümerik çalışmada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olarak Fluent paket programı kullanılmıştır. Hesaplamalar üç boyutlu olarak yapılmıştır. Türbülans modeli olarak RNG k- ϵ , yanma modeli olarak Finite rate/Eddy dissipation modeli kullanılmıştır. Kazan geometrisine göre oluşan sıcaklık konturları, hız vektörleri, baca gazı sıcaklıkları ve verimler incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Nümerik hesaplama sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslanarak değerdendirmeler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Pelet yakıtına sıvı emdirilmesiyle ilgili yapılan deneylerin sonucunda, pelet yakıtının (hacim değışimi olmaksızın) kütleliel bazda %15 dizel, %17 biyodizel ve %19 ayçiçek yağı emdiği tespit edilmiştir.
- Viskozitesi ve yüzey gerilimi daha yüksek olan sıvıların pelet yakıtına daha iyi emilim sağladığı görülmüştür. Ayrıca, emilim gerçekleşikten sonra pelet yakıtının içerisindeki gözeneklere dolan sıvıyı salmadığı belirlenmiştir.
- Dizel ve biyodizel emdirilmiş peletlerin uçucu madde miktarlarının ham pelete kıyasla daha fazla olması sebebiyle daha hızlı tutuştuğı görülmüştür.
- Birim hacim başına ısı değeri, dizel emdirilmesi sonucu %36.7, biyodizel emdirilmesi sonucu %36.9 ve ayçiçek yağı emdirilmesi sonucu %40.9 arttığı tespit edilmiştir. Bu durumda ham pelet, dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirilmiş peletlerin ısı güç giriş değeri sırasıyla 15.2 kW, 20.8 kW, 20.9 kW ve 21.5 kW olduğu belirlenmiştir.
- Ham pelet yakıtta kömür eklenmesiyle, nem, kül, sabit karbon ve ısı değeri miktarlarının arttığı, uçucu madde miktarının ise düştüğü belirlenmiştir. Ancak ham pelet-kömür karışımlarının, kazanda iyi yanmadığı ve yanmayı kötüleştirdiğı tespit edilmiştir.

Birinci geçişte duman borusuz kazan (Kazan-1) ile yapılan deneylerde:

- Ham pelet-Kömür deneylerinde, en yüksek baca gazı sıcaklığının ham pelet, en düşük sıcaklığın ise %60 Ham pelet-%40 Mangal kömür (HP60MK40) yakıt yanması sonucunda oluştuğı belirlenmiştir. Ancak bu sıcaklık farkları birbirlerine çok yakındır ve aralarında yaklaşık 5°C fark vardır.
- Ham pelet yanması sonucu oluşan O₂ emisyonu %13.5 civarındadır ve kömürle harmanlanmış peletlere kıyasla daha düşüktür. Taş kömürüyle harmanlanmış pelet mangal kömürüyle harmanlanmış pelete kıyasla daha düşük oksijen emisyonuna sahiptir.
- Ham pelet yanması sonucu oluşan NO_x emisyonu 48 ppm civarındadır. Kömürle harmanlanan peletlerin tümünde NO_x emisyonları ham pelete kıyasla daha yüksektir ve yaklaşık olarak 90-100 ppm aralığındadır.

- Emdirilmiş pelet yakıtların baca gazı sıcaklık değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ve ham pelet yakıtı göre yaklaşık 10 °C daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Ham pelet yanması sonucu oluşan O₂ konsantrasyonu %13.5 civarındadır ve emdirilmiş peletlere kıyasla daha yüksektir. Dizel emdirilmiş pelet ve biyodizel emdirilmiş pelet yanması sonucu oluşan O₂ konsantrasyonu birbirlerine yakın değerdedir ve yaklaşık olarak %10.8 civarındadır. Ayçiçek yağı emdirilmiş pelet yanması sonucu elde edilen O₂ konsantrasyonu en düşük değere sahiptir. Bu durum ayçiçek yağının ham pelet yakıtına en çok emilen sıvı olması ile açıklanabilir.
- Ham pelet yakıtının emdirilmiş peletlerden daha düşük CO emisyonu yaydığı görülmüştür. Özellikle emdirilmiş peletlerde yanma odasında daha düşük oksijen konsantrasyonu bulunmasının da etkisiyle baca gazında daha yüksek CO emisyonu yaydıkları belirlenmiştir.

Birinci geçişte duman borulu kazan (Kazan-2) ile yapılan deneylerde:

- Yanma odası içerisindeki sıcaklıklar incelendiğinde sıcaklık dağılımının en yüksek dizel emdirilmiş pelette olduğu, bunu sırasıyla biyodizel emdirilmiş peletin, ayçiçek yağı emdirilmiş peletin ve ham peletin izlediği belirlenmiştir.
- En düşük baca gazı sıcaklığı ham pelet yakıtın yanması sonucu elde edilmiştir. Baca gazı sıcaklıkları, ham pelet, dizel emdirilmiş pelet, biyodizel emdirilmiş pelet ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelet için sırasıyla 76.9 °C, 86.4 °C, 89.6 °C ve 90.9 °C değerindedir.
- Ham pelet yanması sonucu suya olan ısı geçişi yaklaşık 13.2 kW iken, bu değer dizel emdirilmiş pelette 18.2 kW, biyodizel emdirilmiş pelette 18.3 kW ve ayçiçek yağı emdirilmiş pelette 18.7 kW'tır. Görüleceği gibi kazanın yakıt besleme ayarında hiçbir değişiklik yapılmaksızın suya olan ısı geçişi dizel, biyodizel ve ayçiçek yağı emdirme işlemleri sonucunda, sırasıyla %37.9, %38.6 ve %40.9 artmıştır.
- Emdirilmiş pelet yakıtlarının yanması sonucu elde edilen verim değerlerinin birbirlerine yakın ve %93 civarlarında olduğu, ham pelet yanması sonucu ise bu değer yaklaşık %92 civarlarında olduğu belirlenmiştir.
- Ham pelet yanması sonucu oluşan O₂ konsantrasyonu %13 civarındadır ve emdirilmiş peletlere kıyasla daha yüksektir. Dizel emdirilmiş pelet yanması

sonucu oluşan O₂ konsantrasyonu yaklaşık olarak %9.5 değerindedir ve biyodizel ve ayçiçeği yağı emdirilmiş peletlere kıyasla daha yüksek değere sahiptir. Bu durum dizelin, biyodizel ve ayçiçek yağına göre ham pelet yakıtına daha az emilmesi ile açıklanabilir.

