İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİNYİTLERİN DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA HAVA, OKSİJENCE ZENGİN HAVA VE OKSİYANMA ORTAMLARINDA YANMA DAVRANIMLARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Berrin ENGİN

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİNYİTLERİN DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA HAVA, OKSİJENCE ZENGİN HAVA VE OKSİYANMA ORTAMLARINDA YANMA DAVRANIMLARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Berrin ENGİN
(506072005)

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506072005 numaralı Doktora Öğrencisi Berrin ENGİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "LİNYİTLERİN DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA HAVA, OKSİJENCE ZENGİN HAVA VE OKSİYANMA ORTAMLARINDA YANMA DAVRANIMLARININ İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Reha YAVUZ** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hayati OLGUN .....
Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü

Prof. Dr. Hasancan OKUTAN .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Fehmi AKGÜN .....
TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü

Teslim Tarihi : 9 Mayıs 2019

Savunma Tarihi : 21 Haziran 2019

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim ve tez çalışmam boyunca engin bilgisi, değerli görüş ve fikirleri ile bana yol gösteren, yakın ilgisini, her türlü yardım ve desteğini benden esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunmak isterim.

Ayrıca, bu çalışmama değerli fikirleri ile önemli katkılarda bulunan Prof. Dr. Hayati OLGUN, Dr. Ufuk KAYAHAN ve Dr. Serhat GÜL'e teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarda sonsuz destek olan Erdal GÜGÜK ve Hüseyin GÜRKAN'a teşekkür ederim. Deney düzeneğinin kurulmasında katkılarını ve desteğini gördüğüm TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği TÜBİTAK 1007 Kamu Araştırmaları Destek Grubu (KAMAG) tarafından desteklenen 105G023 nolu "Biyokütle ve Biyokütle/Kömür Karışımlarını Dolaşımlı Akışkan Yatakta Yakma Teknolojilerinin Geliştirilmesi" projesi kapsamında kurulmuştur. Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneyler Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından desteklenen "Kömür Karakterizasyonu ve Yanma Davranışlarının İncelenmesi" projesi ve TÜBİTAK ARDEB (Araştırma Destek Programları Başkanlığı) tarafından desteklenen 113M003 nolu "Dolaşımlı Akışkan Yatak Yakma Sisteminde Linyit ve Biyokömürün Oksijence Zengin Ortamda Yakılması" projesi kapsamında edinilen tecrübe sayesinde gerçekleştirilmiştir. Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nde çalışan Sn. Zeki OLGUN ve Sn. Selda KARAOĞUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

İlgi ve desteklerini gördüğüm arkadaşlarıma ve tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek her zaman yaptıklarımın arkasında olan eşim Barış ENGİN, oğullarım Erdem ve Arda ENGİN'e, annem Nazife BAY, babam Ramiz BAY, ablam Çiğdem BAY ŞENKAL'a sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2019 Berrin Engin

(Kimya Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ……. vii
İÇİNDEKİLER ix
KISALTMALAR xi
SEMBOLLER xiii
ÇİZELGE LİSTESİ xv
ŞEKİL LİSTESİ xvii
ÖZET……. xxi
SUMMARY xxiii
1. GİRİŞ….. 1
1.1 Genel 1
1.2 Motivasyon ve Tezin Amacı 2
1.3 Tez Planı 4
2. LİTERATÜR 5
2.1 Dünyada ve Türkiye'de Enerji Kaynakları 5
2.1.1 Dünya enerji kaynakları 5
2.1.2 Türkiye enerji kaynakları 7
2.2 Akışkan Yatak Teknolojisi 9
2.2.1 Akışkan yatakta yakma 10
2.2.1.1 Oksiyanma 11
2.2.1.2 Oksiyanma sistemleri 16
2.2.1.3 Oksiyanma çalışmaları 19
3. DENEYSEL 39
3.1 Kömürler 39
3.2 Kireçtaşı 40
3.3 Yatak Malzemesi (Silisyum Kumu) 41
3.4 Karakterizasyon 41
3.5 Dolaşımlı Akışkan Yatak Yanma Deney Sistemi 42
3.6 Deney Prosedürü 52
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 55
4.1 Kömürlerin Karakterizasyonu 55
4.2 Kireçtaşlarının Karakterizasyonu 71
4.3 Linyitlerin Niteliği-van Krevelen grafiği 72
4.4 Linyitlerin Yanma Süreçlerinin İncelenmesi 75
4.4.1 Linyitlerin Hava Ortamında Yanma Süreci 75
4.4.2 Linyitlerin Oksijence Zengin Havayla Yanma Süreci 126
4.4.3 Linyitlerin Oksiyanma Süreci 142
5. SONUÇLAR 165
KAYNAKLAR 171
EKLER……. 183
ÖZGEÇMİŞ 221

KISALTMALAR

AB28 : Avrupa Birliği'ne üye 28 ülke
ASU : Air Separation Unit
Ar-Ge : Araştırma Geliştirme
AY : Akışkan Yatak
AYT : Akışkan Yatak Teknolojisi
BAY : Basınçlı Akışkan Yatak
BMİDÇS : Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
BLİ : Bursa Linyitleri İşletmesi
BOE : Bazik Oksit Endeksi
CFB : Circulating Fluidized Bed
ÇLİ : Çan Linyitleri İşletmesi
DAY : Dolaşımlı Akışkan Yatak
DBG : Geri Döndürülen Baca Gazı
DT : Deformation Temperature
DTG : Diferansiyel Termogravimetri
ELİ : Ege Linyitleri İşletmesi
EOR : Enhanced Oil Recovery
ER : Equivalence Ratio
ESP : Elektrostatic Precipitator
FGD : Flue Gas Desulphurization
FT : Fluidization Temperature
GELİ : Güney Ege Linyitleri İşletmesi
GLİ : Garp Linyitleri İşletmesi
HFK : Hava Fazlalık Katsayısı
HT : Hemisphere Temperature
ID : Induced Draft
ILİ : Ilgın Linyitleri İşletmesi
KTD : Karbon Tutma ve Depolama
MAM : Marmara Araştırma Merkezi
MSW : Municipial Solid Waste
N : Azot
OY : Oksiyanma
OZH : Oksijence Zengin Hava
PLC : Programmable Logic Controller
PY : Pulverize Yakıcı
RFG : Recycled Flue Gas
SCR : Selective Catalytic Reduction
ST : Softening Temperature
SLİ : Seyitömer Linyitleri İşletmesi
TGA : Termogravimetrik Analiz
TKİ : Türkiye Kömür İşletmesi
TÜBİTAK : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

UM **:** Uçucu Madde
YLİ **:** Yeniköy Linyitleri İşletmesi

SEMBOLLER

C	**:** Karbon
CO	**:** Karbon monoksit
CO_2	**:** Karbon dioksit
H	**:** Hidrojen
H_2O	**:** Su buharı
kW	**:** kilowatt
N	**:** Azot
NOx	**:** Azotoksitler ($NO+NO_2$)
S	**:** Kükürt
SO_2	**:** Kükürt dioksit
O	**:** Oksijen
MW	**:** Megawatt

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Türkiye birincil enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı. **8**
Çizelge 2.2 : Dünyadaki halen çalışmakta ve planlanmakta olan bazı oksi-pulvarize ve oksi-DAY test sistemleri. **21**
Çizelge 3.1 : Yakma deneylerinde kullanılan kömür örnekleri kodları ve sağlandığı kaynaklar. **40**
Çizelge 3.2 : SO_2 tutma deneylerinde kullanılan kireçtaşı örneklerinin kodları ve $CaCO_3$ içerikleri. **41**
Çizelge 3.3 : Yakma deneylerinde kullanılan yatak malzemesi özellikleri. **41**
Çizelge 3.4 : Kömürlerin ve adsorbanların karakterizasyonunda kullanılan yöntemler ve cihazlar. **42**
Çizelge 4.1 : Kömür örneklerinin kısa analizi ve ısıl değerleri (orijinal temelde). ... **56**
Çizelge 4.2 : Kömür örneklerinin kısa analizi ve ısıl değerleri (kuru temelde). **56**
Çizelge 4.3 : Kömürlerin elementel analizi sonuçları (kuru temelde). **57**
Çizelge 4.4 : Kömürlerin kül içerik analizleri. **59**
Çizelge 4.5 : Linyit örneklerinin kül ergime sıcaklıkları. **61**
Çizelge 4.6 : L3 kömürünün farklı yanma atmosferlerinde Coats-Redfern yöntemi ile hesaplanan kinetik parametreleri. **69**
Çizelge 4.7 : L7 kömürünün farklı yanma atmosferlerinde Coats-Redfern yöntemi ile hesaplanan kinetik parametreleri. **70**
Çizelge 4.8 : L3 kömürünün farklı yanma atmosferlerinde modelden bağımsız yöntem ile hesaplanan aktivasyon enerjileri (Ea) (kJ/mol). **70**
Çizelge 4.9 : L7 kömürünün farklı yanma atmosferlerinde modelden bağımsız yöntem ile hesaplanan aktivasyon enerjileri (kJ/mol). **71**
Çizelge 4.10 : SO_2 tutma deneylerinde kullanılan kireçtaşı örneklerinin $CaCO_3$ içerikleri (%ağ., orijinal temelde). **71**
Çizelge 4.11 : Çanakkale/Çan kireçtaşı (KT1) örneğinin içerik analizi (%ağ., orijinal temelde). **71**
Çizelge 4.12 : Deneysel çalışmalarda kontrol edilen ve ölçülen parametreler ile araştırılan konular. **75**
Çizelge 4.13 : Havayla yanma deneylerinin koşulları. **76**
Çizelge 4.14 : Havayla yakma deneylerinde sıcaklık dağılımının ünifomluğu ve güvenlik payı toleransı ($\Delta T_{güvenlik}$), (HFK=1.3±0.02). **88**
Çizelge 4.15 : Linyitlerin NOx emisyonları ve O/N oranları. **105**
Çizelge 4.16 : Havayla yanma sürecinde baca gazlarındaki SO_2'i tutma koşulları ve SO_2 tutma oranları. **114**
Çizelge 4.17 : Türkiye'de enerji santrallerinde uygulanan emisyon sınırları **117**
Çizelge 4.18 : Avrupa Birliği'nde enerji santrallerinde uygulanan emisyon **s**ınırları **117**

Çizelge 4.19 : Çalışmada kullanılan linyitlerin dolaşımlı akışkan yatakta havayla yakma sürecinde ortaya çıkan emisyonların Türk ve AB yasalarında enerji santralleri için düzenlenen emisyon değerleriyle kıyaslanması. **119**
Çizelge 4.20 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin havayla ve oksijence zengin havayla yapılan deneylerin koşulları. **128**
Çizelge 4.21 : Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin oksiyanma deneylerinin koşulları. **143**
Çizelge 4.22 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin havayla yanma, oksijence zengin havayla yanma ve oksiyanma koşullarında, yatak içi maksimum **s**ıcaklık gradyeni (ΔT_{AY}) ve güvenlik marjları ($\Delta T_{güvenlik}$). **145**
Çizelge 4.23 : Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin havayla yanma, oksijence zengin havayla yanma ve oksiyanma süreçlerinde ortaya çıkan NOx emisyonları. **152**
Çizelge 4.24 : Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin havayla yanma, oksijence zengin havayla yanma ve oksiyanma süreçlerinde ortaya çıkan SO_2 emisyonları. **157**
Çizelge 4.25 : Orhaneli (L15) ve Soma (L19) kömürlerinin havayla yanma, oksijence zengin havayla yakma ve oksiyanma süreçlerinde ortaya çıkan emisyonların Türk ve AB yasalarında enerji santralleri için düzenlenen emisyon değerleriyle kıyaslanması. **161**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Dünyada birincil enerji arzındaki gelişim **6**
Şekil 2.2 : Dünya birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı..... **6**
Şekil 2.3 : Türkiye kömür sahaları ve ortalama rezerv miktarları. **8**
Şekil 2.4 : Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı. **9**
Şekil 2.5 : Yatak basınç düşüşü ve yüzeysel hız arasındaki ilişki. **10**
Şekil 2.6 : Oksiyanma teknolojisine dayalı tesisler **13**
Şekil 2.7 : Oksiyanma süreci. **14**
Şekil 2.8 : Tipik bir oksiyanma güç santralinin mümkün konfigürasyonları. HAÜ : Hava ayırma ünitesi, SCR: seçimli katalitik indirgeme reaktörü (DeNOx), ESP: Elektrostatik çöktürücü, FGD: kükürt giderme ünitesi……**18**
Şekil 2.9 : Kömür yanması sırasında yakıta bağlı azotun NO, N_2O ve N_2'a dönüşüm mekanizması **23**
Şekil 2.10 : Değişik yakma atmosferlerinde kireçtaşıyla SO_2 tutulmasının sıcaklık ile değişimi..... **29**
Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan laboratuvar ölçekli DAY yakma sistemi. **43**
Şekil 3.2 : DAY yakma sistemi. **45**
Şekil 3.3 : DAY yakma sisteminde ölçüm noktaları (dağıtıcı plakadan itibaren). **46**
Şekil 3.4 : Saf oksijen besleme hattı. **47**
Şekil 3.5 : Baca gazının geri dönüş hattı. **48**
Şekil 3.6 : Kül boşaltma ünitesi şematik gösterimi. **50**
Şekil 4.1 : L3 kömürünün 10 °C/dakika ısıtma hızında hava ve oksiyanma koşullarında termogravimetrik analiz deneylerinde elde edilen yanma profilleri. a) TG, b) DTG eğrileri. **64**
Şekil 4.2 : L7 kömürünün 10 °C/dakika ısıtma hızında hava ve oksiyanma koşullarında termogravimetrik analiz deneylerinde elde edilen yanma profilleri. a) TG, b) DTG eğrileri. **65**
Şekil 4.3 : L3 kömürünün %21 O_2- %79 CO_2 atmosferinde oksiyanma davranımının ısıtma hızı ile değişimi. a) TG, b) DTG eğrileri. **67**
Şekil 4.4 : L7 kömürünün %21 O_2- %79 CO_2 atmosferinde oksiyanma davranımının ısıtma hızı ile değişimi. a) TG, b) DTG eğrileri. **68**
Şekil 4.5 : Linyitlerin van Krevelen grafiği. **73**
Şekil 4.6 : Linyitlerin alt ısıl değerlerinin (a) O/C (b) H/C oranı ile değişimi. **74**
Şekil 4.7 : L1 linyitinin (Tunçbilek lavvar) havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **79**
Şekil 4.8 : L2 linyitinin (Ömerler lavvar) havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **80**
Şekil 4.9 : L12 (Tınaz) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **82**
Şekil 4.10 : L18 linyitinin (Ilgın) yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **83**

Şekil 4.11 : Linyitlerin yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağındaki sıcaklık profilleri. **86**
Şekil 4.12 : Linyitlerin akışkan yatak havayla yanma sürecinde sıcaklıklık dağılımları ve yanma kararlılığı. **89**
Şekil 4.13 : DAY yakma sisteminde güvenlik marjının kül deformasyon başlangıç sıcaklığı ile değişimi. **91**
Şekil 4.14 : Kömür küllerinin başlangıç deformasyon ve ergime sıcaklığının bazik oksit içeriği ile değişimi. **93**
Şekil 4.15 : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan CO emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L1, b) L2, c) L12, d) L18**.....** **94**
Şekil 4.15 (devam) : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan CO emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L1, b) L2, c) L12, d) L18. ..... **95**
Şekil 4.16 : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan CO emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). **97**
Şekil 4.17 : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L12, b) L18, c) L5, d) L2. ..... **98**
Şekil 4.17 (devam) : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L12, b) L18, c) L5, d) L2. ..... **99**
Şekil 4.17 (devam) : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L12, b) L18, c) L5, d) L2. ..... **100**
Şekil 4.18 : Linyitlerin hava ortamındaki yanma süreçlerinde ortaya çıkan emisyonlar (kuru temelde, %6 O_2) a) NOx emisyonu, b) N_2O emisyonu. **102**
Şekil 4.19 : Linyitlerin yanması sürecinde ortaya çıkan NOx emisyonlarının (kuru temelde, %6 O_2) linyitlerin azot içerikleriyle değişimi (%N kuru külsüz temelde verilmiştir.) **104**
Şekil 4.20 : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan SO_2 emisyonları (kuru temelde, %6 O_2 (a) L6, (b) L12, (c) L17, (d) L18. ..... **107**
Şekil 4.20 (devam) : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan SO_2 emisyonları (kuru temelde, %6 O_2 (a) L6, (b) L12, (c) L17, (d) L18. ..... **108**
Şekil 4.21 : Linyitlerin yanması sürecinde ortaya çıkan SO_2 emisyonlarının hava fazlalık katsayısıyla değişimi (kuru temelde, %6 O_2)**.....** **109**
Şekil 4.22 : Linyitlerin yanma sürecinde SO_2 emisyonu (kuru temelde, %6 O_2)**....** **110**
Şekil 4.23 : Linyitlerin dolaşımlı akışkan yatakta havayla yanma sürecindeki yanma verimleri. **125**
Şekil 4.24 : Linyitlerin dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde yanma verimleriyle alt ısıl değerleri arasındaki ilişki. **126**
Şekil 4.25 : Hava ve oksijence zengin hava ortamında akışkan yatakta sıcaklık dağılımları, a) Orhaneli kömürü, havayla yakma, b) Soma kömürü, havayla yakma, c) Orhaneli kömürü, oksijence zengin hava ortamında yakma, d) Soma kömürü, oksijence zengin hava ortamında yakma.. **132**
Şekil 4.25 (devam) : Hava ve oksijence zengin hava ortamında akışkan yatakta sıcaklık dağılımları, a) Orhaneli kömürü, havayla yakma, b) Soma kömürü, havayla yakma, c) Orhaneli kömürü, oksijence zengin hava ortamında yakma, d) Soma kömürü, oksijence zengin hava ortamında yakma. **133**

Şekil 4.26 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde açığa çıkan CO emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19)..... **136**
Şekil 4.27 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde açığa çıkan CO_2 emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19)..... **137**
Şekil 4.28 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19). . **139**
Şekil 4.29 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde açığa çıkan SO_2 emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19)..... **141**
Şekil 4.30 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta, oksiyanma koşullarında gerçekleşen yanma sürecinde sıcaklık dağılımı, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19)..... **144**
Şekil 4.31 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan CO emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19). **147**
Şekil 4.32 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan CO_2 emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19). **148**
Şekil 4.33 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19). **149**
Şekil 4.33 (devam) : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19)..... **150**
Şekil 4.34 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan SO_2 emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19). **155**
Şekil A.1 : Lab DAY yakma sistemi su/hava hattı PID diyagramı. **185**
Şekil A.2 : Lab DAY yakma sistemi baca gazı hattı PID diyagramı. **186**
Şekil A.3 : Yakıt/adsorban besleme sistemi. **187**
Şekil A.4 : Lab DAY sistemi kontrol arayüzü..... **187**
Şekil B.1: L3 (Kütahya-Ayvalı pano) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **189**
Şekil B.2: L4 (Kütahya-Höyükaltı krible) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **190**
Şekil B.3: L5 (Kütahya-S48 Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **191**
Şekil B.4: L6 (Manisa-İmbat Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **192**
Şekil B.5: L7 (Manisa-İmbat araürün) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **193**
Şekil B.6: L8 (Manisa-İmbat tüvenan) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **194**
Şekil B.7: L9 (Manisa-Kısrakdere) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **195**
Şekil B.8: L10 (Manisa-Dereköy Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **196**

Şekil B.9: L11 (Muğla-Eskihisar) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **197**
Şekil B.10: L13 (Muğla-Hüsamlar krible) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **198**
Şekil B.11: L14 (Muğla-İkizköy Işıkdere) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **199**
Şekil B.12: L15 (Bursa-Orhaneli) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **200**
Şekil B.13: L16 (Bursa-Keles) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **201**
Şekil B.14: L17 (Çanakkale-Çan) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **202**
Şekil B.15: L19 (Manisa-Soma) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri. **203**
Şekil C.1: L3 (Kütahya-Ayvalı pano) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **205**
Şekil C.2: L4 (Kütahya-Höyükaltı krible) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **206**
Şekil C.3: L5 (Kütahya-S48 Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **207**
Şekil C.4: L6 (Manisa-İmbat Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **208**
Şekil C.5: L7 (Manisa-İmbat araürün) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **209**
Şekil C.6: L8 (Manisa-İmbat tüvenan) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **210**
Şekil C.7: L9 (Manisa-Kısrakdere) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **211**
Şekil C.8: L10 (Manisa-Dereköy Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **212**
Şekil C.9: L11 (Muğla-Eskihisar) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **213**
Şekil C.10: L13 (Muğla-Hüsamlar krible) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **214**
Şekil C.11: L14 (Muğla-İkizköy Işıkdere) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **215**
Şekil C.12: L15 (Bursa-Orhaneli) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **216**
Şekil C.13: L16 (Bursa-Keles) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **217**
Şekil C.14: L17 (Çanakkale-Çan) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **218**
Şekil C.15: L19 (Manisa-Soma) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar. **219**

LİNYİTLERİN DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA HAVA, OKSİJENCE ZENGİN HAVA ve OKSİYANMA ORTAMLARINDA YANMA DAVRANIMLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada linyit kömürlerinin dolaşımlı akışkan yatakta (DAY) *hava* ile, *oksijence zenginleştirilmiş hava* (OZH) ile ve *oksiyanma* (OY) koşullarında yanma davranışları incelenmiştir. Havayla yapılan deneylerde, hava fazlalık katsayısı (HFK) 1.1 -1.4 (±0.02) aralığında seçilmiştir. Oksijence zengin havayla yapılan yanma deneylerinde havadaki oksijen oranı %21-28 arasında değişmiştir. Oksiyanma çalışmaları ise geri döndürülen baca gazları (DBG)+ O_2 karışımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Türkiye'nin değişik bölgelerinden toplanmış toplam 19 adet linyit kömürü kullanılmıştır. Bu kömürler L1-L19 olarak kodlanmıştır. Havayla yapılan yakma çalışmalarında bütün kömürler, oksijence zengin hava ile yakma ve oksiyanma çalışmalarında ise ikişer kömür kullanılmıştır. Her üç yanma rejimi deneylerinde kullanılan kömürler *Bursa-Orhaneli* (L15) ve *Manisa-Soma* (L19) bölgelerinden alınan kömürlerdir. Yanma deneyleri 30 kW termal kapasitesindeki dolaşımlı bir akışkan yatak yakma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sisteme bağlı bir ölçme ve kontrol ünitesi vasıtasıyla deneyler boyunca, sistem içerisinde değişik seviyelerdeki noktalarda sıcaklık ve basınç değişimleri ve hat üstü (on-line) çalışan iki gaz analiz sistemi kullanılarak baca gazı emisyonları tüm deneyler boyunca sürekli olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Hava ve yakıt besleme debileri yine bu sistem vasıtasıyla ayarlanmıştır. Kullanılan kömürler Van Krevelen grafiğinde linyitleri tanımlayan H/C (0.08-0.12) ve O/C (0.20-0.35) sınırları içerisinde kalmakta, ancak oldukça geniş bir dağılım göstermektedir.

Kömürlerin yanma süreçleri yatışkın koşullara ulaşıldıktan sonra, yanma stabilitelerini test etmek amacıyla bu koşullarda uzun süre (>8 saat) devam ettirilmiştir ve herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır. Havayla gerçekleştirilen yanma sürecinde en düşük sıcaklıklar dağıtıcı elek civarında, en yüksek sıcaklıklar ise kömür besleme noktasının üstündeki bölgede ölçülmüştür. Benzer bir durum oksijence zengin havayla ve oksiyanma koşullarında gerçekleşen yanma deneylerinde de geçerlidir. Hava fazlalık katsayısındaki değişim sıcaklık profilinde önemli bir değişiklik yaratmamıştır. Ancak sıcaklık profili yanma ortamı tarafından etkilenebilmektedir. Oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma sürecinde yüksek oksijen oranlarında yanma yoğunluğunun, havayla yanmaya kıyasla, daha alt bölgelere kaydığı görülmüştür. Sıcaklık profilinin üniformluk derecesini belirlemek için temel alınan ve yakıcıda ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklıklar arasındaki farkı gösteren ΔT_{AY}, havayla yanma sürecinde biri hariç diğer tüm kömürler için 30 - 80 ^{o}C gibi görece düşük olmuş ve dar bir aralıkta değişmiştir. Kömürlerin başlangıç deformasyon sıcaklıkları temel alındığında, güvenli yanma açısından en hassas ve en güvenli olan kömürler sırasıyla Kütahya -Ayvalı pano (L3) ve Çanakkale-Çan (L17) linyitleri olmuştur.

Havayla yanma sürecinde NOx ve SO_2 gibi ana kirleticiler hava fazlalık katsayısı (HFK) tarafından etkilenmektedir. HFK artıkça NOx emisyonlarında bir artma eğilimi ortaya çıkmıştır. NOx emisyonu, genel olarak 100-400 mg/Nm^3 aralığında değişmiştir. Kömürlerin %30'u için ise emisyonlar 200 mg/Nm^3 altında kalmıştır. Kömürlerin yanma sürecinde SO_2 emisyonları L7, L8 ve L19 haricindeki kömürler için 1100-20000 mg/Nm^3 ölçülmüş olup geniş bir aralıkta değişmiştir. L7, L8 ve L19 linyitlerinin yanma sürecinde baca gazlarındaki SO_2 miktarı ölçülmeyecek derecede düşük olmuştur. En yüksek SO_2 emisyonları en yüksek yanabilir kükürt içeriğine sahip olan L17 (S_{yanar}: %6.15) ve L18 (S_{yanar}: %3.23) linyitlerinin yanması sırasında ölçülmüştür. Genel olarak SO_2 emisyonu kömürlerin yanar kükürt içerikleriyle uyumlu olmuştur. Yani kükürt miktarı artıkça SO_2 emisyonları artmıştır. Bu kirleticilerin birim enerji başına ölçülen miktarları, yanma rejimi tarafından da etkilenebilmektedir. Her üç yanma rejiminde kullanılan iki kömür, Bursa-Orhaneli (L15) ve Manisa-Soma (L19) için ölçülen NOx emisyonları (mg/MJ) hava ve oksijence zengin havayla yanma rejimlerinde göreceli olarak bir birbirine yakın olurken, oksiyanma koşullarında önemli ölçülerde düşmüştür. Bu düşme Orhaneli ve Soma linyitleri için, uygulanan yanma koşullarında, sırasıyla %70-80 ve %50-60 aralığında değişmiştir. Benzer bir durum SO_2 emisyonları için de geçerlidir. Oksiyanma koşullarında, Orhaneli kömürünün yanması sırasında gözlenen SO_2 emisyonları (mg/MJ), havayla yanmaya göre yaklaşık % 58, OZH ile yanmaya göre ise yaklaşık %60 daha düşük olmuştur. Soma linyiti için ise SO_2 emisyonu hiçbir koşulda ölçülecek seviyelere çıkmamıştır. Kömürlerin yanma verimi ise %85-95 aralığında değişmiştir

Baca gazları geri döndürülerek kömürlerin oksiyanma süreci başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte baca gazlarındaki CO_2 oranı O_2/DBG karışımındaki oksijen oranı ile hızla yükselerek kuru temelde %96'ya kadar çıkarılabilmiştir.

INVESTIGATION OF AIR, OXYGEN-ENRICHED AIR AND OXYCOMBUSTION CHARACTERISTICS OF LIGNITES IN CIRCULATING FLUIDIZED BED

SUMMARY

Excessive dependency on imported fossil fuels is a serious threat to the energy security of Turkey. Turkey still imports up to 80% of her yearly energy needs which is a heavy burden on her national budget. Lignite reserves are one of the major energy resources of the country. The currently determined reserves are about 15 billion tons and this figure is expected to increase as the new reserves are discovered in the recent explorations. However, the vast majority of these lignites, low calorific values, high ash, moisture and sulfur contents, are classified as low quality coal according to the global criteria and can have significant environmental impacts when are used to generate energy. Therefore, the clean and efficient technologies are required for a cleaner energy production from these coals. Fluidized bed combustion technology (FBCT) is an advanced technology which has been widely studied and used in power generation based on fossil fuels. Research is still going on this technology, however, this technology is open to improvement for more efficient and cleaner burning of low grade and multiple fuels, including lignites and various biomasses. Although the studies on the fluidized bed combustion technology in Turkey date back to 1980s, they have mostly been confined to laboratory-scale and bubbling fluidized bed (BFB) combustion and remained limited. Similarly, research on the combustion Turkish lignite in the circulating fluidized bed (CFB) also are very limited and did not produce suitable data that can be used for development of technology and design of the pilot- and industrial-scale combustor design. On the other hand, recently the focus of the research and development activities in power generation based on the coal has shifted to the oxygen-enriched combustion and the oxyfuel combustion aiming at combining power generation and tackling of CO_2 emission problem. In Turkey, there have been few studies on oxygen-enriched and oxyfuel combustion of coal and biomass. Most of them, however, were conducted by using TGA method on microgram scales. Therefore, there is need for research on the CFB combustion of Turkish lignites under air, oxygen-enrich air and oxyfuel combustion conditions in order to obtain data that can be used for design of these system and contribute to literature in the field.

In this study, the circulating fluidized bed combustion behavior of Turkish lignites in the air, the oxygen-enriched air and the oxyfuel combustion environments was investigated. Nineteen lignite samples taken from the major lignites reserves at different regions of Turkey were used. All coals were supplied by Turkish Coal Enterprises (TKI). They were designated as L1-L19. All of them were used in the air combustion and two of them were also used in the oxygen-enriched and oxyfuel combustion experiments. The combustion experiments were conducted in a circulating fluidized bed combustion system. It was consisted of a combustor, the fuel, sorbent and gas feeding units, the flue gas line, the ash removal, the gas recirculating, the gas analysis and the control units and had a 30 kW thermal capacity.

Combustion/fluidization air was supplied by an air blower, oxygen was supplied from oxygen cylinders and flue gas was recycled by recirculation line and feed to the combustor through distributor plate. An induce fan attached to the flue gas line was used to provide a slightly negative pressure in the combustor. All air was fed to combustor as primary air without air staging. Temperature and pressure at different levels along the axis of the combustor and downcomer were measured. Similarly, along the courses of combustion experiments, the flue gas analyses were continuously done via two on-line gas analysis equipment. The flow rates of fuel, adsorbent, air, oxygen and carbon dioxide were measured and adjusted by using control system. All data obtained from measurements were recorded and saved in a computer attached to control unit.

In the air-combustion experiments, equivalence ratio was chosen in the range of 1.1-1.4 (±0.02). Oxygen ratio in the air was changed in the range of 21-28% in the oxygen-enriched air combustion experiments. Oxyfuel combustion experiments were performed by mixtures of the recycled flue gases and oxygen.

All coal samples were characterized by using the related appropriate standard analysis methods including proximate, ultimate, calorific and ash analyses, for their fuel and ash characteristics. Results showed that coal samples were of highly diverse nature. On the original basis, their approximate analyses yield:14-37% moisture, 20-40% volatile matter, 6-56% ash, 4-40% fixed carbon. Ultimate analyses: 20-70% carbon, 1.84-4.74% hydrogen, 0.69-2.44% nitrogen and 0.7-5.7% sulphur. The lower calorific values (LCV) varied in range of 5-22 MJ/kg and 6-27 MJ/kg on the original and the dry basis, respectively. 42% of the coal had LCV less than 15 MJ/kg on dry basis. The H/C and O/C ratios of coals varied in the range 0.042-0.083 and 0.08-0.38, respectively. Therefore, coal samples mostly were in O/C ratio range specified for lignites in the Van Krevelen graph, but highly scattered. Only two coals (L1 and L2) remained out of lignite O/C ratio range in the graph. Almost all coals, however were out of the H/C zone which was specified as lignite in the same graph. On average, the combustion of coals lasted more than 8 hours after steady-state was attained. All coals maintained a stable and steady combustion and no problem (such as sintering and agglomeration) was observed under the operating conditions applied. In the combustion process with air, the lowest temperatures were measured in the vicinity of the distributor plate and the highest temperatures were measured in the region above the coal feed point. In a typical profile, the temperature increased with height from the distributor plate, reached a maximum level in the region at about 100-250 cm from the distributor plate and then gradually and slightly decreased toward to the exit of the combustor. The temperature difference (ΔT_{AY}) between the regions where the highest and the lowest temperatures were measured was used to quantify the uniformity degree of the temperature profile in the combustor. In the air combustion ΔT_{AY} varied in the range of 30-80°C for 18 out of 19 lignites. ΔT_{AY} was slightly higher in the oxygen-enriched and oxyfuel combustion of two coals which burned in tree environments.

The operating safety of the combustor burning lignites was evaluated based on difference between the initial deformation temperature and the maximum temperature coal particles attained (safety margin) during combustion. In the air combustion, the operating safety margins of coals varied in a wide range of 88-562 °C. Kütahya-Ayvalı pano (L3) and Çanakkale-Çan (L17) had the lowest and the highest safety margins, respectively. For the two coals, Orhaneli (L15) ve Soma (L19), test in three combustion environments, the safety margin varied in descending order as: air combustion > oxygen enriched combustion > oxyfuel combustion.

The main emissions such as NOx and SO_2 are affected by equivalence ratio (ER) in the air combustion. As ER increased, NOx emissions also tended to increase. Generally, the NOx emission varied in the range of 100-400 mg/Nm3. For 30% of the coals, emissions were below 200 mg/Nm^3. In the combustion process of coals, SO_2 emissions mostly were as high as 1,100-20,000 mg/ Nm^3 and changed over a wide range except three coals. SO_2 emissions in the flue gases were too low to be measured during the combustion of three lignites, namely L7, L8 and L19. The highest SO_2 emissions in flue gases were measured, as may be expected, for the coals with the highest contents of combustible sulfur, such as L17 (S_{comb}: 6.15%) and L18 (S_{comb}: 3.23%). In general, the SO_2 emissions were o consistent with the combustible sulfur content of the coals. In other words, SO_2 emissions increased as the amount of combustible sulfur in the coals increased or vice versa. The emissions of pollutants per unit energy generated also affected by combustion regimes. The NOx emissions (mg/MJ) measured from combustion of two coals, Bursa-Orhaneli (L15) and Manisa-Soma (L19) which were tested in three combustion regimes, were similar in the air and the oxygen-enriched air combustion regimes, but significantly decreased under the oxyfuel combustion conditions. Decrease in NOx emissions were about 70-80% and 50-60% in the oxyfuel combustion of Bursa-Orhaneli (L15) and Manisa-Soma (L19), respectively, in comparison to that of the air combustion under the conditions applied. A similar trend is valid also for SO_2 emissions. In oxyfuel combustion atmosphere, SO_2 emissions per unit energy (mg/MJ) from Orhaneli lignite (L15) were about 58% lower than of the air combustion and about 60% lower than that of the oxygen-enriched combustion. For Soma lignite, the SO_2 emissions have never been high enough to be measured under conditions applied.

In the air-combustion experiments, different limestone samples were used as adsorbents in order to retain the sulfur oxides in-situ (in bed) formed during combustion of lignites in the circulating fluidized bed. Different Ca/S ratios were determined and SO_2 retaining efficiencies were calculated.

Combustion efficiencies calculated varied in the range of 85-95%.

The oxyfuel combustion processes of coals have been successfully carried out by recirculation of flue gases (RFG). During the course of oxyfuel combustion of coals, the CO_2 concentration in the flue gases rapidly increased with increase in oxygen concentration in the O_2/RFG mixture and reached to 96% on dry basis.

1. GİRİŞ

1.1 Genel

Enerji elde etmek için fosil yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan sera gazı emisyonları çoğunlukla karbondioksit gazının yoğun biçimde atmosfere salınımı, küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Küresel iklim değişikliği mücadelesi kapsamında karbon emisyonlarının yakalanması, tutulması ve depolanması teknolojileri konularında çok yönlü araştırmalar yapılmaktadır. Karbondioksit yakalama ve karbondioksit depolama teknikleri karbon tutulumu ve depolanması (KTD) (carbon capture and storage-CCS) olarak anılmaktadır. Açığa çıkan karbondioksiti yakalayıp depolamak ve muhafaza etmek mümkündür. Böylece sera gazı yayılımının büyük oranda azaltılması ve iklim değişikliklerinin yavaşlatılması mümkün olabilmektedir.

Endüstride ve Ar-Ge merkezlerinde yapılan karbondioksit tutma çalışmaları başlıca üç başlık altında toplanmaktadır (Ansolobehere ve diğ, 2007):

1. Yanma öncesi,

2. Yanma sonrası ve

3. Oksiyanma

Söz konusu teknolojiler henüz gelişme aşamasındadır, ancak ileride uygulamaya geçme potansiyeli taşımaktadırlar. Bu teknolojilerden, bu çalışmanın da bir parçası olan oksiyanma (oxy-fuel combustion) teknolojisi son yıllarda öne çıkmış bulunmaktadır. Yanma başlıca üç şekilde gerçekleştirilmektedir:

1. Havayla yanma (Air-combustion)

2. Oksijence zengin havayla yanma (Oxygen-enriched air)

3. Oksiyanma (Oxy-fuel combustion)

Havayla yanma çok uzun süreden beri kullanılmakta olan klasik yanma yöntemidir. Bu yöntemde yanma hava (%21 O_2 / %79 N_2) ortamında gerçekleşmektedir. Oksijence

zengin havayla yanmada, yanma oksijen oranı artırılmış havayla gerçekleştirilmektedir. Bunun için yakma havasına ayrıca belirli miktarlarda oksijen eklenmektedir. Oksiyanmada ise yakıtlar saf oksijen ortamında veya O_2/CO_2 ortamında yakılmaktadır. Uygulamada, oksiyanma süreci, geri döndürülen baca gazlarının (DBG) oksijenle karıştırılarak (O_2/DBG) yanma odasına gönderilmesi ile gerçekleşmektedir. Bunun için kısmen geri döndürülen baca gazlarına oksijen eklenmektedir. Bu süreçte ortamda azot olmadığı için baca gazlarındaki CO_2 oranı %90'lara kadar çıkmaktadır. Bu da CO_2'in değişik yöntemlerle tutulması ve depolanması imkanını sağlamaktadır. Baca gazlarının geri döndürülmesi sıcaklıkların kararlı halde kalmasına da yardımcı olmaktadır.

Oksiyanma konusunda yapılan çalışmalar çoğunlukla oksi pulverize kömür yakma ile ilgilidir. Bu çalışmalar oksiyanma teknolojisinin hâlihazırda kurulu bulunan termik santrallere adaptasyonunun (retrofit) mümkün olabileceğini göstermiştir (Jia ve diğ, 2007).

Pulverize sistemlerde yapılan çalışmaların yanısıra, son yıllarda akışkan yatakta oksiyanma konusuna ilgi artmaktadır. Akışkan yatak yakma teknolojisi kömür, kok, katı şehir atıkları (MSW), odun ve diğer biyokütleler gibi çok farklı özelliklere sahip yakıtları kullanabilme esnekliğine sahiptir. Akışkan yatak yakma sistemi; yakıt esnekliği, düşük NOx emisyonları, çeşitli sorbentlerle (kireçtaşı, dolomit, vb.) yanma sırasında SO_2'i tutma gibi üstünlüklere sahiptir (Tan ve diğ, 2012).

1.2 Motivasyon ve Tezin Amacı

Türkiye enerji açısından önemli ölçüde *dış kaynaklara bağımlı* bir ülkedir. Halen enerji ihtiyacını *%80'e varan oranlarda ithal* etmektedir. Öte yandan ülkenin en önemli ve büyük enerji kaynaklarından bir tanesi günümüzdeki tespit edilmiş rezervleri yaklaşık *18 milyar ton* olan, ancak devam etmekte olan aramalara paralel olarak daha da artması beklenen *linyit kaynaklarıdır*. Ancak bu linyitlerin büyük çoğunluğu küresel ölçütlere göre *düşük kaliteli* kömürler sınıfında yer almaktadır ve enerji üretmek amacıyla kullanıldıklarında *önemli çevresel etkileri* söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle bu kömürleri enerji kaynağı olarak değerlendirirken uygun ve temiz teknolojilerin kullanılması gerekmektedir. Bu teknolojilerden bir tanesi *akışkan yatak teknolojisidir* (AYT). *Türk linyitlerinin akışkan yatak* yanma

süreçlerinin özelliklerinin belirlenmesi ve uygun bir AYT geliştirilmesi konusunda yapılan *çalışmalar çok sınırlı* kalmıştır. Dolayısıyla bu alanda ve Türk kömürleriyle ilgili *önemli bir boşluk* bulunmaktadır.

Akışkan yatak teknolojisinin tarihi 1930'lara kadar gitmesine karşın, akışkan yatakta yakma konusundaki çalışmalar 1970'lerde hız kazanmış ve 1980'lerde iyice yoğunlaşmıştır. Teknolojik gelişmeler ise çeşitli aşamalardan geçerek günümüzde ticari aşamaya ulaşmıştır. Bununla birlikte günümüzün *çevresel gerçekleri*, küresel düzeyde *çevresel normların* gittikçe daha sınırlayıcı hale gelmesi, *atmosferdeki CO_2 seviyesinin* iklim değişikliklerinin radikal şekilde ve geri dönülmez şekilde değiştirebilecek seviyelere yaklaşması, halen kullanılmakta olan enerji sistemlerinin daha da iyileştirilmesini ve/veya yeni teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu durum akışkan yatak teknolojisi için de geçerlidir. Akışkan yatak teknolojisinde son yıllarda ortaya çıkan en büyük gelişmelerden bir tanesi bu teknolojinin *oksiyanma* teknolojisiyle birleştirilmesidir. Bu yeni teknoloji *oksi-akışkan yatak teknolojisi* olarak tanımlanabilir. Böylece, kömürleri kullanarak enerji (elektrik) üretimini ve CO_2'i tutmayı bir arada gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Bu durum günümüzde kömürden güç üretimi önündeki en büyük problemlerden birinin çözülmesi anlamına gelebilir. Öte yandan oksiyanma teknolojisi henüz gelişmekte olan bir teknolojidir ve günümüzde pilot ölçekte/demostrasyon uygulamalar aşamasına ulaşmıştır. Bütün dünyada son yıllarda bu konuda hem laboratuvar hem pilot ölçeklerde yoğun bir çalışma devam etmektedir. Türkiye'de ise *oksiyanma* konusunda yapılan *çok az* çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmaların ise hemen hemen tümü termogravimetri cihazları kullanılarak miligram mertebesinde yakıtlarla yapılan çalışmalardır ve teknolojinin gelişmesine katkı sağlayacak nitelikte değildir. Dolayısıyla *Türkiye'de* bu konuda tam bir *boşluk* bulunmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı; Türk linyitlerinin *dolaşımlı akışkan yatakta* hava, *oksijence zengin hava* ve *oksiyanma* koşullarında yanmalarını incelemektir. Bu çerçevede çalışmada ülkemiz linyitlerini mümkün olduğu ölçüde geniş bir şekilde kapsayan ve istatistiksel olarak anlamlı verilerin üretildiği sistematik bir çalışmanın gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Böylece konuyla ilgili evrensel bilgi birikimine ve ülkemizdeki linyitlerin akışkan yatakta yanması konusunda mevcut *bilgi boşluğunun* doldurulmasına *katkıda* bulunulmuş ve ülkemiz kömür kaynaklarına uygun bir akışkan *yatak teknolojisinin* geliştirilmesi için *girdi* sağlanmış olacaktır. Deneysel

çalışmalarda 30 kW termal kapasitede bir dolaşımlı akışkan yatak sistemi kullanılmıştır. Çalışma bu niteliğiyle Türkiye'de ve Türk linyitleri konusunda kendi türünde yapılmış olan ilk çalışmadır. Çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerinden toplanan 19 adet linyit numunesinin tümü hava ortamında, bunlardan iki tanesi ayrıca hem oksijence zengin hem de oksiyanma koşullarında yakılarak yanma davranımları ve çevresel etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kıyaslamalı olarak irdelenmiştir.