- Emdirilmiş peletlerin ham pelete kıyasla daha yüksek CO₂ emisyonu yaydığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak daha önce de belirtildiği gibi emdirilmiş peletlerin karbon içeriğinin ham pelete kıyasla daha yüksek olmasıdır. Ham pelet yanması sonucu oluşan CO₂ oranı %7 civarındayken, bu değer emdirilmiş peletlerde yaklaşık olarak %10'dur.
- Ham pelet, dizel emdirilmiş pelet ve biyodizel emdirilmiş peletlerde NO_x emisyonları 50 ppm civarındadır. Ayçiçek yağı emdirilmiş pelette ise bu değer 110 ppm civarındadır ve diğer yakıtlara kıyasla daha yüksektir.
- CO emisyonları açısından değerlendirildiğinde ham pelet yakıtının emdirilmiş peletlerden daha düşük CO emisyonu yaydığı görülmüştür. Ham pelet, dizel, biyodizel ve ayçiçeği yağı emdirilmiş peletlerin yanması sonucu oluşan CO emisyonları sırasıyla 400 ppm, 650 ppm, 1050 ppm, 1300 ppm civarlarındadır.

Birinci geçişte duman borusuz kazanın (Kazan-1) ve birinci geçişte duman borulu kazanın (Kazan-2) performans ve emisyon sonuçları birbirleriyle karşılaştırmalı olarak incelendiğinde:

- Her iki kazan durumunda da ham pelet yanmasında oluşan alev emdirilmiş sıvıların yanması sonucu oluşan alevden daha düşük şiddette ışık saçtığı, en yüksek alev parlaklığının dizel emdirilmiş pelet yanmasında olduğu, ham pelet-kömür karışımlarının yanması sonucu oluşan alevin ise çok düşük şiddette olduğu görülmüştür.
- Her iki kazanla yapılan deneylerde de ham pelet yakıtın baca gazı sıcaklığı tüm durumlarda emdirilmiş peletlerden daha düşük sıcaklıklara sahip olduğu belirlenmiştir.
- Kazan-1 durumunda yanma odası içerisinde oluşan alev sıcaklıkları Kazan-2 durumuna göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Kazana duman borusu eklenmesiyle baca gazı sıcaklıklarının tüm yakıt tiplerinde yaklaşık 7-10 °C düştüğü belirlenmiştir. Bu durum kazana eklenen duman boruları sayesinde suya olan ısı transferinin artması ile açıklanabilir.

- Kazan-2 durumunda termal verim değerlerinin Kazan-1 durumuna göre yaklaşık %0.5-1 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm yakıt durumlarında Kazan-1 geometrisinde Kazan-2 geometrisine göre daha az CO emisyonunun yayıldığı görülmüştür. Kazan-2'de, yanma gazları soğuk yüzeyler ile daha fazla temas halindedir ve özellikle birinci geçiş duman borularında gaz sıcaklıkları Kazan-1 durumuna göre daha düşüktür. Bu durum CO emisyon artışına sebep olmuştur.

Nümerik sonuçlar değerlendirildiğinde:

- Kazan-1 ve Kazan-2 geometrilerinde, kazana eklenen birinci geçiş duman boruları baca gazı sıcaklıklarını 10-14 °C düşürmüştür.
- En yüksek baca gazı sıcaklığı dizel emdirilmiş pelet durumunda oluşurken, bunu sırasıyla HP60TK40, HP60 MK40, HP80TK20, HP80MK20 ve HP 100 takip etmiştir.
- RNG k-ε türbülans modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar Standart k-ε modele göre deneysel değerlerle daha uyumlu çıkmıştır.
- Ham pelet yanması durumunda nümerik hesaplamalar sonucu elde edilen maksimum sıcaklıklar 1050-1100 °C civarındadır ve deneysel sonuçlardan yaklaşık %11-15 daha fazladır. Alev genişliğine bakıldığında, nümerik hesaplamalarda dar bir alanı kapsayan alevin deneysel sonuçlarda daha yaygın bir alanı kapsadığı tespit edilmiştir.
- Dizel emdirilmiş pelet durumunda nümerik hesaplama sonucu oluşan hazne üzerindeki pik alev sıcaklığı 1200-1300 °C civarındayken deneysel olarak bu değer 1000-1100 °C civarındadır. Ayrıca nümerik hesaplama sonucu elde edilen alev boyunun daha uzun olduğu belirlenmiştir.
- Maksimum sıcaklıklarda %11-15'lik bir fark olduğu ve alev genişliklerinde farklılıkların olduğu belirlenmiştir. Bu durum yanmanın çok kompleks bir yapıya sahip olması, yanma esnasında oluşan akışın ve türbülansın tam anlamıyla nümerik olarak modellenememesi gibi sebeplerle açıklanabilir.
- Ham pelet yakıt ile harmanlanan kömür oranı arttıkça nümerik ve deneysel baca gazı sıcaklık değerleri arasındaki farkın açıldığı görülmüştür. Bu durum deney şartlarında artan kömür oranında gözlemlenen yanmanın zorlaşması ile açıklanabilir.

- Genel anlamda bakıldığında ham pelet yanması durumunda deneysel ve nümerik model sonuçlarının profil olarak birbirlerine benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Ham pelet yanması durumunda baca gazı sıcaklıklarının deneysel ve nümerik olarak oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışmadan elde edilen tecrübeler ve bilgiler doğrultusunda, pelet yakıtlı kazanlarda yanma ve emisyon performansı ile ilgili ileride yapılacak çalışmalarda aşağıdaki önerilerin yararlı olacağı düşünülmektedir.