1.3 Tez Planı

Tez kapsamında öncelikle genel bir giriş yapılmış olup tezin amacı ve motivasyonuna değinilmiştir. 2. Bölümde Dünya'da ve Türkiye'deki enerji kaynakları istatistiklerinden sonra literatürde hava, oksijence zengin hava ve oksiyanma koşullarında yapılan laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalar detaylı olarak anlatılmıştır. 3. Bölümde ise tez kapsamında 19 adet linyit numunesinin dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde yanma süreçleri incelenmiştir. Önce bütün kömürler hava ortamında yakılmıştır. Süreç; yanma verimi, sistem içinde sıcaklık dağılımları, yanma ve işletme kararlılığı ve çevresel etkiler (emisyonlar) gibi çeşitli açılardan araştırılmıştır. Hava atmosferindeki yanma çalışmalarından sonra, bu linyitler içinden seçilen Bursa-Orhaneli Gümüşpınar (L15) ve Manisa-Soma (L19) kömürlerinin ayrıca oksijence zengin hava ve oksiyanma koşullarında yanma süreçleri incelenmiştir. Sonuçlar, hava ortamında yanma sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Deneylerde kullanılan kömür, kireçtaşı ve kum örneklerinin karakterizasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar Bölüm 4'de irdelenmiştir. Son bölümde ise tez kapsamında yapılan tüm deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

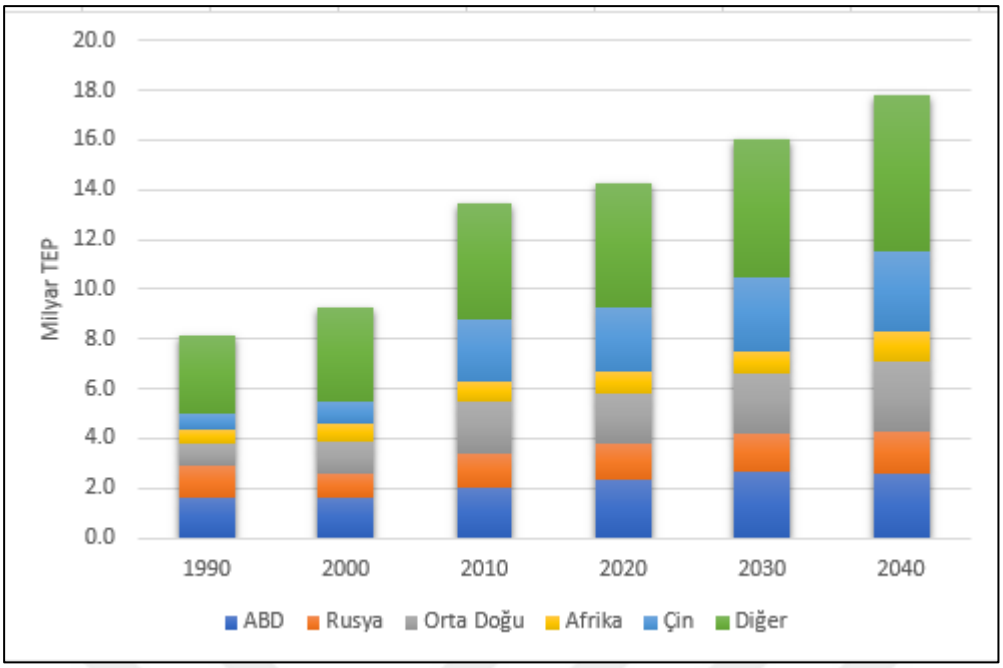
2. LİTERATÜR

2.1 Dünyada ve Türkiye'de Enerji Kaynakları

2.1.1 Dünya enerji kaynakları

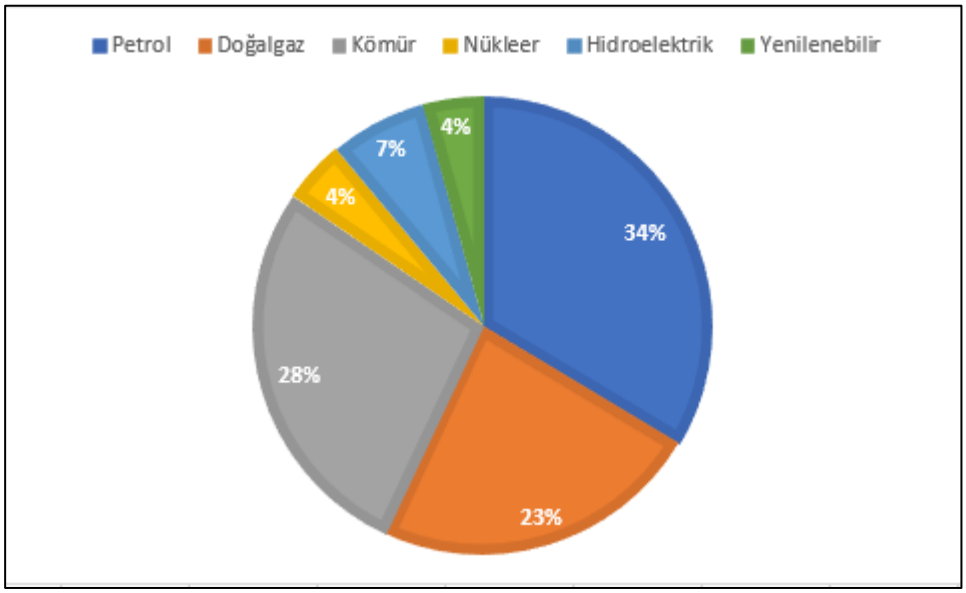
Kömür, diğer iki ana doğal kaynak olan petrol ve doğal gaz ile küresel enerji dengesinin ayrılmaz bir parçasıdır. Son on yılda kömür tüketim oranı dünya çapında hızla artarak petrol tüketim oranına yaklaşmıştır. Günümüzde küresel enerji talebini karşılamak için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin %39 kadarı kömürün yakılması ile elde edilmektedir. Son birkaç yıldır kömür üretimi Asya ve Pasifik ülkelerinde (Çin, Hindistan, Endonezya, Avustralya ve Rusya) sürdürülebilir büyüme göstermiştir. Güneydoğu Asya ülkeleri, kömür üretimini artırmaya devam etmektedir. Bu ülkelerde petrol kaynaklarının sınırlı olmasından dolayı kömür ana enerji kaynağı olarak öne çıkmıştır (Margarita ve diğ, 2018).

Günümüzde 7.4 milyar civarında olan Dünya nüfusunun 2040'larda 9 milyara ulaşması beklenmektedir. Öte yandan küresel ekonomi her yıl ortalama yaklaşık %3.4 oranında büyümektedir. Dünya birincil enerji arzı 1990 ve 2010 yılları arasındaki 20 yılda yaklaşık iki kat artmıştır ve öngörülen 2020 yılı enerji arzı 14.2 mtep (milyar ton eşdeğer petrol) düzeyi olarak belirlenmiştir. Enerji arzı yeni yüzyılın ilk 10 yılında %47 oranında büyürken, artışın yaklaşık dörtte üçü Asya kıtasından kaynaklanmıştır. Söz konusu 10 yılda, enerji arzı Çin'de %169, ABD'de %24 ve diğer ülkelerde ise %26 oranında artmıştır. Şekil 2.1'de dünyada birincil enerji arzındaki gelişim görülmektedir (BP Energy Outlook, 2019).



Şekil 2.1 : Dünyada birincil enerji arzındaki gelişim (BP Energy Outlook, 2019).

1973-2017 yılları arasındaki dönemde; dünyada petrolün payı %46.2'den %34'e düşerken, doğal gazın payı %16'dan %23'e, nükleer enerjinin payı %0.9'dan %4'e ve hidrolik dahil yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ise %1.9'dan %4'e yükselmiştir. Aynı dönemde kömürün payı %24.5'dan %28 düzeyine ulaşmıştır. Şekil 2.2'de dünya birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.2 : Dünya birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı (BP Energy Outlook, 2019).

Uzun vadeli enerji trendlerini değerlendirerek dünya enerji piyasaları için gelecek 20 yıla yönelik tahminler geliştiren **"BP Enerji Görünümü 2019"** raporuna göre (BP Energy Outlook, 2019), küresel enerji talebinin yılda ortalama %1.2 oranında artacaktır. Karbon emisyonlarının 2040 yılına kadar yaklaşık %10 oranında artacağı öngörülmektedir.

2.1.2 Türkiye enerji kaynakları

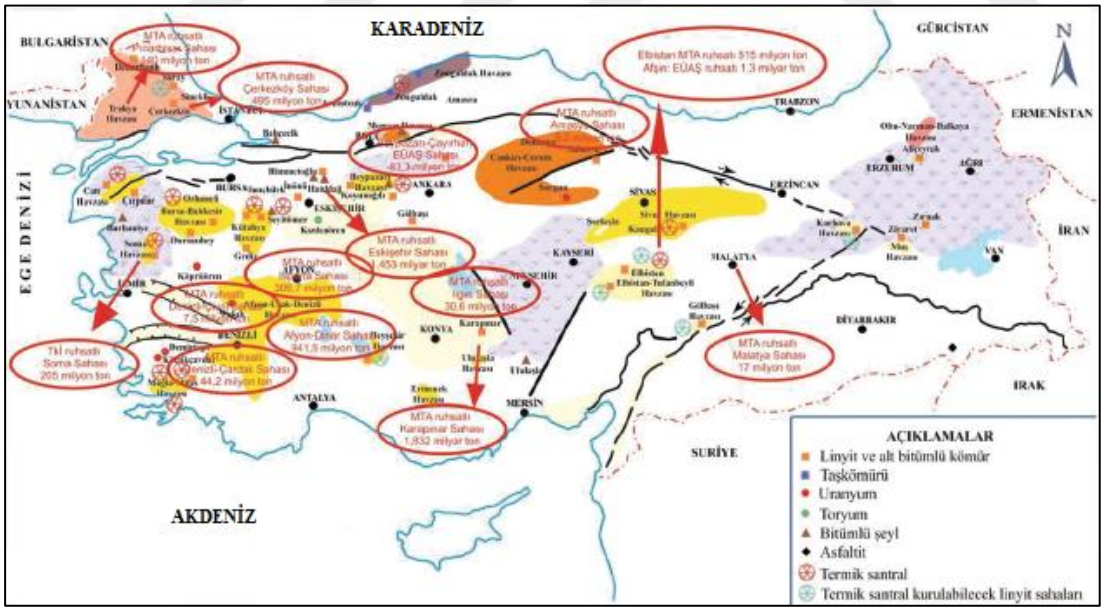
Birincil enerji arzının alternatifi olarak yenilenebilir enerjiyi teşvik etmek için sarfedilen yoğun çabalara rağmen, kömür hala küresel ekonomi için ana ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olmaya devam etmektedir (Xia ve diğ, 2017). Bu, enerjide yaklaşık % 80 dışa bağımlı olan ve "enerji yoksul" ülke olarak sınıflandırılan Türkiye için de geçerlidir. Türkiye'nin en bol ve önemli yerli fosil enerji kaynağı kömürdür. Bu kaynaklar yaklaşık 1.3 milyar ton taş kömürü ve 18 milyar ton linyitten oluşmaktadır. Kömür arama çalışmaları devam etmektedir ve son on yılda önemli miktarda yeni kömür rezervleri bulunmuştur. 2005 yılında 8.3 milyar ton olan toplam linyit rezervleri 2018 yılında yaklaşık 18 milyar tona yükselmiştir (Url-1). Henüz keşfedilecek rezervler bulunmaktadır. Bu nedenle, Türkiye'nin kanıtlanmış linyit rezervlerinin gelecekte daha da artması beklenmektedir. Üretilen linyitin % 85'i enerji üretimi için kullanılmaktadır (Ersoy, 2015). Bu linyitler düşük ısıl değere sahiptir ve düşük kaliteli kömürler (yüksek kül, nem ve kükürt içerikli) olarak sınıflandırılmaktadır. Bunların yaklaşık % 70' inin ısıl değeri 8.37 MJ/kg'dan az ve sadece % 6-8' inin ısıl değeri 12.6 MJ/kg'dan yüksektir (Atımtay ve diğ, 2017; Şengüler, 2010).

2017 yılının sonunda yerli kömür arzı; 13.8 mtep linyit, 0.7 mtep taşkömürü ve 0.6 mtep asfaltit olmak üzere toplam 15.1 mtep ve ithal kömür arzı ise 24.3 mtep taşkömürü ve 0.5 mtep kok olmak üzere toplam 24.8 mtep düzeyindedir. 2017 sonu itibariyle Türkiye'nin birincil enerji üretimi 35.4 mtep şeklinde gerçekleşmiştir. Birincil enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı Çizelge 2.1'de verilmiştir (Url-2).

Çizelge 2.1 : Türkiye birincil enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı (Url-2).

Kaynaklar	Birincil enerji üretimi (mtep)	Payı (%)
Taş Kömürü	0.7	1.97
Linyit	13.8	38.98
Asfaltit	0.6	1.69
Hidrolik	5	14.12
Biyoenerji ve Atıklar	2.5	7.06
Ham Petrol	2.7	7.62
Doğalgaz	0.3	0.85
Jeotermal, rüzgâr, güneş	9.7	27.40

Türkiye kömür sahaları ve ortalama rezerv miktarları Şekil 2.3'de verilmiştir. Son yıllarda yürütülen arama ve rezerv geliştirme çalışmaları sonucunda ciddi bir rezerv artışı sağlanmıştır. Yeni sahaların bulunmasına ve rezerv artışına yönelik çalışmalar MTA tarafından sürdürülmektedir (Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Faaliyet Raporu, 2018).

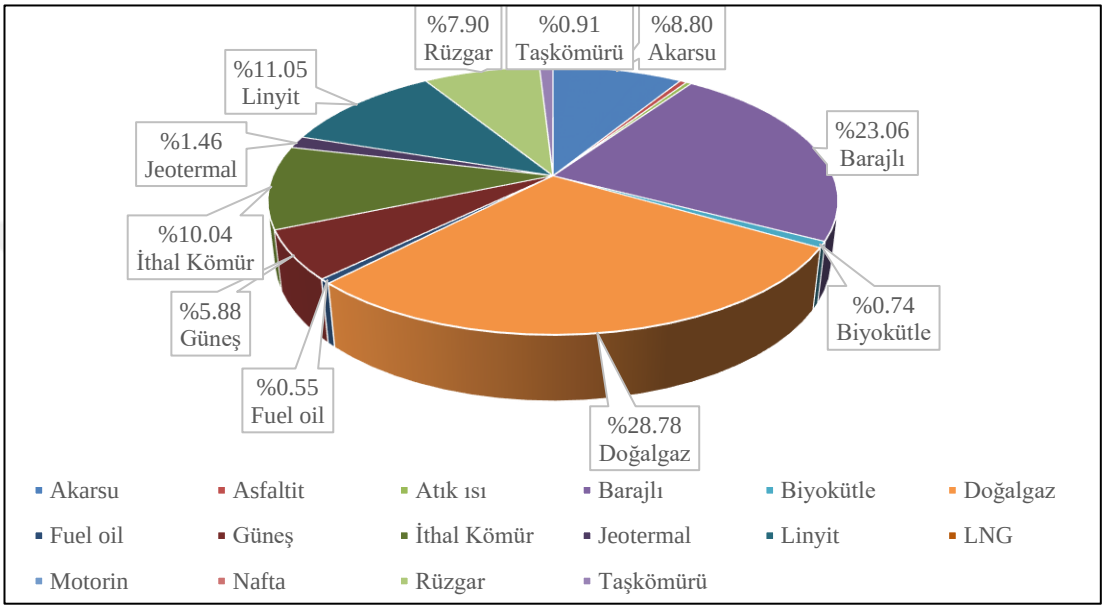


Şekil 2.3 : Türkiye kömür sahaları ve ortalama rezerv miktarları (Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Faaliyet Raporu, 2018).

2018 yılı sonu itibariyle 153.5 milyon ton eşdeğer petrol (mtep) olan ülkemizin toplam birincil enerji tüketiminde kömürün payı %27.55 oran ile 42.3 mtep 'dir (BP Energy Outlook, 2019). Ülkemizin 2018 yılı sonu itibariyle kömüre dayalı santral kurulu gücü

19,747 MW olup toplam kurulu gücün %22.3'üne karşılık gelmektedir. Yerli kömüre dayalı kurulu güç 10,980 MW (%12.4) ve ithal kömüre dayalı kurulu güç ise 8,767 MW (%9.9)'dır.

Türkiye'deki elektrik enerjisi kurulu gücünün enerji kaynaklarına göre dağılımı Şekil 2.4'de verilmiştir. Şubat 2019 sonu itibariyle Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücü 89.05 GW'dır (Url-3).

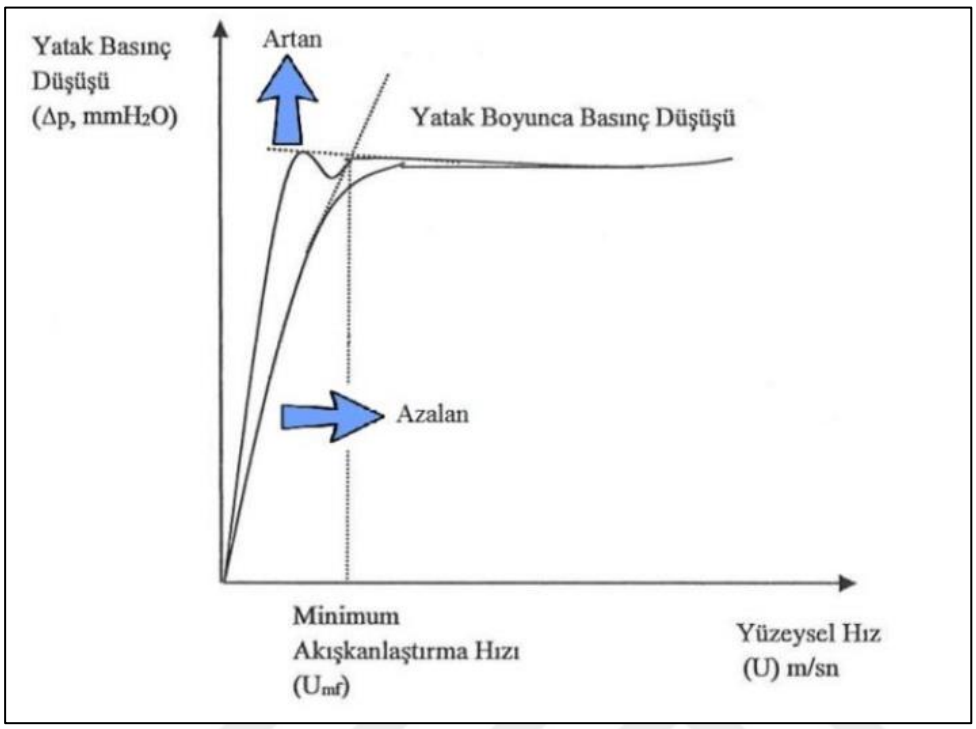


Şekil 2.4 : Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı.

2.2 Akışkan Yatak Teknolojisi

Akışkanlaşma, kısaca katı taneciklere akışkan özellikler kazandırmaktır. Bu işlem, katı parçacıklarının bir gaz veya sıvıyla temas ettirilmesi yoluyla gerçekleştirilebilmektedir. Akışkanlaşmanın gerçekleştirildiği fiziksel sistemler ise *akışkan yatak* olarak isimlendirilmektedir. Delikli bir destek plakası (dağıtıcı elek) üzerinde duran katı tanecikleri içerisinden hava geçirilmeye başladığında, havanın hızı, havanın sürükleme ve kaldırma kuvveti, taneciklerin ağırlığını dengelediği noktaya ulaştığında *minimum akışkanlaşma* başlamaktadır. Bu noktada, yatak boyunca basınç düşüşü, parçacık yatağının ağırlığına eşittir. Yine bu noktadan itibaren, havanın hızı ve taneciklerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak akışkanlaşma değişik aşamalardan geçmekte ve değişik özellikler göstermektedir. Minimum akışkanlaşma noktasından sonra katı-gaz karışımı artık bir sıvı gibi davranmaktadır. Şekil 2.5'de akışkan yatakta yatak basınç düşüşü ve yüzeysel hız arasındaki ilişki görülmektedir.

Akışkanlaşma ve akışkan yatakla ilgili ayrıntılar birçok kaynakta bulunabilir (Kunii ve Levenspiel, 1991; Basu, 2006).



Şekil 2.5 : Yatak basınç düşüşü ve yüzeysel hız arasındaki ilişki (Kunii ve Levenspiel, 1991).

2.2.1 Akışkan yatakta yakma

Yanma, kömürden enerji üretmek için en çok kullanılan yöntemdir. Bu nedenle, çoğunlukla geleneksel pulverize elektrik üretiminin çevresel etkilerini azaltmak için daha temiz ve verimli yanma teknolojilerini geliştirmek gerekmektedir. Bu bağlamda, akışkan yatakta yanma daha yüksek yanma verimi, daha iyi yakıt ve çalışma esnekliği ve daha düşük çevre yükü gibi bilinen avantajlarından ötürü umut verici ve temiz bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra son yıllarda yanma verimliliğini geliştirmek amacıyla oksiyanma teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknoloji ile baca gazındaki CO_2'nin kolaylıkla ayrılabilmesi için CO_2 derişimi %80'in üzerine çıkarılmaktadır (Stanger ve diğ, 2015; Singhn ve Kumar, 2016).

Akışkan yataklı yanma sistemleri, katı yakıt taneciklerinin yakma gazları içerisinde asılı kalarak sıvı gibi davrandığı ve yanmanın da bir sıvı yanmasına benzediği sistemlerdir. Bu sistemler, pulverize yakma sistemlerine kıyasla, yüksek ısı ve kütle transfer hızları, kompakt kazan tasarımı, yakıt esnekliği ve düşük kirletici (NOx ve SO_2) emisyonları gibi üstünlüklere sahiptirler. Oksi-akışkan yataklar (Oksi-AY),

yanmanın, hava yerine, O_2/CO_2 ortamında gerçekleştiği sistemlerdir. Akışkan yataklı yakma sistemlerini temel olarak üç grupta toplanmaktadır:

1. Kabarcıklı akışkan yataklar (KAY),
2. Dolaşımlı akışkan yataklar (DAY),
3. Basınçlı akışkan yataklar (BAY).

Bunlar içinde en yaygın kullanılanlar dolaşımlı akışkan yataklardır (DAY). Bu sistemler hakkında ayrıntılı bilgi birçok kaynakta bulunmaktadır (Kunii ve Levenspiel, 1991; Basu, 2006).

Bu sistemlerde akışkanlaştırma ve yakma için kullanılan gazlar, yakıcının tabanındaki dağıtıcı elek içinden (birincil besleme) ve/veya yanma odasının duvarı içinden değişik noktalardan beslenebilmektedir (ikincil hava). Oksi-AY'larda yanma hava yerine, O_2/CO_2 karışımıyla gerçekleştirilmektedir. Ortamdaki O_2 derişimi, DBG ve O_2 miktarları değiştirilerek ayarlanmaktadır. Operasyon sıcaklığı, yanmanın etkin bir şekilde gerçekleşmesi için yeterince yüksek olacak ancak aglomerasyonun başlamasını önleyecek kadar düşük seviyelerde tutulmaktadır. Bunun yanı sıra NOx ve SO_2 emisyonları da göz önüne alındığında optimum operasyon sıcaklıkları 800-900 ^oC olmaktadır. DBG ıslak veya kuru olabilmektedir. Genellikle, ıslak DBG akışkanlaşmayı sağlamak üzere dağıtıcı elek içinden beslenmektedir. Kuru DBG ise yakıtların yakıt silolarından yakıcıya beslenmesi için kullanılmaktadır. Oksiyanma koşullarında çalışan DAY tipi yakıcılarda DBG miktarları değiştirilerek ortamdaki O_2 oranı %30-50 yükseltilebilmekte ve yanma daha küçük hacimlerde gerçekleşebilmektedir. Böylece oksi-DAY'ların boyutları havayla yanmanın yapıldığı yakıcılara göre daha küçük olmaktadır. (Stanger ve diğ, 2015).

2.2.1.1 Oksiyanma

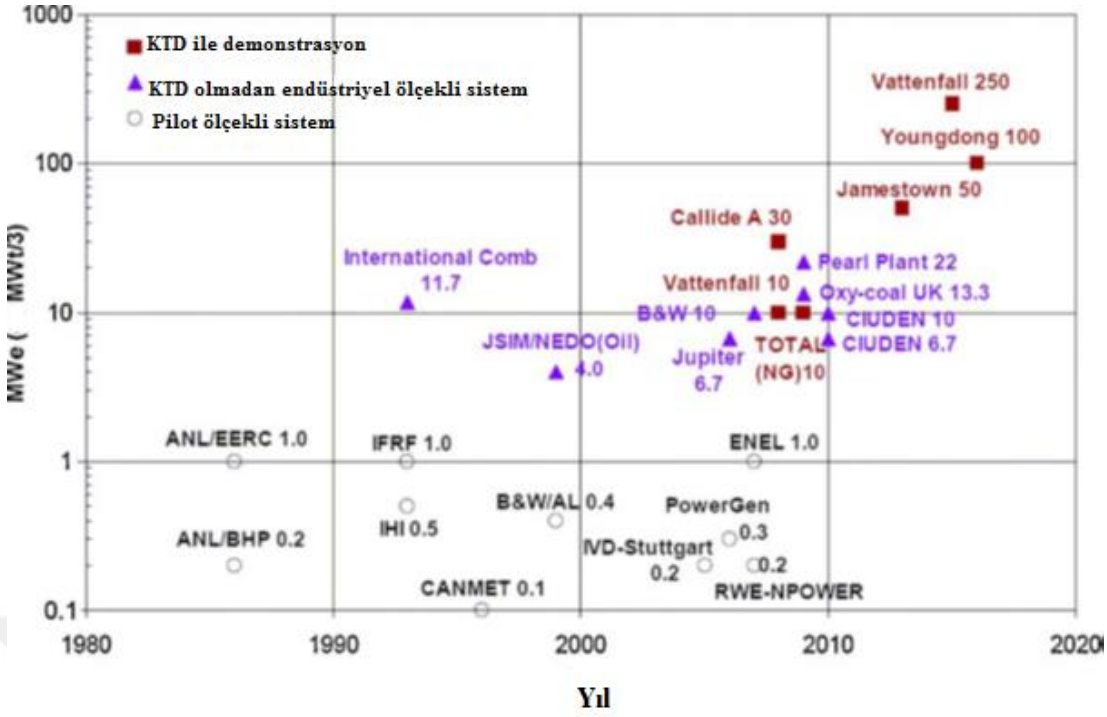
Oksiyanma teknolojisi; yakıtların hava yerine saf O_2 veya baca gazının reaktöre (yakıcıya) döndürülerek kullanılması yoluyla yakılması esasına dayanmaktadır. Oksiyanma yoluyla baca gazı içindeki CO_2 derişimini yükseltmek mümkün olmaktadır. Hava yerine oksijen kullanılmasındaki amaç, yakma havası içinde büyük oranda (hacimce %79) bulunan azotun bertaraf edilmesidir. Yakıcıya saf oksijen beslenerek, yakıtlar azotun çok az olduğu ve karbondioksitçe zengin ortamda yakılmaktadır. Kömürün saf oksijen ortamında yakılması alev sıcaklıklarının

yükselmesine ve bunun sonucunda küllerin ergimesine/sinterleşmeye/cüruflaşmasına yol açmaktadır. Bu sistemlerde, yüksek alev sıcaklığından korunmak üzere karbondioksitçe zengin baca gazları, yanma odasına geri beslenmektedir. Hava ile gerçekleştirilen geleneksel yakma süreçlerinde azotça zengin ve %12-15 oranında karbondioksit içeren yanma gazı elde edilirken, oksijence zengin ortamda gerçekleştirilen yakma süreçlerinde ağırlıklı olarak karbondioksit ve subuharından oluşan baca gazları elde edilmektedir. Alternatifleri ile karşılaştırıldığında, oksiyanma sonucunda yüksek karbondioksit ve düşük azot derişimi içeren baca gazlarının elde edilmesi, *karbondioksit tutma teknolojisinde* enerji ve yatırım maliyetlerinin önemli ölçüde düşmesini sağlamaktadır.

Oksiyanma teknolojisi, demonstrasyon projeleri vasıtasıyla hızlı bir şekilde ticarileşmeye doğru gitmektedir. Karbon tutma ve depolama teknolojisinde (KTD) pilot ve demonstrasyon projeleri konusunda dünya çapındaki son gelişmeler Şekil 2.6'da özetlenmiştir. Bununla birlikte, henüz sürdürülebilir şekilde çalışan endüstriyel ölçekli oksiyanma sistemleri bulunmamaktadır. Oksiyanma koşullarında kömürlerin yanma davranışını karakterize eden 0.3-3 MW termal kapasiteli pilot ölçekli sistemlerin yanısıra, 30 MW termal-300 MW elektrik kapasiteli demonstrasyon ölçekli sistemler bulunmaktadır (Zheng, 2011).

Bu projeler üç kategoride sınıflandırılmektedir:

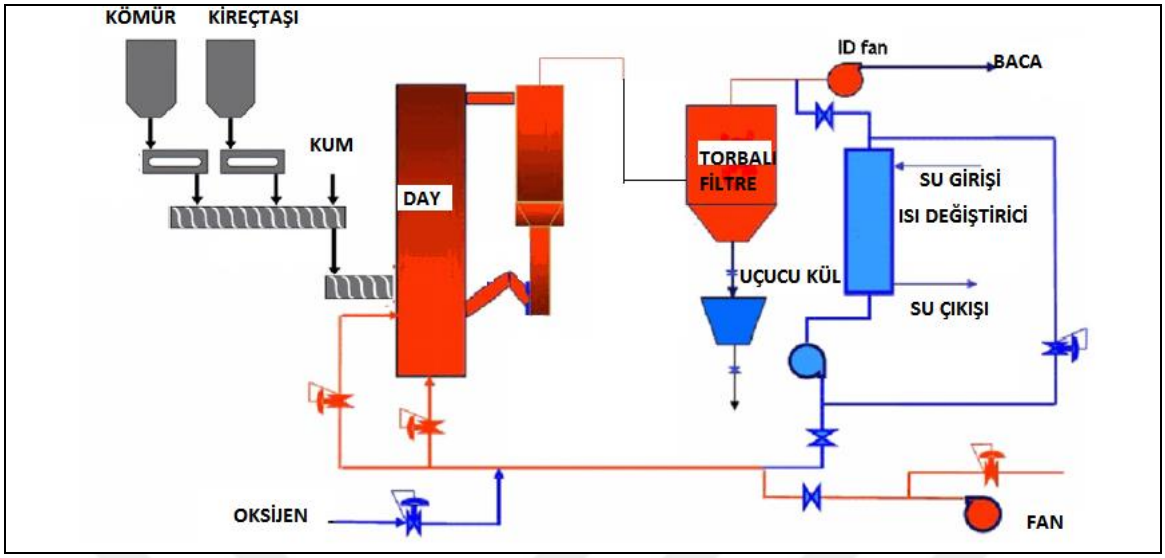
- KTD ünitesine sahip, elektrik üretimi yapan ve kömürle çalışan tesisler,
- KTD ünitesi olmayan endüstriyel ölçekli tesisler,
- Pilot ölçekli elektrik üretiminin olmadığı gaz temizleme ve KTD ünitesinin olduğu tesisler.



Şekil 2.6 : Oksiyanma teknolojisine dayalı tesisler (Zheng, 2011).

Şekil 2.7'de tipik bir oksiyanma prosesi şematik olarak görülmektedir. Proses temel olarak şu alt ünitelerden oluşmaktadır: **1.** Yakıcı (reaktör), **2.** Yakıt ve sorbent besleme birimi, **3.** Oksijen üretme ve/veya besleme birimi, **4.** Baca gazı temizleme birimi, **5.** Baca gazını geri besleme sistemi.

Oksiyanma prosesinin havayla yanmanın yapıldığı geleneksel sistemlerden farkı, diğer birimlere ek olarak bir oksijen üretme/besleme birimi ile baca gazı geri besleme sistemini içeriyor olmasıdır. Buna göre, reaktöre beslenen yakıtlar oksiyanma koşullarında yanmaktadır. Ortaya çıkan yanma gazları gaz temizleme ünitesine gitmekte ve burada içermiş olduğu kül, su buharı ve kükürt gibi safsızlıklardan arındırılmaktadır. Gaz temizleme ünitesi temel olarak siklonlar, filtreler, kondenser ve kükürt giderme alt ünitelerinden oluşmaktadır. Temizlenmiş gazın bir bölümü geri döndürülerek yanma havası ve oksijenle karıştırılmakta ve tekrar yakıcıya beslenmektedir. Geriye kalan bölüm ise bir depolama ünitesine beslenmektedir. Yanmada kullanılan oksijen ise bir hava ayırma ünitesinden sağlanmaktadır (Buhre ve diğ, 2005).



Şekil 2.7 : Oksiyanma süreci.

Bu teknoloji ile baca gazındaki CO_2 derişimini %14'ten %95'e kadar çıkarmak mümkündür. CO_2 ve H_2O içeren baca gazlarının yakıcıya geri beslenmesinin amacı, yakma havasının içerdiği azotun miktarını azaltmak, böylece alev sıcaklığını ve ısı transferini kontrol etmektir (Yang ve diğ, 2010).

Oksiyanmanın Üstünlükleri

Yanma verimi: Oksiyanma sürecinde yakıtlar oksijence zengin bir ortamda yandığından yanma daha etkin bir şekilde gerçekleşmekte ve bunun sonucu olarak daha yüksek yanma verimlerine ulaşılabilmektedir.

Baca gazının hacmi: Havayla (hacimce %21 oksijen ve %79 azot) gerçekleştirilen geleneksel yanma sürecinde baca gazlarının büyük bir bölümü azottan oluşmaktadır. Yanma sürecinde üretilen enerjinin bir bölümü azot gazını ısıtmak için kullanılmaktadır. Hava yerine oksijen kullanıldığı durumda ısı kaybı, hava ile yakmaya göre %75 oranında düşmektedir. Böylece sistemin termal verimi yükselmektedir. Yanma gazlarının geri döndürülmesinden dolayı daha kompakt ve ekonomik yakıcıların tasarlanması mümkün olabilmektedir.

Alev sıcaklığı: Hava ile yakma sonucunda oluşan adyabatik alev sıcaklığı yaklaşık 1950 °C'dir. Yakma havasının oksijence zenginleştirilmesi alev sıcaklığını ve termal verimi artırmaktadır. Oksijence zengin hava ile yakma teknolojisinde alev sıcaklığı 2800°C'a kadar çıkabilmektedir.

Enerji verimi: Yukarıda da belirtildiği gibi, yakma havasının oksijen bakımından zenginleştirilmesi alev sıcaklığı ve termal verimin artmasını sağlamaktadır. Diğer yandan yakma havasındaki oksijen derişimi arttıkça baca gazı hacmi düşmektedir. Baca gazının miktarı düştükçe baca gazlarıyla kaybolan ısı miktarı azalmaktadır. Bunun yanı sıra baca gazı sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, yakıt tüketimi o kadar az olmaktadır. Baca gazındaki CO_2 ve H_2O derişimlerinin artması ısı aktarım verimini artırmaktadır. Bütün bunlar, yakma sisteminin termal veriminin iyileşmesine katkıda bulunmaktadır.

CO_2 tutma imkanı: Oksiyanma sistemlerinde ortaya çıkan baca gazlarında azot oranı düşük ve CO_2 oranı yüksektir. Bu nedenle bu gazlardaki CO_2'nin ayrılması ve depolanması daha kolay olmaktadır.

Emisyonlar: Oksiyanmada ortaya çıkan baca gazı miktarının görece az olması, baca gazı emisyonlarının kontrolünü kolaylaştırır. Oksiyanma sistemlerinin baca gazlarında azot miktarının az olması veya hiç olmaması nedeniyle bu gazların NO_X içerikleri de daha düşük olabilmektedir.

Yakıcı tasarımı: Oksiyanma sistemlerinin boyutları, hava yakma sistemlerinin boyutlarının 1/5'ine kadar düşmektedir

Oksiyanmanın Sorunları

Oksiyanmanın sahip olduğu bu avantajlarının yanı sıra çözülmesi gereken bazı sorunları da bulunmaktadır. Bunların başlıcaları aşağıda belirtilmiştir:

- Kömürün oksijen-karbondioksit ortamında yanmasının, özellikle yüksek basınç altında verimli bir şekilde sağlanması oldukça zordur. Bunun nedeni; azot ve karbondioksit arasındaki fiziksel ve kimyasal farklardan dolayı ısı ve kütle transferi, reaksiyon kinetiği ve alev karakteristiğinde meydana gelen değişikliklerdir.
- Baca gazı geri dönüş hattında içeriye hava kaçaklarının sızma riskinin olması.
- Yakıtın saf oksijenle yanması sırasında yüksek alev sıcaklıklarına ortaya çıkmaktadır. Bu durum, bu sistemlerin havayla çalışan geleneksel yakma sistemlerine adaptasyonunu güçleştirmektedir.
- Baca gazı hacminin düşük olması konvektif ısı transfer veriminin düşmesine neden olmaktadır.

- Sistemin içine havanın sızması ve yüksek alev sıcaklıkları NOx oluşumunu artırabilmektedir.
- Oksijen üretim maliyeti oldukça yüksektir.

Bu problemlerin yanı sıra diğer yakma sisteminde gözlemlenen yakma stabilitesi, emisyon, yakıcı tasarımı ve boyutlandırılması, optimum operasyon koşullarının belirlenmesi gibi sorunlar bu teknoloji için de söz konusu olabilmektedir.

Oksiyanma, diğer yanma süreçlerinden aşağıda belirtilen konularda farklılık göstermektedir:

- Yakıt besleme
- Isı transferi
- Kömür taneciklerinin yanma süreci
- Alev stabilizasyonu
- Kirletici oluşumu

Bu farklılıkların anlaşılabilmesi için oksiyanmanın ne olduğu ve farklılık gösterdiği konuların teknik olarak ifade edilmesi gerekmektedir.

Yukarıda belirtilen ve aşılması gereken sorunlar nedeniyle endüstriyel fırınlarda ve kazanlarda oksiyanma teknolojisi ticari olarak henüz uygulanamamaktadır. Dünyada Ar-Ge amaçlı çalıştırılan demonstrasyon üniteleri mevcuttur. Ancak yakın gelecekte oksijen üretim maliyetlerinin düşürülmesi ile teknoloji uygulanabilir hale gelebilecektir (Hong ve diğ, 2009).

2.2.1.2 Oksiyanma sistemleri

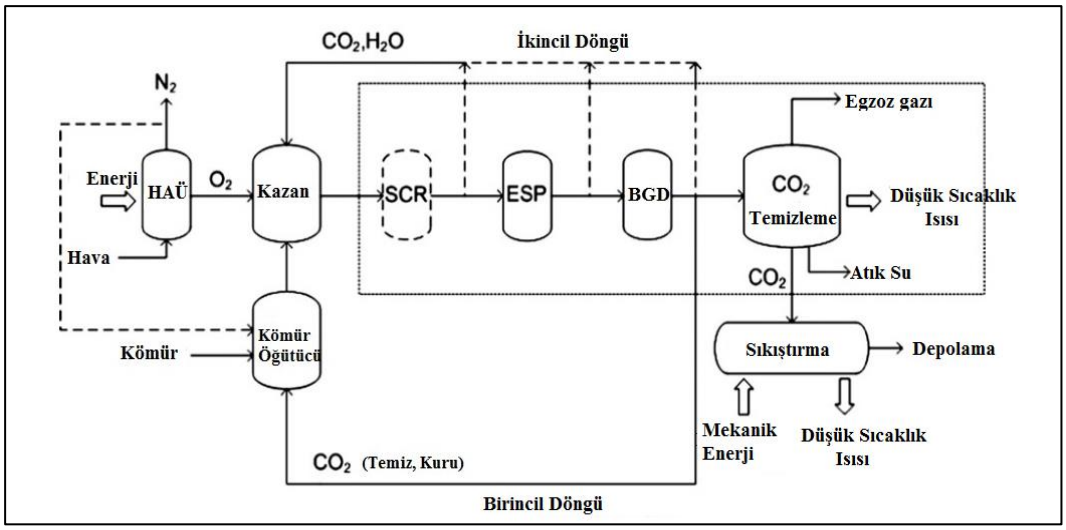
Oksiyanma teknolojisi prensip olarak, elektrik üretiminde kullanılabilecek ve her yakıt için uygulanabilecek esnekliğe sahip bir teknolojidir. Bunun yanı sıra, halen çalışmakta olan geleneksel yakma sistemleri de oksiyanma sistemlerine dönüştürülebilir. Başka bir ifadeyle oksiyanma sistemleri var olan sistemlere *retrofit* olarak entegre edilebilir. Hava ile yanmada, havanın içermiş olduğu yüksek miktarlardaki N_2'nin seyreltme etkisi nedeniyle yanma/baca gazlarındaki CO_2 oranı düşük (tipik olarak %12-16) olmaktadır. Oksiyanmada ise hava yerine saf oksijen geri döndürülen baca gazlarına katılarak kullanılmaktadır ve böylece CO_2 oranı yüksek (hacimce %65-95, kuru temelde) baca gazları elde edilebilmektedir. Baca gazları diğer safsızlıklardan arındırıldıktan sonra, CO_2 sıkıştırma ve soğutma yoluyla

sıvılaştırılmakta ve depolanmaktadır. Baca gazındaki CO_2 oranı sistemdeki hava sızıntıları tarafından önemli ölçülerde etkilenebilmektedir. Kömür yakan tipik bir oksi-yakma sistemi Şekil 2.8'de görülmektedir. Sistem temel olarak şu ünitelerden oluşmaktadır (Toftegaard ve diğ, 2010):

1. Hava ayırma ünitesi (HAÜ) (Air separation unit, ASU),
2. Yakma ünitesi,
3. Gaz temizleme ünitesi,
4. Baca gazı geri döndürme ünitesi,
5. CO_2 ayırma ve depolama ünitesi.

Bu sistemleri geleneksel yakma sistemlerinden ayıran üniteler HAÜ, baca gazı geri döndürme ve CO_2 ayırma ve depolama üniteleridir.

Hava Ayırma Ünitesi (HAÜ): HAÜ, yanma için gerekli olan oksijeni havadan ayrıştırarak sağlar ve sistemin en kritik ünitelerinden bir tanesini oluşturur. Bu ünitenin kapasitesi yakma sisteminin ihtiyacına bağlı olarak değişmektedir. Endüstriyel ölçekli uygulamalarda kriyojenik yöntemle oksijen üreten HAÜ kullanılmaktadır. Kriyojenik ayırma enerji yoğun bir işlemdir ve %95 saflıktaki O_2 için yaklaşık 0.24 kWh/kg O_2 enerji gerekmektedir (Chen ve diğ, 2012). 500 MW gücündeki bir santral için 9,000-10,000 t/gün oksijene gereksinim vardır (Toftegaard ve diğ, 2010). HAÜ, bir oksiyanma santralinin işletilmesindeki en pahalı ünitedir. Bir oksi-elektrik santralinde HAÜ tarafından tüketilen elektrik miktarı santralde üretilen tüm elektriğin %3-4'ü civarındadır. Havadan oksijenin elde edilmesi için ticari olarak adsorpsiyon ve membranla ayırma yöntemleri de mevcuttur, ancak pahalı oldukları için tercih edilmemektedirler. Bu nedenle oksijen üretimi için daha ucuz yöntemler üzerinde çalışılmaktadır. İlgi çeken alternatif yöntemlerden bir tanesi kimyasal döngü (chemical looping) ile ayırmadır (Shah ve diğ, 2013).



Şekil 2.8 : Tipik bir oksiyanma güç santralinin mümkün konfigürasyonları. HAÜ : Hava ayırma ünitesi, SCR: seçimli katalitik indirgeme reaktörü (DeNOx), ESP: Elektrostatik çöktürücü, FGD: kükürt giderme ünitesi (Toftegaard ve diğ., 2010).

Baca Gazının Geri Döndürülmesi: Oksiyanma sistemlerinde havadaki azotun yerine kullanılan CO_2 baca gazlarının geri döndürülmesiyle sağlanmaktadır. Geri döndürülen baca gazı (DBG) aynı zamanda yakıcıdaki sıcaklığın ayarlanması için de kullanılmaktadır. DBG, çekildiği ve O_2 ile karıştırıldığı konum oksiyanma sistemlerinin çalışmasını en çok etkileyen parametreler arasında yer almaktadır. DBG elektrik santrallerinde ekonomizörden sonra değişik konumlarda kuru veya ıslak olarak çekilebilmektedir. Genel olarak DBG tüm baca gazlarının %60-80'i kadar olabilmektedir. Yakma atmosferindeki O_2 oranı ise genellikle %28-32 aralığında değişmektedir. Çoğu uygulamada, oksijen DBG ile karıştırıldıktan sonra yanma odasına beslenmektedir. DBG genellikle ikiye ayrılarak yakma sistemine beslenmektedir: **1.** Birincil DBG, **2.** İkincil DBG.

Birincil DBG: Toplam DBG'nin yaklaşık %30-35'i soğutulup neminden arındırıldıktan sonra tekrar 200-250^oC'a kadar ısıtılmakta, sonra yakıt değirmenine gönderilmekte ve burada kurutulan ve öğütülen kömürü yanma odasına taşınması için kullanılmaktadır.

İkincil DBG: İkincil DBG akımı O_2 ile karıştırılarak O_2/CO_2 karışımı şeklinde yanma gazı olarak doğrudan yakma odasına beslenmektedir. Şekil 2.8' de görüldüğü gibi DBG sistemin değişik noktalarından (kesikli çizgiler) çekilebilmekte ve buna bağlı olarak içermiş olduğu su ve safsızlık (NOx, SO_2, vb.) miktarları da değişebilmektedir. Gazın içerdiği su miktarı kömürün yakma karakteristiklerini etkilemektedir. Geri

döndürme nedeniyle DBG içindeki SO_2 derişimi artacağı için (2-3 kat) yüksek miktarda kükürt içeren kömürlerin kullanılan sistemlerde korozyonu azaltmak için, baca gazlarındaki SO_2'nin en azından kısmen giderilmesi gerekmektedir.

Oksiyanma sistemlerinde gaz temizleme işlemi, CO_2 hariç olmak üzere, geleneksel yakma sistemlerinde uygulanan işleme benzerdir. Temel olarak partiküler madde, NOx ve SO_2 gidermeyi kapsamaktadır. Partiküler madde emisyonu ve giderimi konusunda geleneksel ve oksiyanma süreçleri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır (Stanger ve diğ, 2015). Buna karşın, oksiyanmada NOx emisyonu, havayla yanmaya kıyasla, %50-70 gibi önemli oranlarda düşmektedir (Normann ve diğ, 2009; Yoshiie ve diğ, 2011). Ancak yerel ve küresel düzenlemelerde öngörülen sınır değerleri karşılamak için ek bir NOx giderimine gerek olabilir. SO_2 emisyonu ise havayla yanmaya göre önemli bir farklılık göstermemekte ve yine benzer yöntemlerle tutulmaktadır (Kazanç ve diğ, 2011).

Karbon Tutulması ve Depolanması (KTD): Oksiyanma sistemlerinin geleneksel sistemlere göre en önemli farkı baca gazlarında CO_2 oranının çok yüksek (%65-95) ve böylece CO_2'in ayrılması ve tutulmasının mümkün olmasıdır. CO_2 ayırma ünitesi bir dizi çok aşamalı sıkıştırma ve soğutma adımlarından oluşmaktadır. Burada önce su uzaklaştırılmakta ve daha sonra CO_2 sıvılaştırılmaktadır. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi, sıvılaşmayan gazlar (Ar, N_2, O_2, CO, NOx) ise ekzost gazı olarak bacadan atılmaktadır.

2.2.1.3 Oksiyanma çalışmaları

Oksijence zengin ortamda yakma teknolojisi ilk kez 1980'li yıllarda Enhanced Oil Recovery (EOR) için CO_2 üretimi amacıyla kullanılmıştır (Abraham ve diğ,1982). Konu, 1990'lı yılların ortasından itibaren sera gazı emisyonlarından dolayı tekrar ilgi görmeye başlamıştır. Laboratuvar ölçekli çalışmalarla yanma karakteristikleri, kömür reaktivitesi, ısı transferi ve emisyonlar gibi pek çok bilimsel ve mühendislik konularına ışık tutmak amacıyla birçok araştırma yapılmıştır.

Oksi-pulverize yakma (Oksi-PY) sistemleri, geleneksel pulverize yakmanın hava yerine, O_2/CO_2 ortamında gerçekleştirilmesine dayanmaktadır. Kömürden elektrik üretimi ağırlıklı olarak pulverize yanma yoluyla yapıldığından, ilk oksi-yanma çalışmaları da daha çok pulverize kömür konusunda yoğunlaşmıştır ve son 10 yılda bu teknolojinin geliştirilmesinde önemli yol alınmıştır. Halen dünyanın bir çok yerinde

kapasiteleri 0.3-30 MW_{th} aralığında değişen çeşitli entegre oksi-PY sistemleri bulunmaktadır. Kapasitesi 30 MW_{th}-300 MW_e arasında değişen sistemler ise proje aşamasındadır (Scheffknecht ve diğ, 2011). Bu sistemlerin bazıları Çizelge 2.3'de verilmiştir. Bu çalışmalar sayesinde teknolojinin "*olgunlaşma derecesi (readiness)*" hızlı bir şekilde yükselmiştir. Bölüm 2.2.1.2' de belirtildiği gibi, bu sistemlerde yanma gazları prosesin değişik noktalarından çekilerek kuru veya ıslak olarak geri döndürülebilmektedir. Döndürülen gazlar (DBG) birincil DBG (DBG-1) ve ikincil DBG (DBG-2) olmak üzere ikiye bölünüp yanma odasına gönderilmektedir. Baca gazının yaklaşık %65-70'i geri döndürülmekte, bunun da %30-35'i DBG-1 olarak kömür öğütme değirmenlerinde kömür kurutma ve kuru toz kömürün buradan kazana taşınmasında kullanılmaktadır. %65-70'i ise DBG-2 şeklinde oksijenle karıştırılarak yanma odasına yakma gazı olarak beslenmektedir. Bazı uygulamalarda, üçüncül DBG (DBG-3) de kullanılmaktadır. Bu akım daha üst bölgelerde yanma odasına beslenmektedir. Oksijen bu DBG'lerden herhangi birisine veya birden fazlasıyla karıştırılarak ve/veya doğrudan yanma odasına beslenmektedir. Bu sistemlerle ilgili ayrıntılar çeşitli yayınlarda bulunabilmektedir (Toftegaard ve diğ, 2010; Scheffknecht ve diğ, 2011; Chen ve diğ, 2012; Yin ve Yan, 2016).

Halen aralarında Kanada, Finlandiya, Polonya, Çin, Amerika Birleşik Devletlerinın de bulunduğu pek çok ülkede oksi-dolaşımlı akışkan yatak (oksi-DAY) yakma üzerine konusunda Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır. Ancak bugüne kadar yapılan çalışmaların çoğunda küçük ölçekli (<100 kW) sistemler ve/veya simüle gazların kullanıldığı sistemler incelenmiştir.

Oksi-DAY çalışmaları halen laboratuvar ve pilot ölçeklerde yapılmaya devam edilmektedir. Bunların çoğu 100 kW_{th}' den küçük kapasitelere sahiptir. Halen kurulmuş en büyük ünite ise AB tarafından desteklenen ve İspanya'da bulunan CIUDEN'a ait 30 MW_{th} kapasiteye sahip sistemdir (Lupion ve diğ., 2013). Sistem temel olarak kazan, siklon, geri dönüş ayağı, yatak içi ısı değiştirici yüzeyler ve kızdırıcıdan oluşmaktadır. Dünyada halen çalışmakta ve planlanmakta olan çeşitli oksi-PY ve oksi-DAY sistemlerinden bazıları Çizelge 2.2'de görülmektedir. Bu tabloda 100 MW termal ve daha büyük kapasiteye sahip olan PY sistemleri halen kurulmakta olan sistemlerdir ve bunlarla ilgili olarak henüz literatüre yansımış herhangi bir araştırma sonucu bulunmamaktadır.

Çizelge 2.2 : Dünyadaki halen çalışmakta ve planlanmakta olan bazı oksi-pulverize (Chen ve diğ., 2012) ve oksi-DAY test sistemleri (Stanger ve diğ., 2015).

Proje Adı	Ülke	Boyut	Kapasite	Teknoloji	Yeni(Y)/ Retrofit (R)
Jupiter Pearl Plant	ABD	Pilot	22 MW_{th}	PY[1]	R
B&W pilot plant	ABD	Pilot	30 MW_{th}	PY	R
OxyCoal-UK	İngiltere	Pilot	40 MW_{th}	PY	R
Alstom Windsor	ABD	Pilot	15 MW_{th}	PY	R
Schwarze Pumpe	Almanya	Pilot	10 MW_e	PY	Y
Callide-A	Avusturalya	Pilot	30 MW_e	PY	R
Compostilla(Oxy300)			17 MW_e	PY	Y
Janschwalde,Vattenfall	Almanya	Demo	250 MW_e	PY	Y
FutureGen	ABD	Demo	200 MW_e	PY	R
Youngdong	Güney Kore	Demo	100 MW_e		R
CIUDEN	İspanya	Demo	30 MW_{th}	DAY[2]	Y
Valmet,Tampere	Finlandiya	Pilot	4 MW_{th}	DAY	Y
Alstom,Windsor	ABD	Pilot	3 MW_{th}	DAY	Y
IET-CAS, Beijing	Çin	Pilot	1 MW_{th}	DAY	Y
IET-CAS, Beijing	Çin	Lab	100 kW_{th}	DAY	Y
IET-CAS, Beijing	Çin	Lab	30 kW_{th}	DAY	Y
CanmetENERGY	Kanada	Pilot	800 kW_{th}	DAY	Y
CanmetENERGY	Kanada	Lab	100 kW_{th}	DAY	Y
University of Utah	ABD	Lab	330 kW_{th}	DAY	Y
University of Stuttgart	Almanya	Lab	150 kW_{th}	DAY	Y
VTT	Finlandiya	Lab	140 kW_{th}	DAY	Y
Czestochowa Univ.	Polonya	Lab	100 kW_{th}	DAY	Y
Vienna Univ.	Avusturya	Lab	100 kW_{th}	DAY	Y
TÜBİTAK MAM	Türkiye	Lab	30 kW_{th}	DAY	Y

[1]PY : Pulvarize yanma, [2]DAY : Dolaşımlı akışkan yatak.

Laboratuvar Ölçekli Oksiyanma Çalışmaları

Emisyonlar

NOx emisyonları

NOx baca gazındaki NO ve NO_2'nin toplamı olarak gösterilir. NO yanma sırasındaki NOx emisyonlarının genellikle %90'ından fazlasını içermektedir. NO hala çok net açıklanamamakla beraber çok farklı mekanizmalar ile oluşmaktadır (Zheng, 2011).

1. Yakıtın içindeki azotun azotoksitlere dönüşümü: Bu oluşum yakıtça zengin bölgede gerçekleşir.

$$N \Rightarrow NO, NO_2 \tag{2.1}$$

2. Birincil NOx oluşumu: Havanın içindeki azot molekülleri, alevin içinde bulunan serbest radikaller yardımı ile NOx moleküllerine dönüşür (Fenimore reaksiyonları):

$$CH + N_2 \Rightarrow HCN + N \quad (2.2)$$

$$HCN + O \Rightarrow CNO + H \quad (2.3)$$

$$CNO + O \Rightarrow NO + CO \quad (2.4)$$

Ortamdaki O_2 derişiminin artması, bu tepkimelerin oluşumunu arttırır.

3. Isıl NOx oluşumu: Yüksek sıcaklıklarda (1400°C - 1600°C veya üzeri) havadaki azot molekülleri, oksijenle doğrudan tepkimeye girerek, azot oksit moleküllerini oluştururlar (Zeldovich reaksiyonları):

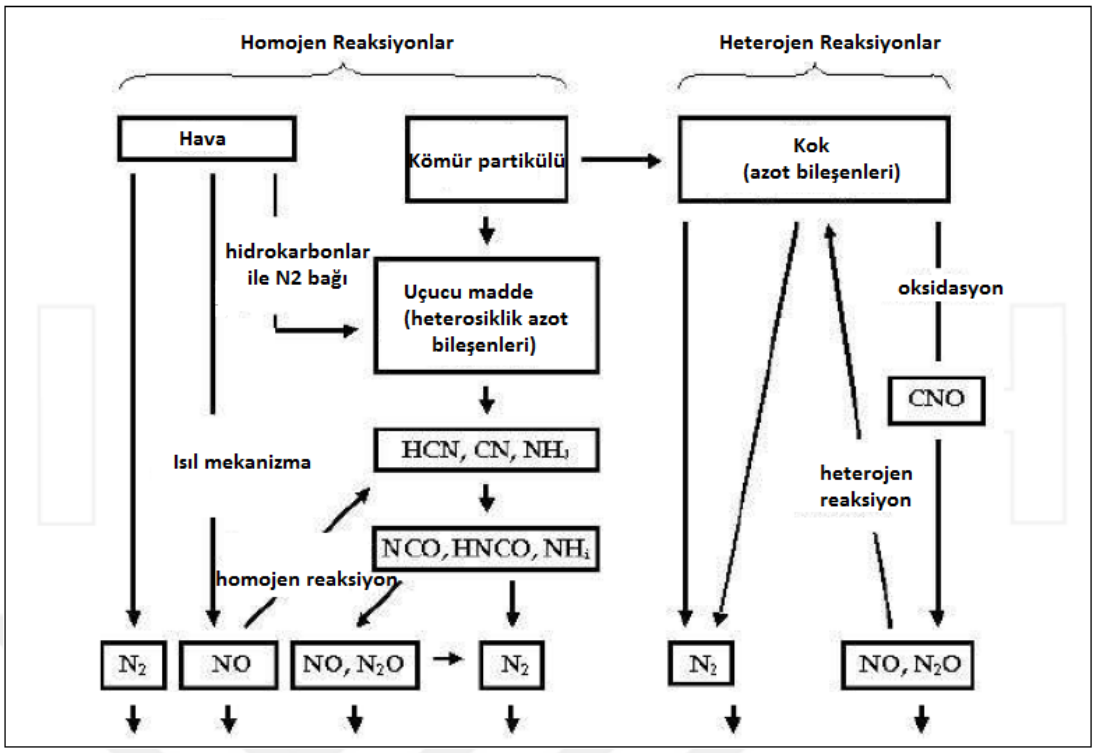
$$O + N_2 \Rightarrow NO + N \quad (2.5)$$

$$N + O_2 \Rightarrow NO + O \quad (2.6)$$

$$OH + N \Rightarrow NO + H \quad (2.7)$$

Bu tepkimeler yavaş sayılabilecek bir sürede (0,5 - 1 s) gelişirler (Zheng, 2011).

Kömür yanması sırasında yakıta bağlı azotun NO, N_2O ve N_2'a dönüşüm mekanizması Şekil 2.9'da şema halinde gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : Kömür yanması sırasında yakıta bağlı azotun NO, N_2O ve N_2'a dönüşüm mekanizması (Gil, 2012).

Literatürde kömür yakma sonucunda açığa çıkan NOx emisyonlarının ağırlıklı olarak yanma sıcaklığı ve atmosferden etkilendiği vurgulanmıştır. Bu nedenle NOx giderim teknolojisi bu etkenlere bağlıdır. Örneğin; hava ile kademeli yakma (air staging) yapılarak azotlu bileşenlerin NOx yerine N_2'ye dönüşmesini sağlamak amacıyla bir atmosfer yaratmak mümkündür. Bu gibi yöntemlerin en önemli dezavantajı yanma veriminin olumsuz etkilenmesidir.

Oksiyanma teknolojisinde saf oksijen ve reaktöre geri döndürülen gazın beslenmesi ile NOx giderimi açısından avantajlı bir durum söz konusudur. Oksiyanma sonucunda açığa çıkan NOx emisyonu havayla yakmaya göre oldukça düşüktür. Oksiyanma havayla yakma ile kıyaslandığında kömür tipi, yakıcı tasarımı ve baca gazı geri dönüşüm oranı gibi etkenlere bağlı olarak %30-60 aralığında daha düşük NOx emisyonu açığa çıkmaktadır. Bu azalmanın nedeni yanma için kullanılan gazların azot içermemesi ve dolayı ısıl NOx oluşumun baskılanmasıdır (Zheng, 2011).

DAY teknolojisi NOx emisyonları açısından en iyi seçeneklerden bir tanesidir. Bu teknolojide aşağıda belirtilen nedenlerden dolayı NOx emisyonları daha düşük olabilmektedir (Krzywanski ve diğ, 2010).

- Yanmanın daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi (800-900 °C)
- Hava fazlası esnekliği
- Yakıt esnekliği
- Katı-gaz karışmasının daha iyi olması

Okazaki ve Ando (1997) oksiyanma sırasındaki NOx indirgeme mekanizmasını araştırmışlardır. Sonuçlar, beklendiği gibi, CO_2 derişimindeki artışın NOx derişimi üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu yönünde olmuştur. Diğer taraftan, geri döndürülen gazdaki NO'nun %50'den fazlası kömürün uçucu madde içeriğinin yandığı bölgede kimyasal reaksiyonlarla N_2'ye dönüştüğü belirtilmektedir. Bununla birlikte araştırmacılar NOx indirgenmesi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlardan söz etmemişlerdir. Literatürde, NOx emisyonlarının NOx'lerin yeniden yanma (reburn) mekanizması (NOx'un hidrokarbon ile reaksiyonu) ile indirgenebileceği raporlanmıştır.

$$NO+CHi \rightarrow HCN + O \quad (2.8)$$

$$NO + NHi \rightarrow N_2 + H_2O \quad (2.9)$$

HCN aşağıdaki reaksiyonlarla N_2'ye dönüşmektedir:

$$HCN + O \rightarrow NCO + H \quad (2.10)$$

$$NCO + H \rightarrow NH + CO \quad (2.11)$$

$$NH + H \rightarrow N + H_2 \quad (2.12)$$

$$N + NO \rightarrow N_2 + O \quad (2.13)$$

Bir diğer NOx indirgeme reaksiyonu kok ile NO arasında olmaktadır:

$$(kok)\text{-}2C + NO \rightarrow (kok)\text{-}C\text{-}O + (kok)\text{-}C\text{-}N \quad (2.14)$$

$$(kok)\text{-}C\text{-}O \rightarrow (kok) + CO \quad (2.15)$$

$$(kok)\text{-}C\text{-}N + NO \rightarrow (kok)\text{-}O + N_2 \quad (2.16)$$

Kok ile NO arasındaki reaksiyonlar kömürdeki mineral madde içeriğinden çok fazla etkilenebilmektedir. Yapılan bir çalışmada Na ve K'un reaksiyon hızı olan etkisi irdelenmiştir. Ancak bu etkinin yüksek sıcaklık bölgesinde gözlenmediği bildirilmiştir. Guo ve Hecker (1998) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklık bölgesinde kalsiyumun çok aktif bir katalizör görevi gördüğünü vurgulamıştır.

NO emisyonlarının oksiyanma koşullarında indirgenmesi birkaç araştırma grubu tarafından raporlanmıştır. Andersson ve diğ. (2008b) linyit ile oksiyanma koşullarında NO emisyonları konusunda çalışmışlardır. Oksijen derişiminin %25-29 aralığında değiştiği oksiyanma koşullarında NO emisyonlarının birim enerji başına %70-75 oranında azaldığını bildirmişlerdir.

Liu ve diğ. (2005) 20 kW dikey yakıcıda pulverize kömür yakma konusunda çalışma yürütmüşlerdir. Havayla yakma koşulları ile %30 O_2-%70 CO_2 ortamında yakma koşullarında açığa çıkan NOx emisyonları karşılaştırılmıştır. Geri döndürülen gaz yerine simüle gaz kullanılmasına rağmen giriş gazına NO ve SO_2 ilavesiyle baca gazı geri dönüşümünün NOx ve SOx emisyonları üzerine etkisini araştırmışlardır. Ayrıca O_2/CO_2 karşımında oksijen derişimi arttıkça kömürün elementel azotunun NOx'a dönüşümünün arttığı gözlenmiştir. Bu bulguların yukarıda bahsi geçen Andersson ve diğ. (2008b) yaptığı çalışmadaki bulgularla örtüştüğü görülmüştür. NOx indirgenmesinin yanma ortamı, yanma modu (staging veya non-staging) ve geri döndürülen gazın konumuna bağlı olarak değiştiği sonucuna varılmıştır. Araştırmacıların yaptıkları başka bir çalışmada optimum koşullarda NOx'in %92 oranında azaltıldığı raporlanmıştır.

Farzan ve diğ. (2005) 1.46 MW termal kapasiteli sistemde NOx emisyonları konusunda çalışmışlardır. Yapılan çalışmada düşük kükürt içerikli alt bitümlü kömür kullanılmış ve baca gazı geri döndürülmüştür. Oksiyanma koşullarında açığa çıkan NOx emsiyonlarının havayla yakmaya göre %65 daha düşük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca NOx emisyonlarının yakıcı stokiyometrisi, oksijen derişimi ve geri döndürülen baca gazı debisi gibi parametrelerin değiştirilmesi ile optimize edilebileceği sonucuna

varılmıştır. Örneğin, geri döndürülen baca gazı debisinin düşürülmesi ile sıcaklığın yükseldiği ve yakıcının indirgeme bölgesinde NOx'un N_2'ye dönüştüğü gözlenmiştir. Bu bulgular oksiyanma yapılan reaktörlerin tasarımında yol gösterici olmaktadır.

Liu ve diğ. (2005) ve Farzan ve diğ. (2005) yaptığı çalışmalarda önemli bir gözlem de NOx emisyonlarının düşürülmesi için oksiyanmada yanma giriş gazında azotun yokluğuna rağmen optimum yakıcı tasarımı ve operasyonunun önemli olduğudur.

Literatürde düşük azot derişiminin olduğu durumda oksiyanma atmosferi NO ile doygunluğa ulaşacağından NOx oluşum mekanizmasının göz ardı edilebileceği belirtilmiştir. Bu nedenle Zeldovich rekasiyonu NO'nun N_2'ye dönüşümü yönüne kaymaktadır.

CO_2 derişiminin NO emisyonları üzerine etkisi literatürde sadece bir kaç çalışmada raporlanmıştır. Mendiara ve diğ. (2009) yaptıkları çalışmada yakıt açısından zengin koşullarda CO_2'in uçucu azottan NO oluşumunu tetiklerken stokiyometrik ve yakıt açısından fakir ortamda tam tersi durumun söz konusu olduğunu belirtmişlerdir.

Jia ve diğ. (2010) bitümlü kömür ve petrokokun oksiyanma sürecini 100 kW termal kapasiteli DAY sisteminde incelemişlerdir. Bu araştırmacılar da, oksiyanma ortamında ortaya çıkan CO ve NOx emisyonlarının havayla yakmaya sürecine kıyasla daha düşük olduğunu gözlemişlerdir. Çalışmada baca gazı geri dönüşüm oranı %49-62 aralığında değiştirilmiştir. Oksiyanma sırasında baca gazındaki CO_2 miktarı %85' e kadar yükselmiştir. CO derişimi 850°C'da 100 ppm (850°C) ile 20 ppm (950°C) arasında değişmiş, O_2 derişimi ise %3-5 oranında sabitlenmiştir. NOx derişimi göreceli olarak sabit kalmıştır. Yatak sıcaklığı 850°C'dan 950°C'a çıktığında SO_2 derişimi önemli miktarda azalmıştır.

Chaiklangmuang ve diğ. (2002) yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen pulverize kömür yakma ve dolaşımlı akışkan yatakta daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen yanma süreçlerinde uçucu madde ve koktan kaynaklanan NO emisyonu konularını incelemişlerdir. Kömürün uçucu madde içeriğinin NOx oluşumunda önemli rol oynadığı görülmüştür. Kademeli gaz beslemenin yapılmadığı yakıcılarda NOx oluşumu uçucu madde ile artmış, kademeli beslemeli yakıcılarda ise azalmıştır. Yakıttaki azotun NO'a dönüşüm oranı sıcaklık ve O_2 derişimi ile doğru orantılı olduğu bildirilmiştir. Tipik pulverize kömür yakıcılarda NO derişimi alev bölgesinde maksimuma ulaşır ve sıcaklığın yüksek olduğu ve yanmamış karbon taneciklerinin

olduğu reaksiyon bölgesinin sonuna doğru düşmektedir. Akışkan yatak yakma sistemlerinde pulverize kömür yakma sistemlerine göre sıcaklık daha düşük olmasına karşın, kok derişimi daha yüksek ve yakıt taneciklerinin yakıcıda kalma süreleri daha uzundur. Araştırmacılar, NO derişiminin ana reaktörde en yüksek değerlere ulaştığını ve yanma odasının üst bölgelerine doğru gittikçe düştüğünü belirtmektedirler. Bu durum, yüksek yüzey alanına sahip karbon taneciklerinin katalizör görevi yapması ve kolon boyunca NO'in kokla indirgenmesine bağlanmıştır.

Riaza ve diğ. (2012) sürüklemeli akış reaktöründe ve oksiyanma koşullarda yarı antrasit ve yüksek uçucu madde içeriğine sahip bitümlü kömür-prina karışımlarının (prina oranı: %10-%20) tutuşma sıcaklığı, yanma davranışı ve NO emisyonlarını incelemişlerdir. Farklı koşullarda (%21 O_2 - %79 CO_2, %30 O_2 - %70 CO_2, %35 O_2 - %65 CO_2) gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen sonuçlar havayla yakma ortamında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Azot yerine CO_2 kullanıldığı durumlarda tutuşma sıcaklığında yükselme ve yanmanın tamamlandığı sıcaklıkta (burnout temperature) düşüş gözlenmiştir. O_2 derişimi %30 ve %35'e artırıldığında ise tersi bir durum gözlenmiş, yani havayla yakmaya göre tutuşma sıcaklığı düşmüş, yanmanın tamamlandığı sıcaklık yükselmiştir. Biyokütle ilavesiyle tutuşma sıcaklığında önemli oranda bir düşüş, yanmanın tamamlandığı sıcaklıkta hafif bir artış gözlenmiştir. Bu eğilim, karışımdaki biyokütle oranı artırıldığında daha da farkedilir bir düzeye çıkmıştır. Oksiyanma sırasında açığa çıkan NO emisyonlarının havayla yakma sonucunda ortaya çıkan NO emisyonlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Fakat oksijen derişimi artırıldıkça, NO emisyonu, çalışma koşullarından bağımsızlaşmış ve sabit kalmıştır. Bitümlü kömüre biyokütle katıldığında ise NO emisyonlarının önemli miktarda azaldığı gözlenmiştir. Buna karşın yarı antrasit-biyokütle karışımlarının yanmasında NO emisyonları biyokütlenin varlığından çok fazla etkilenmemiştir.

SOx emisyonları

Son yıllarda oksiyanma koşullarında gaz fazda kükürt seviyesinde önemli miktarda artışın olması ile kazanda korozyon ve kül özelliklerinin etkisi önem kazanmıştır.

Oksiyanma koşullarında açığa çıkan SO_2 emisyonlarında farklı araştırma grupları tarafından çok farklı sonuçlar bulunmuştur. Havayla yakmaya göre kıyaslandığında bazı araştırmacılar SO_2 emisyonlarında azalma olduğunu belirtirken bazıları da hiç bir fark olmadığını raporlamışlardır (Toftegaard ve diğ, 2010).

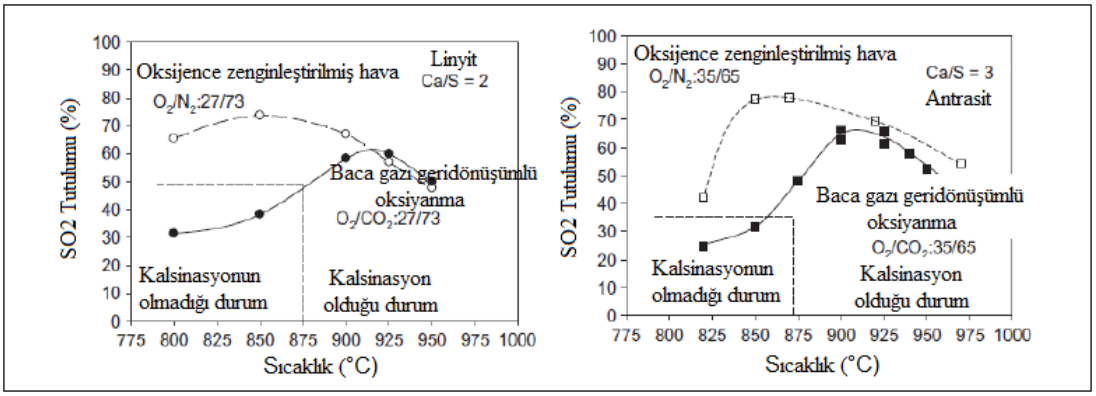
SO_2, yakıtın içerdiği kükürdün oksijen ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşmaktadır. Oksiyanma süresince yanma atmosferindeki oksijen derişimi arttıkça SO_2 emisyonu da artar. Bunun iki nedeni vardır: **1.** Oksijen derişimi ile sıcaklık da artmaktadır. Bu da SO_2 emisyonunu artırmaktadır. **2.** Daha yüksek oksijen derişiminde H_2S de oksitlenmekte ve SO_2 emisyonunu arttırmaktadır.

Hava ile yakma sonucunda açığa çıkan SO_2 emisyonu %21 O_2 - %79 CO_2 ortamında yapılan yakma sonucunda salınan SO_2 emisyonundan daha fazladır. Bunun nedeni, hava atmosferinde daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesidir. Geri dönüşümden önce desülfürizasyon ünitesi yoksa yanma gazlarındaki kükürtlü bileşikler 3-4 katına çıkmaktadır. Kükürt dioksit çok korozif olduğundan kazan bileşenlerinde ciddi sorunlara yol açmaktadır (Toftegaard ve diğ., 2010). Araştırmalar yüksek kükürt içeriğine (%5-6) sahip kömürleri yakan sistemlerin baca gazlarında SO_2 miktarının %1-2 civarına çıkabileceğini göstermiştir (Zheng, 2011).

Araştırmalar akışkan yatak koşullarında optimum kükürt gidermenin 850 °C civarındaki sıcaklık seviyelerinde sağlanabildiğini göstermişlerdir. Bu durum düşük CO_2 derişimine sahip atmosferler (<hacimce %16) için geçerlidir. Oksiyanma koşullarında yüksek CO_2 derişimi, kalsiyum içeren sorbentleri etkilemektedir. Oksiyanma koşullarında optimum kükürt giderim sıcaklığı 900-925 °C'a yükselebilmektedir (De Diego ve diğ, 2013b). Oksiyanmada NOx'da olduğu gibi kimyasal bir SO_2 giderim mekanizması yoktur. Diğer yandan, Maier ve diğ. (2008) külde sülfat oluşturan elementlerin varlığında SO_2 tutmanın mümkün olabileceğini belirtmişlerdir. Ca, Mg ve Na gibi elementler SO_2 ile düşük sıcaklıkta (yaklaşık 450 °C) tepkimeye girerek sülfat oluşturmaktadır (Zheng, 2011).

Oksijence zengin atmosferde yüksek oksijen derişimi SO_2 emisyonunu artırmaktadır. Yüksek oksijen derişimi elementel kükürdün SO_2'e oksidasyonunu desteklemektedir. Bunun yanı sıra, yüksek sıcaklık da SO_2 emisyonunu artırmaktadır. Yüksek SO_2 derişiminin üçüncü nedeni ise daha düşük gaz debisidir. Oksijence zengin hava ile yapılan yakmada toplam yakma gazı debisi azalırken toplam SO_2 miktarı sabit kalmaktadır. Bu da baca gazındaki SO_2 derişimini artırmaktadır (Lupianez ve diğ., 2013). Oksijence zengin hava ile yapılan yakmanın baca gazı geri dönüşümünün yapıldığı oksiyanmaya göre avantajı kükürt giderimi ile ilgilidir. Oksijen derişiminin artması ile kükürt giderimi için optimum sıcaklık artmaktadır. Şekil 2.10'da değişik yanma atmosferlerinde baca gazlarındaki SO_2'in kireçtaşıyla tutulmasının sıcaklıkla

değişimi görülmektedir. Buna göre, %35 oksijen içeren hava ile yapılan yakmada kükürt giderimi için optimum sıcaklık 850 °C'den 870 °C'ye kaymaktadır. Baca gazı geri dönüşümünün yapıldığı oksiyanmada ise bu sıcaklık 900-925 °C civarındadır.



Şekil 2.10 : Değişik yakma atmosferlerinde kireçtaşıyla SO_2 tutulmasının sıcaklık ile değişimi (De Diego ve diğ., 2013b).

Scheffknecht ve diğ. (2011) baca gazındaki yüksek su buharı ve oksijen derişiminin SO_3 oluşumunu tetiklediğini belirtmişlerdir. Baca gazı geri dönüşümünün yapıldığı ve asit çiğlenme noktasının altında çalışan sistemlerde SO_3 emisyonlarının yüksek seviyelere (85 ppmv) çıkarak hatlarda korozyona neden olabileceği bildirilmiştir.

Crosiet ve Thambimutho (2001) O_2/CO_2 geri dönüşümünün NOx ve SO_2 emisyonlarına olan etkilerini incelemişlerdir. Bu araştırmacılar, iki tür deney yapmıştır: **1.**O_2 /CO_2 karışımıyla yapılan deneyler ve **2.** yanma odasına geri beslenen baca gazıyla yapılan deneyler. Havayla yanma sürecindeki emisyonlar referans olarak kullanılmıştır. Emisyonlar reaktör boyunca farklı noktalardan ölçülmüştür. Deneylerden bir tanesi %42 O_2 -%58 CO_2 karışımıyla yapılmıştır ve baca gazı bileşimi %94.5 CO_2, %0.5 N_2, %5 O_2 olarak ölçülmüştür. En yüksek NOx emisyonları havayla gerçekleştirilen yanma deneylerinde gözlenmiştir. Bunun nedeni; ortamda daha fazla azotun bulunması ve bunun azot oksitlerine dönüşmesidir. Buna karşın, geri beslenen baca gazlarıyla gerçekleştirilen oksiyanma sürecinde ortaya çıkan NOx miktarının O_2/CO_2 karışımıyla gerçekleştirilen yanma sürecinde ortaya çıkan NOx emisyonlarından daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, baca gazlarıyla yanma odasına geri beslenen NO'in burada indirgenerek N_2'a dönüşmesiyle açıklanmıştır. Öte yandan oksiyanma sürecinde oksijen derişimi arttığında SO_2 emisyonu da artmıştır.

Hu ve diğ. (2000) yüksek uçucu madde içeriğine sahip kömürün N_2-O_2 (%20 O_2 - %80 N_2, %50 O_2 - %50 N_2, %80 O_2 - %20 N_2, %100 O_2) ve CO_2 -O_2 (%20 O_2 - %80 CO_2, %50 O_2 - %50 CO_2, %80 O_2 - %20 CO_2) karışımları ile yakılması sonucu oluşan CO_2, NOx ve SO_2 emisyonlarını incelemişlerdir. Sıcaklığın, NOx emisyonlarında önemli bir etkiye sahip olduğu, ancak SO_2 emisyonunda çok az rolü olduğu bulunmuştur. Deneylerde, endüstriyel ölçekli yakıcılarda olduğu gibi reaktörde kalma süresi 2 s olarak sabit tutulmuştur. Havayla yapılan yanma deneylerinde baca gazındaki CO_2 derişimi %16 iken, azotsuz (O_2+CO_2) ortamda bu %95'in üstüne çıkmıştır.

Garcia-Labiano ve diğ. (2011) iki farklı kireçtaşının SO_2 tutma kapasitesini ve oksijence zengin yakma koşulları için optimum sıcaklığı tespit etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, ana çalışma parametreleri olan CO_2-SO_2 derişimi, sıcaklık ve tane boyutunun kalsinasyon ve sülfatasyona olan etkileri incelenmiştir. Akışkan yatak yakıcılarda tipik işletme koşullarında sülfatasyon reaksiyonu genellikle sorbentin dış yüzeyinde ve gözenek çeperlerinde gerçekleşmektedir. $CaSO_4$'ın molar hacmi $CaCO_3$ ve CaO'in molar hacimlerinden büyük olduğundan gözenekler tıkanmakta ve böylece taneciklerin merkezi bölgeleri sülfatlanmadan kalmaktadır. 860 °C'ın altındaki sıcaklıklarda doğrudan sülfatasyon gözlemlenmiştir. Ancak sıcaklık arttıkça, kalsine olmuş sorbentin yüzeyinde sülfatasyonun gerçekleşmeye başladığı saptanmıştır. Yüksek sıcaklıklarda adsorban tanecikleri sinterleştiğinden, kükürt tutma veriminde kayıp gerçekleşmiştir. Tipik işletme koşulları ve kireçtaşı tanecik boyutları için maksimum sorbent dönüşümüne 900 °C civarında ulaşılmıştır. Bu koşullarda kireçtaşının sülfatasyon reaksiyonun hızı gözenekler tıkanıncaya kadar difüzyon tarafından kontrol edilmekte, sonraki aşamalarda ise oluşan $CaSO_4$ tabakası içinde gerçekleşen difüzyon reaksiyon hızını kontrol etmeye başlamaktadır. Kimyasal reaksiyon hızı sülfatasyon reaksiyonunun gerçekleştiği yerdeki tabakanın kalınlığını etkilemektedir. Gözenekler tıkanmadan önce, sıcaklık arttıkça tabaka kalınlığı azalmaktadır. Çalışmada kullanılan iki farklı kireçtaşının sülfatasyon özellikleri de farklı olmuştur. Bununla birlikte, reaksiyon süresinin uzun olduğu durumlarda, dönüşen sorbent miktarı her iki sorbent için de tanecik boyutu küçüldükçe artmaktadır.

Czakiert ve diğ. (2006), kömürün DAY'da oksiyanma koşullarında yanma sürecini değişik koşullarda incelemişlerdir. Yanma süreci 973-1133 K operasyon sıcaklığında ve %21 O_2-%79 N_2 (kuru hava), %40 O_2-%60 N_2, %60 O_2-%40 N_2; %21 O_2-%79 CO_2, %40 O_2-%60 CO_2, %60 O_2-%40 CO_2 gibi değişik atmosferlerde

gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, karbon, kükürt ve azot dönüşüm oranları hesaplanmıştır. Reaktör sıcaklığının karbon dönüşüm oranına etkisinin olmadığı, buna karşın karbon dönüşüm oranının oksijen derişimi ile arttığı gözlenmiştir. Oksiyanma (O_2+CO_2) ortamında gerçekleşen karbon dönüşüm oranı hava (O_2+N_2) atmosferinde gözlemlenen oranlardan daha düşüktür. Bu durum, yanma sırasında Bouduard reaksiyonu ile CO_2'nin CO'ya indirgenmesi ve bunun etkisiyle yanma sürecinin yavaşlanmasına bağlanmıştır. Havayla yanma sürecinde yakıtın içerdiği kükürdün %90'ı SOx'a dönüşmekte, bu dönüşme oranı karışımdaki oksijen derişimi ve sıcaklık ile artış göstermektedir. Oksijen derişiminin artması ile yakıt taneciklerinin sıcaklığı ve buna bağlı olarak kükürt dönüşümünün arttığı öne sürülmüştür. Sonuç olarak, oksiyanma koşullarında CO_2'nin N_2 ile yer değiştirmesi durumunda kükürt emisyonlarında değişiklik gözlenmemektedir. Ancak oksijen kısmi basıncı, uygun alev sıcaklığı sağlayacak kadar artırıldığında SO_3 emisyonu artmaktadır. SO_2 giderimi yapılmadığı durumda baca gazı geri dönüşümü yapılırsa hem yüksek hem de düşük sıcaklıkta SO_3 seviyeleri artarak hatlarda korozyon meydana gelmektedir. SOx emisyonlarının yüksek olması durumunda uçucu külde kalan kükürt miktarı artmaktadır.

Pilot Ölçekli Oksiyanma Çalışmaları

Oksiyanma konusunda, laboratuvar çalışmalarının yanı sıra, dünyada pilot ölçekli çalışmalar da yapılmaktadır. Termogravimetrik ve laboratuvar çalışmalarında, yakıtların oksiyanma koşullarındaki davranışının ve yanma özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Ancak endüstriyel ölçek uygulamalara geçebilmek için pilot ölçek çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar kirleticilerin emisyonu, sistemin ısı transfer özellikleri, sistemin alt birimlerinin performansı ve entegrasyonu konularında bilgi üretmeye yönelik olarak yapılmaktadır. Pilot ölçek oksiyanma çalışmaları açısından, 2008 yılı bir dönüm noktası niteliğindedir. Bu tarihte Almanya'da, 30 MW termal kapasiteye sahip ilk oksiyanma demonstrasyon sahası kurulmuştur (Buhre ve diğ., 2005). Bunu çeşitli ülkelerde devreye alınan benzer tipte diğer sistemler izlemiştir. Halen faaliyette olan bazı önemli pilot ölçek oksiyanma sistemleri aşağıda kısaca tanıtılmıştır.

Önemli pilot tesisler (Buhre ve diğ, 2005):

- **Vattenfall 30 MW_{th} Schwarze Pumpe tesisi:** Almanya'da Berlin'in güneydoğusunda Brandenburg bölgesinde kurulmuştur. 2001'de oksiyanma teknolojisi üzerine Ar-Ge projesi başlatılmış olup 2008 yılında 30 MWth kapasiteli oksiyanma pulverize pilot tesisi devreye alınmıştır. Pulverize yakıt olarak kaliteli kömür veya ön kurutmaya tabi tutulmuş linyit kullanılmıştır. Sistemde, kireçtaşı ve amonyağın kullanıldığı ve NOx, SOx, H_2O ve uçucu kül gibi safsızlıkların uzaklaştırılmasını sağlayan bir gaz temizleme ünitesi bulunmaktadır. Bu tesiste 8 ton/gün sıvı CO_2 tutulmakta ve gıda sektöründe kullanılabileck saflıkta CO_2 elde edilmektedir.
- **CIUDEN test ünitesi:** İspanya'nın kuzeybatısında Ponferrada'da kurulmuştur ve 20 MW termal kapasiteli pulverize yakıt ve 30 MW termal kapasiteli DAY oksiyanma ünitelerine sahiptir. Sistemde kireçtaşı hazırlama/besleme sistemi, opsiyonel seçici katalitik indirgeme ünitesi, filtreler ve ıslak gaz desülfürizasyon üniteleri bulunmaktadır. Havayla yanma sürecinde, bir absorpsiyon kulesi vasıtası ile CO_2 tutulmakta ve daha sonra sıkıştırma/soğutma ünitesine beslenmektedir. Oksiyanma sürecinde ise baca gazındaki CO_2 doğrudan sıkıştırma/soğutma ünitesine beslenmektedir.
- **Babcock&Wilcox (B&W) projesi:** 30 MW termal kapasiteli sistem ABD Ohio, Alliance'de kurulmuştur. 2007 yılında B&W'ya ait 30 MW termal kapasiteli Temiz Çevre Geliştirme Ünitesi (Clean Environment Development Facility) oksiyanma modunda çalıştırılmak üzere modifiye edilmiştir. Sistemde önce baca gazındaki uçucu kül, SOx, su buharı giderilmekte sonra temizlenmiş CO_2 sıkıştırma ünitesine gönderilmektedir.
- **Pearl Power Station (Jupiter Oxygen):** 22 MWe kapasiteli 4-yakıcılı oksiyanma sistemi ABD'de 2008'de devreye alınmıştır. Tesis elektrik üretim sistemi ve CO_2 sıkıştırma ünitelerinden oluşmaktadır. CO_2 tutulmadan önce baca gazındaki cıva uzaklaştırılmaktadır.

Oksiyanma için literatürde birçok sistem önerilmektedir (Buhre ve diğ, 2005; Seepana ve Jayanti, 2008; Seepana ve Jayanti, 2010; Hong ve diğ., 2009; Andersen ve diğ., 2008). İlk versiyonlardan bir tanesi, atmosferik basınçta, alev sıcaklıklarını uygun seviyelerde tutmak amacıyla baca gazının bir kısmının reaktöre geri beslendiği atmosferik basınçta çalışan sistemler olmuştur. Diğer bir alternatif ise baca gazının yanma odasına geri döndürülmesi yerine yanma odası giriş hattına su buharının enjekte

edildiği sistemlerdir (Seepana ve Jayanti, 2010). Bu sistemlerin performansını daha da artırmak için, reaktörün daha yüksek basınçlarda çalıştırılması da literatürde önerilmektedir (Hong ve diğ, 2009; Zheng, 2011; Fassbender, 2009; Yang ve diğ, 2010).

Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu pulverize kömür yakma sistemleri konusunda olmuştur. Bu çalışmalar pulverize oksiyanma sistemlerinin kurulmasında teknik kısıtlamalar olmadığını göstermiştir. Ancak tutuşma ve alev kararlılığı gibi operasyonel parametrelerde karşılaşılan güçlükler net elektrik verimini düşürebilmekte ve baca gazının içerdiği safsızlıklar gaz şartlandırma ünitelerini olumsuz etkileyebilmektedir (Buhre ve diğ, 2005; Wall ve diğ, 2009).

CO_2'nin tutulması açısından DAY oksiyanma teknolojisi bazı durumlarda, pulvarize oksiyanma teknolojisine göre daha iyi bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. DAY'da yüksek gaz hızlarında akışkanlaştırılan katı tanecikleri yanma odasını terk ettikten sonra geri dönüş ayağı (downcomer) vasıtasıyla tekrar yanma odasına geri dönmektedirler. Sıcak yatak malzemesi yakıtın kurutulması, uçucularının uzaklaştırılması ve tutuşması için gerekli ısıyı sağlamaktadır. Oksijen derişiminin çok yüksek olduğu (%70) durumlarda reaktör içi sıcaklıkların yükselmesi beklenmektedir. DAY oksiyanma sistemlerinde pulverize sistemlere göre daha düşük baca gazı geri dönüşümü ile yüksek oksijen derişimlerine çıkılabilmektedir. DAY yakma sistemleri yakıt esnekliğine sahiptir. Odun, şehir atıkları gibi biyokütleler yüksek verimlerle yakılabilmektedir. DAY'da kömür-biyokütle karışımları da yakılmaktadır. DAY oksiyanma sistemlerinin pulverize oksiyanmaya göre bir diğer üstünlüğü ise kurulumlarının daha basit olmasıdır. DAY yakma sistemlerinde çok gelişmiş, karmaşık yakıcı tasarımları ve işletimine gereksinim yoktur. Mevcut DAY yakma sistemlerinin oksiyanmaya uygun hale getirilebilmesi daha kolaydır (Tan ve diğ, 2012).