- Yapılan çalışmada kullanılan pelet yakıtı %70 Kayın-%30 Çam'dan üretilmiştir. Farklı tür odunlardan elde edilmiş pelet yakıtının sıvıları emme kapasiteleri araştırılabilir.
- Ham pelet-Kömür karışımlarının pelet haline gelebilmesi (birbirlerine tutunabilmesi) amacıyla ham pelet üretimi için gerekenden daha fazla nemlendirilmiştir. Bu sebeple de iyi yanma sağlanamamıştır. Bu karışımların birbirlerine bağlanabilmesi amacıyla kimyasal bağlayıcılar kullanılarak yanma performansları araştırılabilir.
- Yapılan deneylerde toz emisyon cihazının bulunmaması sebebiyle toz emisyonları ölçülememiştir. Emdirilmiş peletlerin toz emisyonlarını hangi oranda etkilediği araştırılabilir.
- Kazana eklenen duman borularının toz emisyonlarına etkisi araştırılabilir.
- Deneylerin tümü, çalışma şartları ham pelet yakıt yakmaya uygun bir kazanda gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple yanma odasında, emdirilmiş pelet durumunda ham pelete göre daha az oksijen bulunmuştur. Deneyler hava fazlalığı tüm yakıtlarda aynı olacak şekilde hava fanı debisi ayarlanarak yeni araştırmalar yapılabilir.
- Nümerik hesaplamalarda katı yakıtın yanma aşamaları (kurutma, gazlaşma, sabit karbon yanması) daha detaylı hesaplanarak mevcut model geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Acaroğlu, M. 2003. *Alternatif Enerji Kaynakları*. Atlas Yayın Dağıtım, Ankara.
- Ahn, J. and Kim, J. J. 2014. Combustion and heat transfer characteristics inside the combustion chamber of a wood pellet boiler. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28:2, 789-795.
- Akçay, H. T. (2006). Bazı bitkisel yağlardan biyodizel üretimi. Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, 82, Trabzon.
- Anonim (2013). MEGEP. Motor çevrimleri ve yakıtlar. http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Motor%20%20C3%87evrimleri%20Ve%20Yak%20C4%B1tlar.pdf (Erişim tarihi: 20.10.2018)
- Anonim (2014). Türkiye Cumhuriyeti Gümrük ve Ticaret Bakanlığı Kooperatifçilik Genel Müdürlüğü. 2014 yılı ayçiçeği raporu. <http://koop.gtb.gov.tr/data/53319ccf487c8eb1e43d7298/2014%20Ay%20C3%A7i%20C3%A7e%20C4%9Fi%20Raporu.pdf> (Erişim tarihi: 20.11.2017)
- Anonim (2015). TMMOB. Enerji ve Kömür Raporu. http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/22ed738b2c7ba36_ek.pdf (Erişim tarihi: 20.08.2018)
- Anonim (2017). TS EN 303-5, Kazanlar - Bölüm 5: Katı yakıtlı kazanlar, elle ve otomatik yüklemeli, anma ısı çıktısı 500 kW'a kadar - Terim ve tarifleri, gerekler, deneyler ve işaretleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Anonim (2018). Maxpel. Maxpel mix peletinin ürün özellikleri. http://www.maxpel.com.tr/urun/75_maxpel-mix (Erişim tarihi: 20.10.2018)
- Anonymous (1998). SS 187120, Biofuels and peat: Fuel pellets: Classification. Swedish Standard Institution, Stockholm, Sweden.
- Anonymous (1999). NS 3165 NS (NBR) M Biofuel: Cylindrical pellets of pure wood: Classification and requirements. Norwegian General Standardizing Body, Oslo, Norway .
- Anonymous (2001). SN 166000, Schweizerische Normen-Vereinigung, Testing of solid fuels: compressed untreated wood, requirements and testing. Wintherthur, Switzerland.
- Anonymous (2016). Greenheat Ltd. <http://www.greenheat.ie/useful-information/frequently-asked-questions/> (Erişim tarihi: 20.10.2018)
- Anonymous (2018). Sun and Climate. Applications in biomass-pellet boilers. <https://www.sunandclimate.com/applications/10-biomass/122-pellets-boilers.html> (Erişim tarihi: 15.09.2018)
- Anonymous (2019). U.S. Department of Energy. Alternative Fuels Data Center. <https://afdc.energy.gov/fuels/prices.html> (Erişim tarihi: 19.09.2018)

- Arranz, J. I., Miranda, M. T., Montero, I., Sepúlveda, F. J. and Rojas, C. V. 2015. Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe. *Fuel*, 142, 199-207.
- Barnwal, B. K. and Sharma, M. P. 2005. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9:4, 363-378.
- Baxter, L. 2005. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, 84:10, 1295-1302.
- Bayrak, F. (2014). Elektrik Üretiminde Kullanılan Linyitin Madencilik Aşamasına Ait Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 144, Ankara.
- Begum, S., Rasul, M., Akbar, D. and Cork, D. 2014. An experimental and numerical investigation of fluidized bed gasification of solid waste. *Energies*, 7:1, 43-61.
- Calcagnile, P., Fragouli, D., Bayer, I. S., Anyfantis, G. C., Martiradonna, L., Cozzoli, P. D., Cingolani, R. and Athanassiou, A. 2012. Magnetically driven floating foams for the removal of oil contaminants from water. *Acs Nano*, 6:6, 5413-5419.
- Carlson, E., Schwarz, M., Golicza, L., Verma, V. K., Prada, A., Baratieri, M., Haslinger, W. and Schmidl, C. 2015. Efficiency and operational behaviour of small-scale pellet boilers installed in residential buildings. *Applied Energy*, 155, 854-865.
- Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V. K., Haslinger, W. and Schmidl, C. 2013. Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy*, 104, 286-296.
- Chaney, J., Liu, H. and Li, J. 2012. An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach. *Energy Conversion and Management*, 63, 149-156.
- Chen, Q., Zhang, X., Bradford, D., Sharifi, V. and Swithenbank, J. 2010. Comparison of emission characteristics of small-scale heating systems using biomass instead of coal. *Energy & Fuels*, 24:8, 4255-4265.
- Chen, Q., Zhang, X., Zhou, J., Sharifi, V. N. and Swithenbank, J. 2015. Effects of flue gas recirculation on emissions from a small scale wood chip fired boiler. *Energy Procedia*, 66:Supplement C, 65-68.
- Chum, H. L. and Overend, R. P. 2001. Biomass and renewable fuels. *Fuel Processing Technology*, 71:1, 187-195.
- Collazo, J., Porteiro, J., Míguez, J. L., Granada, E. and Gómez, M. A. 2012a. Numerical simulation of a small-scale biomass boiler. *Energy Conversion and Management*, 64, 87-96.
- Collazo, J., Porteiro, J., Patiño, D. and Granada, E. 2012b. Numerical modeling of the combustion of densified wood under fixed-bed conditions. *Fuel*, 93, 149-159.
- Dağsöz, A. K. 1993. *Bacalar*. Alp Teknik Kitaplar, İstanbul.