Payne ve diğ. (1989) 3 MW_{termal} kapasiteli sistemde yaptıkları çalışmalarda kül oluşumu, cüruflaşma (slagging) ve tortu oluşumu (fouling) konularında havayla yakma ile oksiyanma arasında fark olmadığını gözlemişlerdir. Ancak, Glarborg ve diğ. (2003) yüksek CO seviyelerinin korozyon ve cüruflaşmayı tetiklediğini öne sürmüşlerdir. Yakma sırasında kömürün mineral madde içeriğinin sıcaklık ve kömür taneciklerini çevreleyen gaz faz bileşiminden önemli ölçüde etkilendiği bilinmektedir. Yanma atmosferinin değişmesi, havayla yakma ve oksiyanma arasında tanecik

sıcaklığı farkının oluşması kül oluşum mekanizmasını, kül bileşimini ve kalitesini etkilemektedir.

Türkiye'de Oksiyanma Çalışmaları

Oksiyanma dünyada yeni ve yoğun ilgi çeken bir teknolojidir. Yapılan çalışmalar daha çok bu teknolojinin pulvarize kömür yakma sistemlerine uygulanması konusunda yoğunlaşmıştır. Akışkan yatak sistemlerinde kömürün oksiyanma ortamında yakılması konularındaki teknolojik uygulama çalışmaları dünya genelinde yoğun bir şekilde devam etmektedir. Buna karşın, ülkemizde oksiyanma konusunda hemen hemen hiç bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle termogravimetrik analiz cihazında farklı yakıtların kinetik parametrelerinin hesaplanmasına yöneliktir. Bu çalışma, konusunda dünyadaki çalışmalarla eş zamanlı ve ülkemizde ise ilk çalışma niteliğini taşıyan özgün bir çalışmadır. Oksiyanma ile yanma ürünleri ve buna bağlı olarak bacadan kaybolan atık ısı miktarları düşürülmüş ve havayla gerçekleştirilen klasik yakma süreçlerine kıyasla daha yüksek yanma verimlerine ulaşılmıştır.

Türk linyitleri üzerine yapılan akışkan yatak yakma çalışmaları 1980'li yılların ortalarında başlamış olsa da çalışmalar çok sınırlı kalmıştır. Bu çalışmaların çoğu küçük ölçekli kabarcıklı akışkan yatak yakıcılarda gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmalarda Türk linyitlerinin kabarcıklı akışkan yatakta uçucu madde salınımı ve yanma davranışları (Atımtay, 1987; Ekinci ve diğ, 1990; Urkan ve Arıkol, 1994), aglomerasyon ve yanma/işletme kararlılığı (Atakül ve Ekinci, 1989; Atakül ve Ekinci, 1990; Atakül ve diğ, 2005), çevresel etkileri (Altindag ve diğ, 2004) incelenmiştir. Türk linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta yakılması ile ilgili çalışmalar genellikle son on yılda yapılmıştır (Topal ve diğ, 2003; Atımtay ve Topal, 2004). Selçuk ve Ozkan (2011) 150 kW termal kapasiteli dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde düşük ısıl değere sahip bir Türk linyitini yakmışlardır. Geliştirilen Dolaşımlı Akışkan Yatak Yakma modelinin doğrulanması amacıyla deneysel bulguların bulunması için emisyonlar ölçülmüştür. Model ile deneysel veriler arasında oldukça iyi bir bağıntı olduğu görülmüştür.

Varol ve diğ. (2014a, 2014b) linyit-orman atıkları (odun) karışımlarının (%10, %30 ve %50 karışım) dolaşımlı akışkan yatakta yakma çalışmalarını yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda işletme sorunları ile karşılaşılmamış olup orman atıklarının karışımdaki oranının artırılmasının NO emisyonu üzerinde önemli bir etkisinin

olmadığı, ancak kükürt içermemeleri nedeni le SO_2 emisyonlarını düşürdüğü görülmüştür. İkincil hava kullanımı NOx emisyonunun düşmesini sağlarken SO_2 emisyonunun artmasına neden olmuştur. Bu çalışmada, karışımdaki biyokütle oranına bağlı olarak minimum CO salınımı için optimum hava fazlalık katsayısının 1.2-1.5 aralığında değiştiği görülmüştür. Diğer bir çalışmada ise, iki adet linyit ile prina dolaşımlı akışkan yatakta yakılmıştır. %50 linyit-%50 prina karışımı, prinanın külünün deformasyon sıcaklığının 270 °C altında, 850 °C'da prinanın yüksek potasyum içeriğine (külde ağırlıkça %49.4) rağmen 25-50 saat süreyle, herhangi bir sinterleşme veya aglomerasyon olmaksızın yakılmıştır (Varol ve Atımtay, 2015).

Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, %2-2.9 oranında kükürt içeren linyitler ile kızılçam karışımı 750 kW termal kapasiteli bir dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde yakılmıştır. Bu sistem Türkiye'de test amaçlı kullanılan ve buhar üretimi yapan en büyük kapasiteli sistem pilot sistemdir (TÜBİTAK 1007 KAMAG "Biyokütle ve Biyokütle/Kömür Karışımlarını Dolaşımlı Akışkan Yatakta Yakma Teknolojilerinin Geliştirilmesi" Projesi Sonuç Raporu, 2012). Tek başına linyit ve linyit-kızılçam karışımları yakıldığında karbon bazlı yanma verimi %92-96 aralığında hesaplanmıştır. ASME standardına göre kazan verimi ise %70-79 aralığında hesaplanmıştır (Atımtay ve diğ, 2017).

Kazanç ve diğ. (2011) farklı özelliklere sahip pulverize kömürler ile biyokütle ve bunların karışımlarını farklı oksijen derişimlerinde (%20, %40, %60, %80 ve %100) O_2/N_2 ve O_2/CO_2 atmosferinde elektrikle ısıtılmış drop-tüp fırında 1150 °C sıcaklıkta yakmışlardır. Dört farklı kömürün yakıldığı çalışmada, aynı oksijen derişimi için O_2/CO_2 ortamında ölçülen NOx derişiminin O_2/N_2 ortamına göre %19-43 oranında daha az olduğu gözlemlenmiştir. Şekerkamışı küspesi ve kömür/şeker kamışı küspesi karışımları ile yapılan deneylerde, O_2/CO_2 ortamındaki NOx emisyonunun O_2/N_2 ortamındakine göre %22-39 daha düşük olduğu görülmüştür. NOx emisyonu O_2 derişiminin artmasıyla artmıştır. Ancak oksijen derişimi %50'nin üstüne çıktığında azalmaya başlamıştır. Azotun yerini CO_2'nin almasının SO_2 emisyonlarını çok fazla etkilemediği görülmüştür. Öte yandan, SO_2 emisyonunun yakıtların kükürt içerikleri (%0.07-1.4) arttkça arttığı, kalsiyum içeriği arttıkça (%0.28-2.7) ise azaldığı gözlenmiştir. Bu çalışmalarda, yakıta bağlı azotun %20-50 oranında NOx emisyonuna dönüştüğü görülmüştür.

Chalmers ve diğ. (2017) Türk kömürlerinin yanma davranışı ve kinetiği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Tunçbilek ve Soma bölgesinden alınan iki adet kömür ile zeytin atığı örneklerini termogravimetrik analiz cihazında 15, 20 ve 40 °C/dak ısıtma hızında yakmışlar ve Coats-Redfern yöntemine göre yanma sürecinin kinetik parametrelerini hesaplamışlardır. Tunçbilek ve Soma linyitlerinin yaklaşık 500 °C'da tek bir pike sahip oldukları, ancak zeytin atığının 290 ve 423 °C'da olmak üzere yanmanın değişik aşmalarında iki pik verdiğini gözlemişlerdir. Yakıtların yanabilirlik indeksinin düşük ısıtma hızında çok benzer olduğu, ancak yüksek ısıtma hızında Tunçbilek linyitinin yanabilirlik indeksinin Soma linyitininkinin 2 katı olduğu görülmüştür. Görünür aktivasyon enerjilerinin ısıtma hızının 15 °C/dak'dan 20 °C/dak'ya çıkarıldığı durumda sabit olduğu gözlenmiştir. Isıtma hızı 20 °C/dak'dan 40 °C/dak'ya artırıldığında ise görünür aktivasyon enerjisinde düşüş görülmüştür.

Yüzbaşı ve Selçuk (2011), ithal kömür, petrokok, yerli linyitler, prina ve bu yakıtların çeşitli karışımlarını, hava ve oksiyanma koşullarında piroliz ve yanma davranışlarını termogravimetrik analiz yöntemi (TGA) ve buna bağlı olan Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometresini (FTIR) kullanarak incelemişlerdir. Piroliz testleri hava ve oksiyanma koşullarının seyreltici gazları olan azot ve karbon dioksit ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Piroliz testlerinde elde edilen sonuçlara göre, kütle kayıp profillerinin her iki piroliz ortamında da yüksek sıcaklıklara kadar benzer davranışlar sergilediği görülmüş ve bu durum CO_2 gazının bu sıcaklık aralığında inert bir gaz şeklinde hareket ettiğini göstermiştir. Ancak CO_2 ortamında 700 °C'dan sonra kömür-CO_2 gazlaştırma reaksiyonu sebebiyle kütle kaybının devam ettiği görülmüştür. Yakma testleri ise hava ve oksiyanma ortamında (%30 O_2 – %70 N_2; % 21 O_2 – % 79 CO_2; %30 O_2 – % 70 CO_2) yapılmıştır. Yakma testlerinde elde edilen sonuçlar yanma atmosferindeki azot gazının, aynı hacimdeki karbon dioksit gazıyla yer değiştirilmesi sonucunda yanma prosesinin belirgin bir şekilde etkilenmediğini; ancak CO_2 gazının yanmada bir miktar gecikmeye (kütle kayıp hızında düşüş ve tam yanma sıcaklığında artış) yol açtığını göstermiştir. Kütle kayıp profillerinin karşılaştırılması sonucunda, yanma prosesine N_2 gazının CO_2 ile yer değiştirmesinden ziyade, en baskın etkenin yanma atmosferindeki yüksek oksijen derişimi olduğu anlaşılmıştır. Oksijen derişiminin artmasıyla yanma profilleri daha düşük sıcaklıklara doğru kaymış, maksimum kütle kayıp hızları artmış ve bu noktaya denk gelen maksimum sıcaklıklar düşmüş, tam yanmaya daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürede ulaşılmıştır.

Okutan, H. ve diğ. 30 kW_{termal} kapasiteli dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde hava, oksijence zengin hava ve baca gazı geri dönüşümlü (oksiyanma) yakma deneyleri gerçekleştirerek kömürlerin ve biyokömürün bu koşullardaki yanma süreçlerini kıyaslamalı olarak incelemişlerdir (TÜBİTAK 1003 ARDEB "Dolaşımlı Akışkan Yatak Yakma Sisteminde Linyit ve Biyokömürün Oksijence Zengin Ortamda Yakılması" Projesi Sonuç Raporu, 2017).

3. DENEYSEL

Bu çalışmada Türkiye'nin farklı kömür sahalarından alınan değişik özelliklere sahip 19 adet linyit numunesinin dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde yanma süreçleri incelenmiştir. Önce bütün kömürler hava ortamında yakılmıştır. Süreç; yanma verimi, sistem içinde sıcaklık dağılımları, yanma ve işletme kararlılığı ve çevresel etkiler (emisyonlar) gibi çeşitli açılardan araştırılmıştır (Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü, "Kömür Karakterizasyonu ve Yanma Davranışlarının İncelenmesi Projesi" Sonuç Raporu, 2015). Hava atmosferindeki yanma çalışmalarından sonra, bu linyitler içinden seçilen Bursa-Orhaneli Gümüşpınar (L15) ve Manisa-Soma (L19) kömürlerinin ayrıca oksijence zengin hava ve oksiyanma koşullarında yanma süreçleri incelenmiştir. Sonuçlar, hava ortamında yanma sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

3.1 Kömürler

Çalışmalarda toplam 19 adet linyit numunesi kullanılmıştır. Kömürler Türkiye Kömür İşletmelerine (TKİ) ait Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ), Seyitömer Linyit İşletmesi (SLİ), Ege Linyitleri İşletmesi (ELİ), Güney Ege Linyitleri İşletmesi (GELİ), Yeniköy Linyit İşletmesi (YLİ), Bursa Linyitleri İşletmesi (BLİ), Çan Linyit İşletmesi (ÇLİ) ve Ilgın Linyit İşletmesi (ILİ) sahalarından alınmış ve TKİ tarafından sağlanmıştır. Linyit numunelerinin alındığı bölgeler ve metin içerisinde kullanılan kod isimleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Yakma deneylerinde kullanılan kömür örnekleri kodları ve sağlandığı kaynaklar.

Örnek Kodu	Alındığı Bölge	Sağlayan Kurum
L1	Kütahya-Tunçbilek Lavvar	TKİ GLİ
L2	Kütahya-Ömerler Lavvar	TKİ GLİ
L3	Kütahya-Ayvalı Pano	TKİ SLİ
L4	Kütahya-Höyükaltı krible	TKİ SLİ
L5	Kütahya-S48 Lavvar	TKİ SLİ
L6	Manisa-İmbat Lavvar	TKİ ELİ
L7	Manisa-İmbat Araürün	TKİ ELİ
L8	Manisa-İmbat Tüvenan	TKİ ELİ
L9	Manisa-Kısrakdere	TKİ ELİ
L10	Manisa-Dereköy Lavvar	TKİ ELİ
L11	Muğla-Eskihisar	TKİ GELİ
L12	Muğla-Tınaz	TKİ GELİ
L13	Muğla-Hüsamlar krible	TKİ YLİ
L14	Muğla-İkizköy Işıkdere	TKİ YLİ
L15	Bursa-Orhaneli	TKİ BLİ
L16	Bursa-Keles	TKİ BLİ
L17	Çanakkale-Çan	TKİ ÇLİ
L18	Konya-Ilgın	TKİ ILİ
L19	Manisa-Soma	TKİ ELİ

3.2 Kireçtaşı

Linyitlerin dolaşımlı akışkan yatakta yanması sonucunda ortaya çıkan kükürt oksitleri yatak içinde (in-situ) tutmak amacıyla farklı kireçtaşı örnekleri adsorban olarak kullanılmıştır. GLİ, ELİ, ÇLİ ve Bursa-Orhaneli linyitlerinde Çanakkale bölgesinden alınan kireçtaşı (KT1) kullanılmıştır. Diğer linyit işletmelerinde ise bu işletmelerin olduğu bölgeden kireçtaşı örneği alınmış olup SO_2 tutma deneylerinde GELİ, Bursa-Keles, YLİ ve ILİ'den alınan linyitlerin yakma deneylerinde SO_2 giderimi amacıyla sırasıyla KT2, KT3, KT4 ve KT5 kullanılmıştır. Tüm kireçtaşı örneklerinin SO_2 tutmada en önemli bileşen olan $CaCO_3$ oranları tespit edilmiş olup kireçtaşı örneklerinin kodları ve $CaCO_3$ içerikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : SO_2 tutma deneylerinde kullanılan kireçtaşı örneklerinin kodları ve $CaCO_3$ içerikleri.

Kireçtaşı Kodu	Alındığı Bölge
KT1	Çanakkale-Çan
KT2	Muğla-Yatağan
KT3	Bursa-Orhaneli
KT4	Muğla-Milas
KT5	Konya-Ilgın

3.3 Yatak Malzemesi (Silisyum Kumu)

Dolaşımlı akışkan yatak yakma deneylerinde yatak malzemesi olarak silisyum kumu kullanılmıştır. Silisyum kumunun özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Yakma deneylerinde kullanılan yatak malzemesi özellikleri.

Yatak malzemesi	Silisyum kumu
Silisyum kumu içeriği	%95.2 SiO_2 , %1.76 Al_2O_3, %0.358 Fe_2O_3, %0.338 CaO, %0.126 F, %0.108 MgO, %0.638 Na_2O, %0.299 K_2O
Ortalama tanecik boyutu (mm)	0.34
Gerçek yoğunluk (g/cm^3)	2.4
Yığın yoğunluğu (g/cm^3)	1.7

3.4 Karakterizasyon

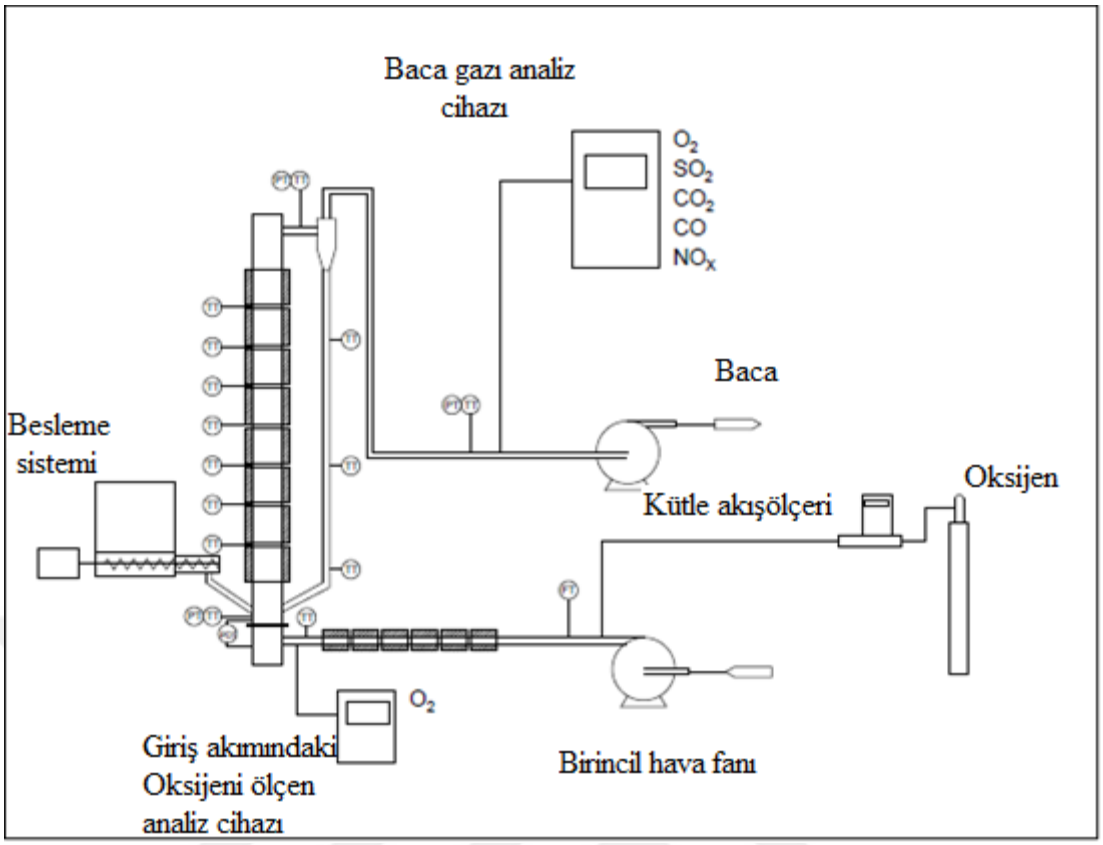
Deneylerde kullanılan kömürler çeşitli yöntemler kullanılarak karakterize edilmişlerdir. Karakterizasyon çalışmaları, ilgili ulusal ve uluslararası standart yöntemlere göre yapılmıştır. Yapılan karakterizasyonlar ve bunlar için kullanılan yöntem ve cihazlar Çizelge 3.4'de sunulmuştur.

Çizelge 3.4 : Kömürlerin ve adsorbanların karakterizasyonunda kullanılan yöntemler ve cihazlar.

Analiz	Parametre	Analiz yöntemi	Kullanılan cihaz
Kısa analiz	Nem, UM, Kül	ASTM D 7582	LECO TGA 701
Elementel analiz	C, H, N	ASTM D 5373	LECO Truspec
Kükürt analizi	Toplam kükürt	ASTM D 4239	LECO Truspec S
Oksijen analizi	Oksijen	ASTM D 3176	-
Üst ısıl değer	Üst ısıl değer	ASTM D 5865	LECO AC600
Alt ısıl değer	Alt ısıl değer	ISO 1928	-
Kül ergime sıcaklıkları	Deformasyon, yumuşama, yarıküre, kül ergime sıcaklıkları	ASTM D 1857	LECO AF700
Kül analizleri	Oksijen-uranyum	XRF	Philips PW-2404 X-ray floresance
Kireçtaşı analizleri	Nem,$CaCO_3$, $MgCO_3$, SiO_2,vb.	EN 12485	-
Silisyum kumu analizi	SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, vb.	TS EN 15309	-

3.5 Dolaşımlı Akışkan Yatak Yanma Deney Sistemi

Yakma deneyleri için 30 kW termal kapasiteli laboratuvar ölçekli bir dolaşımlı akışkan yatak (DAY) yakma sistemi kullanılmıştır. Sistem Şekil 3.1'de şematik olarak verilmiştir. Sistem tasarımı ile igili detaylar [Kayahan, U., Doktora Tezi, 2017] verilmiştir.



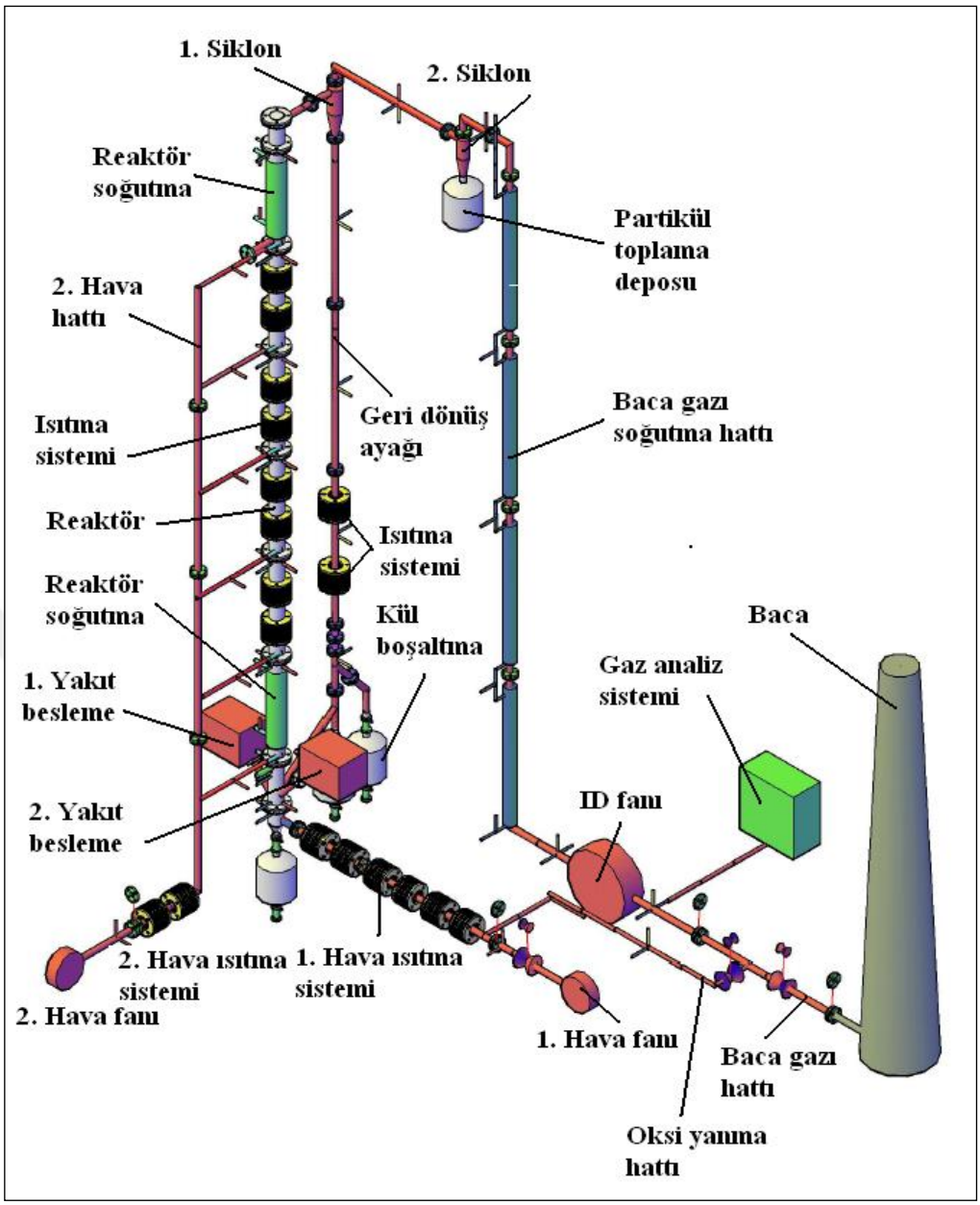
Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan laboratuvar ölçekli DAY yakma sistemi.

Sistem başlıca, DAY yakma reaktörü, yakıt besleme sistemi (iki adet) ve hava besleme sistemi (birincil ve ikincil hava) üniteleri, siklonlar (iki adet), geri dönüş ayağı, kül toplama ve boşaltma ünitesi, baca gazı hattı, taşıyıcı platform, ısıtma ve soğutma elemanlar ile ölçme ve kontrol ünitelerinden oluşmaktadır. Bu üniteler aşağıda kısaca tanıtılmıştır.

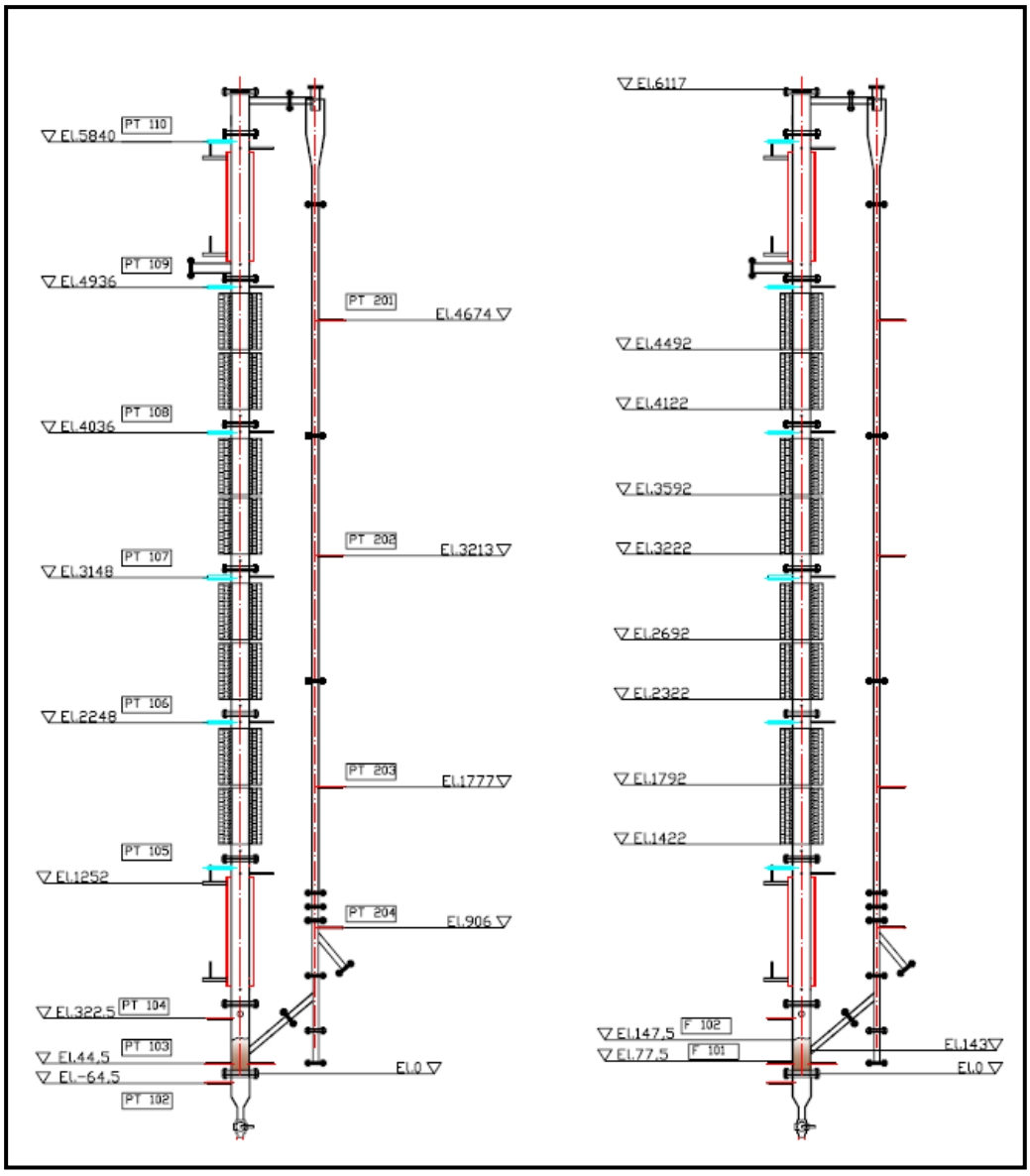
DAY reaktörü: Yanmanın gerçekleştiği birimdir. Yakıcı 4" AISI 310S paslanmaz çelikten yapılmış olup, 108 mm çapında ve 6 m yüksekliğindedir. Reaktör modüller şekilde tasarlanmıştır ve dağıtıcı plakadan itibaren 8, hava odasından (windbox) itibaren 9 modülden oluşmaktadır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi; 2. ve 7. modüller (yeşil görünen parçalar) sistemden ısıyı çekmek amacıyla ısı değiştiricisi tipinde (su/hava cepli) tasarlanmıştır. Geri dönüş ayağı J valf tipi tasarlanmış olup oluşabilecek tıkanmaları açabilmek amacıyla iki adet hava girişi bulunmaktadır. Gerektiğinde buradan kontrollü bir şekilde hava beslenmektedir. Başlangıçta (start-up) ısıtma 15 adet elektrikli ısıtıcı ile sağlanmaktadır. Bunların 6 adedi birincil havayı ısıtmak amacıyla kullanılmaktadır. Diğerleri ise yakıcı ve geri dönüş ayağı üzerinde yer almaktadır. Değişik noktalarda sıcaklık ve basınç ölçümlerinin yapıldığı ölçüm

noktaları bulunmaktadır. Ortalama yatak sıcaklığı dağıtıcı plakadan itibaren 32 mm, 44 mm ve 322 mm mesafeden ölçülmektedir. Ortalama freeboard sıcaklığı dağıtıcı plakadan itibaren 1250 mm ve 2250 mm yükseklikten ölçülmektedir. Birincil hava, ikincil hava ve baca gazı debileri orifiz debiölçer ile, süpürme (purge) havası rotametre ile, oksiyanma deneylerinde kullanılan oksijen ve karbon dioksit debileri ise kütle akış ölçer ile ölçülmektedir. Basınç, sıcaklık ve debiler SIEMENS PLC ve SCADA sistemi ile ölçülüp kontrol edilmektedir.

Hava ve yakma için kullanılan gazlar, hava odasıyla yanma bölgesi arasında bulunan delikli tip bir dağıtıcı plakadan geçerek yanma odasına girmektedir. Dairesel kesite sahip dağıtıcı elek üzerinde 1 mm çapında 618 adet orifiz bulunmaktadır. Reaktörün çıkışında seri halde çalışan iki adet siklon bulunmaktadır. Birinci siklonda, gazlardan ayrılan kül, yanmamış kömür ve yatak malzemesi (kum) taneciklerinden oluşan katı kütle, bu siklona bağlı geri dönüş ayağıyla geçerek buradan yanma odasına tekrar geri beslenmektedir. Geri dönüş ayağında sıcaklık düşüşünün fazla olduğu durumlarda (sıcaklığın reaktör boyunca ~850° C, geri dönüş ayağında ise 550-600 °C civarında olması beklenir.) geri dönüş ayağındaki malzemeyi ısıtmak amacıyla 2 adet fırın kullanılmıştır. Birinci siklondan çıkan gazlar ikinci bir siklona girmekte ve burada ince tanecikler tutulmaktadır. Bu siklonu terk eden yanma gazları tahliye hattı (baca hattı) üzerindeki torba filtreden geçtikten sonra bir çekiş fanı (ID fanı) yardımıyla bacaya gönderilmektedir. DAY yakma sistemi şematik gösterimi Şekil 3.2'de; DAY yakma sisteminde sıcaklık ve basınç ölçümlerinin yapıldığı noktalar ve bunların dağıtıcı plakadan itibaren yükseklikleri Şekil 3.3'de görülmektedir.



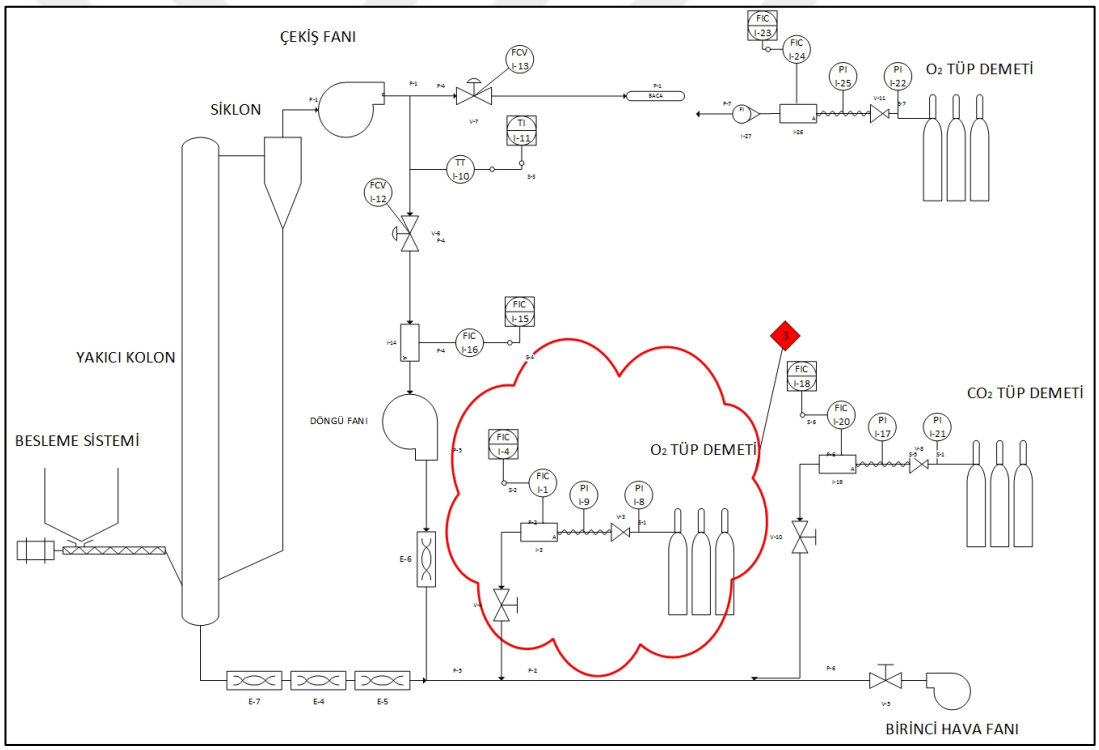
Şekil 3.2 : DAY yakma sistemi.



Şekil 3.3 : DAY yakma sisteminde ölçüm noktaları (dağıtıcı plakadan itibaren).

***Hava/gaz besleme ünitesi*:** Bu ünite 2 adet hava besleme fanı ve 8 adet hava ısıtıcısından oluşmaktadır. Birinci fan, yanma odasına birincil yanma havasının beslenmesi için kullanılmaktadır. Bu fandan gelen hava/gaz 6 adet hava ısıtıcısından geçerek genel olarak Türk linyitlerinin tutuşma sıcaklığı olan 400 ºC' a kadar ısıtılmakta ve dağıtıcı elek vasıtasıyla yanma odasına beslenmektedir. Birincil hava akışkanlaştırma ve yanma için kullanılmaktadır. İkinci fan ise ikincil hava beslemesi için kullanılmaktadır. Hava besleme debileri hava fanlarının devir sayısının değiştirilmesiyle ayarlanmaktadır. Birincil ve ikincil hava fanları, devir sayısına bağlı olarak, sırasıyla 0-50 m^3/sa ve 110 m^3/sa hava besleyebilmektedir. Besleme fanından gelen ikincil hava önce iki adet ısı değiştiriciden geçerek ısıtılmakta, sonra ikincil hava

hattına girmekte ve bu hat vasıtasıyla besleme noktalarına taşınmaktadır. İkincil hava beslemesi için dağıtıcı elekten itibaren değişik yüksekliklerde 6 adet hava giriş noktası bulunmaktadır. Bu noktalardaki hava besleme debileri hat üzerinde yer alan hava akış ölçerler (kütle akışölçerler) vasıtasıyla ölçülmekte ve ayarlanmaktadır. Oksiyanma deneyleri yapılacağı zaman sisteme saf oksijen tüplerden beslenmektedir. Saf oksijen besleme hattı Şekil 3.4'de verilmiştir. Tüp çıkışında basınç ayarı yapabilmek için bir regülatör bulunmaktadır. Regülatörden sonra hatta debi ölçüm ve kontrolünün yapılabilmesi amacıyla bir kütle akış kontrol cihazı yerleştirilmiştir. Bu cihaz, sistemin otomasyon sistemine bağlı olup 0-500 L/dakika aralığında debi kontrolü yapabilmektedir. Kütle akış kontrol cihazı çıkışında oksijen hattı ana hava besleme hattına bağlanmadan önce bakım ve onarım sırasında kullanılmak üzere bir adet el vanası konulmuştur.



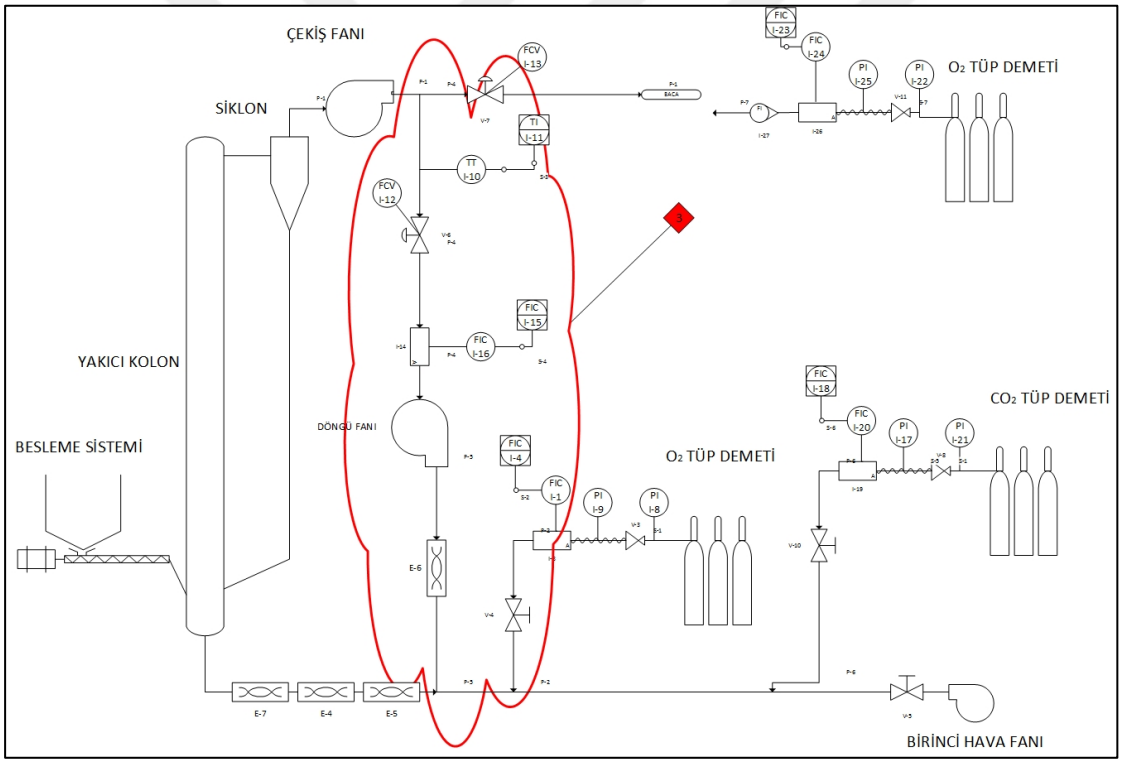
Şekil 3.4 : Saf oksijen besleme hattı.

Sistemin su/hava hattı borulama ve enstrümantasyon (P&I) diyagramı Ek A Şekil A.1'de verilmiştir.

***Baca gazı hattı*:** Bu ünite gaz tahliye hattı, filtre, çekme fanı (ID) ve bacadan oluşmaktadır. Filtre fanın hemen öncesinde, fan ise bacadan önce yeralmaktadır. Fan ve filtre en fazla 160°C sıcaklıkta çalışabilmektedir. Hat soğutma cidarlarına sahiptir

ve buradan geçen yanma gazları istenen seviyeye (<160°C) kadar soğutulduktan sonra filtre ve fandan geçerek bacaya gönderilmektedir. Çekme fanı vasıtasıyla sistemi negatif basınç (vakum) altında da çalıştırmak mümkündür. Baca gazı hattı borulama ve enstrümantasyon (P&I) diyagramı Ek A Şekil A.2'de görülmektedir.

Baca gazı geri döndürme hattı: Oksiyanma deneylerinde, deney hava ortamında yakma ile başlamaktadır. Oksiyanmaya geçileceği zaman hava kısılır ve baca gazının bir kısmı geri döndürülerek tekrar yanma ortamında verilir. Eş zamanlı olarak saf oksijen beslemesi de yapılır. Bu işlem geçiş süreci boyunca devam eder. Tam oksiyanma koşullarında hava beslemesi yoktur. Yanma ortamı saf oksijen ile geri döndürülen baca gazından oluşur. Saf oksijen daha önce belirtildiği gibi tüplerden beslenmektedir. Baca gazının geri döndürüldüğü hat Şekil 3.5'de kırmızı çerçeveyle gösterilmiştir.



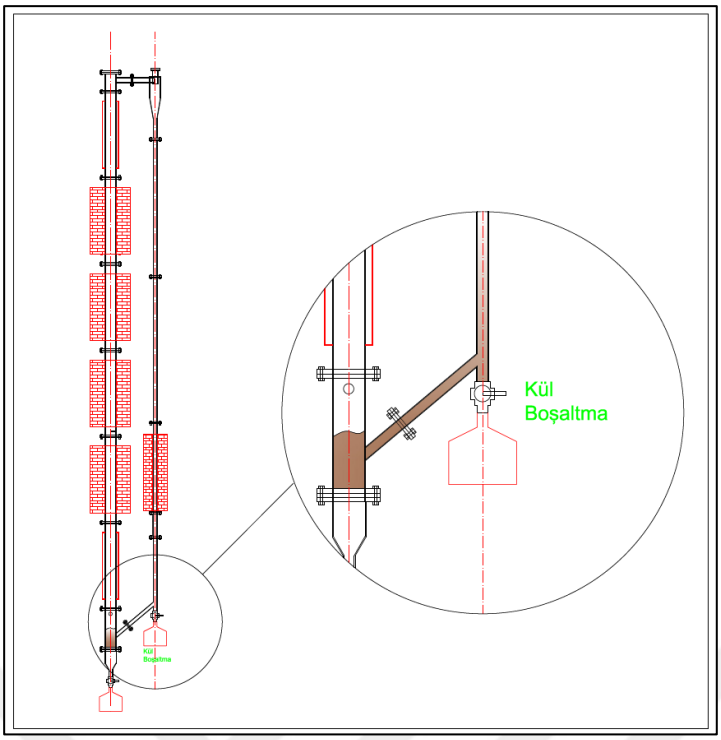
Şekil 3.5 : Baca gazının geri dönüş hattı.

Bu hat baca gazlarını geri beslemek için yanma sistemine eklenmiştir. Hat; bir geri besleme fanı, baca gazı debi ölçer ve debi ayar vanası, elektrikli ısıtıcı ve borulardan oluşmaktadır. Bu hat vasıtasıyla baca gazlarının bir kısmı, sistemin en sonunda bulunan çekiş fanı çıkışında, bacaya gitmeden önce çekilerek tekrar birincil hava hattına beslenebilmektedir. Geri dönüş hattının birincil hava hattına bağlandığı nokta

ısıtıcıların öncesinde konumlandırılmıştır. Böylelikle baca gazları ısıtılarak sisteme beslenebilmektedir. Baca gazı geri besleme sisteminin uzunluğundan dolayı, geri beslenen gazların sıcaklığı düşmektedir. Bu sıcaklık düşüşü, SO_2 gibi korozif gazların yoğuşmasına neden olduğundan hatlarda önemli derecede korozyon ve erozyon tehlikesi söz konusu olabilmektedir. Bu durum da göz önüne alınarak baca gazlarının ısıtılması için bu hatta ayrıca bir ısıtıcı konulmuştur. Hatta ayrıca geri dönüş debisinin ayarlanabilmesi için devir ayarlı bir fan ile debi ölçer bulunmaktadır.