- Dias, J., Costa, M. and Azevedo, J. L. T. 2004. Test of a small domestic boiler using different pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27:6, 531-539.
- Dong, W. and Blasiak, W. 2001. CFD modeling of ecotube system in coal and waste grate combustion. *Energy Conversion and Management*, 42:15–17, 1887-1896.
- Eskilsson, D., Rönnbäck, M., Samuelsson, J. and Tullin, C. 2004. Optimisation of efficiency and emissions in pellet burners. *Biomass and Bioenergy*, 27:6, 541-546.
- Feng, L., Zhang, Z., Mai, Z., Ma, Y., Liu, B., Jiang, L. and Zhu, D. 2004. A super-hydrophobic and super-oleophilic coating mesh film for the separation of oil and water. *Angewandte Chemie International Edition*, 43:15, 2012-2014.
- Fernandes, U. and Costa, M. 2012. Particle emissions from a domestic pellets-fired boiler. *Fuel Processing Technology*, 103, 51-56.
- Fiedler, F. 2004. The state of the art of small-scale pellet-based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8:3, 201-221.
- Fluent Inc. (2006). *Fluent 6.3 User's Guide*.
- Forbes, E. G. A., Easson, D. L., Lyons, G. A. and McRoberts, W. C. 2014. Physico-chemical characteristics of eight different biomass fuels and comparison of combustion and emission results in a small scale multi-fuel boiler. *Energy Conversion and Management*, 87, 1162-1169.
- Frey, H.-H., Peters, B., Hunsinger, H. and Vehlou, J. 2003. Characterization of municipal solid waste combustion in a grate furnace. *Waste Management*, 23:8, 689-701.
- Golser, M. 2001. *Standardisierung von Holzpellets: Aktuelle nationale und internationale Entwicklungen. 2. Europäisches Expertenforum Holzpellets*. Salzburg: UMBERA GmbH.
- Gómez, M. A., Comesaña, R., Feijoo, M. A. Á. and Eguía, P. 2012. Simulation of the effect of water temperature on domestic biomass boiler performance. *Energies*, 5:4, 1044.
- Gómez, M. A., Porteiro, J., de la Cuesta, D., Patiño, D. and Míguez, J. L. 2016. Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feed boiler. *Fuel*, 184, 987-999.
- González, J. F., González-García, C. M., Ramiro, A., Gañán, J., Ayuso, A. and Turegano, J. 2006. Use of energy crops for domestic heating with a mural boiler. *Fuel Processing Technology*, 87:8, 717-726.
- González, J. F., González-García, C. M., Ramiro, A., González, J., Sabio, E., Gañán, J. and Rodríguez, M. A. 2004. Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler. *Biomass and Bioenergy*, 27:2, 145-154.
- Hein, K. R. G. and Bemtgen, J. M. 1998. EU clean coal technology—co-combustion of coal and biomass. *Fuel Processing Technology*, 54:1, 159-169.

- Hermansson, S. and Thunman, H. 2011. CFD modelling of bed shrinkage and channelling in fixed-bed combustion. *Combustion and Flame*, 158:5, 988-999.
- Holz, T. 2003. *Holzpelletheizungen*. Staufen bei Freiburg: Ökobuch.
- Hussain, A. 2012. CFD modeling of grate furnace designs for municipal solid waste combustion. *Asian Transactions on Engineering*, 2:3, 41-50.
- Huttunen, M., Kjaldman, L. and Saastamoinen, J. 2004. Analysis of grate firing of wood with numerical flow simulation. *IFRF Combustion Journal*, 1:1.
- Javier, P., Athanassia, A. and Despina, F. 2016. Effect of the porous structure of polymer foams on the remediation of oil spills. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49:14, 145601.
- Johansson, L. S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C. and Potter, A. 2004. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment*, 38:25, 4183-4195.
- Johansson, L. S., Tullin, C., Leckner, B. and Sjövall, P. 2003. Particle emissions from biomass combustion in small combustors. *Biomass and Bioenergy*, 25:4, 435-446.
- Kær, S. K. 2004. Numerical modelling of a straw-fired grate boiler. *Fuel*, 83:9, 1183-1190.
- Khelil, A., Naji, H., Loukarfi, L. and Mompean, G., 2009. Prediction of a high swirled natural gas diffusion flame using a PDF model. *Fuel*, 88:2, 374-381.
- Kilic, G., Sungur, B., Topaloglu, B. and Ozcan, H. 2018. Experimental analysis on the performance and emissions of diesel/butanol/biodiesel blended fuels in a flame tube boiler. *Applied Thermal Engineering*, 130, 195-202.
- Kjällstrand, J. and Olsson, M. 2004. Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood—examples referring to different combustion appliances. *Biomass and Bioenergy*, 27:6, 557-561.
- Klason, T. and Bai, X. S. 2007. Computational study of the combustion process and NO formation in a small-scale wood pellet furnace. *Fuel*, 86:10-11, 1465-1474.
- Koc, S. (2006). Linyitlerin Gazlaştırılmasına Mineral Madde İçeriğinin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, 79, Ankara.
- Kopczyński, M., Lasek, J. A., Iluk, A. and Zuwała, J. 2017. The co-combustion of hard coal with raw and torrefied biomasses (willow (*Salix viminalis*), olive oil residue and waste wood from furniture manufacturing). *Energy*, 140, 1316-1325.
- Lee, Y.-W., Ryu, C., Lee, W.J. and Park, Y. K. 2011. Assessment of wood pellet combustion in a domestic stove. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 13:3, 165-172.
- Liu, H., Chaney, J., Li, J. and Sun, C. 2013. Control of NO_x emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging. *Fuel*, 103, 792-798.