***Yakıt/adsorban besleme ünitesi*:** Bu ünite yakıt (linyit) ve sorbent silolarından oluşmaktadır. Siloların altında yer alan ve devri ayarlanabilen sonsuz vida sistemı vasıtasıyla kömür ve sorbent debileri ayarlanarak besleme hattına ve buradan da reaktöre ayrı ayrı beslenmektedir. Her iki hat üzerinde hava girişi bulunmaktadır. Taşıma hatları su soğutmalıdır. Yakıt/adsorban besleme sisteminin bir fotografı Ek A Şekil A.3'de verilmiştir.

***Kül boşaltma ünitesi*:** Kül boşaltma ünitesi şematik gösterimi Şekil 3.6'da görülmektedir. Sürekli çalışan yakma sistemlerinde yatakta biriken külün belirli aralıklarla yataktan uzaklaştırılması gerekmektedir. Mevcut sistemde kül boşaltımı geri dönüş ayağından yapılmaktadır. Buna göre geri dönüş ayağının en alt noktasında bulunan çıkışta bir tane yüksek sıcaklığa dayanıklı paslanmaz vana bulunmaktadır. Çalışma sırasında yataktaki basınç düşüşünün artışı ve buna bağlı olarak hava debisindeki azalış takip edilir ve gerektiği zaman operatör tarafından bu vana açılarak geri dönüş hattındaki taban külü dışarı alınır.



Şekil 3.6 : Kül boşaltma ünitesi şematik gösterimi.

***Gaz analiz ünitesi*:** Gaz analiz ünitesi her ikisi de hat üstü (on-line) çalışan iki analiz ünitesinden oluşmaktadır. Bunlardan bir tanesi sürekli çalışan (ABB AO2020) ve ana gaz bileşenlerini ölçen gaz analiz ünitesidir. Bu analiz cihaz ile havayla yakma deneylerinde baca gazının içerdiği O_2, CO, CO_2, NOx ve SO_2 bileşenleri, oksiyanma deneylerinde ise reaktöre beslenen O_2/CO_2 gaz karışımları ölçülmektedir. Diğeri ise bir FTIR gaz analiz cihazı (Gasmet DX 4000) olup baca gazındaki CO, CO_2, NO, NO_2, N_2O, SO_2, HCl, H_2S, HCN, CH_4, C_2H_6, vb. yanma gazlarının bileşimi ölçülmektedir. Ayrıca sahip olduğu taşınabilir örnekleme ünitesindeki ZrO_2 hücresi ile oksijen analizi de yapabilmektedir. Yakma sisteminde 9 farklı noktada gaz analizi yapmak mümkündür. Sürekli gaz analiz cihazı bacadan önceki bir noktaya bağlı çalışmaktadır.

***Ölçme ve kontrol ünitesi*:** Bu ünite DAY sisteminin değişik noktalarında debiler (gaz sıvı, katı), sıcaklık, basınç ve fan devirleri değerlerini ölçmek, okumak, ayarlamak ve kaydetmek için SIEMENS PLC ve SCADA sistemi kullanılmaktadır. Sistemde toplam 49 noktada sıcaklık, 21 noktada basınç, 5 noktada debi ölçümü yapılabilmektedir. Bu değerler bir pano ve PLC üzerinden ayrı ayrı olmak üzere bilgisayar yardımı ile kontrol edilmektedir. Deneyler boyunca veriler bu sistem yardımıyla toplanmakta ve daha sonra değerlendirilmek üzere elektronik ortamda saklanmaktadır. Deneyler süresince sürekli olarak ölçülen prametre değerleri bilgisayara bağlı büyük ekranlarda gerçek

zamanda görsel olarak da izlenebilmektedir. DAY yakma sisteminin kontrol ara yüzü Ek A Şekil A.4'de verilmiştir.

Sistemin bazı özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- Reaktör boyunca ve geri dönüş ayağında sıcaklık ve basınçlar ölçülüp kontrol edilebilmektedir.
- Birincil hava debisi ölçülüp kontrol edilebilmektedir.
- Farklı noktalardan numune (gaz, toz vs) alınabilmektedir.
- İkincil havalar 6 farklı noktadan kontrollü bir şekilde reaktöre beslenebilmektedir.
- İki farklı besleme sistemi ile iki farklı noktadan yakıt ve katkı maddesi kontrollü bir şekilde reaktöre beslenebilmektedir.
- Birincil ve ikincil havalara ön ısıtma uygulanabilmektedir.
- Reaktör ve geri dönüş ayağına ilave ısıtma sağlanabilmektedir.
- Reaktör gövdesinden ve baca gazı hattından ısı çekişleri mümkün olabilmektedir.
- Modüler yapısı nedeni ile reaktör çapı sabit kalmakla birlikte reaktör yüksekliği değiştirilebilmektedir.
- Geri dönüş ayağı farklı tasarımlara izin verecek esnekliğe sahiptir.
- İkinci siklonda, yatakta, geri dönüş ayağında, baca gazı hattında yatak malzemesi ve kül toplanabilmektedir.
- Sistem hem atmosfer basıncının üstünde hem de atmosfer basıncının altında çalışabilmektedir.
- Operasyon esnasında sisteme yatak malzemesi beslenebilmekte/alınabilmektedir.
- Operasyon esnasında reaktörde biriken kül kontrollü bir şekilde alınabilmektedir.

Sistem hem atmosfer basıncının altında (negatif/vakum) hem de atmosfer basıncının üstünde (pozitif) çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Pozitif basınçta çalışıldığında reaktör içerisinde oluşan artı basınç nedeni ile atmosferik koşullarda yakıt beslemede sorunlar oluşabilmektedir. Bu problemi gidermek amacı ile reaktöre gelen yakıt besleme borusuna kontrollü bir şekilde hava gönderilmektedir. Negatif basınçta çalışılması durumunda ise yanma gazları içerdikleri partiküllerle birlikte ID fandan (vakum)

geçerek bacadan dışarı atılmaktadır. Ayrıca ID fan öncesi fana ait bir filtre sistemi de bulunmaktadır. ID fan ve filtre sistemi en fazla 160°C sıcaklığa dayanabilmektedir. Yanma gazlarının ısısını almak üzere baca gazı hattında hava/su soğutmalı ısı değiştiricisi bulunmaktadır.

3.6 Deney Prosedürü

Tipik bir yakma deneyi (havayla yakma) şu şekilde gerçekleştirilmektedir: Yapılacak deney planlanır ve koşulları belirlenir. Buna göre kullanılacak kömür ve kömür besleme debisi, yakma ortamı (hava, oksijence zengin hava veya oksiyanma), yatak malzemesinın miktarı (kum), adsorban ve besleme debisi, hava/gaz besleme debisi, oksijence zengin havadaki oksijen miktarı, vb. seçilir. Yakıt ve adsorban siloları doldurulur. Belirlenen miktardaki yatak malzemesi DAY içine konulduktan sonra DAY yakma sisteminin ısıtılmasına başlanır. Bunun için birincil hava fanından gelen hava ısı değiştiricilerde ısıtılarak rüzgar odası/hava kamarası ve dağıtıcı elek vasıtasıyla yanma odasına gönderilir. Gerektiği durumlarda DAY'ın çeperlerindeki ısı değiştiriciler çalıştırılır. Bu sırada yatak içerisinde sıcaklıklar izlenir. Yatak malzemesinin bulunduğu bölgede sıcaklık genelde Türk linyitlerinin tutuşma sıcaklığı olan 400^{o}C'a ulaşınca, kömür beslenmeye başlanır. Bir süre bu şekilde devam edilir, sıcaklık 600-700 ^{o}C'a ulaşınca hava besleme hattı üzerindeki ve DAY çeperlerindeki ısı değiştiriciler devreden çıkarılır. Bu süre boyunca sistem içerisindeki sıcaklıklar izlenir, sıcaklıklar dengeye ulaştıktan sonra, başka bir ifadeyle yatışkın yanma koşullarına ulaşılınca ölçümler (sıcaklık, basınç, debi, gaz analizleri, vb.) alınmaya başlanır. *Yatışkın hal*, sıcaklıkların herhangi bir seviyede ±25 ^{o}C sapmayla dengelendiği ve sürdürüldüğü durumdur. Toplanan veriler ölçme ve kontrol ünitesi vasıtasıyla bilgisayar ortamına aktarılarak daha sonra değerlendirilmek üzere depolanır. Deney bittikten sonra, aynı kömürle, sistem durdurulmadan farklı koşullarda başka deneylere devam edilebilir. Deneyler sürekli koşullarda ve istenen uzunlukta sürdürülebilir. Deney süresince, sistemin çalışması (sıcaklık, basınç, debi, gaz analizleri, vb.) aynı zamanda ölçüm-kontrol sistemine bağlı büyük bir televizyon ekranında da izlenebilmektedir. Deney(ler) bittikten sonra, sistem durdurulur, temizlenir, gerekiyorsa bakımı yapılır ve bir sonraki deney için hazır hale getirilir.

Oksijence zengin hava ortamında ve oksiyanma deneyinde öncelikle yukarıda anlatılan prosedür uygulanır. Yani öncelikle havayla yakma deneyi yapılır. Daha sonra

kademeli olarak oksijence zengin hava ortamına ve oksiyanma deneylerine geçiş yapılır.

DAY yakma sistemi öncelikle hava ortamında yakma deneyleri için tasarlanmış olup daha sonra oksijence zengin ve oksiyanma deneylerinin de yapılabilmesine uygun hale getirilmiştir.

Buna göre sisteme saf O_2 ve CO_2 hatları ile bu hatların ihtiyacı olan ölçüm ve kontrol cihazları eklenmiştir. Ayrıca oksiyanma deneyleri için baca gazının sisteme geri döndürülmesini sağlayan geri dönüş hattı ile bu hat üzerindeki ölçüm kontrol ekipmanları ve geri döngü fanı gibi ekipmanlar eklenmiştir. Debi kontrol ekipmanları, sıcaklıkölçerler, basınçölçerler ve fan, otomasyon sistemine eklenerek mevcut kontrol sisteminden izlenebilir ve kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Eklenen ekipmanların kalibrasyonları yapılmıştır. Tüm revizyonlardan sonra sistem sızdırmazlık testine tabi tutulmuştur. Oksijence zengin havayla yakma deneylerinde havanın içine bir kütle akışölçer vasıtasıyla belirli oranlarda oksijen ilave edilerek %22-%29 oranlarında oksijen geri kalanı azot olacak şekilde karışım beslemesi yapılmıştır. %29'un üzerinde oksijen beslemesi yapıldığında yatak sıcaklığı hızla artarak sistemdeki denge bozulmuş, çok yüksek miktarlarda karbon monoksit ve hidrokarbon çıkışı gözlenmiştir. Sistemin %29'un üzerinde oksijen beslemesine uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Oksiyanma deneylerinde yakıt; oksijen ve geri döndürülen baca gazı ile birleştirilip azotun olmadığı bir ortamda yakılarak tutma ve depolamaya hazır yüksek derişimde CO_2 içeren baca gazı elde edilebilmektedir. Oksiyanmanın dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde gerçekleştirilmesi sonucunda oksijen geri döndürülen baca gazı ile birleşerek havanın yerini almaktadır. DAY yakma sisteminde Türk linyitleri ile ilk kez yapılan oksiyanma deneylerinde baca gazının %70'i geri döndürülmüştür. Baca gazının %70'i oksijenle karıştırılarak dağıtıcı plakanın altından yakıcıya tekrar beslenmiştir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1 Kömürlerin Karakterizasyonu

Bölüm 3.4'de belirtildiği gibi, deneysel çalışmalarda kullanılan linyitler ilgili standart yöntemler (Çizelge 3.4) kullanılarak çeşitli açılardan karakterize edilmişlerdir. Karakterizasyon sonuçları Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'de verilmiştir. Çizelge 4.1 Kısa analiz ve ısıl değerler (orijinal temelde), Çizelge 4.2 Kısa analiz ve ısıl değerler (kuru temelde), Çizelge 4.3 Elementel Analiz, Çizelge 4.4 Küllerin kimyasal analizi ve Çizelge 4.5 ise kül ergime sıcaklıkları ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Tablolar incelendiğinde kullanılan kömürlerin birbirlerinden bir hayli farklı özellikler gösterdikleri anlaşılmaktadır. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi orijinal temelde linyitlerin nem miktarı %14-37, uçucu madde miktarı %20-40, kül miktarı %6-56, sabit karbon oranları ise %4-40 gibi çok geniş aralıklarda dalgalanmaktadır. Linyitlerin birbiri ile kıyaslanması için analiz sonuçlarının kuru temelde verilmesi daha uygundur. Çizelge 4.2'de linyitlerin kuru temelde kısa analiz ve ısıl değerleri verilmektedir. Linyitlerin kuru temelde uçucu madde miktarı % 25-51, kül miktarı %9-69, sabit karbon oranları ise %5-48 gibi çok geniş aralıkta değişmektedir. Elementel analiz sonuçları, Çizelge 4.3, linyitlerin karbon, kükürt ve ısıl değerlerinin de benzer ve beklendiği şekilde yine geniş bir yelpaze içinde değiştiğini göstermektedir. Örneğin karbon oranları %20-70, kükürt miktarları %0.7-5.7 arasında değişmektedir. Linyitlerin alt ısıl değerleri sırasıyla orijinal temelde yaklaşık 5-22 MJ/kg; kuru temelde 6-27 MJ/kg aralığında değişmektedir. Çizelge 4.2 incelendiğinde, 19 kömürden 8 tanesinin, yani % 42'nin ısıl değerinin 15 MJ/kg'dan düşük olduğu görülmektedir. Kömürlerden yalnızca 6 tanesinin (%32) ısıl değeri 23 MJ/kg'ı aşabilmektedir. 19 adet kömürün temel analizlerinin yanısıra bu kömürler arasından seçilen iki adet kömürün (L3-Kütahya-Ayvalı pano ve L7-Manisa-İmbat araürün) termogravimetrik analizi (TGA) gerçekleştirilerek kinetik parametreleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1 : Kömür örneklerinin kısa analizi ve ısıl değerleri (orijinal temelde).

Kömür	Uçucu Madde (%)	Kül (%)	Sabit Karbon (%)	Nem (%)	Üst ısıl Değer (MJ/kg)	Alt Isıl Değer (MJ/kg)
L1	30.23	11.79	39.39	18.59	22.89	21.66
L2	28.99	13.91	39.05	18.04	22.62	21.41
L3	25.66	17.96	19.89	36.50	12.74	11.36
L4	27.72	16.04	21.94	34.31	14.09	12.71
L5	27.84	16.35	21.77	34.05	14.02	12.65
L6	32.91	12.34	38.36	16.39	21.66	20.48
L7	25.77	31.34	20.36	22.53	12.24	11.20
L8	32.28	31.15	21.64	14.93	13.30	12.35
L9	33.51	11.36	38.84	16.28	21.23	20.07
L10	32.94	10.76	38.36	17.94	21.23	20.03
L11	35.48	19.35	23.54	21.63	15.69	14.49
L12	19.96	55.89	5.65	18.50	5.44	4.68
L13	31.02	22.47	12.41	34.10	10.13	8.81
L14	39.62	25.77	12.21	22.41	11.03	9.86
L15	30.59	6.30	30.44	32.68	17.68	16.25
L16	24.60	18.88	18.89	37.63	12.06	10.68
L17	24.59	35.82	21.74	17.85	12.50	11.57
L18	31.66	38.11	3.81	26.42	8.73	7.57
L19	28.09	34.70	18.50	18.71	11.46	10.51

Çizelge 4.2 : Kömür örneklerinin kısa analizi ve ısıl değerleri (kuru temelde).

Kömür	Uçucu Madde (%)	Kül (%)	Sabit Karbon (%)	Üst ısıl Değer (MJ/kg)	Alt Isıl Değer (MJ/kg)
L1	37.13	14.48	48.38	28.12	26.61
L2	35.37	16.97	47.65	27.60	26.12
L3	40.41	28.28	31.32	20.06	17.89
L4	42.20	24.42	33.40	21.45	19.35
L5	42.21	24.79	33.01	21.26	19.18
L6	39.36	14.76	45.88	25.91	24.49
L7	33.26	40.45	26.28	15.80	14.46
L8	37.95	36.62	25.44	15.63	14.52
L9	40.03	13.57	46.39	25.36	23.97
L10	40.14	13.11	46.75	25.87	24.41
L11	45.27	24.69	30.04	20.02	18.49
L12	24.49	68.58	6.93	6.67	5.74
L13	47.07	34.10	18.83	15.37	13.37
L14	51.06	33.21	15.74	14.22	12.71
L15	45.44	9.36	45.22	26.26	24.14
L16	39.44	30.27	30.29	19.34	17.12
L17	29.93	43.60	26.46	15.22	14.08
L18	43.03	51.79	5.18	11.86	10.29
L19	34.55	42.68	22.76	14.11	13.46

Çizelge 4.3 : Kömürlerin elementel analizi sonuçları (kuru temelde).

Kömür	C	H	N	O	Syanar	Stoplam	Kül
L1	70.58	4.12	2.19	6.23	1.83	2.39	14.48
L2	69.30	4.31	2.44	5.48	1.06	1.49	16.97
L3	53.70	2.74	1.12	11.66	0.64	2.51	28.28
L4	56.35	3.24	1.18	12.63	0.70	2.19	24.42
L5	55.36	3.15	1.22	12.93	0.83	2.55	24.79
L6	66.54	4.11	1.98	11.71	0.49	1.01	14.76
L7	43.72	3.05	0.84	11.19	0.32	0.92	40.45
L8	43.67	3.06	0.78	15.20	0.26	0.77	36.62
L9	66.55	4.69	1.06	13.44	0.38	0.79	13.57
L10	67.55	4.68	1.28	12.23	0.74	1.34	13.11
L11	54.00	3.67	1.30	15.03	0.28	1.31	24.69
L12	19.50	1.39	0.60	7.44	1.22	2.50	68.58
L13	43.69	3.06	1.30	12.55	1.01	4.30	34.10
L14	42.80	2.40	0.99	15.50	3.17	5.11	33.21
L15	69.26	4.74	0.97	13.50	0.79	2.18	9.36
L16	51.03	4.02	1.17	11.54	0.59	1.97	30.27
L17	39.21	2.86	0.96	7.67	4.48	5.69	43.60
L18	32.18	2.69	0.69	6.96	3.23	5.02	51.79
L19	42.40	1.84	0.84	11.51	0.15	0.73	42.68

Kül, kömürün içerdiği mineral maddenin, tam yanma sonucu bazı değişikliklere uğramasıyla oluşan bir artıktır. Külün kökeni, kömürün içerdiği mineral madde olduğundan, özellikleri mineral maddenin bileşimine ve yanmanın gerçekleştirildiği şartlara bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Yakma sisteminin tasarımının uygun bir şekilde yapılabilmesi, çalışma koşullarının belirlenebilmesi ve kömürlerin optimum harmanlama oranlarının saptanabilmesi için kullanılacak kömürün kül özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Kömür külünün bileşimi ve buna bağlı olarak değişen kül ergime sıcaklıkları korozyon, aglomerasyon/sinterleşme ve kabuk oluşumu gibi yanma sisteminin işletilmesi açısından büyük önem taşıyan olayların gelişmesinde belirleyici rol oynar. Alkali elementlerin (Na, K, Ca) ve özellikle belirli kömürlerde klor ile birlikte bulunan Na elementinin bakım masraflarını artıran, aşındırıcı etkisi vardır. Na (sodyum) ve K (potasyum) aglomerasyon/sinterleşme, yapışma ve yanma kararlılığı açısından önem taşımaktadır. Sodyum ve potasyum içeriklerinin yüksek olması, kül yumuşama ve ergime sıcaklıklarının da daha düşük olmasına neden olabilir. Linyitlerin kül analiz sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Aglomerasyon/sinterleşme açısından önem taşıyan Na ve K'ın oksit formundaki oranlarına bakıldığında, sodyum oranlarının (%0.17-%1.51) çok yüksek olmadığı, K oranlarının (%0.46-%3.37) ise görece biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Burada bazik oksit

($Na_2O+K_2O+CaO+Fe_2O_3$) toplamı açısından da bir şeyler söylenebilir. Külde bulunan CaO, yanma sırasında ortaya çıkan kükürt oksitlerin yatak içinde (in-situ) tutulması açısından önem taşımaktadır. Çizelgeden görüldüğü gibi, CaO miktarı %1.21 ile %58 gibi çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Altı adet kömürün (L7, L13, L14, L15, L18 ve L19) CaO oranı %19 ve üstündedir. L13 ve L14 sırasıyla %58.1 ve %50.9 oranında CaO içermektedir.

Çizelge 4.4 : Kömürlerin kül içerik analizleri.

	Kül Bileşimi (%)																		
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19
Na_2O	0.17	0.06	0.35	0.14	0.92	1.51	0.74	0.82	0.65	0.20	0.19	0.27	0.20	0.20	0.17	0.33	0.53	0.22	0.24
MgO	2.15	2.74	9.02	10.3	9.08	1.56	1.52	2.95	2.19	2.16	3.23	2.98	2.10	3.05	4.79	3.77	0.52	1.47	2.08
Al_2O_3	21.4	24.4	13.8	10.3	13.8	23.1	19.8	26.0	27.9	22.1	24.3	24.4	8.73	6.59	11.0	27.2	29.1	8.45	22.2
SiO_2	51.3	57.6	35.6	34.0	35.7	36.7	41.7	39.6	39.8	35.1	36.7	47.5	13.2	10.3	11.9	48.3	43.8	27.5	39.5
P_2O_5	0.18	0.18	0.11	0.08	0.10	0.24	0.18	0.35	0.18	0.21	0.35	0.13	0.24	0.38	0.26	0.14	0.24	0.12	0.25
SO_3	1.69	1.41	18.7	17.9	18.3	9.22	4.88	9.83	7.70	11.3	11.1	8.53	11.6	23.4	33.9	7.08	4.94	22.0	6.79
K_2O	1.14	2.14	1.04	0.48	1.06	1.85	2.06	1.90	1.39	1.06	2.80	3.37	1.09	0.71	0.46	3.51	0.71	0.84	1.95
CaO	1.21	1.28	7.12	6.19	6.87	11.8	19.9	9.62	10.8	13.9	14.8	4.43	58.1	50.9	24.4	3.88	2.86	24.6	19.3
TiO_2	1.27	1.57	0.72	0.46	0.62	0.76	0.68	1.02	0.93	0.76	0.96	1.08	0.55	0.31	0.28	0.92	1.26	0.39	1.14
V_2O_5	0.12	0.07	0.12	0.10	0.10	0.10	0.04	0.19	0.12	0.14	-	-	-	-	-	-	0.10	-	0.14
MnO	2.15	0.12	0.09	0.18	0.10	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03	0.12	0.05	0.06	0.05	0.21	0.05	0.16	0.14	0.07
Fe_2O_3	12.5	9.48	12.3	18.9	12.5	6.82	5.39	7.23	6.67	7.90	5.08	7.01	3.70	3.31	12.1	4.49	15.5	13.9	5.85
SrO	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04	0.03	0.07	0.04	0.02	0.09	0.11	0.12	0.08	0.03	0.05	0.05
BaO	0.07	0.04	0.02	0.03	0.03	0.17	0.10	0.07	0.10	0.11	0.03	0.06	0.04	0.03	0.11	0.05	0.04	0.04	0.12

Yukarıda da belirtildiği gibi, kül ergime sıcaklıkları yanma sisteminde korozyon, ısı transfer yüzeylerinde kabuklaşma ve katı tanecik birikimi ve buna bağlı olarak ısı transfer özelliklerinin olumsuz etkilenmesi, yanma stabilitesinin bozulması gibi bir dizi olumsuzluklara neden olmaktadır. Kömürün külü; kristal, yarı kristal ve camsı minerallerinin çok karmaşık bir karışımıdır. Kömürün yakılması sırasında, ergimiş veya yapışkan tortular, yanma kamarasındaki ısı değiştirici yüzeyler üzerinde birikir ve cüruflaşmaya/kabuklaşmaya yol açar. Sinterleşmiş malzemenin kazanın çeşitli kısımları üzerinde tortu oluşturması ise kirlenmeye neden olur.

Yakma proseslerinde kül ergime noktasının bilinmesi çok önemlidir. Yanma sıcaklığının mutlaka kül ergime noktasının 250-300°C altında olması gereklidir. Aksi takdirde yatakta aglomerasyon/sinterleşme oluşmakta ve yanma durmaktadır. Ergiyen kül ise ısı değiştirici yüzeylerine yapışarak kirlenmeye ve ısı aktarım veriminin düşmesine neden olmaktadır. Akışkan yatak yakma sistemlerinde yatak sıcaklığı 800-850°C civarındadır. Aglomerasyon kül yumuşama sıcaklığı civarında da başlayabileceğinden, kömürlerin deformasyon sıcaklıklarının (DT) 850°C'nin olabildiğince üzerinde olması istenmektedir. Kullanılan kömürlerin kül ergime özellikleri Çizelge 4.5'de verilmiştir. Bu tabloda küllerin deformasyon başlangıç (DT), kül yumuşama (ST), yarıküre (HT) ve ergime (FT) sıcaklıklarını görmek mümkündür. Görüldüğü gibi küllerin deformasyon başlangıç sıcaklıkları arasında büyük farklar olabilmektedir. 1200 ^{o}C altında kalan DT değerlerine sahip olan kömürler olduğu gibi (L3, L4, L5, L7, L8, L10, L19), DT değerleri 1400^{o}C'ı aşan kömürler de vardır. Çanakkale-Çan bölgesi linyiti (L17) 1400^{o}C'ı aşan DT değeriyle dikkati çekmektedir. Onu 1400^{o}C'i aşan değeriyle Yeniköy Linyit İşletme bölgesinden alınan linyit (L13) izlemektedir. Linyitlerden 12 tanesinin (%63) DT değerleri 1200^{o}C civarı veya üstünde kalmaktadır.

Çizelge 4.5 : Linyit örneklerinin kül ergime sıcaklıkları.

Kömür	Deformasyon Sıcaklığı (°C)	Yumuşama Sıcaklığı (°C)	Yarıküre Sıcaklığı (°C)	Ergime Sıcaklığı (°C)
L1	1331	1380	1400	1420
L2	1325	1416	1437	1455
L3	1085	1193	1340	1391
L4	1181	1203	1293	1372
L5	1188	1196	1254	1330
L6	1312	1321	1355	1394
L7	1197	1217	1245	1303
L8	1185	1191	1197	1240
L9	1318	1325	1353	1381
L10	1196	1200	1203	1229
L11	1296	1304	1324	1377
L12	1271	1346	1375	1427
L13	1419	>1500	>1500	>1500
L14	1281	1340	1464	>1500
L15	1319	1323	1330	1367
L16	1227	1402	1448	>1500
L17	>1500	>1500	>1500	>1500
L18	1200	1205	1228	1285
L19	1187	1192	1194	1254

Tüm kömürlerin temel analizleri (kısa analiz, ısıl değer analizi, elementel analiz, kül içerik analizi, kül ergime sıcaklığı tayini) tamamlandıktan sonra kömürler içinden seçilen L3 (Kütahya-Ayvalı pano) ve L7 (Manisa-İmbat araürün) örneklerinin termogravimetrik analizleri gerçekleştirilerek kinetik analizi yapılmıştır (Engin, B. ve Atakül, H., 2018).

Termogravimetrik analiz, katı yakıtların yanma davranımları ve kinetiğini incelemek için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntemle zamanın ve sıcaklığın fonksiyonu olarak ağırlık kaybını ölçmek ve elde edilen veriler yardımıyla kinetik parametreleri hesaplamak mümkündür. Termogravimetrik analiz yöntemi, incelenecek numunenin ağırlığının, belirli bir ortamda ısıtıldığı veya soğutulduğunda zamanın ve sıcaklığın fonksiyonu olarak (m=f (t veya T)) kaydedildiği teknikleri kapsamaktadır (Kissinger, 1957 ve Wentlandt, 1986).

Termogravimetrik analiz Mettler Toledo TGA/SDTA851e model bir cihazda farklı işletme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Kömür numuneleri gerekli ön işlemlerden geçirilerek her bir analizde 10 mg numune 10, 20 ve 40 °C/dakika ısıtma hızı ile 900 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve ağırlık kaybının bittiğinden emin olmak için bu sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiştir.

Termogravimetrik yakma deneyleri hem hava hem de oksiyanma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Oksiyanma deneyleri %21 O_2 – %79 CO_2, %40 O_2 – %60 CO_2 ve %50 O_2 – %50 CO_2 ortamında yapılmıştır. Ayrıca, olağanüstü (extreme) koşullarda kömürlerin yanma davranışlarını incelemek amacıyla saf O_2 (%100 O_2) de kullanılmıştır. Oksijen ve karbon dioksit gazları iki ayrı gaz silindirinden bir kütle akış ölçer yardımı ile belirlenen oranlarda karıştırılarak her bir deneyde toplam 40 mL/dakika gaz debisi beslenmiştir.

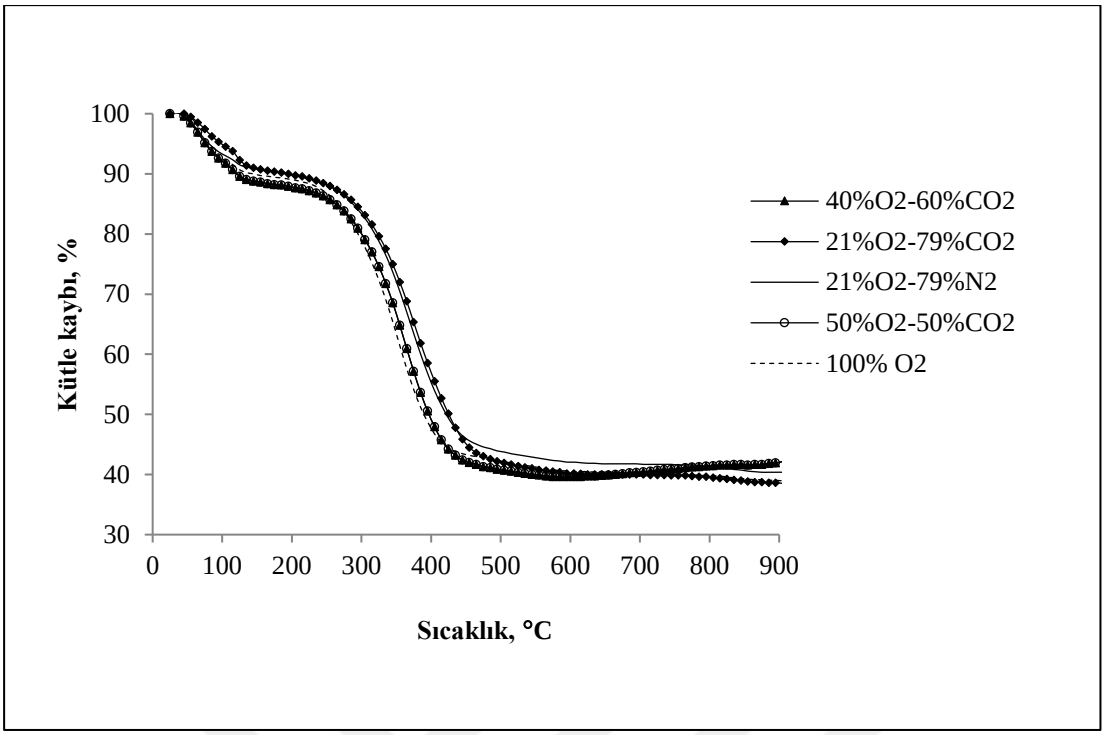
Kinetik analiz için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında; iki adet kömür örneğinin yanma kinetiği modele bağlı (model fitting) ve modelden bağımsız (model-free) kinetik yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Modele bağlı kinetik yaklaşımda Coats-Redfern yöntemi kullanılmıştır. Modelden bağımsız yöntemde ise Friedman (FR), Flynn-Wall-Ozawa (FWO) ve Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) yöntemleri ile kinetik analiz yapılmıştır.

L3 (Kütahya-Ayvalı pano) ve L7 (Manisa-İmbat araürün) kömürlerinin hava ve oksiyanma koşullarında yanma süreçlerinin 10 °C/dakika ısıtma hızında yapılan termogravimetrik analiz deneyleri sonucunda elde edilen TG (termogravimetri) ve DTG (diferansiyel termogravimetri) eğrileri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sunulmuştur. Şekilde de görüldüğü gibi; her iki kömürde de tipik yanma adımları (nem çıkışı, uçucu çıkışı ve yanması, kok yanması) gözlenmiştir. Fakat şekiller birbiri ile kıyaslandığında kömürlerin yanma davranışlarında çok büyük farklılıklar görülmektedir. L3 kömürü L7 kömürüne göre daha düşük kül içeriği, daha yüksek karbon içeriği ve daha yüksek uçucu madde içeriğine sahip olmakla birlikte daha dik bir ağırlık kayıp profili göstermektedir. Bu, yanma atmosferinden bağımsız olarak daha hızlı bir yanma sürecine işaret etmektedir. L3 kömürü hava ortamında yakıldığında yaklaşık 230 °C'da yanmaya başlamakta ve 430 °C civarında ağırlık kaybı sona ermektedir (Şekil 4.1). L7 kömürünün hava ortamında yanma davranışına bakıldığında ise uçucuların çıkışı ve yanma sıcaklığı aralığı 300-540 °C aralığına kaymaktadır (Şekil 4.2).

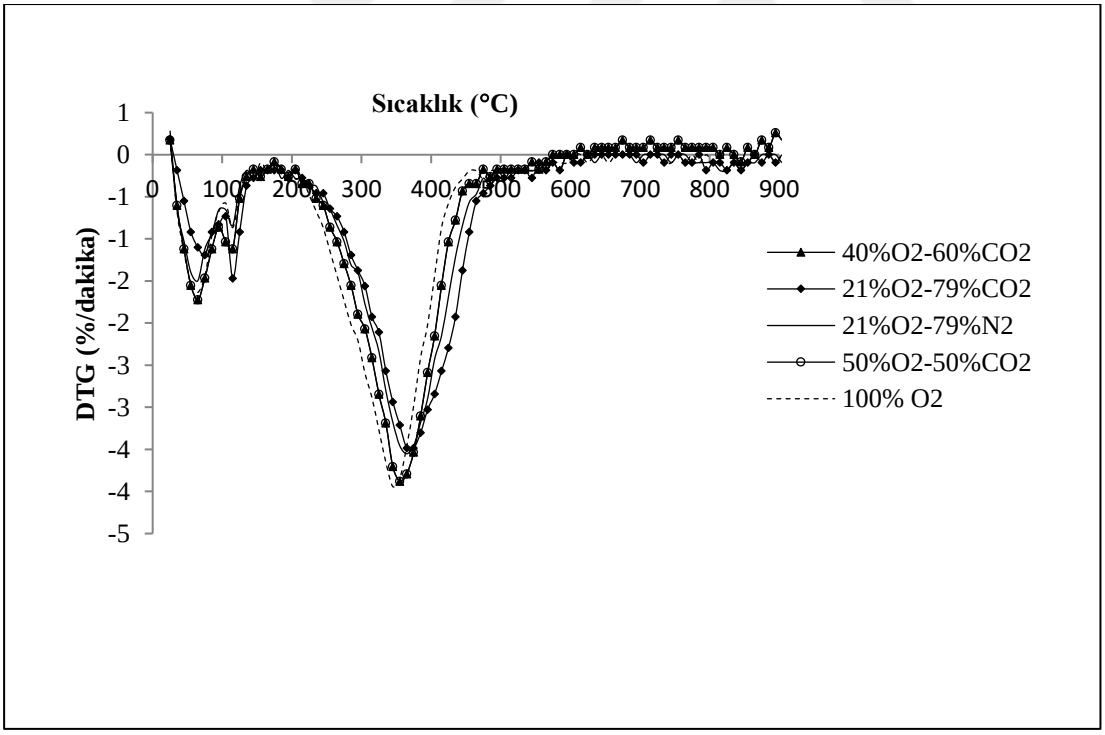
DTG eğrilerinde de görüldüğü gibi üç adet pik noktaları gözlenmektedir. Bunlardan ilki 25-125 °C aralığında nem çıkışı; ikincisi 125-600 °C aralığında uçucu çıkışı ve yanması; son pik ise 600-900 °C aralığında mineral madde içeriği ve kokun yanmasını temsil etmektedir. İki kömür arasında pik yüksekliklerine bakıldığında önemli farklılıklar olduğu görülmüştür. Örneğin; L3 kömürünün DTG profilinde görülen uçucu çıkışı ve yanması piki L7 kömüründen daha yüksektir. Yanma profillerindeki

farklılıkların bu kömürlerin kısa, elementel analiz sonuçlarının birbirinden çok farklı olmasından kaynaklandığı ön görülmektedir (Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3). Bu iki kömürün kısa ve elementel analiz sonuçları kıyaslandığında; L7 kömürünün kül içeriğinin (%40) L3 kömürünün kül içeriğinin (%28) 1.5 katı kadar olduğu görülmektedir. L3 kömürünün uçucu madde içeriğinin (%40) L7 kömürünün uçucu madde içeriğinden (%33) daha yüksek olduğundan dolayı L3 kömürü L7 kömüründen daha reaktiftir. Bu nedenle uçucu çıkışı ve yanması daha geniş aralıkta gerçekleşmiştir. L7 kömürünün hava ve %100 O_2 ile yanma sürecinde 600-900 °C aralığında bir pik oluştuğu gözlenmiştir. Bunun nedeninin hem yanma atmosferi hem de L7 kömürünün mineral madde içeriği ve yanma davranışlarından olabileceği düşünülmektedir.

TG ve DTG profillerine bakıldığında her iki kömürün de yanma atmosferinden önemli ölçüde etkilenmediği görülmektedir. Hava ortamında yanma sürecini temsil eden %21 O_2 - %79 N_2 ortamında gözlemlenen yanma davranışı ile azotun yerini CO_2'in alması ile (%21 O_2 - %79 CO_2) oluşturulan oksiyanma koşulunda gözlemlenen yanma davranışlarının birbirine benzediği görülmektedir. Sıcaklığın 450 °C'dan daha yüksek olduğu sıcaklıkta küçük bir farklılık haricinde önemli bir fark görülmemiştir. Bu adımdaki ağırlık kaybı oksiyanma koşullarında biraz daha fazla gerçekleşmiştir. Fakat, O_2-CO_2 karışımındaki oksijen derişimi arttıkça TG eğrileri önemli ölçüde düşük sıcaklıklara doğru kaymıştır. O_2 derişimi %21'den %50'ye çıkarıldığında L3 ve L7 için sırasıyla yaklaşık 25-30 °C ve 10-15 °C kayma olmuştur. Bu durum, kömürlerin yanma performansında bir miktar iyileşmeye işaret etmektedir. %100 oksijen ile yapılan yanma deneylerinde ise iki kömür farklı yanma davranışı sergilemiştir. L3 kömürünün TG ve DTG profillerinin daha düşük sıcaklığa kaydığı gözlemlenirken L7 kömüründe önemli bir değişiklik görülmemiştir.

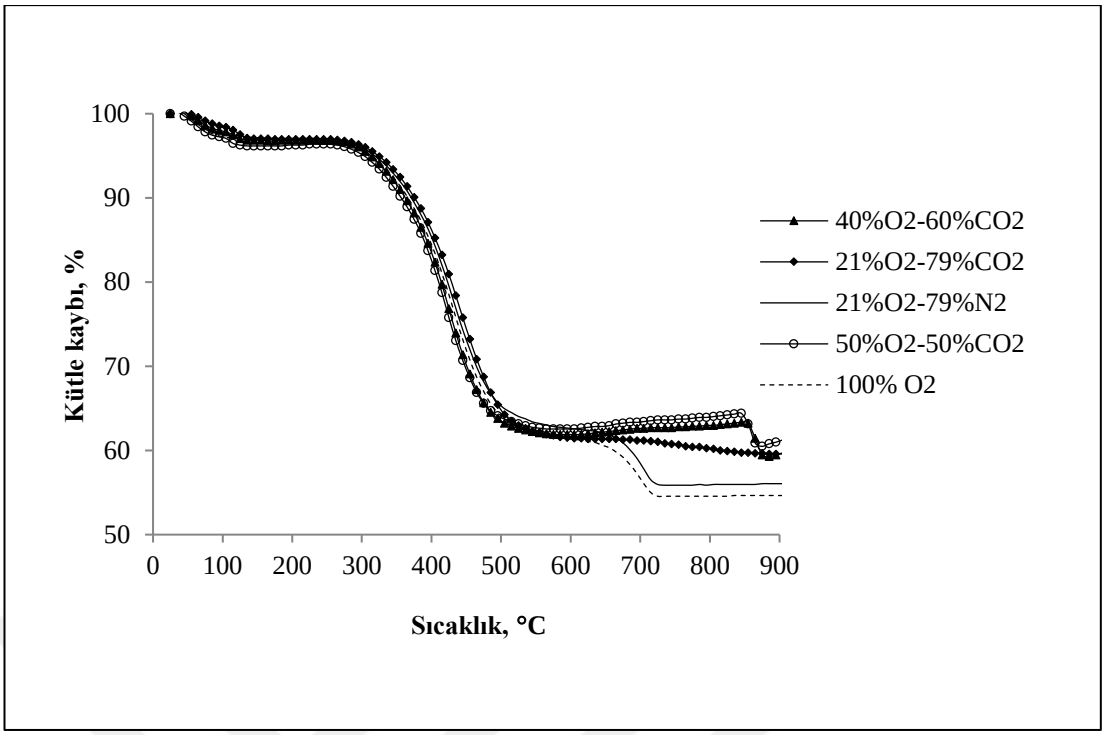


a)

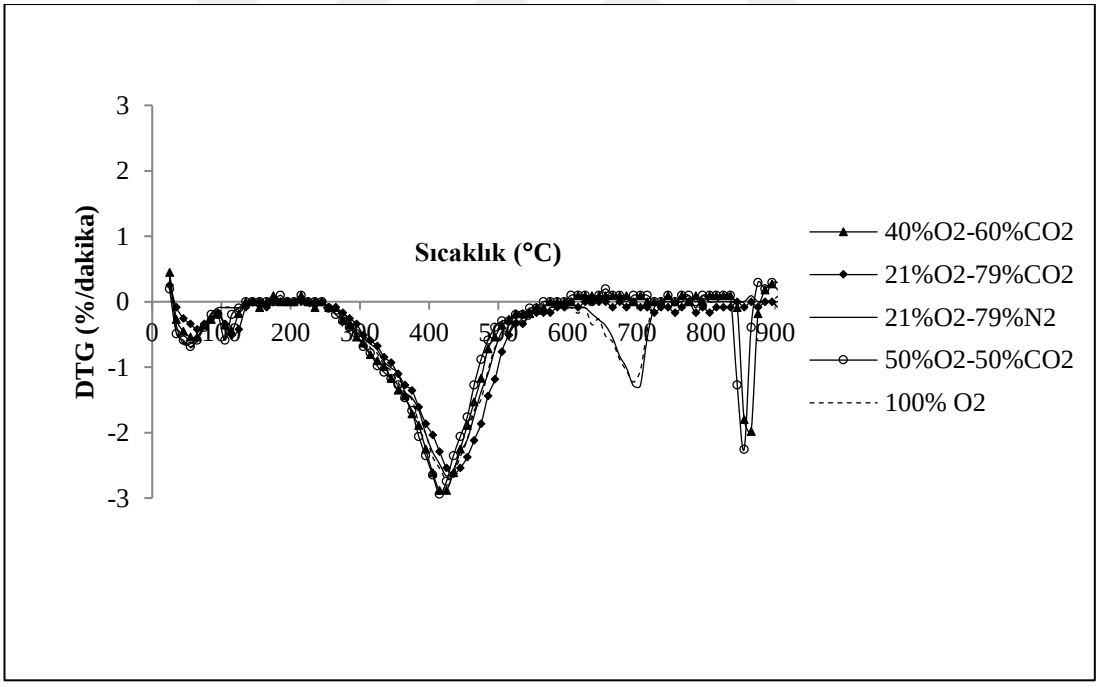


b)

Şekil 4.1 : L3 kömürünün 10 °C/dakika ısıtma hızında hava ve oksiyanma koşullarında termogravimetrik analiz deneylerinde elde edilen yanma profilleri. a) TG, b) DTG eğrileri.



a)



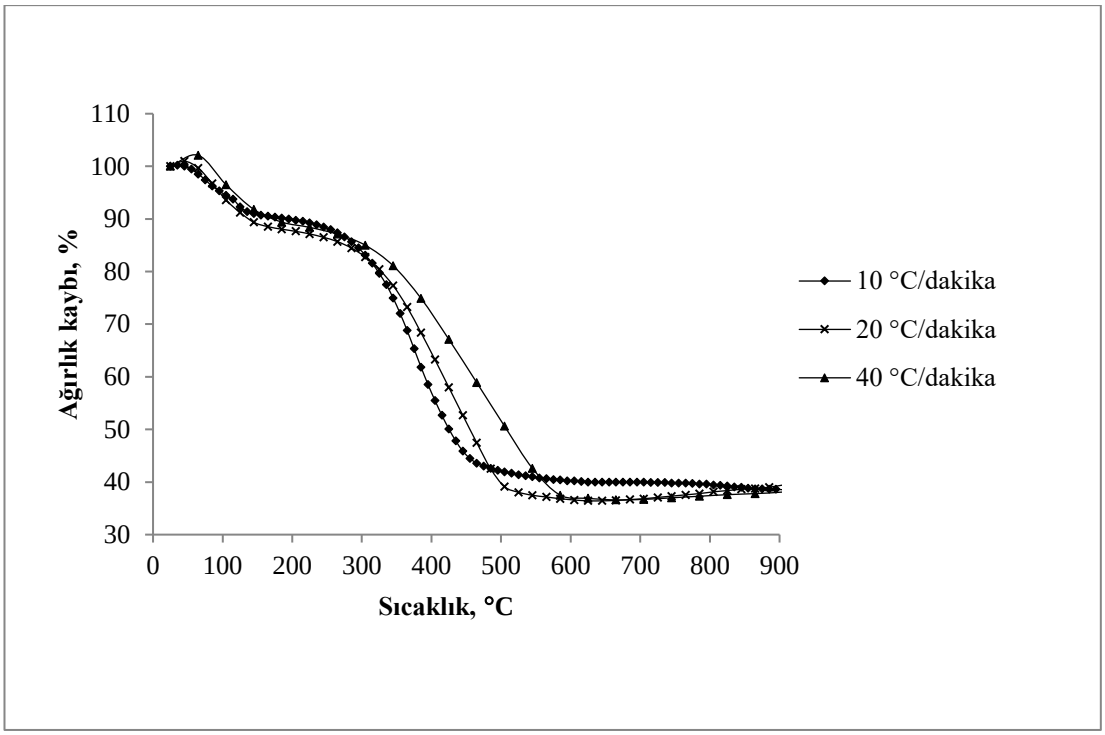
b)

Şekil 4.2 : L7 kömürünün 10 °C/dakika ısıtma hızında hava ve oksiyanma koşullarında termogravimetrik analiz deneylerinde elde edilen yanma profilleri. a) TG, b) DTG eğrileri.