- Mehrabian, R., Shiehnejadhesar, A., Scharler, R. and Obernberger, I. 2014. Multi-physics modelling of packed bed biomass combustion. *Fuel*, 122:Supplement C, 164-178.
- Míguez, J. L., Morán, J. C., Granada, E. and Porteiro, J. 2012. Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:6, 3867-3875.
- Miranda, T., Arranz, J. I., Montero, I., Román, S., Rojas, C. V. and Nogales, S. 2012. Characterization and combustion of olive pomace and forest residue pellets. *Fuel Processing Technology*, 103, 91-96.
- Mock, C., Lee, H., Choi, S., Yang, W. and Manovic, V. 2017. Burning characteristics of single particles of coal and wood mixtures for co-firing in an upward-flowing hot gas stream. *Fuel Processing Technology*, 163, 20-34.
- Moffat R. J. 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Exp Therm Fluid Sci*, 1:1, 3-17.
- Morán, J. C., Tabarés, J. L., Granada, E., Porteiro, J. and González, L. M. L. 2006. Effect of different configurations on small pellet combustion systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28:12, 1135-1148.
- Muthuraman, M., Namioka, T. and Yoshikawa, K. 2010. A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 101:7, 2477-2482.
- Nosek, R., Jandacka, J. and Szlek, A. 2011. Simulation of coal combustion process in small boiler. *AIP Conference Proceedings*, 1337:1, 43-47.
- Novozhilov, V., Moghtaderi, B., Fletcher, D. F. and Kent, J. H. 1996. Computational fluid dynamics modelling of wood combustion. *Fire Safety Journal*, 27:1, 69-84.
- Nussbaumer, T. 1997. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion: Volume 1 / Volume 2*. Springer Netherlands, 1447-1461, Dordrecht.
- Obernberger, I. and Thek, G. (2002). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. The First World Conference on Pellets, Stockholm: Swedish Bioenergy Association.
- Obernberger, I. and Thek, G. (2006). Recent Developments Concerning Pellet Combustion Technologies - A Review of Austrian Developments. NEI-SE-636, Sweden.
- Olsson, M. 2006. Wheat straw and peat for fuel pellets—organic compounds from combustion. *Biomass and Bioenergy*, 30:6, 555-564.
- Olsson, M. and Kjällstrand, J. 2004. Emissions from burning of softwood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27:6, 607-611.
- Onat, K., Genceli, O.F. ve Arısoy, A. 2007. *Buhar kazanlarının ısı hesapları*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özdoğan, M., Sungur, B., Namlı, L., Topaloğlu, B. ve Durmuş, A. 2016. Farklı En-Boy Oranlarına Sahip Binaların Etrafındaki Akışın Sayısal Çözümünde

Türbülans Modellerinin Etkisinin Karşılaştırmalı Araştırılması. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12:3, 585-595.

- Pettersson, E. and Nordin, A. (1996). Effect of temperature and residence time on emissions of CO, THC, tars and NO_x during pellet combustion. Nordic Seminar on Thermochemical Conversion, Trondheim.
- Porteiro, J., Collazo, J., Patiño, D., Granada, E., Moran Gonzalez, J. C. and Míguez, J. L. 2009. Numerical modeling of a biomass pellet domestic boiler. *Energy & Fuels*, 23:2, 1067-1075.
- Purvis, M. R. I., Tadulan, E. L. and Tariq, A. S. 2000. NO_x control by air staging in a small biomass fuelled underfeed stoker. *International Journal of Energy Research*, 24:10, 917-933.
- Rabaçal, M., Fernandes, U. and Costa, M. 2013. Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones. *Renewable Energy*, 51, 220-226.
- Rodi, W. 1993. *Turbulence models and their application in hydraulics : a state-of-the art review, Third Edition*. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Roy, M. M., Dutta, A. and Corscadden, K. 2013. An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy*, 108, 298-307.
- Ryu, C., Yang, Y. B., Nasserzadeh, V. and Swithenbank, J. 2004. Thermal reaction modeling of a large municipal solid waste incinerator. *Combustion Science and Technology*, 176:11, 1891-1907.
- Sami, M., Annamalai, K. and Wooldridge, M. 2001. Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27:2, 171-214.
- Schramek, E. R. and Recknagel, H. 2007. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 07/08*. Oldenbourg Industrieverlag,
- Schütte, A. 2006. *Holzpellets Komfortabel, effizient, zukunftssicher*. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Herausgeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow.
- Seven, B. (2014). Pamuk sapları-atık hayvansal yağ karışımlarından elde edilen briketlerin yanma performansının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 55, Elazığ.
- Seven, T., Can, B., Darende B.N. ve Ocak, S. 2018. Hava ve Toprakta Ağır Metal Kirliliği. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1:2, 91-103.
- Shen, G., Tao, S., Wei, S., Zhang, Y., Wang, R., Wang, B., Li, W., Shen, H., Huang, Y., Chen, Y., Chen, H., Yang, Y., Wang, W., Wei, W., Wang, X., Liu, W., Wang, X. and Simonich, S. L. M. 2012. Reductions in emissions of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of biomass pellets in comparison with raw fuel burning. *Environmental Science & Technology*, 46:11, 6409-6416.
- Shin, D. and Choi, S. 2000. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. *Combustion and Flame*, 121:1, 167-180.