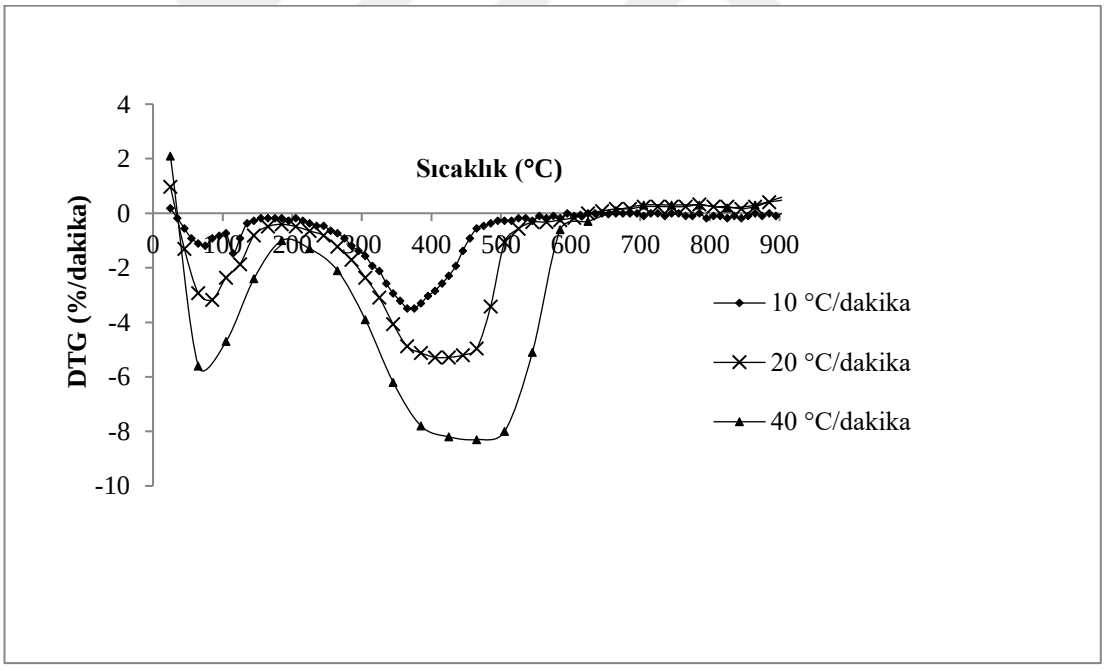
Isıtma hızının kömürlerin yanma davranışları üzerine etkisini incelemek amacıyla deneyler %21 O_2-%79 CO_2 atmosferinde 10 °C/dak, 20 °C/dak ve 40°C/dak ısıtma

hızında gerçekleştirilmiştir. Kömür örnekleri oda sıcaklığından 900 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak bu sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiştir. Deneylerde elde edilen TG ve DTG eğrileri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir. Isıtma hızı arttıkça her iki kömürün TG ve DTG yanma eğrilerinin sistematik olarak daha yüksek sıcaklık bölgesine doğru kaydığı gözlenmiştir. Isıtma hızının etkisinin her adımda aynı olmadığı görülmüştür. İlk adım (T < 300 °C) ve son adımın (T > 600 °C) ısıtma hızının artışından önemli ölçüde etkilenmediği, ancak uçucu madde çıkışı ve yanmasının gerçekleştiği ikinci adımın (300 °C < T < 600 °C) önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Yanma profilleri ısıtma hızının her iki kömürde farklı etkilerinin olduğunu, bunun da kömürlerin özelliklerinin birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha düşük kül ve daha yüksek uçucu madde içeriğine sahip olan L3 kömüründe ısıtma hızının etkisinin çok daha etkin olduğu gözlenmiştir. Isıtma hızı 10 °C/dak'dan 40 °C/dak'ya çıkarıldığında L3 ve L7 kömürlerinin maksimum ağırlık kaybının meydana geldiği sıcaklıklar sırasıyla 355 °C'dan 505 °C'a ve 425 °C'dan 465 °C'a yükselmiştir.

Isıtma hızındaki artış kömürlerin ağırlık kayıp hızlarında önemli bir değişikliğe neden olmuştur. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de de görüldüğü gibi; L3 ve L7 kömürlerinin ağırlık kayıp hızları sırasıyla %3.2/dak'dan %8/dak'ya ve %2.6/dak'dan %7/dak'ya çıkmıştır. Bu bulgular yüksek ısıtma hızlarının uçucu madde çıkışı ve yanması periyodunu kısalttığını, fakat kok yanmasını önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Bu sonuçların literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir (Li ve diğ, 2009).

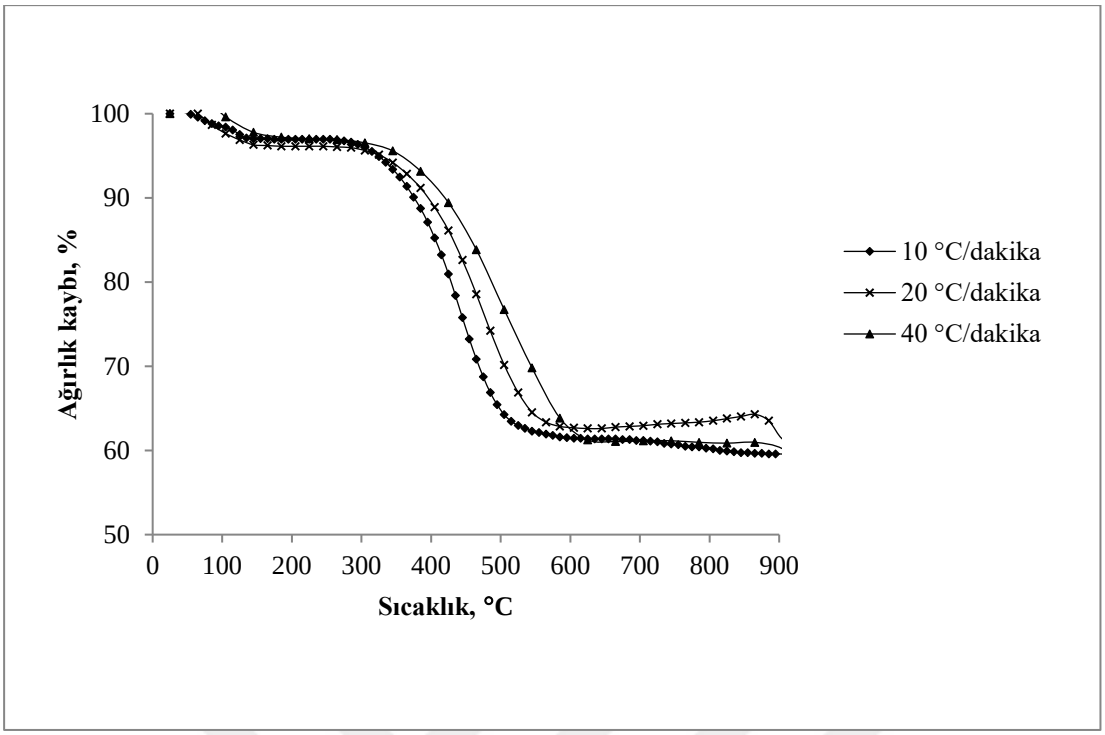


a)

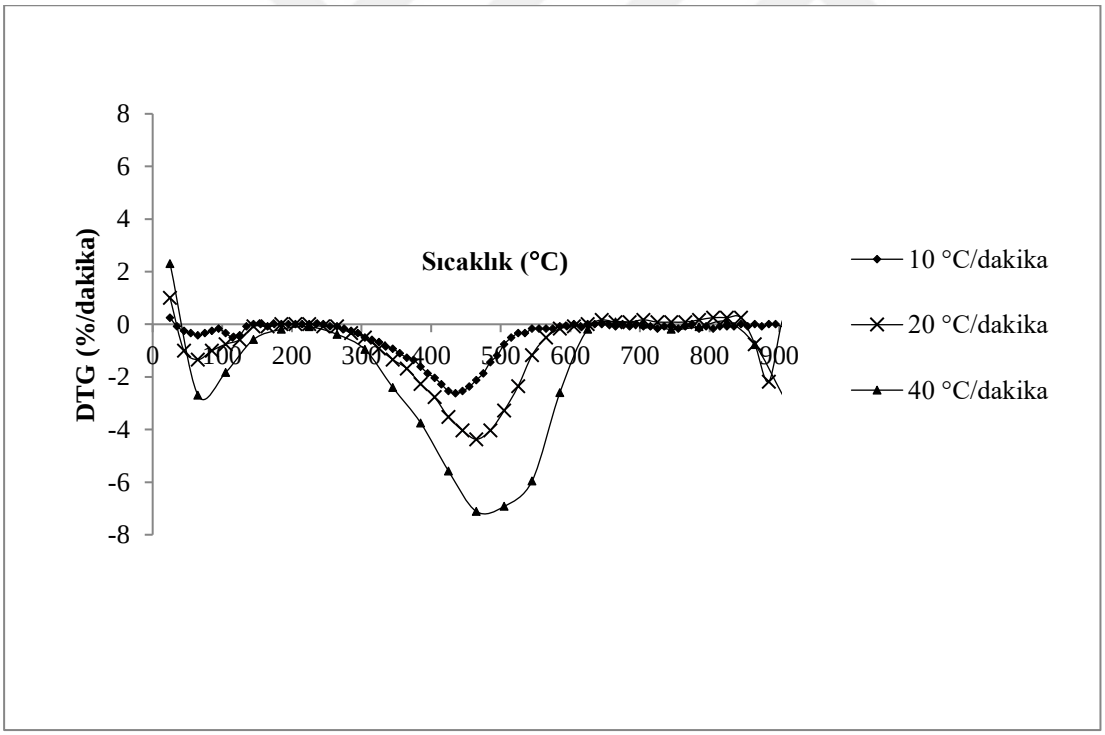


b)

Şekil 4.3 : L3 kömürünün %21 O_2- %79 CO_2 atmosferinde oksiyanma davranımının ısıtma hızı ile değişimi. a) TG, b) DTG eğrileri.



a)



b)

Şekil 4.4 : L7 kömürünün %21 O_2- %79 CO_2 atmosferinde oksiyanma davranımının ısıtma hızı ile değişimi. a) TG, b) DTG eğrileri.

Kinetik Analiz

Yanma deneylerinde kinetik analiz için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında; iki adet kömür örneğinin yanma kinetiği modele bağlı (model-fitting) ve modelden bağımsız (model-free) kinetik yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Modele bağlı kinetik yaklaşımda Coats-Redfern yöntemi kullanılmıştır. Modelden bağımsız kinetik analiz ise Friedman (FR), Flynn-Wall-Ozawa (FWO) ve Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

Modele bağlı yöntem: Coats-Redfern yöntemi

Coats-Redfern yöntemi ile hesaplanan göraktivasyon enerjisi (Ea) ve frekans faktörü (A) değerleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Çizelgelerden de görüldüğü gibi; her iki kömür için oksiyanma koşullarında hesaplanan aktivasyon enerjisi hava ortamında hesaplanan aktivasyon enerjisinden daha düşüktür. Oksiyanma atmosferindeki oksijen derişimi arttıkça aktivasyon enerjisinin azaldığı ve yanmanın kolaylaştığı görülmektedir. L3 ve L7 kömürleri için aktivasyon enerjisindeki maksimum düşüşün sırasıyla %8 ve %13 olduğu gözlenmiştir. Aynı oksijen derişiminin olduğu ortamda hava ve oksiyanma koşullarında hesaplanan aktivasyon enerjilerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Genel olarak L7 kömürünün hava ve oksiyanma koşullarında hesaplanan aktivasyon enerjisinin L3 kömürüne kıyasla daha yüksek aktivasyon enerjisi olduğu gözlenmiştir. Daha düşük kaliteye sahip olan L7 kömürünün yanma atmosferine daha duyarlı olduğu ve oksiyanma koşullarında daha gelişmiş yanma sürecine sahip olduğu öngörülmektedir. Yanma atmosferinin etkisi ve aktivasyon enerjisi değeri açısından bu sonuçların literatürde bulunan sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür (Cahyadi ve diğ, 2013; Kök, M. V., 2005; Niu ve diğ, 2009).

Çizelge 4.6 : L3 kömürünün farklı yanma atmosferlerinde Coats-Redfern yöntemi ile hesaplanan kinetik parametreleri.

Yanma Atmosferi	Ea (kJ/mol)	A (min^{-1})	R^2
%21 O_2-%79 N_2	88.20	6.51E+04	0.9849
%21 O_2-%79 CO_2	88.60	2.05E+04	0.9842
%40 O_2-%60 CO_2	81.00	1.85E+05	0.9892
%50 O_2-%50 CO_2	81.00	8.99E+05	0.9929
%100 O_2	76.30	5.85E+05	0.9934

Çizelge 4.7 : L7 kömürünün farklı yanma atmosferlerinde Coats-Redfern yöntemi ile hesaplanan kinetik parametreleri.

Yanma Atmosferi	Ea (kJ/mol)	A (min^{-1})	R^2
%21 O_2-%79 N_2	90.11	7.95E+05	0.9931
%21 O_2-%79 CO_2	90.28	2.45E+05	0.9928
%40 O_2-%60 CO_2	81.09	1.05E+06	0.9906
%50 O_2-%50 CO_2	77.74	1.55E+05	0.9977
%100 O_2	74.71	3.36E+05	0.9885

Modelden bağımsız yöntem

Modelden bağımsız kinetik analiz Friedman (FR), Flynn-Wall-Ozawa (FWO) ve Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Hesaplanan aktivasyon enerjileri L3 ve L7 kömürü için sırasıyla Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da verilmiştir. Hava ve %100 O_2 ortamında yapılan yanma deneyleri için de aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Ancak R^2 değerleri çok düşük olduğundan bu değerler gözardı edilmiştir. Kömürlerin yüksek oksijen derişimine sahip oksiyanma atmosferlerinde dönüşüm derecesi arttıkça aktivasyon enerjisinin azaldığı görülmektedir. En düşük oksijen derişimine sahip oksiyanma koşulunda (%21 O_2-%79 CO_2) ise aktivasyon enerjisinin dönüşüm derecesinden etkilenmediği gözlenmiştir. Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi aktivasyon enerjisi değerleri L3 kömürü için FWO (79-86 kJ/mol) > KAS (71-80 kJ/mol) > FR (52-65 kJ/mol ve L7 kömürü için FWO (69-104 kJ/mol) > KAS (50-99 kJ/mol) > FR (54-96 kJ/mol) aralığında hesaplanmıştır. L3 kömürü için FWO ve KAS yöntemleri ile hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri ile L7 kömürü için FWO yöntemi ile hesaplanan aktivasyon enerjisi değeri literatürdeki çalışmalarla uyumludur (Niu ve diğ, 2009). Fakat L7 kömürü için KAS yöntemi ile bulunan aktivasyon enerjisinin aynı araştırmacıların hesapladığı aktivasyon enerjisi değerinden düşük olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların çalışmalarda kullanılan kömür örneklerinin yakıt özelliklerinin ve deneysel koşulların farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.8 : L3 kömürünün farklı yanma atmosferlerinde modelden bağımsız yöntem ile hesaplanan aktivasyon enerjileri (Ea) (kJ/mol).

Yanma Atmosferi	α (%)	Friedman	FWO	KAS
%21 O_2-%79 CO_2	50	52.54	79.10	72.09
%40 O_2-%60 CO_2	50-90	65.51	78.79	71.50
%50 O_2-%50 CO_2	50	56.70	86.08	80.06

Çizelge 4.9 : L7 kömürünün farklı yanma atmosferlerinde modelden bağımsız yöntem ile hesaplanan aktivasyon enerjileri (Ea) (kJ/mol).

Yanma Atmosferi	α (%)	Friedman	FWO	KAS
%21 O_2-%79 CO_2	20-55	72.86	84.63	-
%40 O_2-%60 CO_2	20-30	95.90	104.40	98.95
	70-80	54.95	81.50	74.25
%50 O_2-%50 CO_2	20-30	63.60	69.20	62.05
	60-90	-	60.05	50.45

4.2 Kireçtaşlarının Karakterizasyonu

Bölüm 3.4'de belirtildiği gibi, SO_2 tutma deneylerinde kullanılan kireçtaşları ilgili standart yöntemler (Çizelge 3.4) kullanılarak çeşitli açılardan karakterize edilmişlerdir. Tüm kireçtaşı örneklerinin SO_2 tutmada en önemli bileşen olan $CaCO_3$ oranları tespit edilmiş olup kireçtaşı örneklerinin $CaCO_3$ içerikleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bursa/Orhaneli'den alınan kireçtaşı örneği %97 ile en yüksek $CaCO_3$ içeriğine sahiptir. Deneylerin çoğunda KT1 örneği kullanıldığından KT1 örneğinin detaylı analizi yapılmış olup bileşimi Çizelge 4.11'de verilmiştir. KT1 örneği oldukça yüksek reaktiviteye sahiptir. KT1 örneği 1 kg $CaCO_3$ için 120 g S adsorplayabilmektedir.

Çizelge 4.10 : SO_2 tutma deneylerinde kullanılan kireçtaşı örneklerinin $CaCO_3$ içerikleri (%ağ., orijinal temelde).

Kireçtaşının kodu	Alındığı bölge	$CaCO_3$
KT1	Çanakkale/Çan	91
KT2	Muğla/Yatağan	96
KT3	Bursa/Orhaneli	97
KT4	Muğla/Milas	92
KT5	Konya/Ilgın	91

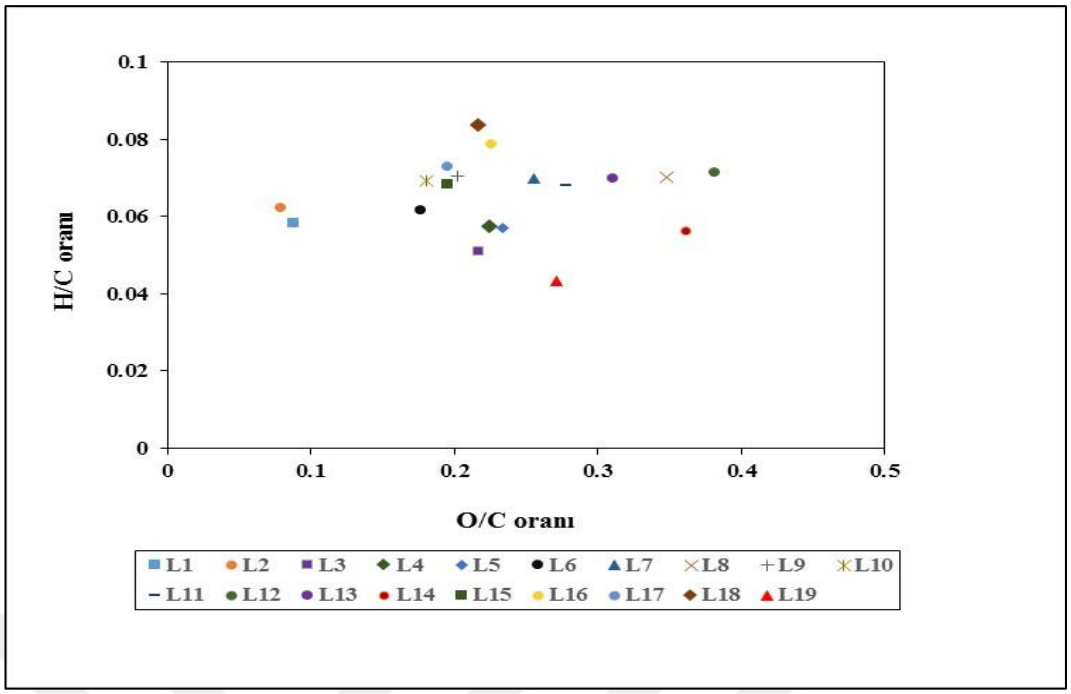
Çizelge 4.11 : Çanakkale/Çan kireçtaşı (KT1) örneğinin içerik analizi (%ağ., orijinal temelde).

Kömür	Birim	Değer
Nem	% ağ.	0.395
$CaCO_3$	% ağ.	91.110
$MgCO_3$	% ağ.	0.420
SiO_2	% ağ.	0.772
Na_2O	% ağ.	0.022
K_2O	% ağ.	0.152
Al_2O_3	% ağ.	0.200
Fe_2O_3	% ağ.	0.485
Kızdırma Kaybı	% ağ.	43.662

4.3 Linyitlerin Niteliği-van Krevelen grafiği

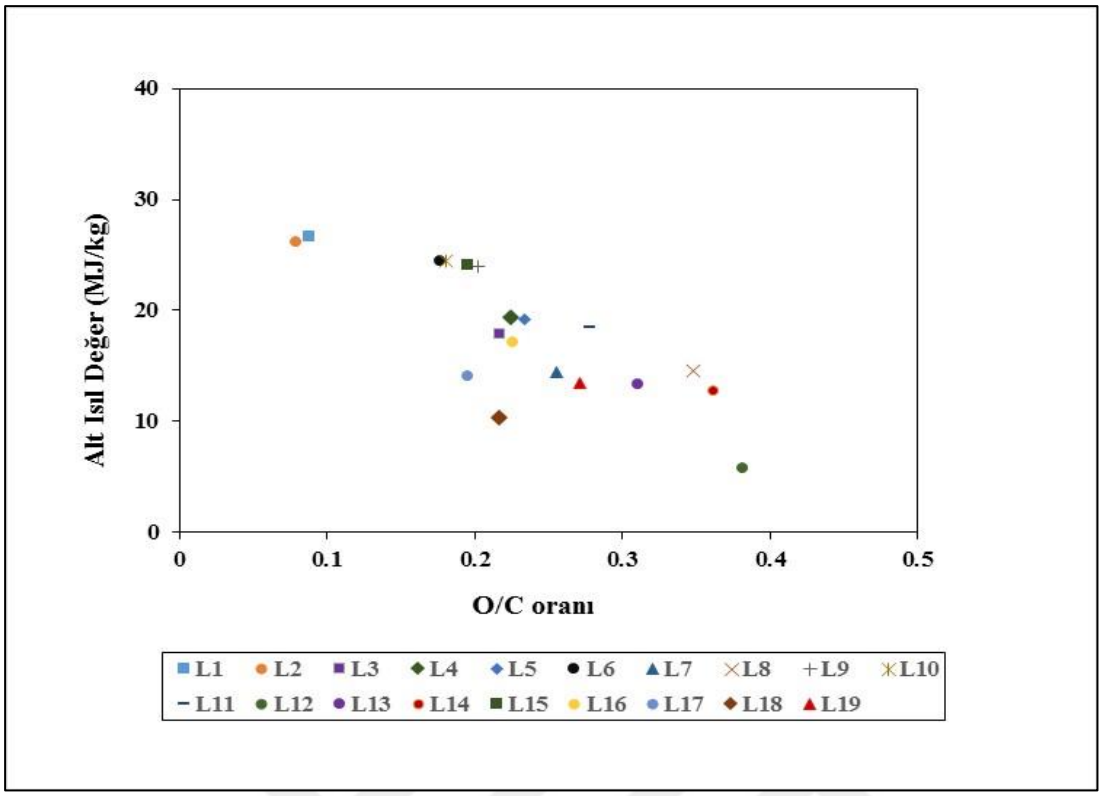
Kömürlerin kalitesinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi Van Krevelen grafiğidir. Bu yöntemde kömürlerin H/C atomik oranları O/C atomik oranlarının bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir ve kömürlerin buradaki konumlarına bağlı olarak kömürlerin sınıflandırılması yapılmaktadır (Van Krevelen, 1950). Yüksek kaliteli kömürler düşük H/C ve O/C oranlarına sahip olup grafiğin sol tarafında yer alırlar. Düşük kaliteli kömürler ise yüksek H/C ve O/C oranlarına sahiptir ve grafiğin sağ tarafında yer alırlar. Örneğin; antrasit grafiğin solunda yer alırken odun en sağda yer almaktadır. H/C oranları 0.08-0.12 ve O/C oranları 0.20-0.35 aralığında değişen kömürler linyit olarak sınıflanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan linyitlerin van Krevelen grafiği Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Türk linyitleri genellikle bu aralık içinde kalmaktadırlar. Bununla birlikte farklı özellikleri nedeniyle oldukça geniş bir dağılım göstermektedirler. İncelenen kömürlerden sadece ikisinin (L1 ve L2) O/C oranları 0.2'den çok düşük olduğu için aralığında dışında kalmaktadır. Bu kömürler 26 MJ/kg'ı aşan alt ısıl değerleriyle kullanılan linyitler içerinde en kaliteli olanlarıdır. Diğer yandan, L12 ve L14 kömürleri 0.35'den biraz yüksek O/C oranlarına sahiptir. Bunlardan L12 linyiti en düşük alt ısıl değere (5.74 MJ/kg) sahiptir. L12, L18 (10.29 MJ/kg) ve L13 (13.37 MJ/kg) en düşük alt ısıl değere sahip 3 kömür içerisinde yer almaktadır.

Linyitlerin O/C ve H/C oranları ile alt ısıl değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6a'da görüldüğü gibi O/C oranı linyitlerin alt ısıl değerini önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle O/C oranının 0.2-0.3 aralığında değiştiği bölgede O/C oranının artması ile alt ısıl değer önemli ölçüde düşmektedir. En düşük O/C oranına sahip olan L1 ve L2 kömürleri en yüksek ısıl değere sahiptir. En yüksek O/C oranına sahip olan L8, L12, L14 ve L19 ise düşük alt ısıl değere sahiptir. Bu sonuç, kömürdeki oksijen miktarının artmasına bağlı olarak ısıl değerin azaldığının gözlendiği diğer çalışmalarla uyum içindedir (Huggings ve diğ, 1981).

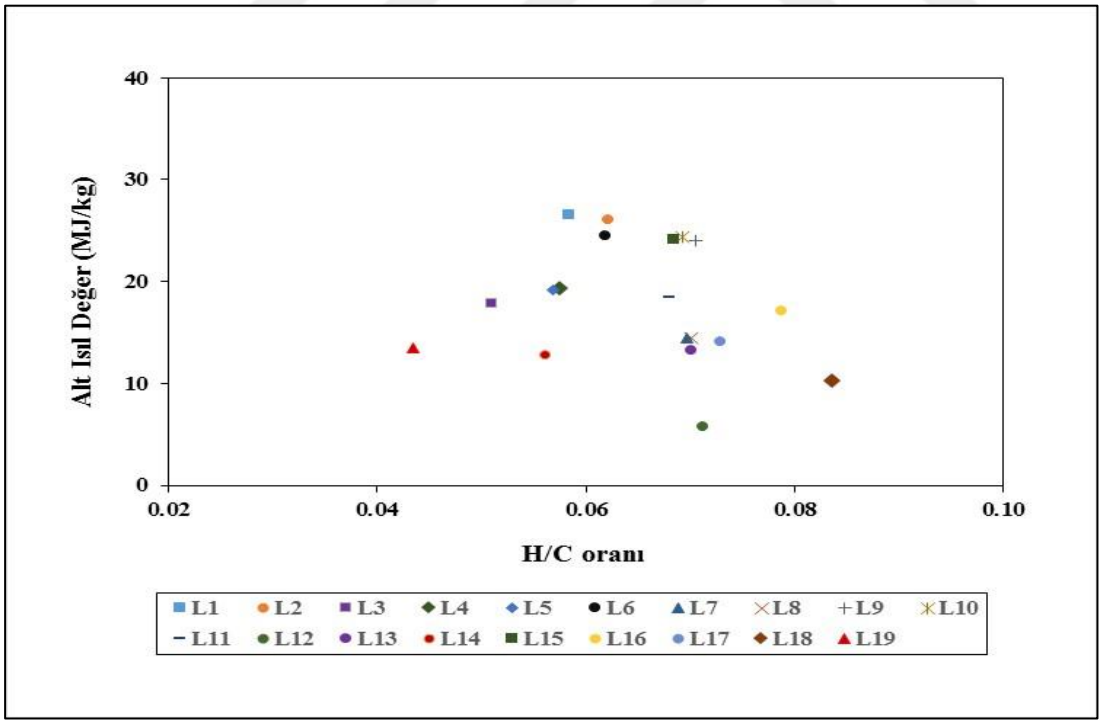


Şekil 4.5 : Linyitlerin van Krevelen grafiği.

Öte taraftan çalışmada kullanılan linyitlerin H/C oranları 0.04-0.08 aralığında değişmektedir. Bu aralık, van Krevelen sınıflandırılmasında linyitler için tanımlanan genel aralıktan (H/C = 0.08-0.12) biraz daha düşüktür. Bu sonuç, kullanılan linyitlerin genel olarak daha düşük hidrojen içeriğine sahip olduğunu göstermektedir. Linyitlerin H/C oranlarıyla alt ısıl değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.6b'da sunulmuştur. Şekilden de anlaşıldığı gibi bu iki özellik arasında sistematik bir ilişki görülmemektedir. Ancak incelenen linyitler için genel olarak gözlenen eğilim, ısıl değerin H/C oranındaki artıştan olumsuz etkilenmesi ve azalmasıdır. Göze çarpan diğer ilginç bir nokta ise, bazı durumlarda H/C oranında meydana gelen çok küçük bir değişikliğin ısıl değerde önemli bir dalgalanmaya neden olabildiğidir. Örneğin, H/C oranının 0.07±0.002 gibi oldukça dar bir aralıkta değişmesi, ısıl değerde 5 MJ/kg – 27 MJ/kg gibi oldukça büyük bir değişikliğe neden olabilmiştir.



a)



b)

Şekil 4.6 : Linyitlerin alt ısıl değerlerinin (a) O/C (b) H/C oranı ile değişimi.

4.4 Linyitlerin Yanma Süreçlerinin İncelenmesi

Bu tezde; Türk Linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta yanması konusunda geniş bir çalışma yapılmıştır. Linyitlerin yanma süreçlerinin incelenmesi için Bölüm 3'de de belirtildiği gibi, çalışmalar 30 kW termal kapasiteye sahip bir akışkan yatak yakma sisteminde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda Türkiye'nin değişik bölgelerinden ve değişik üretim sahalarından alınan farklı özelliklere sahip 19 adet linyit kullanılmıştır. Linyitler **1.** Hava ile yanma, **2.** Oksijence zengin havayla yanma ve **3.** Oksiyanma koşullarında yakılmışlardır. Linyitlerin tümü hava ortamında, bunlardan iki tanesi ise ayrıca hem oksijence zengin ve hem de oksiyanma atmosferinde yakılarak incelenmişlerdir. Çalışma, bu niteliğiyle, ülkemizde yapılan ilk araştırma çalışması olmuştur. Çalışmalarda linyitlerin yanma süreçleri, yatak içi sıcaklık dağılımları, yanma kararlılığı, çeşitli emisyonlar ve yanma verimi gibi değişik parametreler temel alınarak incelenmiştir. Yakma çalışmalarında değiştirilen/kontrol edilen girdi parametreleri, ölçülen büyüklükler ve yanma sürecinin araştırılan başlıca yönleri Çizelge 4.12'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.12 : Deneysel çalışmalarda kontrol edilen ve ölçülen parametreler ile araştırılan konular.

Değiştirilen/Kontrol edilen Parametreler	Ölçülen Parametreler	Araştırılan Konular
Yakıt (Linyit) çeşidi	Sıcaklıklar	Sıcaklık dağılımı
Adsorban çeşidi	SO_2 emisyonu	Çevresel etkiler
Hava fazlalık katsayısı	Basınç düşüşü	Yanma sürecinin kararlılığı
Yanma havasındaki oksijen oranı	Yanma verimi	Yanma gazındaki CO_2 oranı
Baca gazlarının geri beslenmesi	Geri döndürme oranı	Standartlara uyum

4.4.1 Linyitlerin Hava Ortamında Yanma Süreci

Çalışmada kullanılan tüm linyitlerin yanma süreçleri hava ortamında ve değişik hava fazlalık katsayılarında (λ) (HFK) gerçekleştirilmiştir (Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü, "Kömür Karakterizasyonu ve Yanma Davranışlarının İncelenmesi" Projesi Sonuç Raporu, 2015). Hava fazlalık katsayısı, yaklaşık ortalama HFK=1.1±0.02 ile 1.4±0.02 arasında değiştirilmiştir. Deneylerde akışkanlaştırma ve yanma için kullanılan havanın tümü birincil hava olarak, rüzgar odası ve dağıtıcı elek vasıtasıyla yanma odasına beslenmiş ve hava beslemede herhangi bir hava kademelendirilmesi (ikincil hava kullanımı) yapılmamıştır. Deneysel çalışmalar

Bölüm 3.6'da belirtildiği şekilde yürütülmüştür. Deneyler başlatıldıktan sonra *yatışkan hale* ulaşması beklenmiş, bu aşamaya ulaşıldıktan sonra ölçümler alınmaya başlanmıştır. *Yatışkın hal*, sıcaklıkların herhangi bir seviyede ±25 ^{o}C sapmayla dengelendiği ve sürdürüldüğü durumdur. Bu uygulama, başlatılmış bir yanma süreci boyunca yakma koşulları değiştirildiğinde de uygulanmıştır. Havayla yakma deneylerinde uygulanan çalışma koşulları Çizelge 4.13'de gösterilmiştir. Linyitlerin yanma sürecini karakterize etmek amacıyla Çizelge 4.12'de belirtilen ölçümler yapılmıştır.

Yanma deneyleri 8-14 saat süren uzun deneylerdir. Yatışkın koşullarda ölçülen büyüklükler dahi, sistemin çalışma şeklinden dolayı, belirli sınırlar içerisinde dalgalanmıştır. Burada verilen sonuçlar bu süreler içerisinde sürekli olarak yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçların zamana göre hesaplanan ortalama değerleridir.

Çizelge 4.13 : Havayla yanma deneylerinin koşulları.

Parametre	Aralık
Linyit tanecik boyutu (mm)	1-2
Linyit besleme hızı (kg/sa)	3-5
Hava besleme şekli	Tümü birincil hava
Hava besleme debisi (Nm^3/sa)	25-30
Hava fazlalık oranı (-)	1.1 -1.4 (±0.02)
Deney süresi (sa)	8-14

Hava Ortamında Yanma Sürecinde Sıcaklık Dağılımı

Akışkan yatak yakıcıların performansını tasarımları, işletme koşulları ve kullanılan yakıtın özellikleri belirlemektedir. Tasarım ve işletme koşulları bir yakıt için optimize edilebilir, fakat kullanılan yakıtın özellikleri, tipi ve orijinine bağlı olarak değişebilmektedir. Yakıttan kaynaklanan çeşitli işletme sorunları ise yanma sürecini ve dolayısıyla yakma sisteminin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Yanma odasındaki sıcaklık dağılımı, aynı zamanda akışkan yatak yakma sisteminin ne kadar etkin ve başarılı çalıştığının da bir göstergesidir. Bu nedenle, yanma deneyleri boyunca reaktör ve geri dönüş ayağında değişik noktalarda sürekli olarak sıcaklık ölçümü yapılmış ve kaydedilmiştir. Sıcaklık dağılımı, kullanılan yakıtın özellikleri (ısıl değer, uçucu madde içeriği, karbon içeriği, vb.) ve işletme koşulları (hava fazlalık katsayısı, birincil ve ikincil hava besleme pozisyonları ve oranları, vb.) ile yakından

ilişkilidir. Diğer yandan, akışkan yatak yakma sistemlerinde çalışma sıcaklığı ve operasyonun kararlılığının üst sınırları yakıtların kül ergime sıcaklığına bakılarak belirlenmektedir.

İncelenen kömürler içinde kuru temelde en yüksek alt ısıl değere sahip olan Tunçbilek lavvar (L1) (AID = 26.61 MJ/kg) ve Ömerler Lavvar (L2) (AID = 26.12 MJ/kg) ile en düşük alt ısıl değere sahip Tınaz (L12) (AID = 5.74 MJ/kg) ve Ilgın (L18) (AID = 10.29 MJ/kg) linyitlerinin yakıldığı süreçlerde reaktör ve geri dönüş ayağı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 4.7'de, Şekil 4.8'de, Şekil 4.9'da ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

Şekilde, sıcaklıklar dağıtıcı elekten itibaren olan mesafenin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Kömür, dağıtıcı elekten itibaren 80 mm yükseklikte reaktöre beslenmektedir. Şekiller incelendiğinde, reaktör içerisinde dağıtıcı elekten itibaren yukarıya doğru gidildikçe sıcaklıklar önce yükselmekte, bir maksimumdan geçtikten sonra reaktör çıkışına doğru kademeli olarak azalmaktadır. Böylece kabaca 3 bölge ortaya çıkmaktadır.

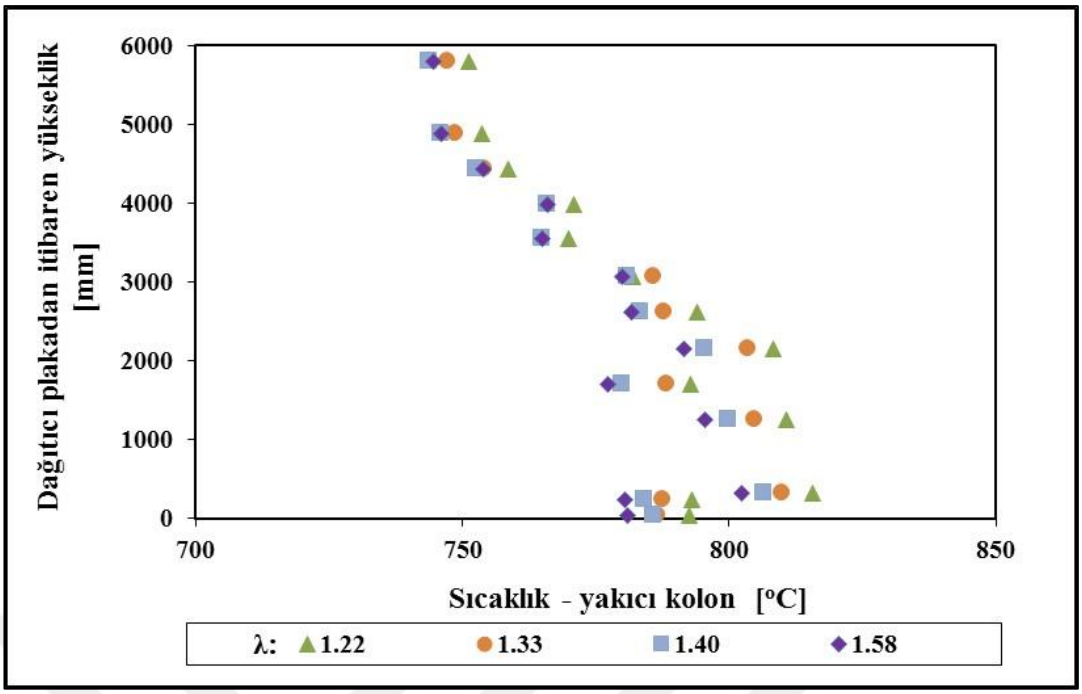
Bölge-1: Yanma odasının en alt tarafında yeralmakta ve dağıtıcı elekten itibaren kabaca 0-50 cm yüksekliğindeki hacmi kapsamaktadır. Bu bölgede sıcaklıklar nispeten düşüktür ve dağıtıcıdan itibaren yükseklik arttıkça artmaktadır. Bu bölgenin alt kesitlerinde sıcaklıkların odukça düşük olduğu dikkati çekmektedir. Akışkanlaşma ve yakma için kullanılan hava bu bölgeden giriş yapmaktadır. Bu havanın soğutma etkisi nedeniyle bölgede sıcaklıklar düşük kalmaktadır. Bunun yanı sıra havanın dağıtıcı elekteki nozullarda geçerken oluşan hava jetlerinin hidrodinamik olarak hakim olduğu bir *jet penetrasyonu* derinliği söz konusudur. Bu bölgede hava hızı çok yüksektir ve yakıt taneciklerinin bölgeye ulaşması ya hiç mümkün olmamakta veya ihmal edilebilecek seviyelerde kalmaktadır. Bundan dolayı yanmanın olmadığı bu giriş bölgesinde sıcaklıklar minimum seviyelerde kalmaktadır. Bu özelliğinden dolayı Bölge-1' de büyük sıcaklık gradyenleri ortaya çıkmaktadır.

***Bölge-2*:** Bölge yakıt besleme noktasının üstünde yeralmaktadır. Kömür derişiminin ve yanmanın en yoğun olduğu bir bölgedir. Dolayısıyla sıcaklıkların en yüksek seviyelere ulaştığı bölgedir. Sınırları kömürün çeşiti ve kalitesiyle ile operasyon koşulları tarafından etkilense de genellikle dağıtıcı elekten itibaren kabaca 50-300 cm arasında yer alan bir bölgedir.