- Sikanen, L. and Teemu, V. 2012. Small scale pilot combustion experiments with wood pellets – the effect of pellet length. *The Open Renewable Energy Journal*, 5, 1-6.
- Sippula, O., Hytönen, K., Tissari, J., Raunemaa, T. and Jokiniemi, J. 2007. Effect of wood fuel on the emissions from a top-feed pellet stove. *Energy & Fuels*, 21:2, 1151-1160.
- Skodras, G., Grammelis, P., Samaras, P., Vourliotis, P., Kakaras, E. and Sakellariopoulos, G. P. 2002. Emissions monitoring during coal waste wood co-combustion in an industrial steam boiler. *Fuel*, 81:5, 547-554.
- Spliethoff, H. and Hein, K. R. G. 1998. Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces. *Fuel Processing Technology*, 54:1, 189-205.
- Srivastava, A. and Prasad, R. 2000. Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4:2, 111-133.
- Sui, J., Xu, X., Zhang, B., Huang, C. and Lv, J. 2013. A mathematical model of biomass briquette fuel combustion. *Energy and Power Engineering*, 5, 1-5.
- Sun, H., Li, A., Zhu, Z., Liang, W., Zhao, X., La, P. and Deng, W. 2013. Superhydrophobic activated carbon-coated sponges for separation and absorption. *ChemSusChem*, 6:6, 1057-1062.
- Sungur, B., Topaloglu, B. and Ozcan, H. 2016. Effects of nanoparticle additives to diesel on the combustion performance and emissions of a flame tube boiler. *Energy*, 113, 44-51.
- Sungur, B., Özdoğan, M., Topaloğlu, B. ve Namlı, L. 2017. Küresel enerji tüketimi bağlamında mikro kojenerasyon sistemlerinin teknik ve ekonomik değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 58:686, 1-20.
- Sungur, B., Topaloglu, B. ve Ozbey, M. 2018. Pelet yakıtlı yakma sistemlerinin ısıl performans ve emisyon açısından incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 59:693, 64-84.
- Sweeten, J. M., Annamalai, K., Thien, B. and McDonald, L. A. 2003. Co-firing of coal and cattle feedlot biomass (FB) fuels. Part I. Feedlot biomass (cattle manure) fuel quality and characteristics. *Fuel*, 82:10, 1167-1182.
- Tillem, İ. (2005). Dizel motorlar için alternatif yakıt olarak biyodizel üretimi ve kullanımı. Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 70, Denizli.
- Topaloglu, B. 2009. *Yakma Kaynaklı Hava Kirlenmesi ve Kontrolü*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Basımevi, Samsun.
- Verma, V. K., Bram, S., Delattin, F., Laha, P., Vandendael, I., Hubin, A. and De Ruyck, J. 2012. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, 90:1, 17-23.
- Wang, Z., Ma, H., Chu, B. and Hsiao, B. S. 2017. Super-hydrophobic polyurethane sponges for oil absorption. *Separation Science and Technology*, 52:2, 221-227.

- Westerlund, L. B., Hermansson, R. L. and Cervantes, M. J. 2012. Computational fluid dynamics optimisation of a pellet burner. *Thermal Science*, 16:4, 1175-1186.
- Wiinikka, H. and Gebart, R. 2004. Experimental investigations of the influence from different operating conditions on the particle emissions from a small-scale pellets combustor. *Biomass and Bioenergy*, 27:6, 645-652.
- Yang, Y. B., Newman, R., Sharifi, V., Swithenbank, J. and Ariss, J. 2007. Mathematical modelling of straw combustion in a 38MWe power plant furnace and effect of operating conditions. *Fuel*, 86:1, 129-142.
- Yang, Y. B., Sharifi, V. N. and Swithenbank, J. 2004. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds. *Fuel*, 83:11, 1553-1562.
- Yang, Y. B., Sharifi, V. N. and Swithenbank, J. 2005. Numerical Simulation of the Burning Characteristics of Thermally-Thick Biomass Fuels in Packed-Beds. *Process Safety and Environmental Protection*, 83:6, 549-558.
- Yang, Y. B., Sharifi, V. N., Swithenbank, J., Ma, L., Darvell, L. I., Jones, J. M., Pourkashanian, M. and Williams, A. 2008. Combustion of a Single Particle of Biomass. *Energy & Fuels*, 22:1, 306-316.
- Yang, Y. B., Yamauchi, H., Nasserzadeh, V. and Swithenbank, J. 2003. Effects of fuel devolatilisation on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed. *Fuel*, 82:18, 2205-2221.
- Yılmaz, İ. (2006). Model Bir yakıcıda hidrojen-metan karışımının yanmasının sayısal ve deneysel incelenmesi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 185, Kayseri.
- Yin, C., Rosendahl, L. A. and Kær, S. K. 2008. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34:6, 725-754.
- Yuan, J., Liu, X., Akbulut, O., Hu, J., Suib, S. L., Kong, J. and Stellacci, F. 2008. Superwetting nanowire membranes for selective absorption. *Nature Nanotechnology*, 3, 332.
- Zamorano, M., Popov, V., Rodríguez, M. L. and García-Maraver, A. 2011. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry logging residues. *Renewable Energy*, 36:11, 3133-3140.
- Zandeckis, A., Blumberga, D., Rochas, C., Veidenbergs, I. and Silins, K. 2010. Methods of nitrogen oxide reduction in pellet boilers. *Scientific Journal of Riga Technical University. Environmental and Climate Technologies*, 4, 123.
- Zhang, X., Chen, Q., Bradford, R., Sharifi, V. and Swithenbank, J. 2010. Experimental investigation and mathematical modelling of wood combustion in a moving grate boiler. *Fuel Processing Technology*, 91:11, 1491-1499.
- Zhao, X., Li, L., Li, B., Zhang, J. and Wang, A. 2014. Durable superhydrophobic/superoleophilic PDMS sponges and their applications in selective oil absorption and in plugging oil leakages. *Journal of Materials Chemistry A*, 2:43, 18281-18287.