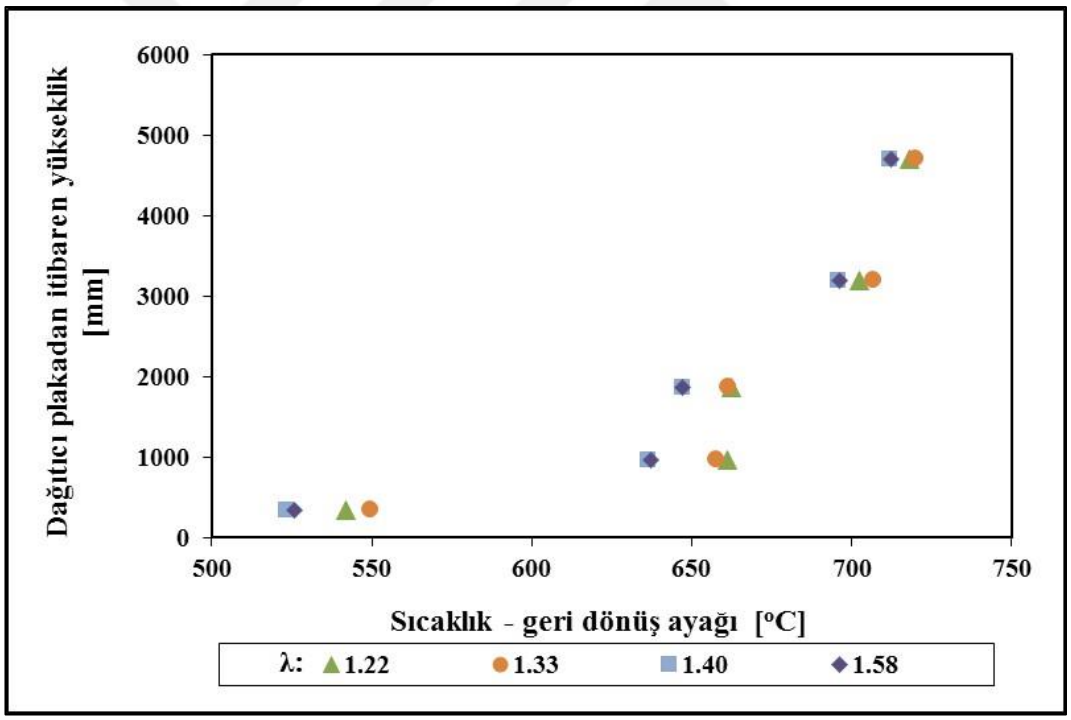
***Bölge-3*:** Bu bölge akışkan yatağın en üst bölgesidir. Burada kömür derişiminin azalması, yanma yoğunluğunun düşmesi ve çevreye olan ısı kayıplarının artmasına paralel olarak sıcaklıklar reaktörün çıkışına kadar kademeli ancak yavaş bir şekilde azalmaktadır. Buradaki sıcaklıklar genelikle, Bölge-1'deki sıcaklıklardan yüksek, Bölge-2'deki sıcaklıklardan ise daha yüksektir. Daha sonra tartışılacağı gibi, bu bölgelerin, özellikle Bölge-2 ve Bölge-3 sıcaklıkları arasında ortaya çıkan fark akışkan yataktaki sıcaklık dağılımının niteliği (homojenlik derecesi) için bir gösterge olarak değerlendirilebilir.

Bütün deneysel çalışmalarda bu bölgeler ortaya çıkmıştır. Her ne kadar yanma bölgesinde termal açıdan bu 3 farklı bölge gözlense de bu bölgeleri kesin sınırlarla bir birinden ayırmanın mümkün olmadığını gözden kaçırmamak gerekmektedir. Bölge sınırları esnektir ve kömürün niteliği ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. Bunun gibi, buralardaki hidrodinamik, yanma ve termal koşullar da değişebilmektedir. Bütün bu koşullara bağlı olarak sıcaklık profili değişebilmektedir.

L1 ve L2 linyitinin yanma süreci sırasında geri dönüş ayağında ölçülen sıcaklık dağılımı sırasıyla Şekil 4.7b'de ve Şekil 4.8b'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü ve beklendiği gibi, sıcaklıklar siklon çıkışından (h = 500 cm) reaktöre geri besleme noktasına (h = 30 cm) doğru gittikçe düşmektedir. Bu durum bütün operasyon koşulları için geçerlidir. 500 cm uzunluğundakı geri dönüş ayağı boyunca sıcaklıklarda 140-180 ^{o}C civarında bir düşüş gerçekleşmiştir. Böylece siklonu 750 ±50 ^{o}C'da terk eden katı kütle reaktöre yaklaşık 500-550 ^{o}C sıcaklıkta geri beslenmiş olmaktadır. Buna göre dönüş ayağında katı kütle 0.3-0.4 ^{o}C/cm hızla soğumaktadır. Şekil incelendiğinde, sıcaklıkların siklon çıkışından itibaren (h = 500 cm) 100 cm seviyesine kadar yavaş, ondan sonra ise biraz daha hızlı bir şekilde azaldığı dikkati çekmektedir.

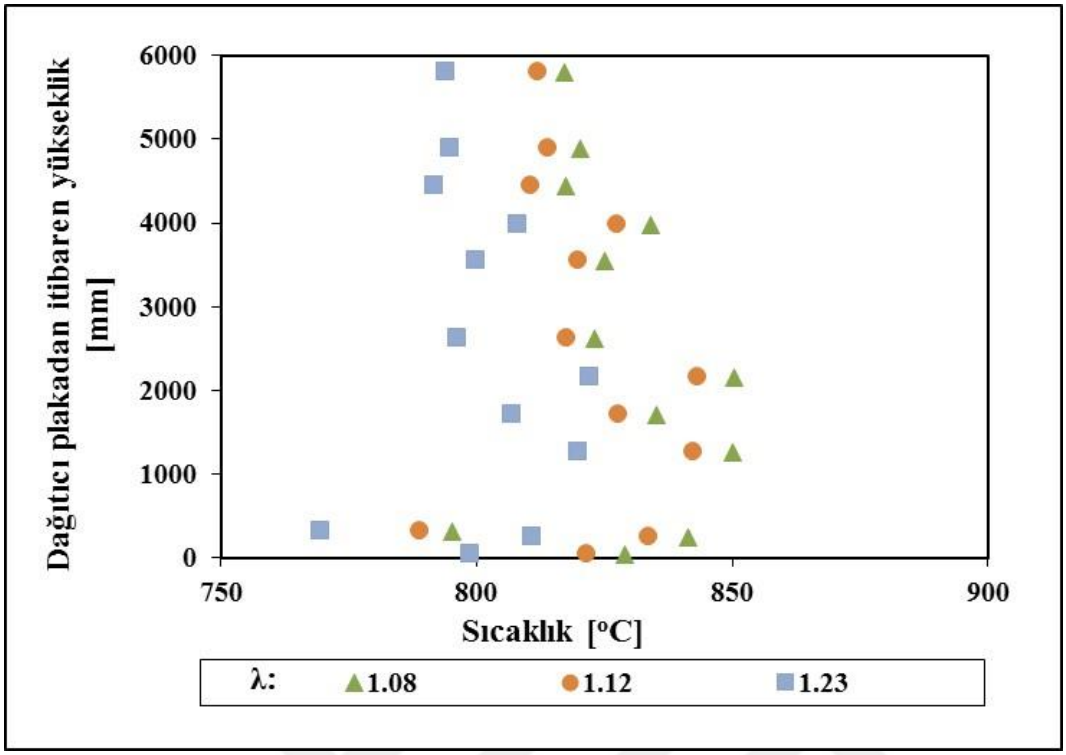


a) Akışkan yatak,

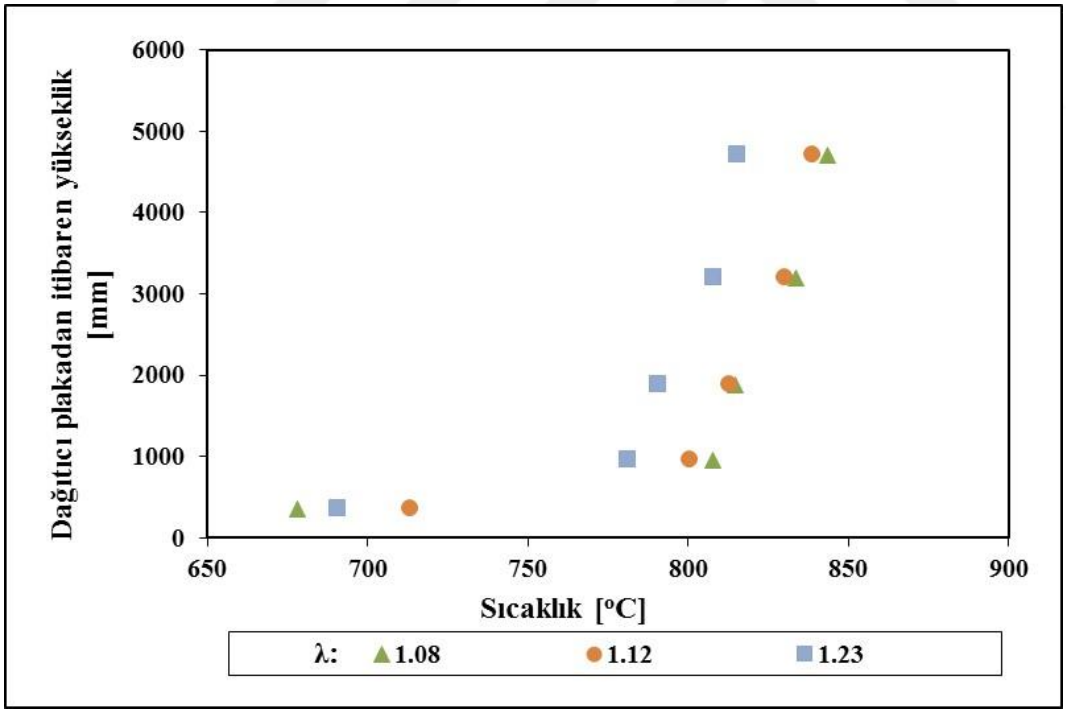


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil 4.7 : L1 linyitinin (Tunçbilek lavvar) havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.



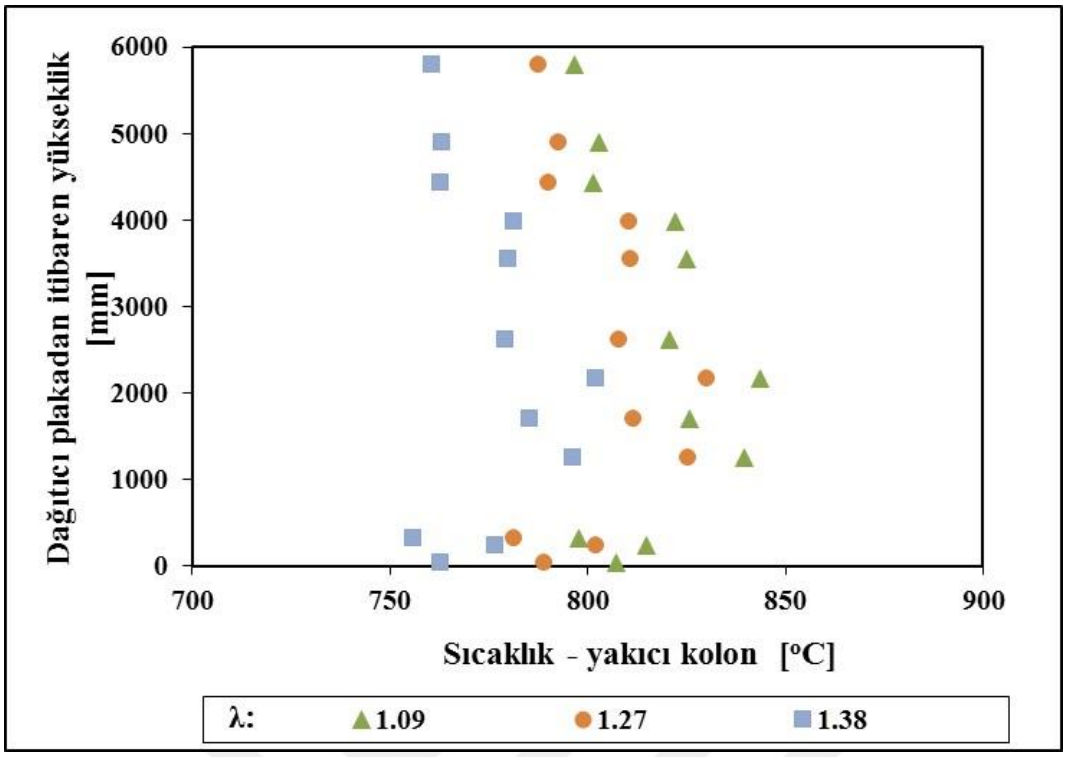
a) Akışkan yatak,



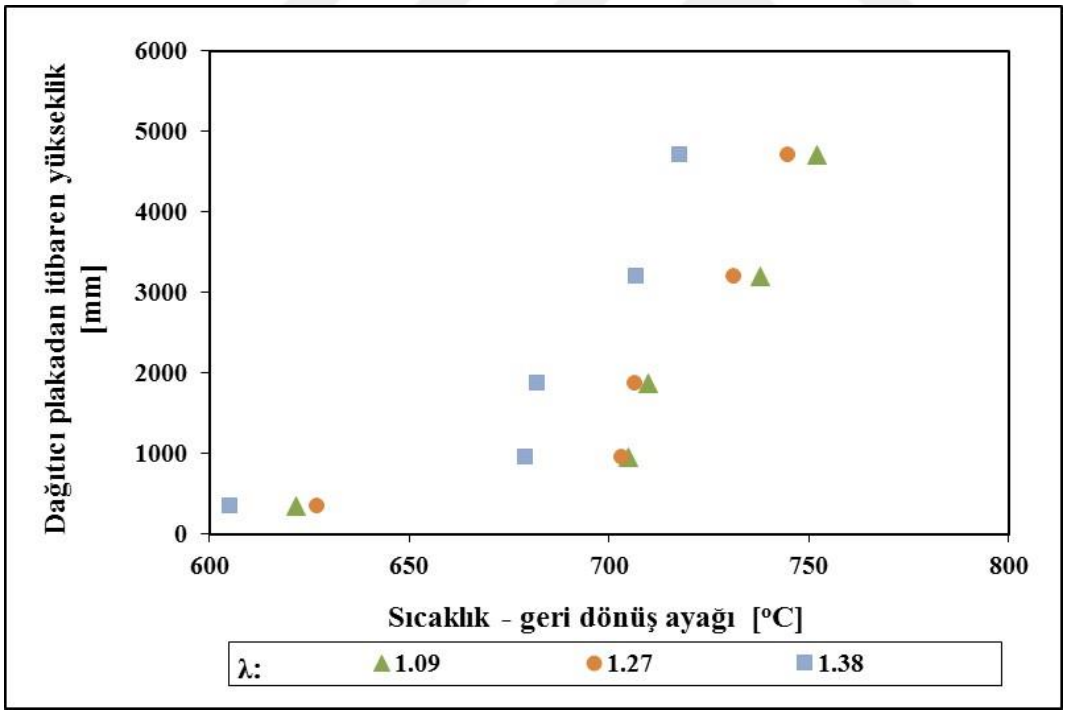
b) Geri dönüş ayağı.

Şekil 4.8 : L2 linyitinin (Ömerler lavvar) havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

Tınaz (L12) ve Ilgın (L18) linyitlerinin yanma sürecinde ölçülen sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 4.9'da ve Şekil 4.10'da görülmektedir. Şekil 4.9a ve ve Şekil 4.9b sırasıyla reaktör ve geri dönüş ayağındaki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 kıyaslandığında hem reaktörde hem de geri dönüş ayağındaki sıcaklık dağılımlarının L2 ve L12 için çok benzer olduğu dikkati çekmektedir. Özellikle reaktör ekseni boyunca ortaya çıkan profillerin temel karakteristikleri hemen hemen aynıdır. Buna karşılık geri dönüş ayağında da profiller benzer olmasına rağmen daha yüksek ısıl değere sahip olan L2 kömürü için h =100-500 cm arasında kalan bölgede, L12'e kıyasla sıcaklıklar 60-80 ^{o}C daha yüksek ölçülmüştür. h = 100 cm altında ve geri besleme girişine yakın bölgede ise her iki kömürün yanma sürecinde de sıcaklık çok yakın seviyelerde olmuştur. Bu durum, kömürlerin özellikleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. L1 ve L2, L12 ve L18'e kıyasla daha düşük kül ve daha yüksek karbon oranına sahiptir. L2'nin geri dönüş ayağında yanması tamamlanmamış, daha çok kömür taneciğinin ulaştığı ve yanmanın burada bir süre daha devam ettiği tahmin edilmektedir. Bu da geri dönüş ayağında sıcaklıkların daha yüksek olmasına neden olmuştur.

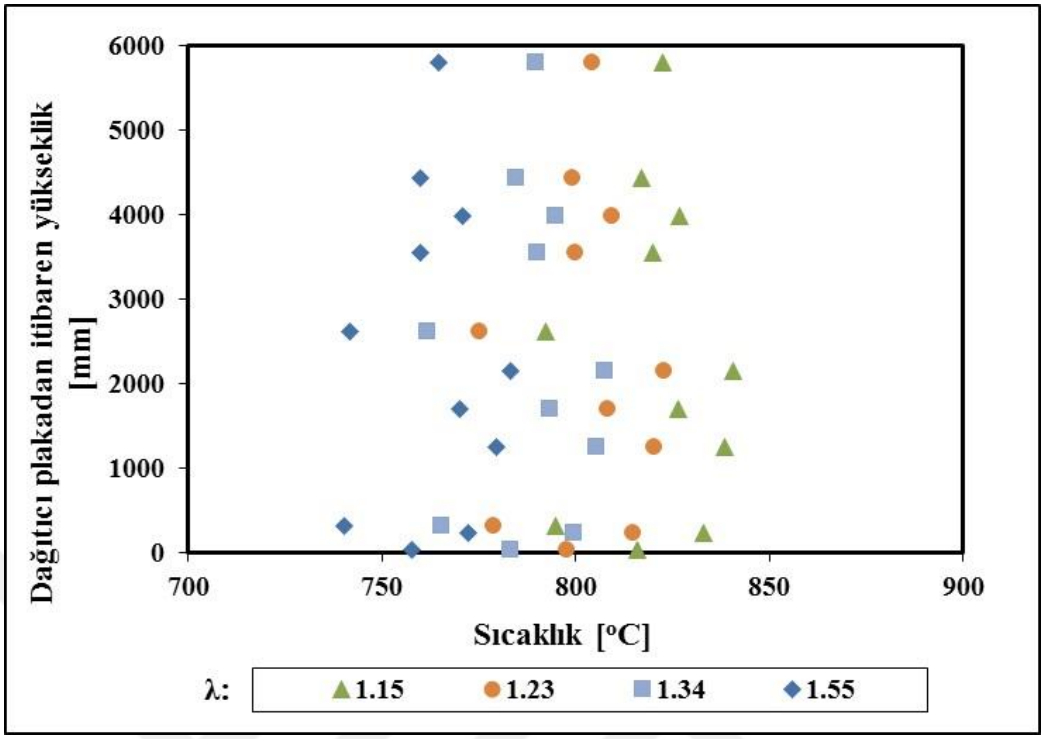


a) Akışkan yatak,

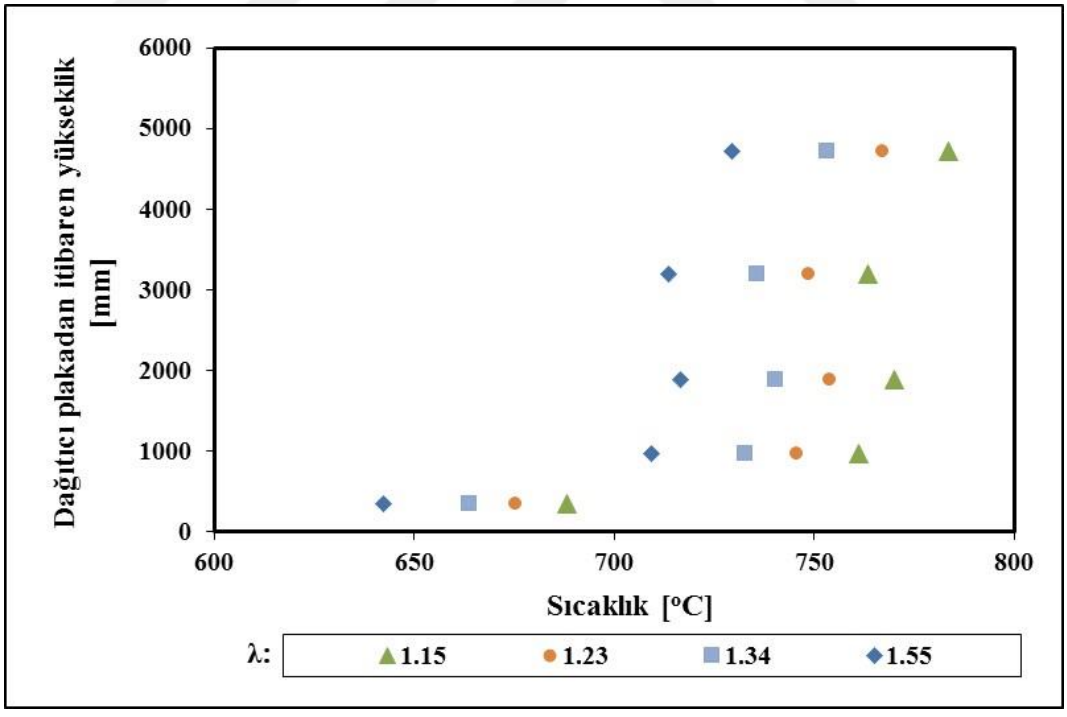


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil 4.9 : L12 (Tınaz) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.



a) Akışkan yatak,



b) Geri dönüş ayağı.

Şekil 4.10 : L18 linyitinin (Ilgın) yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

L1, L2, L12 ve L18 dışında kalan diğer 15 linyit numunesinin yanma sürecinde sistemde gerçekleşen sıcaklık dağılımları her kömür için ayrı ayrı Ek B Şekil B.1-Şekil B.15'de görülmektedir.

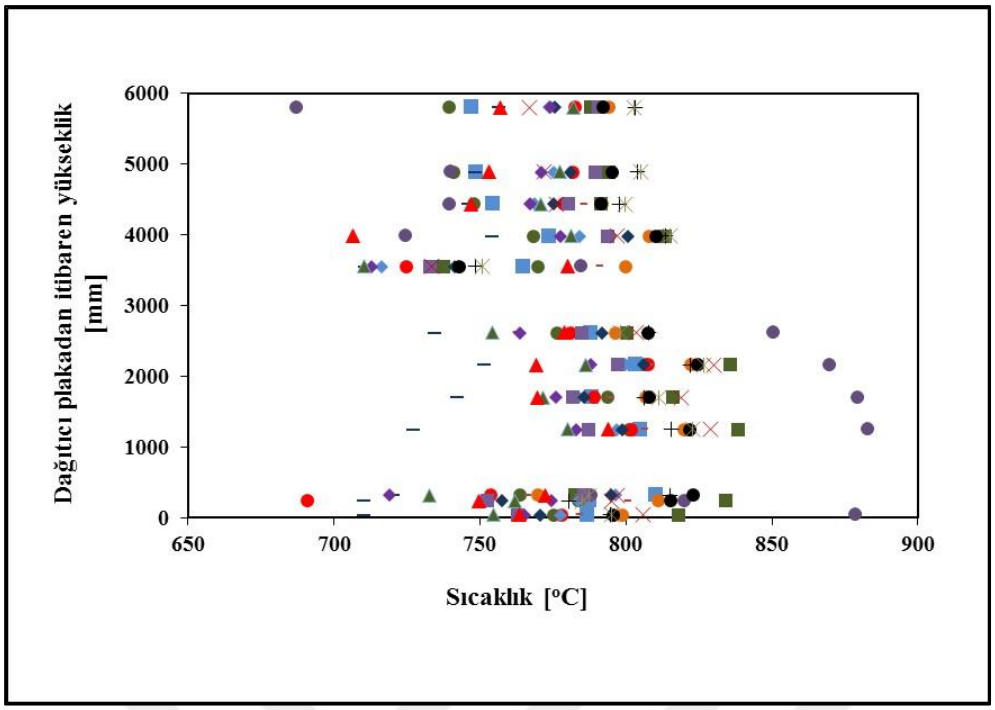
Yanma sürecinde akışkan yatak yakma sisteminde ortaya çıkan sıcaklık profilleri tüm linyitler için Şekil 4.11'de toplu olarak gösterilmiş ve kıyaslanmıştır. Bu profiller hava fazlalık katsayısının HFK=1.3±0.02 olduğu koşullarda elde edilmiştir. Şekil gözden geçirildiğinde, hem akışkan yatak hem de geri dönüş ayağında ölçülen sıcaklık dağılımlarının bütün kömürler için benzer bir profil sergiledikleri görülmektedir. Yani, Şekil 4.11a'da da görüldüğü gibi, daha önce tek tek kömürler için reaktörde gözlenen 3 bölge bütün kömürler için gözlenmiştir. **1.**Sıcaklıkların görece düşük kaldığı en alttaki bölge (B*ölge-1*, h = 0-50 cm), **2.** Sıcaklıkların en yüksek olduğu orta bölge (*Bölge-2*, h = 50-300 cm) ve **3.** En üstteki bölge (B*ölge-3*, h > 300 cm). Sıcaklıkların kabaca Bölge-1'de 700-810 ^{o}C, Bölge-2'de 750-850 ^{o}C ve Bölge-3'de 750-800 ^{o}C arasında değiştiği görülmektedir. Sıcaklıkların bu bölgelerde farklı olmasının olası nedenleri yukarıda tartışılmıştır. Ancak yine çalışma koşulları değiştiğinde bu sıcaklıkların da değişebileceği unutulmamalıdır. Operasyon koşulları ve sıcaklıkları kömürlerin ergime özellikleri göz önüne alınarak belirlenmektedir. Bu konu daha sonra ayrıca tartışılacaktır.

Bu şekilde dikkati çeken diğer bir durum ise reaktördeki sıcaklık seviyeleriyle kömürlerin kalitesi (örneğin ısıl değerleri) arasında sistematik bir ilişkinin olmamasıdır. Başka bir ifadeyle yanma sürecini farklı kömürlerle benzer sıcaklık seviyelerinde sürdürmek mümkün olmaktadır. Bunun için sistemin ihtiyaç duyduğu ısıl girdinin sağlanması yeterli olmaktadır. Bu, yeterli miktarda kömürün sisteme beslenmesi ve sistem tasarımının farklı kömürleri kabul edebilecek esnekliğe sahip olması anlamına gelmektedir. Sıcaklık dağılımları çalışmada kullanılan ve alt ısıl değerleri kabaca 5-27 MJ/kg gibi oldukça geniş bir aralıkta değişen kömürlerle akışkan yatak yakma sistemlerinin tipik çalışma sıcaklarına (800-900 ^{o}C) ulaşmanın ve bu seviyelerde kararlı yanmayı/operasyonu sağlamanın mümkün olduğunu göstermektedir.

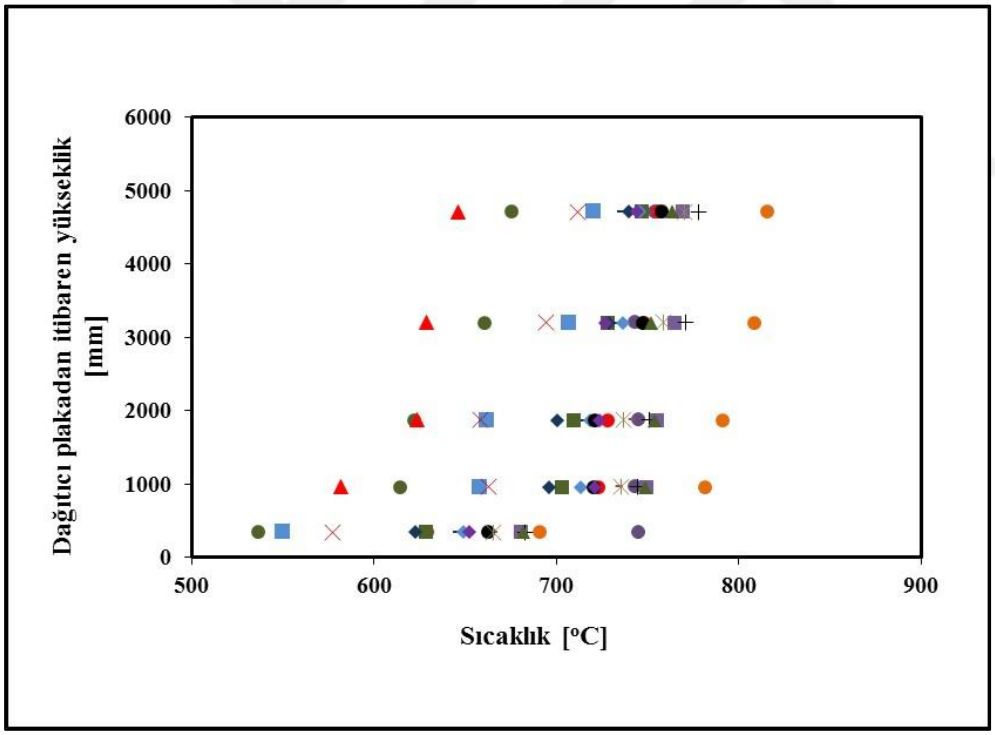
Şekil 4.11b'de, birinci siklonda yanma gazlarından ayrılan ve kül, yanmamış kömür ve varsa diğer katı taneciklerden (yatak malzemesi ve adsorban) oluşan katı kütleyi yanma bölgesine geri beslemekte kullanılan geri dönüş ayağındaki sıcaklık dağılımı tüm kömürler için verilmiştir. Yine daha önce tek tek kömürler için gözlenen durumun

tüm kömürler için geçerli olduğu görülmektedir. Burada kabaca iki bölge görülmektedir: **1.** Sıcaklıkların görece yavaş düştüğü bölge. Bu bölge siklon çıkışından (h = 500 cm) itibaren yaklaşık 4 metre uzunluğundaki bölgeyi kapsamaktadır. **2.** Soğumanın daha hızlı gerçekleştiği bölge. Bu bölge siklon çıkışından sonra yaklaşık 4 m mesafede başlamakta ve geri besleme noktasına kadar devam etmektedir. Geri dönüş ayağında katı kütle sıcaklığında yaklaşık 140-180 ^{o}C civarında bir düşüş gerçekleşmiştir. Böylece geri dönüş ayağındaki kütle yaklaşık 500-550 ^{o}C sıcaklıkta akışkan yatağa girmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, soğuma profili benzer olmasına karşın kömür ve çalışma koşullarına bağlı olarak sıcaklık seviyeleri farklı olabilmektedir. Geri dönüş ayağında, sıcaklıklar yanma bölgesine kıyasla daha geniş bir sıcaklık bandı içinde dağılmıştır. Bu sıcaklıklar yeterince yüksektir ve yanma bölgesinin termal dengesinde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır.

Yakma deneyleri her bir linyit için hava fazlalık katsayısının 1±0.02 -1.4±0.02 olduğu aralıkta yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, hava fazlalık katsayısındaki değişikliklere bağlı olarak sıcaklık profillerinin belli bir oranda sola (daha düşük sıcaklığa doğru) veya sağa (daha yüksek sıcaklığa doğru) doğru kayabileceğini göstermektedir. Fakat tipik profil önemli ölçüde değişmemektedir. Bu nedenle, Şekil 4.7'deki profiller, HFK = 1.3±0.02 olduğu durumda DAY yakma reaktöründeki sıcaklık dağılımının genel eğilimini ortaya koymaktadır.



a) Akışkan yatak,



b) Geri dönüş ayağı.



Şekil 4.11 : Linyitlerin yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağındaki sıcaklık profilleri.

Sıcaklık Dağılımının Üniformluk Derecesi

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi akışkan yatakta sıcaklık dağılım profili birbirine benzemektedir. İdeal bir durumda yanma odasında eksenel yönde üniform bir sıcaklık dağılımı, başka bir ifadeyle her noktada sıcaklıkların aynı olması beklenir. Üniform sıcaklık dağılımı, yanmanın daha etkin ve kaliteli olması, yanma sürecinin güvenli ve stabil bir şekilde sürdürülmesi ve ısı transfer yüzeylerinin tasarımı ve sistem içerisinde konuşlandırılması için büyük önem taşımaktadır. Ancak uygulamada, akışkan yakma sistemlerinin çalışmasını ve yanma sürecini etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bunun için ideal koşulların sağlanması ve dolayısıyla yanma odasında tek bir sıcaklık seviyesiyle tanımlanan ideal bir üniformluğa ulaşılması söz konusu değildir. Öte yandan akışkan yatakta sıcaklık gradyenin büyük olması hem yanmanın kalitesini ve stabilitesini (sürdürülebilirliliğini) hem de bir bütün olarak sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, yanma bölgesinde ölçülen en yüksek ($T_{AY,mak}$) ve en düşük ($T_{AY,min}$) sıcaklıklar arasındaki fark (ΔT_{AY}) sıcaklık dağılımının *üniformluk derecesi* için bir ölçü olarak kullanılmıştır. Buna göre üniformluk derecesi aşağıdaki bağıntıyla tanımlanmıştır:

$$\Delta T_{AY} = T_{AY,mak} - T_{AY,min} \tag{4.1}$$

Burada, ΔT_{AY} akışkan yatakta ölçülen maksimum sıcaklık farkı, $T_{AY,mak}$ akışkan yatakta ölçülen en yüksek sıcaklık, $T_{Ay,min}$ ise akışkan yatakta öçülen en düşük sıcaklığı göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu sıcaklıklar kararlı koşullarda uzun sürelerle yapılan ölçümlerin ortalama değerleridir. Akışkanlaştırma/yanma havasının soğutma etkisinden dolayı sıcaklığın ortalama yatak sıcaklıklarından çok düşük kaldığı dağıtıcı plakanın üstündeki 0-30 cm'lik bölge göz önüne alınmamıştır. Havayla yakma deneylerinde kararlı hal yanma süreçlerinde ölçülen ortalama sıcaklıklar referans alınarak hesaplanan maksimum sıcaklık farkları (ΔT_{AY}) Çizelge 4.14'de sunulmuştur. Çizelgeden de görüldüğü gibi, $\Delta T_{AY,}$ L13 hariç, diğer 18 linyit için yaklaşık olarak ΔT_{AY} =30-80 ^{o}C aralığında değişmiştir. L13 için bu değer ΔT_{AY} = 158 ^{o}C gibi oldukça farklı ve yüksek olmuştur. Burada ölçülen ΔT_{AY} değerlerinin mutlak doğru değerler olmadığı ve sistemin koşullarına bağlı olarak değişebileceği gözden kaçırılmamalıdır. Bununla birlikte elde edilen sonuçların 19 adet kömürün kullanıldığı uzun süreli deneylerden elde edildiği dikkat alındığında,

istatistiki olarak anlamlı ve güvenilir verileri temsil etmektedir. Bu sonuçlar linyitlerin yakılması süresince reaktör hacmi içerinde bir yanma ve ısı üretiminin oldukça homojen bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Literatürde böyle bir bilgiye rastlanmadığı için, herhangi bir kıyaslama yapmak mümkün olmamıştır. Ancak bu sıcaklık gradyenleri bu çalışmada uygulanan koşullarda kullanılan linyitlerin yanma süreçlerinin kararlı ve dengeli bir seyir izlediğini ortaya koymaktadır. Üniform sıcaklık dağılımı, sıcaklıkların herhangi bir noktada veya bölgede yapışma/sinterleşme/aglomerasyon olaylarının başlayabileceği kritik seviyelere ulaşmasının önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. ΔT_{AY} değeri büyüdükçe, yanmanın belirli bölgelerde yoğunlaşması, buna bağlı olarak sıcaklıkların kritik seviyeleri aşması ve yanma stabilitesinin bozulması eğilimi güçlenecektir.

Çizelge 4.14 : Havayla yakma deneylerinde sıcaklık dağılımının ünifomluğu ve güvenlik payı toleransı ($\Delta T_{güvenlik}$), (HFK=1.3±0.02).

Kömür	ΔT_{AY}[a](°C)	$\Delta T_{güvenlik}$[b](°C)
L1	63	321
L2	28	305
L3	45	88
L4	48	175
L5	31	188
L6	32	288
L7	72	217
L8	63	155
L9	35	302
L10	42	169
L11	47	340
L12	67	264
L13	158	336
L14	29	274
L15	56	281
L16	76	241
L17	64	562
L18	46	192
L19	47	226

[a]$\Delta T_{AY} = T_{AY,mak} - T_{AY,min,}$ [b]$\Delta T_{güvenlik} = T_{ID} - (T_{AY}+200)$.

a: Akışkan yatakta ölçülen maksimum sıcaklık farkı

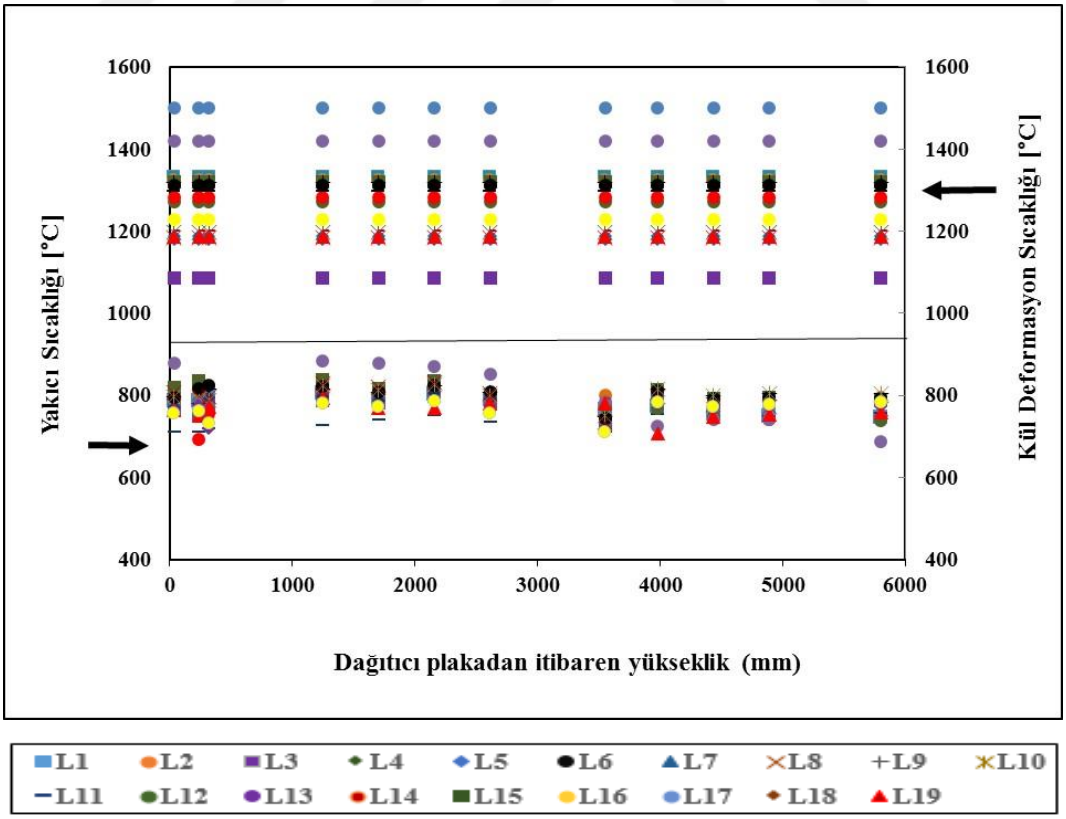
b: Güvenlik payı toleransı

Yanma Sürecinin Kararlılığı ve Güvenliği

Akışkan yatak yakma sistemleri genellikle 750-900°C sıcaklık bandında çalıştırılmaktadır. Bunun nedeni; yanmanın kararlı ve güvenli bir şekilde

sürdürülmesidir. Çalışma sıcaklığı kömürün özellikleriyle, özellikle anorganik bileşimi ve ergime sıcaklıklarıyla yakından ilgilidir. Çalışma sıcaklığının üst limiti birinci derecede yakıtın kül yumuşama/ergime sıcaklıkları tarafından belirlenmektedir. Reaktörde herhangi bir noktada sıcaklığın kül deformasyon sıcaklığını aşması durumunda aglomerasyon/sinterleşme olayının başlama tehlikesi baş göstermektedir. Aglomerasyon, çok hızlı gelişen ve kısa sürede tüm kesit alanına yayılarak yanmanın son bulmasına ve sistemin kilitlenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle yanmanın kararlı ve güvenli bir şekilde devam edebilmesi için operasyon sıcaklığının kül deformasyon sıcaklığının altında olması gerekmektedir. Sistemin operasyon güvenliği bu iki sıcaklık arasındaki fark büyük olduğu ölçüde artacaktır.

Çalışmada kullanılan linyitlerin kül deformasyon sıcaklıkları ve yanma süreçleri boyunca reaktör içinde gerçekleşen sıcaklık dağılımları Şekil 4.12'de karşılaştırılmıştır. Bu şekil incelendiğinde, tüm linyitlerin havayla yanma süreçlerinin 725-950 ^{o}C sıcaklık seviyelerinde kararlı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Ortalama 8-14 saat devam eden deneylerde ortalama sıcaklıklar ise 850±50 ^{o}C olmuştur.

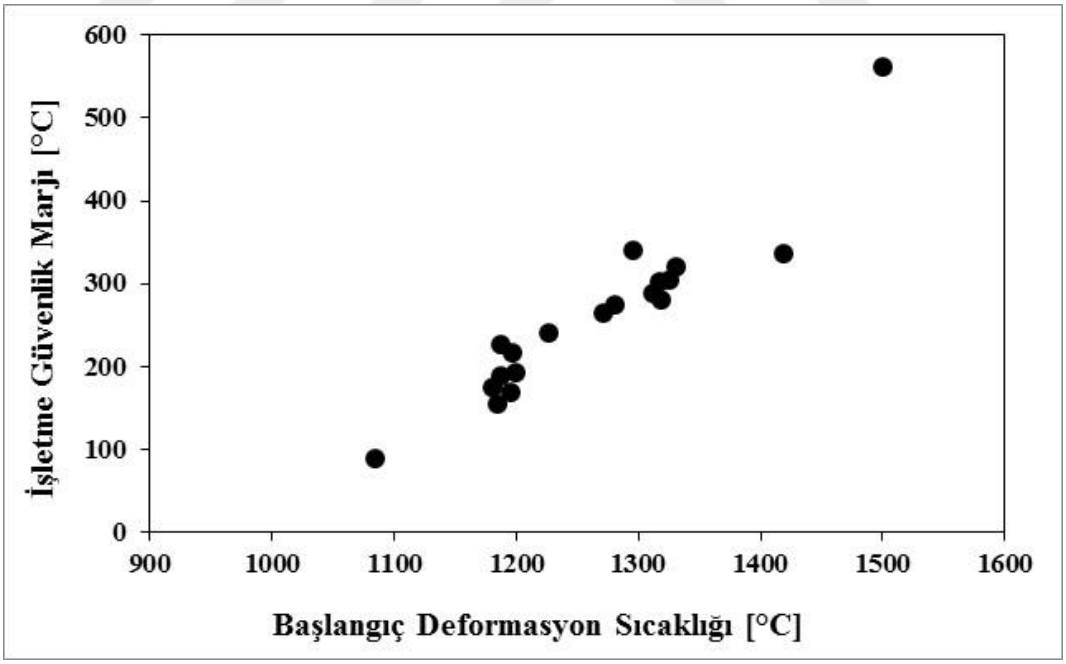


Şekil 4.12 : Linyitlerin akışkan yatak havayla yanma sürecinde sıcaklıklık dağılımları ve yanma kararlılığı.