Zhou, H., Jensen, A. D., Glarborg, P., Jensen, P. A. and Kavaliauskas, A. 2005.
Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. *Fuel*, 84:4, 389-403.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Bilal SUNGUR
Doğum Yeri : Aschaffenburg/Almanya
Doğum Tarihi : 17.02.1988
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dil : İngilizce
Cep Telefonu : 0554 457 17 30
E-posta : bilalsungur@gmail.com

Eğitim Durumu

Doktora : Ondokuz Mayıs Üniversitesi (2013-2019)
Yüksek Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi (2010-2013)
Lisans : Atatürk Üniversitesi (2006-2010)
Lise : Huriye Süer Anadolu Lisesi (2002-2006)

Mesleki Denevim

Araştırma Görevlisi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü (2011-2019)

Yayınlar

A-Uluslararası Makaleler

SCI İndeksli

- 1) Sungur B., Topaloglu B., Ozcan H., “Effects of nanoparticle additives to diesel on the combustion performance and emissions of a flame tube boiler”, *Energy*, 113, 2016.
- 2) Sungur B., Topaloglu B., Namli L., Ozcan H., Ozbey M., “Combustion performance and emissions of diesel/biodiesel blended fuels in a residential reverse flame boiler”, *Int. Journal of Global Warming*, 13(2), 183–196, 2017.
- 3) Ozdogan M, Sungur B, Namli L, Durmus A., “Comparative Study of Turbulent Flow around a Bluff Body by Using Two- and Three-Dimensional CFD”, *Wind and Structures*, 25 (6), 537-549, 2017.
- 4) Kilic G, Sungur B, Topaloglu B, Ozcan H., “Experimental analysis on the performance and emissions of diesel/butanol/biodiesel blended fuels in a flame tube boiler”, *Appl Therm Eng*, 130, 195-202, 2018.

SCI Dışı (Alan İndeksli)

- 1) Sungur B., Topaloglu B., Ozcan H., Namli L., “Numerical Investigation of Turbulent Hydrogen-Methane- Nitrogen Non-Premixed Jet Flame”, *Journal of Energy Technologies and Policy*, 6, 2, 2016.
- 2) Sungur B., Topaloglu B., Ozcan H., Namli L., “Numerical Investigation of the Effect of Different Conical Turbulators on the Performance of a Liquid Fuelled Boiler”, *Journal of Chemical and Process Engineering Research*, 6, 3, 2016.
- 3) Ozdogan M., Sungur B., Namli L., Topaloglu B., Durmus A., “A Comparative Study of Turbulence Model Effects in Numerical Analyzing Flow around the Buildings Having Various Aspect Ratios”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 585-595, 2016.
- 4) Sungur B., Ozdogan M., Topaloglu B., Namli L., “Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 58 (686), 1-20, 2017.
- 5) Sungur B., Topaloglu B., Ozcan H., Namli L., “Numerical analysis of the effect of conical turbulators to heat transfer performance of a liquid fuelled boiler”, *Res. Eng. Struct. Mat.*, 4(2): 127-136, 2018.
- 6) Sungur B., Topaloglu B., Ozbey M., “Kömür yakıtlı bir soba/kazanın performans ve emisyonlarının farklı baca çekiş ve yükleme şartlarında deneysel incelenmesi”, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9 (1), 215-224, 2018.
- 7) Sungur B., Topaloglu B., “Numerical Analyses of the Effects of Fuel Load Variation on Combustion Performance of a Pellet Fuelled Boiler”, *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2(1), 1-8, 2018.
- 8) Sungur, B., Topaloglu B., "Boru İçine Yerleştirilen Konik Türbülötör Sayısının Nümerik Optimizasyonu", *Technological Applied Sciences*, 13 (3), 208-218, 2018.
- 9) Sungur, B., Topaloglu, B., "Numerical Investigation of the Effects of Gas Flow Passes on Performance of a Pellet Fuelled Boiler", *International Journal of Advances in Mechanical and Automobile Engineering*, 5 (1), 1-5, 2018.
- 10) Sungur B., Topaloglu B., Ozbey M., “Pelet Yakıtlı Yakma Sistemlerinin Isıl Performans ve Emisyon Açısından İncelenmesi”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 59 (693), 64-84, 2018.

B-Ulusal Makale

- 1) Ozdogan M., Sungur B., Namli L., Topaloglu, B., Durmus A., “Rüzgâr Hızlarının Bina Etrafındaki Akışa ve Isı Kaybına Etkisinin Farklı Türbülans Modelleriyle Sayısal İncelenmesi”, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 100, 2015.

C- Uluslararası Bildiriler

- 1) Sungur B., Topaloglu B., “Bir Kompozit Gaz Yakıtın Türbülanslı Difüzyon Alevinin Modellenmesi”, *12. Uluslararası Yanma Sempozyumu*, 24-26 Mayıs, 2012, Kocaeli.

- 2) Kılıç G., Sungur B., Topaloğlu B., “Sıvı Yakıtlı Kazanda Dizel Ve Etanol Yanmasının Nümerik İncelenmesi”, *13. Uluslararası Yanma Sempozyumu*, 09-11 Eylül 2015, Bursa.
- 3) Özdoğan M., Sungur B., Namlı L., Durmuş A., “Comperative Numerical Prediction Of Flow Around A Building By Using Its Two and Three Dimensional Models For Different Wind Velocities”, *International Conference On Energy Systems*, December 23-25, 2015, İstanbul.
- 4) Sungur B., Topaloglu B., Namli L., Ozcan H., “Numerical Investigation of the Effect of Excess Air and Thermal Load Variation in a Liquid Fuelled Boiler”, *Proceedings of the World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT’16)*, April 4–5, 2016, Prague.
- 5) Farah S., Topaloğlu B., Sungur B., Özbey M., Namlı L., “Improvement of a Solid Fuel Boiler Performance by Geometrical Variation of Water Carrying Walls”, *IEESE*, May 2016, Afyonkarahisar.
- 6) Sungur B., Topaloglu B., Ozcan H., Namli L., “A Numerical Study On The Effect Of Conical Turbulators To Heat Transfer Inserted In Smoke Tubes Of A Liquid Fuelled Boiler”, *IEESE*, May 2016, Afyonkarahisar.
- 7) Sungur B., Özdoğan M., Namlı L., Topaloğlu B., “Comperative Investigation Of Micro-Cogeneration Systems”, *2nd International Conference On Advances In Mechanical Engineering*, 10-13 May 2016, İstanbul.
- 8) Sungur B., Topaloglu B., “Pelet Yakıtlı Kazanlarda Yanmada Türbülans Modellerinin Etkisinin İncelenmesi”, *10th International Clean Energy Symposium*, 24-26 October, 2016, İstanbul.
- 9) Sungur B., Topaloglu B., “Pelet Yakıtlı Kazanlarda Farklı Yükleme Koşullarında Yanmanın Nümerik İncelenmesi”, *10th International Clean Energy Symposium*, 24-26 October, 2016, İstanbul.
- 10) Özdoğan M., Sungur B., Topaloglu B., Durmuş A., “Samsun ilinin hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin araştırılması”, *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, 26-28 Ekim 2016, Adana.
- 11) Sungur B., Topaloglu B., Ozcan H., “Numerical analyses of the effect of boiler design on the performance of a liquid fuelled boiler”, *2nd International Conference On Combustion Science and Processes*, 06-08 April, 2017, Barcelona.
- 12) Sungur B., Topaloğlu B., “Duman Borularına Yerleştirilen Konik Türbülatorlerin Optimum Sayısının Nümerik Olarak Belirlenmesi”, *International Conference on Advanced Engineering Technologies*, 21-23 Eylül, 2017, Bayburt.
- 13) Sungur B., Topaloğlu B., “Pelet Yakıtlı Kazanlarda Yanmanın İki ve Üç Boyutlu Modellenmesi”, *International Conference on Advanced Engineering Technologies*, 21-23 Eylül, 2017, Bayburt.
- 14) Sungur B., Topaloğlu B., “Pelet Yakıtlı Kazanlarda Farklı Yükleme Koşullarında Yanmanın Üç Boyutlu Nümerik İncelenmesi”, *2nd International Energy And Engineering Conference*, 12-13 Ekim, 2017, Gaziantep.
- 15) Oğuz B., Topaloğlu B., Sungur B., “Cadde Kanyonlarında Taşıt Emisyonları Dağılımının Nümerik Modellenmesi”, *1st International Symposium on*

Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 02-04 Kasım, 2017, Tokat.

- 16) Taşçı Ö.T., Sungur B., Özbey M., Topaloğlu B., “Pelet Yakıtlı Silindirik Kazan Tasarımı ve Performans Testleri”, *1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 02-04 Kasım, 2017, Tokat.
- 17) Sungur B., Topaloğlu B., “Numerical Investigation of the Effects of Boiler Geometry on Combustion Performance of a Pellet Fuelled Boiler”, *9th International Conference on Trends In Science, Engineering, Technology and Natural Resources*, 19-20 March, 2018, Dubai.
- 18) Sungur B., Topaloğlu B., “Pelet Yakıtlı Kazanda Duman Borularının Yanma Performansına Etkisinin Nümerik İncelenmesi”, *14th International Conference on Combustion*, 25-27 Nisan, 2018, Karabük.
- 19) Sungur B., Topaloğlu B., “Numerical Analysis of the Effect of Turbulators to Heat Transfer of a Pellet Fuelled Boiler”, *1st International Technological Sciences and Design Symposium*, 27-29 June, 2018, Giresun.
- 20) Sungur B., Topaloğlu B., “Investigation of Properties of Pellet Fuels Produced from Wood-Coal Mixtures”, *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, November 30- December 2, 2018, Samsun.

D-Ulusal Bildiriler

- 1) Sungur B., Topaloğlu B., “CH₄/H₂/N₂ Kompozit Gaz yakıtının Türbülanslı Difüzyon Alevinin Modellenmesi”, *19. Ulusal Isı Bilimi Kongresi*, 09-12 Eylül, 2013, Samsun.
- 2) Sungur B., Topaloğlu B., “Alev Geri Dönüslü Duman Borulu Kazanda Gaz Yakıt Yanmasının Modellenmesi”, *19. Ulusal Isı Bilimi Kongresi*, 09-12 Eylül, 2013, Samsun.
- 3) Sungur B., Topaloğlu B., “Alev Geri Dönüslü Duman Borulu Kazanda Sıvı Yakıt Yanmasının Modellenmesi”, *19. Ulusal Isı Bilimi Kongresi*, 09-12 Eylül, 2013, Samsun.
- 4) Özdoğan M., Sungur B., Namlı L., Topaloğlu B., Durmuş A., “Rüzgar Hızlarının Bina Etrafındaki Akışa Ve Isı Kaybına Etkisinin Farklı Türbülans Modelleriyle Sayısal İncelenmesi”, *20. Ulusal Isı Bilimi Kongresi*, 02-05 Eylül, 2015, Balıkesir.
- 5) Sungur B., Topaloğlu B., Namlı L., “Duman Borularına Yerleştirilen Konik Türbülatorlerin Isı Transferine Etkisinin Nümerik İncelenmesi”, *20. Ulusal Isı Bilimi Kongresi*, 02-05 Eylül, 2015, Balıkesir.
- 6) Sungur B., Topaloğlu B., Özbey M., Siyah E.C., “Pelet Yakıtlı Soba ve Kazan Yakma Teknolojileri”, *2. Ulusal Biyoyakıtlar Sempozyumu*, 27-30 Eylül, 2016, Samsun.
- 7) Taşçı Ö.T., Özbey M., Sungur B., Topaloğlu B., “Pelet Yakıtlı Kalorifer Kazan Tasarımı ve Performans Analizi”, *2. Ulusal Biyoyakıtlar Sempozyumu*, 27-30 Eylül, 2016, Samsun.

E- Proje

- 1) “Çok Yakıtlı Kazanlarda Yanma ve Emisyon Oluşumunun Nümerik ve Deneysel Modellenmesi” konulu OMÜ BAP PYO.MUH.1904.12.011 kodlu proje, 2013. Proje yürütücüsü: Doç. Dr. Bahattin TOPALOĞLU, Araştırmacı: Arş. Gör. Bilal SUNGUR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, BAP 1904 kodlu Yüksek Lisans Tezleri Destekleme Programı Projeleri, (Tamamlandı).