Yukarıda da belirtildiği gibi, akışkan yataklı yakıcıların çalışma kararlılığına yönelik en büyük tehditlerden biri, yakıttan kaynaklanan, yanmanın durmasına ve yatağın tümden çökmesine yol açabilen aglomerasyon/sinterleşme olayıdır. Aglomerasyon bir çok faktöre bağlı olsa da temel olarak yakıt partikül sıcaklığının kül deformasyon sıcaklığına (T_{ID}) yaklaştığında ya da bu sıcaklığı aştığında süreç tetiklenebilmektedir (Huggings ve diğ, 1981; Manzoori ve Agarwal, 1994; Atakül ve Hilmioglu, 2005). Bu nedenle, kül deformasyon sıcaklığı ile yakıcıda ulaşılan maksimum sıcaklık arasındaki fark, yanma sürecinin güvenliği hakkında bilgi sağlayabilir. Şekilden görüleceği gibi, bu çalışmada kullanılan kömürler için bu fark 285 ile 760 °C arasında değişmektedir. Bu değerler oldukça büyük ve yanmanın güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için yeterli görünmektedir. Ancak bu fark yanıltıcı olabilir. Yanan bir kömür taneciğinin gerçek sıcaklığının ölçülen ortam sıcaklığından daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bir çok çalışma, akışkan yatakta yanan kömür taneciklerinin sıcaklığının ölçülen ortam sıcaklığından yaklaşık 30-200 °C daha yüksek olabileceğini ortaya koymuştur (Park, 1989; Linjewile ve diğ, 1994). Bu durum göz önüne alındığında yanma sürecinin güvenliğini belirlemeye çalışırken pratikte ölçülen yatak sıcaklığı değil, yanan kömür taneciklerinin sıcaklığının temel alınması daha gerçekçi ve güvenli olacaktır. Çünkü aglomerasyon olayının en önemli nedenlerinden bir tanesi, kömür taneciklerinin içerdiği çeşitli elementlerin veya bunların oksit hallerinin ergiyerek tanecik yüzüne çıkması ve taneciği viskoz ve yapışkan hale getirmesidir. Özellikle bazik oksitler olarak isimlendirilen Na_2O, K_2O, CaO, Fe_2O_3 gibi bazı bileşiklerin bunda önemli bir rol oynadıklarına inanılmaktadır. Yapışkan hale gelen tanecikler birbirine yapışmaya başlar. İlerleyen süreçte yüzeyde sıvı birikiminin devam etmesi, tanecikler arası bağların gittikçe güçlenmesi ve yeni taneciklerin ve külün bu yüzeylerde birikmesiyle aglomerasyon ilerlemeye devam eder (Manzoori ve Agarwal, 1992; Manzoori ve Agarwal, 1993; Manzoori ve Agarwal, 1994; Kojima ve diğ, 1993). Yakıtın yanma sürecinin kararlılığı ve güvenliği sistemin operasyon güvenliğini de belirleyen en önemli faktördür. Bu çalışmada akışkan yatak sisteminin operasyon güvenliğinin değerlendirilmesi için yeni bir kriter kullanılmıştır. Bu kriter *Güvenlik marjı* ($\Delta T_{güvenlik}$) olarak isimlendirilmiş ve aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

$$\Delta T_{güvenlik} = T_{ID} - (T_{AY,\,mak}+200) \qquad (4.2)$$

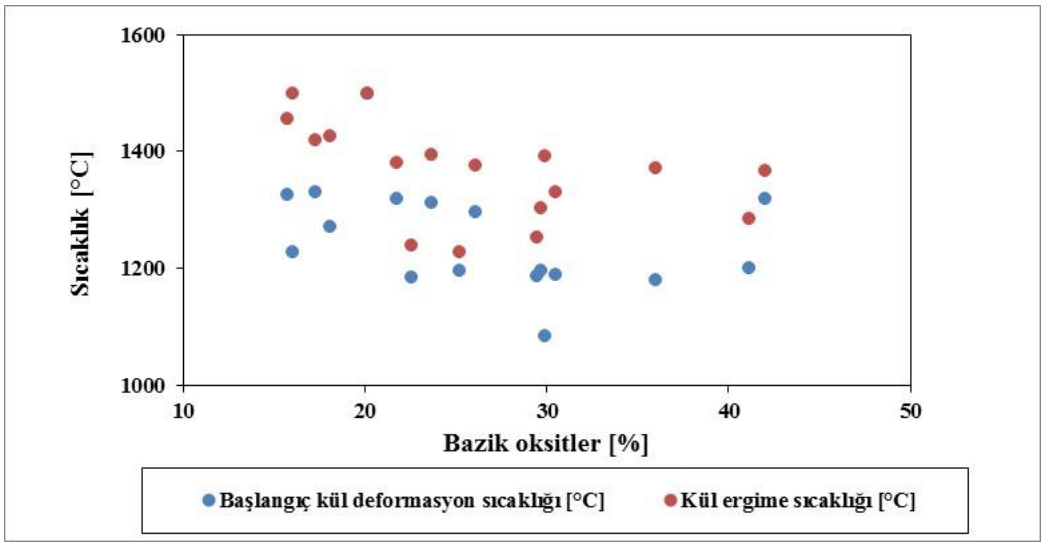
Burada T_{ID} linyit külünün deformasyon başlama sıcaklığını göstermektedir. Linyitler için hesaplanan güvenlik toleransı değerleri Çizelge 4.14'de sunulmuştur. Literatürde yatak sıcaklığı ile yakıt taneciklerinin sıcaklığı arasındaki olduğu belirtilen en büyük fark yaklaşık 200 °C'dır (Park, 1989; Linjewile ve diğ., 1994). Hesaplamalarda bu değer kullanıldığından, Çizelge 4.14'de verilen değerler en düşük güvenlik marjlarını temsil etmektedir. Yine bu değerlerin yaklaşık değerler olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Çizelgeden görüldüğü gibi bu çalışmalarda incelenen linyit örnekleri için yanma güvenliği marjı 88-562 °C gibi oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir. En düşük $\Delta T_{güvenlik}$ değeri L3 (Kütahya-Ayvalı pano), en yüksek $\Delta T_{güvenlik}$ değeri ise L17 (Çanakkale-Çan) için elde edilmiştir. Bu durum genel olarak linyitlerin kül ergime, özel olarak deformasyon başlangıç sıcaklıkları (T_{ID}) arasındaki farklılıklardan kaynaklanmıştır. İncelenen linyitler için güvenlik marjı ile kül deformasyon sıcaklığı arasındaki ilişki Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kül deformasyon ergime sıcaklığı ile güvenlik marjı arasında güçlü ve hemen hemen lineer bir ilişki görünmektedir. Buna göre deformasyon sıcaklığı artıkça güvenlik marjı da yükselmektedir.



Şekil 4.13 : DAY yakma sisteminde güvenlik marjının kül deformasyon başlangıç sıcaklığı ile değişimi.

Diğer taraftan kömürlerin ergime sıcaklıkları, anorganik bileşimleri tarafından etkilendiği bilinmektedir. Yukarıda da belirtildiği üzere özellikle ergime özellikleri *bazik oksitler* olarak bilinen Na_2O, K_2O, CaO, MgO, Fe_2O_3, vb. oksitler tarafından tek

tek (Liu ve diğ, 2013) veya bir bütün olarak hepsi tarafından (Vassilev ve diğ., 1995) önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Bu oksitlerin toplamı, $Na_2O + K_2O + CaO + MgO + Fe_2O_3$, *bazik oksit endeksi* (BOE) olarak bilinmektedir. Çalışmada kullanılan linyitlerin kül deformasyon başlangıç sıcaklığı ile ergime sıcaklıkları Şekil 4.14'de bazik oksit endeksinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ergime sıcaklıklarıyla BOE arasında net ve sistematik bir ilişki görünmüyor olsa da, ergime sıcaklıklarının BOE arttıkça düşme eğiliminde olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu sonuçları literatürdeki diğer çalışmaların sonuçlarıyla uyum içerisindedir (Dunnu ve diğ, 2010; Xu ve diğ, 2014; Li, F. ve diğ, 2015). Şekil incelendiğinde yalnız iki linyitin bu eğiliminden önemli ölçüde sapma gösterdikleri görülmektedir. Bu kömürler, en yüksek iki BOE ve en düşük ergime sıcaklığı değerlerine sahip olmakla dikkati çeken L13 (%65) ve L14 (%58) linyitleridir. Bu durum bu kömürlerin sahip oldukları yüksek CaO içeriklerinden kaynaklanmış olabilir. L13 ve L14 linyitleri sırasıyla %58 ve %51 oranında CaO içermektedir. Song ve diğ. (2009), değişik oranlarda CaO içeren kömürlerin ergime özelliklerini incelemiş ve küldeki CaO miktarı arttıkça ergime sıcaklıklarının önce azaldığını, CaO miktarı %35 ulaştığında bir maksimumdan geçtiğini ve bu orandan sonra hızla artmaya başladığını bildirmektedir. Benzer bir eğilim, CaO oranları %5 ile %40 arasında değişen kömürler için de gözlenmiştir (Liu ve diğ, 2013). Akışkan yatak kömürün yanması konusunda yapılan birçok çalışma; yüksek miktarda alkali oksitler içeren kömürlerin daha düşük sıcaklıklarda aglomerasyona uğradığını göstermiştir (Atakül ve Ekinci, 1989; Huffman ve diğ, 1981; Manzoori ve diğ, 1992). Bu da bu kömürler için güvenlik marjının daha düşük olmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.14 : Kömür küllerinin başlangıç deformasyon ve ergime sıcaklığının bazik oksit içeriği ile değişimi.

Havayla Yanma Sürecinde Emisyonlar

Düşük kaliteli kömürlerin akışkan yatakta yakılmaları sonucunda çevreye olan etkilerini incelemek amacıyla CO, NO_X ve SO_2 gibi ana kirletici emisyonları ölçülmektedir. Kirleticilerin derişimleri standart sıcaklık ve basınçta baca gazında %6 oksijen olduğu durum için ve mg/Nm^3 olarak verilmiştir.

Kömürlerin her biri için kararlı yanma sürecindeki ortalama emisyonların hava fazlalık katsayısına göre değişimi grafikler halinde verilmiştir. Deneyler sırasında yatak sıcaklığı 800 ±50°C olmak üzere sabit tutulmuştur. *Hava fazlalık katsayısı* (HFK) birincil hava debisi sabit tutularak kömür besleme hızının değiştirilmesi suretiyle ayarlanmıştır.

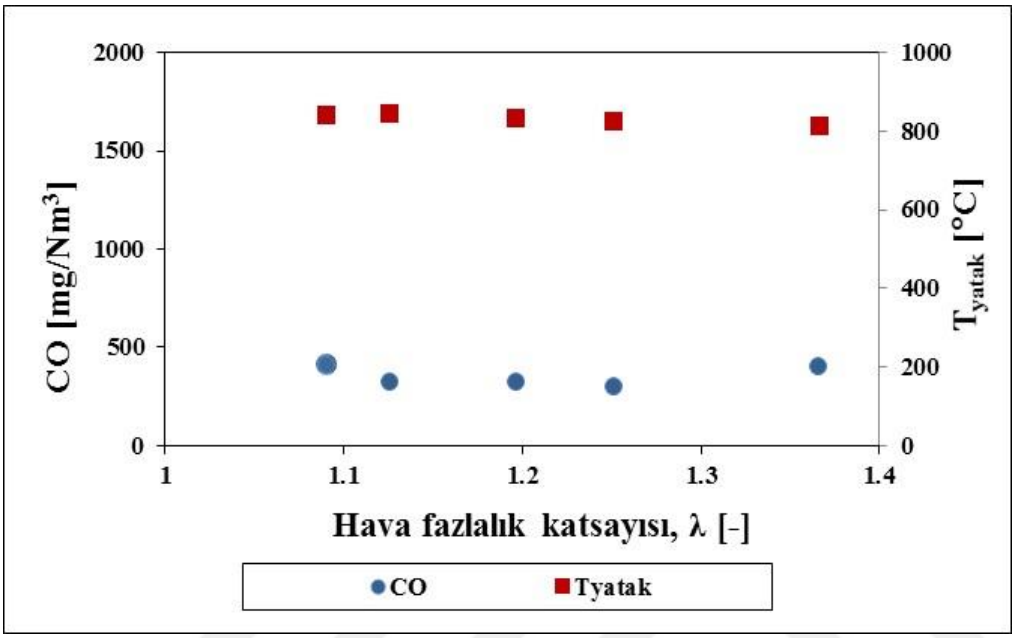
Havayla yanma sürecinde açığa çıkan CO, CO_2, NOx, N_2O ve SO_2 emisyonları Ek C'de verilmiştir.

Havayla Yanma Sürecinde CO Emisyonları

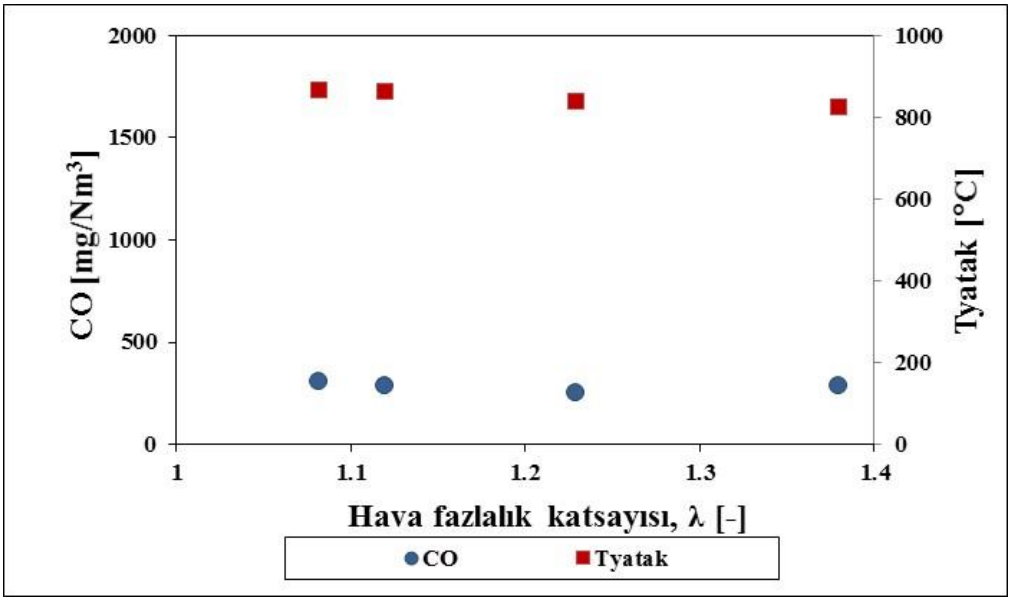
Linyitler içinde en yüksek ısıl değere sahip iki linyit (L1 ve L2) ile en düşük ısıl değere sahip iki linyitin (L12 ve L18) DAY yakma sisteminde yakılması sürecinde açığa çıkan CO emisyonlarının hava fazlalık katsayısı (HFK) ile değişimi sırasıyla Şekil 4.15'de verilmiştir. Diğer kömürlerin CO emisyonları Ek C, Şekil C.1(a) - Şekil C.14(a)'da verilmiştir. Sonuçlar baca gazında kuru temelde %6 O_2 fazlalığına göre sunulmuştur**.**

Şekil 4.15'de de görüldüğü gibi, CO emisyonu genellikle HFK arttıkça azalma eğiliminde olmuştur. Fakat bazı linyitlerin yanma sürecinde tersi bir durum da göze

çarpmaktadır. Her dört linyitte de HFK 1.1'den 1.2'ye çıkarıldığında CO emisyonunda azalma, 1.2'den 1.4'e artırıldığında ise artış gözlenmiştir. En yüksek ısıl değere sahip olan iki linyitin CO emisyonunun (200-400 mg/Nm^3) en düşük ısıl değere sahip olan iki linyite göre CO emisyonundan (300-1050 mg/Nm^3) oldukça düşük olduğu görülmektedir.

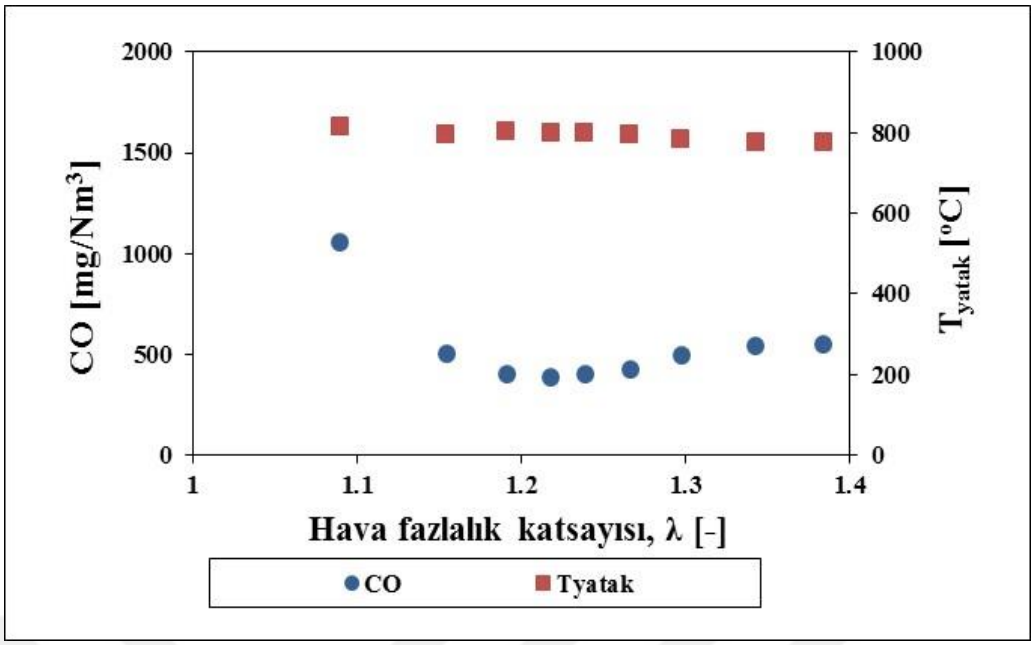


a)

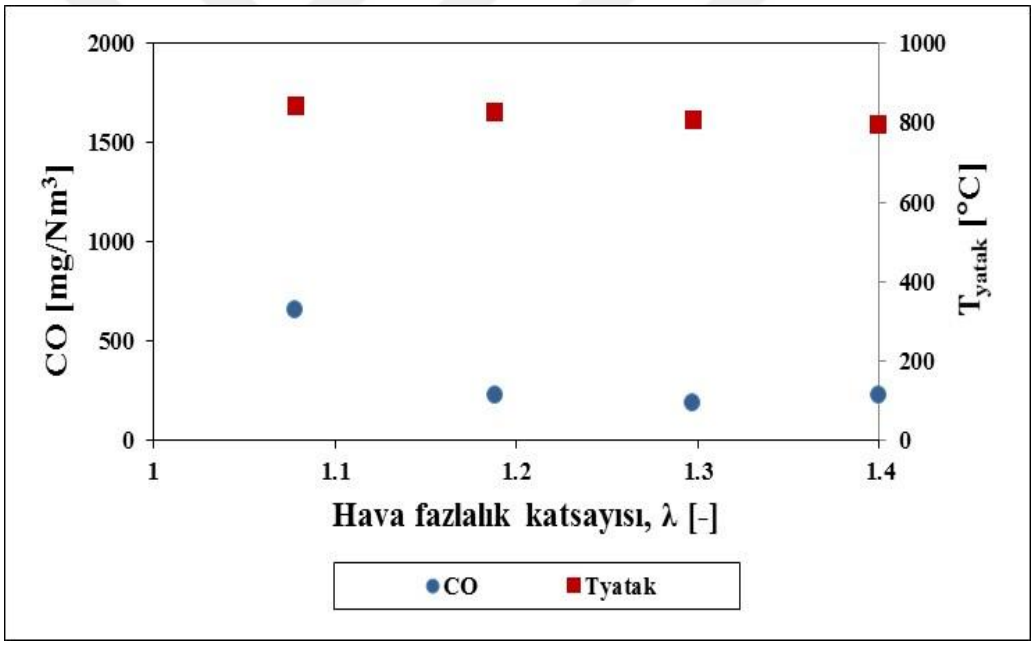


b)

Şekil 4.15 : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan CO emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L1, b) L2, c) L12, d) L18.



c)



d)

Şekil 4.15 (devam) : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan CO emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L1, b) L2, c) L12, d) L18.

Linyitlerin DAY yakma sisteminde yakılması sürecinde açığa çıkan CO emisyonlarının hava fazlalık katsayısı (HFK) ile değişimi toplu olarak Şekil 4.16'da verilmiştir. HFK=1.1±0.02 olduğu durumda L12 linyiti için 1050 mg/Nm^3 gibi oldukça yüksek bir emisyon ölçülmesine rağmen diğer linyitlerde bu değer 140-770 mg/Nm^3 aralığında değişmektedir. Bu hava fazlalık katsayısıyla gerçekleştirilen

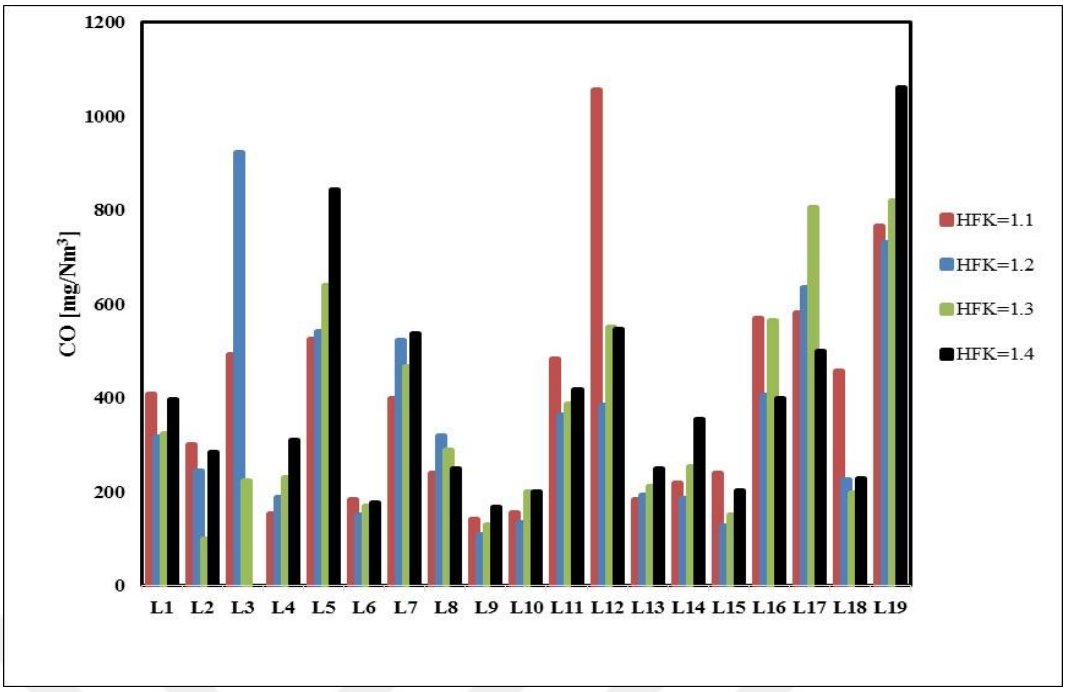
yanma süreçlerinde ölçülen CO emisyonlarına bakıldığında; emisyonların 10 adet linyit için 400-780 mg/Nm^3 seviyelerinde, 4 adet linyit için 200-400 mg/Nm^3 seviyelerinde, 5 adet linyit için ise 200 mg/Nm^3'den düşük olduğu gözlenmiştir.

Hava fazlalık katsayısının HFK = 1.2±0.02 olduğu durumda ölçülen CO emisyonlarının HFK = 1.1 olduğu duruma göre genel olarak daha düşük olduğu görülmektedir. L3 hariç diğer linyitlerin HFK=1.2±0.02 olduğu süreçlerde açığa çıkan CO emisyonları 750 mg/Nm^3'nin altında olduğu gözlenmiştir. L3'ün CO emisyonu ise 920 mg/Nm^3 olarak ölçülmüştür. Linyitlerin %37'sinde CO emisyonu 200 mg/Nm^3' seviyesinin altında ölçülmüştür. Genel olarak HFK değişim ile CO emisyonundaki değişim ters yönlerde olmuştur. Yani, HFK arttığında CO emisyonunda düşüş, azaldığında ise artış görülmüştür.

Hava fazlalık katsayısının 1.3±0.02 olduğu linyit yanma süreçlerinde ölçülen CO emisyonları linyitlerin %26'sı için 200 mg/Nm^3'ten düşük, %37'si için 200-400 mg/Nm^3 aralığında, %21'i için ise 400-700 mg/Nm^3 aralığında ölçülmüştür. L17 ve L19 linyitlerinin yanma süreçlerinde ölçülen CO miktarları bu seviyelerin bir hayli üstünde kalmıştır. L17 linyitinin CO emisyonu 806 mg/Nm^3 ve L19 linyitinin CO emisyonu 820 mg/Nm^3 olarak ölçülmüştür. Hava fazlalık katsayısı 1.4±0.02'ye çıkarıldığında sadece iki linyit (L6 ve L9) için CO emisyonu 200 mg/Nm^3 altında ölçülmüştür. L3 linyiti için HFK=1.4 katsayısına çıkılamadığından grafiklerde emisyon değerleri O olarak görülmektedir.

L1, L2, L5, L9, L10 ve L15 gibi düşük kül ve yüksek alt ısıl değere sahip linyitlerin yakma süreçlerinde salınan CO emisyonlarının oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. Yani bu kömürlerin yanma süreçleri daha yüksek yanma verimleriyle gerçekleşmiştir.

HFK arttıkça yanma atmosferinin oksijence zengin olması nedeniyle CO emisyonu azalmakta ve daha verimli yanma gerçekleşmektedir. Fakat HFK'daki artış bir seviyeye ulaştıktan sonra giriş havasının soğutma etkisi artmakta ve yatak sıcaklığı düşmektedir. Bu durum yanma kalitesini bozarak yüksek miktarlarda CO'in oluşmasına neden olmaktadır. Diğer yandan, yüksek HFK yakıcıya giren hava akışının artmasına neden olarak baca gazını seyreltmektedir. Bu nedenle, yüksek HFK ile işletilen akışkan yatak yakma sistemlerinde baca gazlarındaki CO emisyonları bu iki zıt etkinin bir bileşkesi tarafından belirlenmektedir.



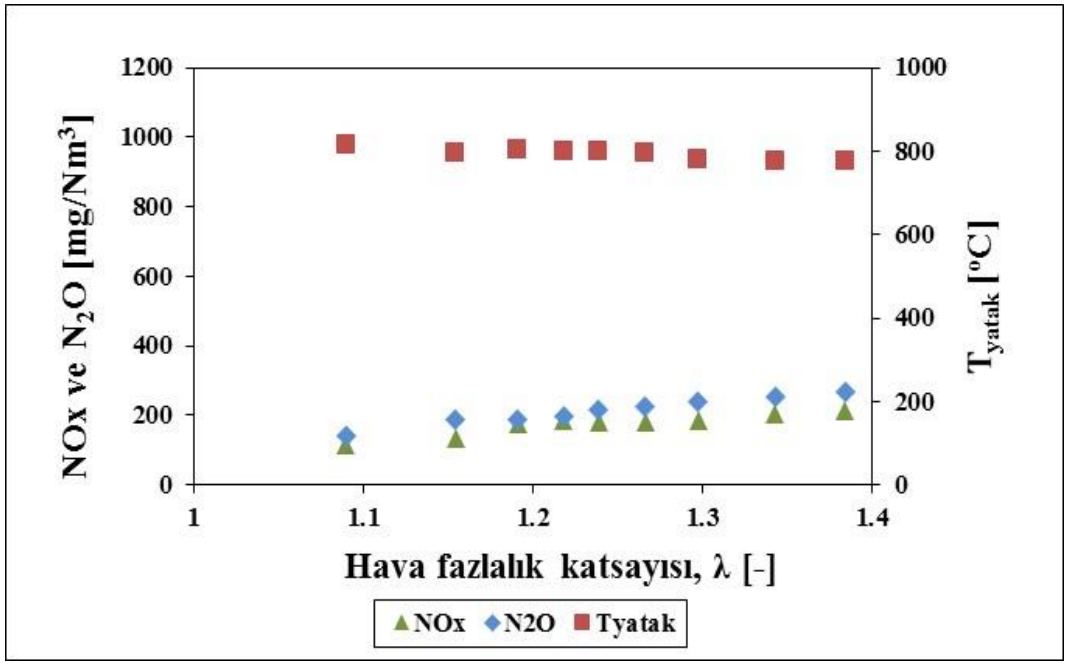
Şekil 4.16 : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan CO emisyonları (kuru temelde, %6 O_2).

Havayla Yanma Sürecinde NOx ve N_2O Emisyonu

Öncelikle en düşük azot içeriğine sahip L12 (kuru temelde N (%ağ.): 0.60) ve L18 (kuru bazda N (%ağ.): 0.69) linyitleri ile ortalama miktarda N içeren L5 (kuru bazda N (%ağ.): 1.22) ve en yüksek N içeriğine sahip L2 (kuru bazda N (%ağ.): 2.44) linyitinin DAY yanma sürecinde ölçülen NOx emisyonları Şekil 4.17'de verilmiştir. L18 linyiti haricindeki linyitlerin yakılması sonucunda açığa çıkan NOx emisyonunun 100-200 mg/Nm^3 aralığında değiştiği görülmektedir.

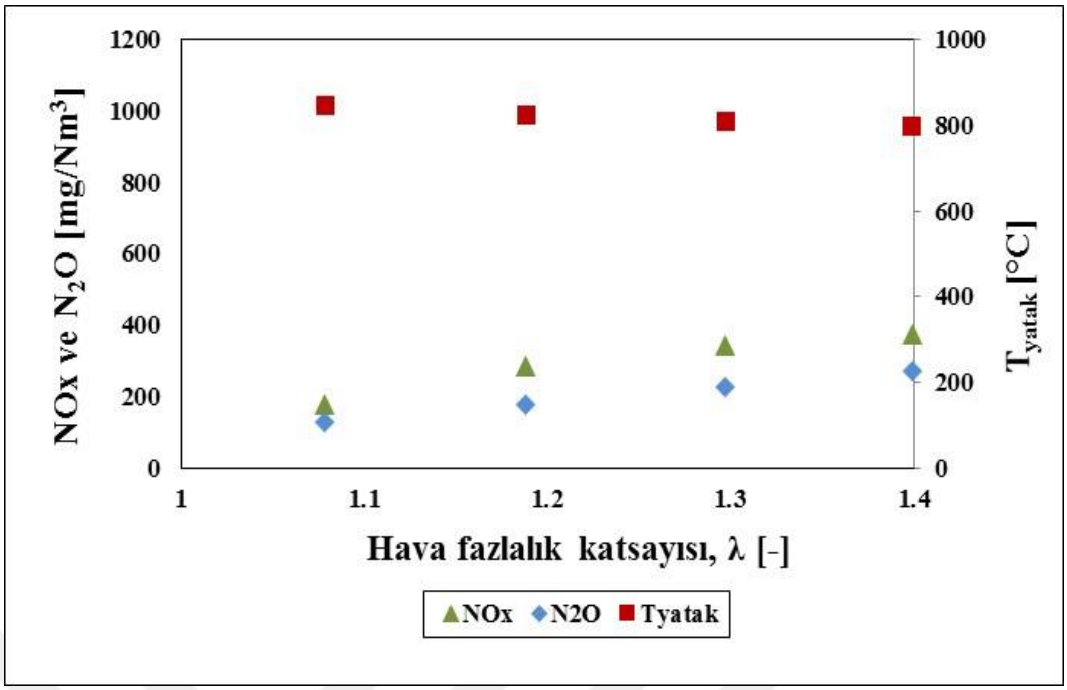
Bu emisyonlar değişik hava fazlalık katsayılarında (HFK) ölçülmüştür ve bu katsayının etkisini de göstermektedir. Deneylerde bütün hava, herhangi bir kademelendirme yapılmaksızın (ikincil hava olmaksızın) birincil hava şeklinde reaktöre beslenmiştir. NOx emisyonlarının yakıtın özellikleri ve yakma sisteminin işletme koşullarından etkilendiği bilinmektedir. Yakıtların yanması sırasında NOx bileşikleri başlıca üç farklı şekilde oluşabilmektedir: **1.** *prompt-NOx*, **2.** *termal-NOx*, **3**. *yakıta bağlı NOx* (Muzio ve diğ., 1997). Prompt-NOx, sıvı yakıtların yanmasında olduğu gibi, oksijen ve hidrokarbon radikalleri bakımından zengin ortamlarda gerçekleşebilmektedir. Termal-NOx oluşumu, yüksek sıcaklıklarda (>1000 °C) ve daha çok havanın içerdiği azotun oksitlenmesinden kaynaklanmaktadır. Akışkan yataklı yakma sistemlerinin tipik çalışma sıcaklığı 800-900 °C' dır. Bu sıcaklık

seviyeleri havadaki azotunun oksijenle reaksiyona girerek NO_X'leri oluşturması için yeterince yüksek olmadığı için, bu yolla NOx oluşumu nadir görülmektedir. Sonuç olarak, akışkan yatak yakma sistemlerinde ortaya çıkan NOx emisyonları önemli ölçüde yakıttaki azottan kaynaklanmaktadır. Bu durum bu çalışmada kullanılan linyitlerin yanması için de geçerlidir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bu çalışmada da linyitlerin yanması 750-900°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Diğer kömürlerin havayla yanma sürecinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları her bir kömür için ayrı ayrı Ek C, Şekil C.1(a) - Şekil C.14(a)'da verilmiştir.

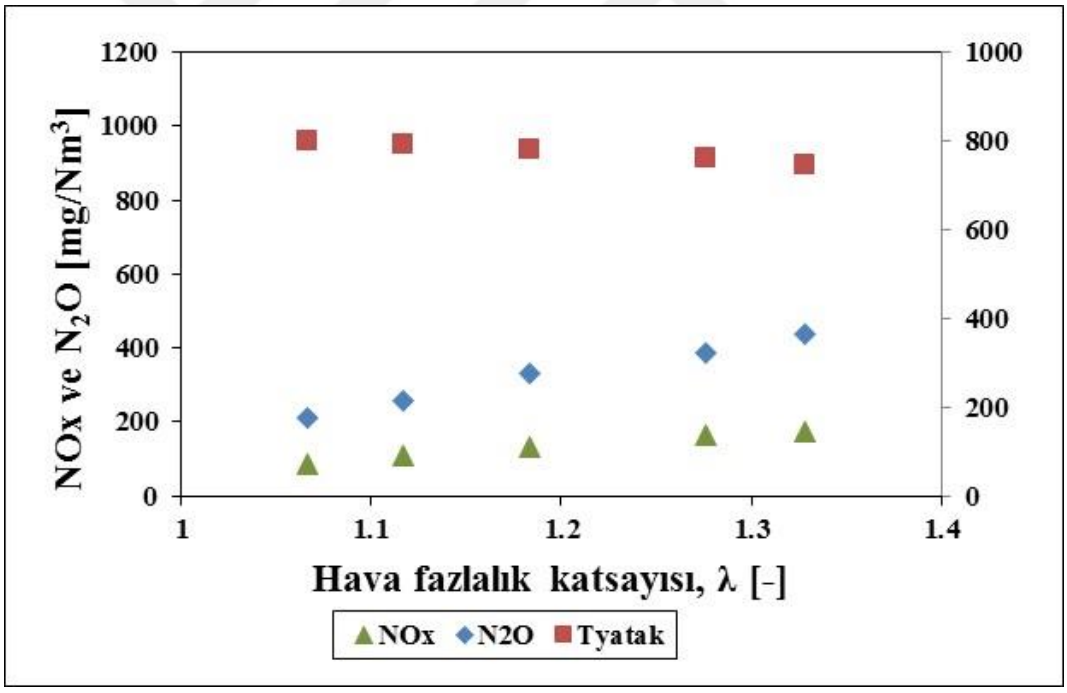


a)

Şekil 4.17 : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L12, b) L18, c) L5, d) L2.

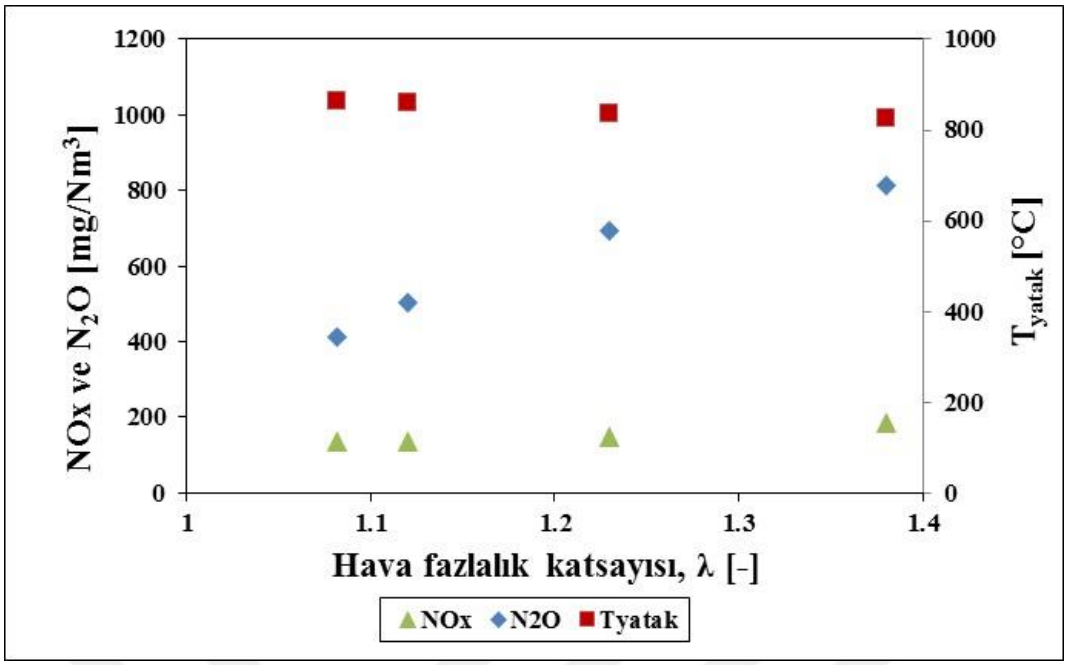


b)



c)

Şekil 4.17 (devam) : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L12, b) L18, c) L5, d) L2.



d)

Şekil 4.17 (devam) : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları (kuru temelde, %6 O_2). a) L12, b) L18, c) L5, d) L2.

Linyitlerin DAY yanma sürecinde ölçülen NOx ve N_2O emisyonları toplu olarak Şekil 4.18'de görülmektedir. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi, NOx ve N_2O emisyonlarının HFK değişiminden önemli ölçülerde etkilendiği anlaşılmaktadır. HFK arttıkça NOx ve N_2O emisyonlarında artış gözlenmiştir. HFK:1.1 civarında olduğu durumlarda linyitlerin yanma sürecinde ortaya çıkan NOx emisyonları 100-420 mg/Nm^3 aralığında değişmiştir. HFK:1.4'e yükseldiğinde ise yanma gazlarında ölçülen NOx emisyonu 160-700 mg/Nm^3 civarında olmuştur. Linyitlerden sadece iki adedinin, L7 (İmbat araürün) ve L8 (İmbat tüvenan), NOx emisyonu 600 mg/Nm^3 seviyesini aşmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, geniş emisyon aralığına ve kademeli hava (ikincil hava) beslenmesi uygulanmamasına rağmen linyitlerin %88'nin NOx emisyonu 400 mg/Nm^3 seviyesinin altında ölçülmüştür. Linyitlerin %30'u için ise ölçülen NOx emisyonları 200 mg/Nm^3'ün altında kalmıştır. Bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmaların sonuçlarıyla uyum içerisindedir (Armesto ve diğ., 2003; Jia ve diğ., 2012; Zhu ve diğ., 2013; Roy ve Bhattacharya, 2014).

Akışkan yatak yakma sistemlerinde sıcaklık arttıkça NOx emisyonunun arttığı, buna karşın N_2O emisyonunun azaldığı bilinmektedir. Yüksek sıcaklık gaz faz reaksiyonların NOx oluşumu yönünde ilerlemesini sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıkta

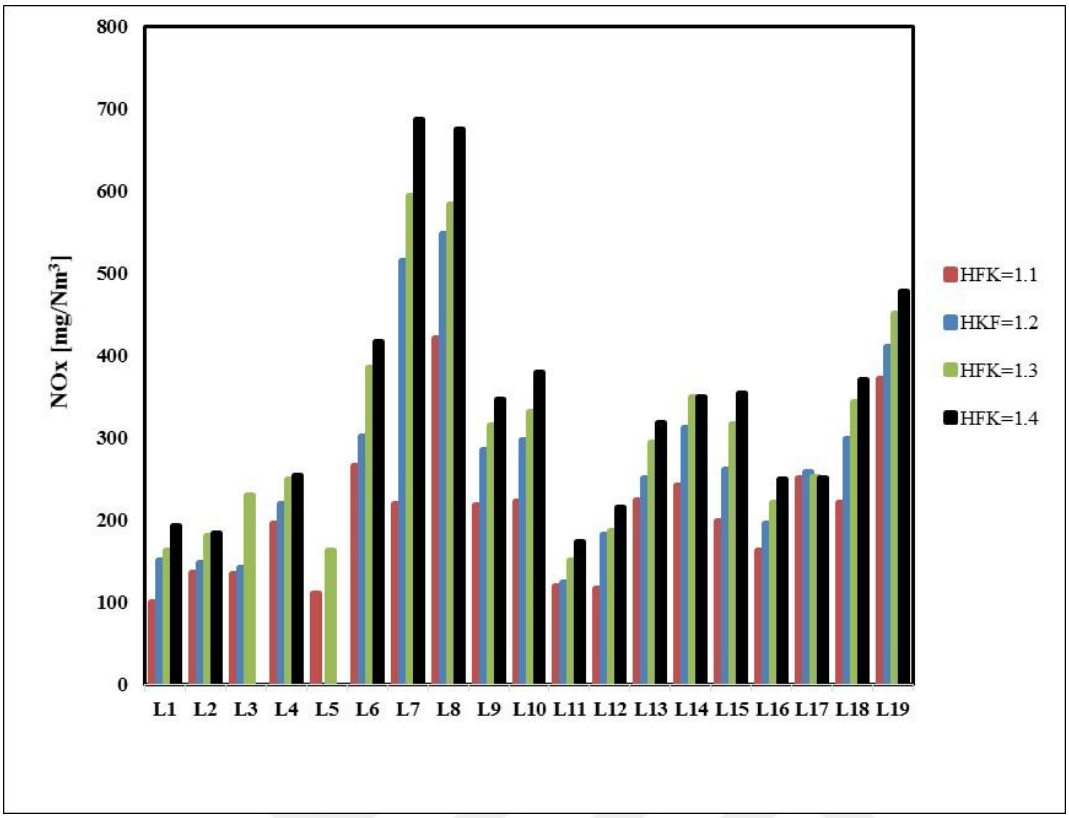
N_2O emisyonunun düşük olmasının bir nedeni de N_2O giderimi için radikaller veya gaz molekülleri arasındaki çarpışmadan kaynaklanan güçlü gaz faz reaksiyonlarıdır:

$$N_2O + H \rightarrow N_2 + OH \quad (4.3)$$

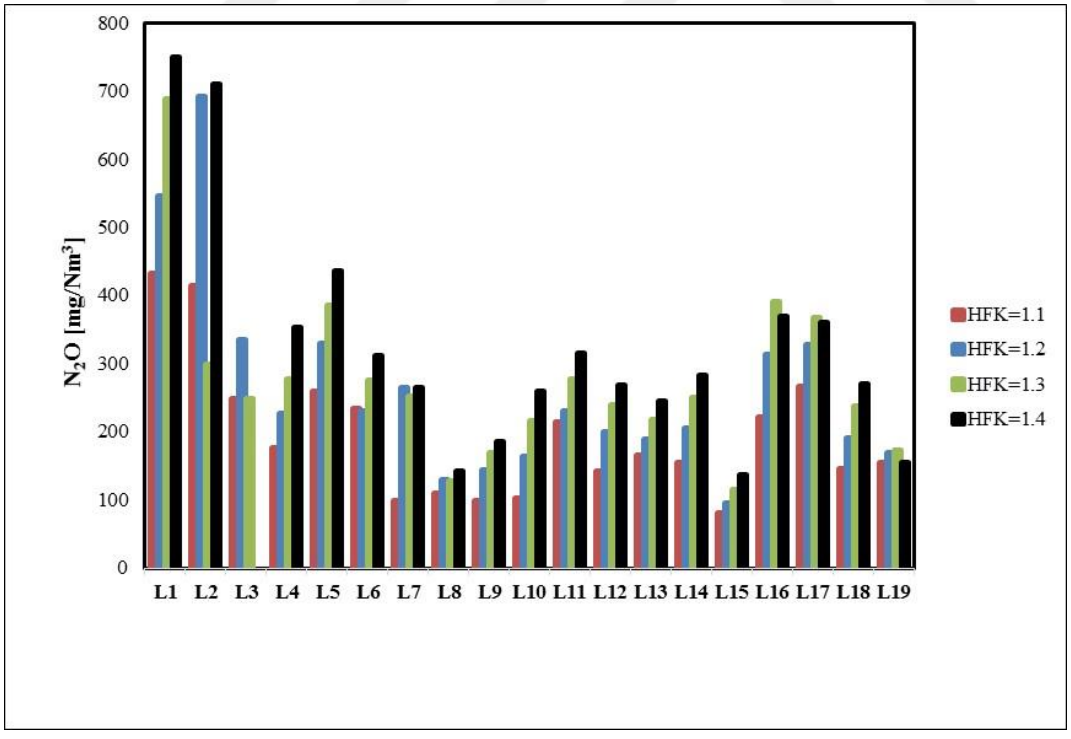
$$N_2O + OH \rightarrow N_2 + HO_2 \quad (4.4)$$

$$N_2O + M \rightarrow N_2 + O + M \quad (4.5)$$

M gaz molekülün temsil etmektedir. N_2O'nun heterojen olarak bozunması önemli olmakla birlikte bu etkinin katkısı partikül derişimine bağlıdır. Prensip olarak, yakıcıdaki kalma zamanının yeterli olması durumunda N_2O denge derişimine ulaşmakta ve neredeyse 0'a yaklaşmaktadır. Reaktörde kalma zamanı sabit ise hızı kontrol eden en önemli değişken sıcaklık ve dolayısıyla reaktördeki N_2O bozunmasıdır. Bununla birlikte, NOx emisyonunun, sıcaklıkla birlikte artan denge derişimiyle termodinamik olarak sınırlı olduğu görülmektedir.



a)



b)

Şekil 4.18 : Linyitlerin hava ortamındaki yanma süreçlerinde ortaya çıkan emisyonlar (kuru temelde, %6 O_2) a) NOx emisyonu, b) N_2O emisyonu.

Roy ve Bhattacharya (2014), 10 kW termal kapasiteli akışkan yatakta hava ve oksiyanma koşullarında yaptıkları linyit yakma çalışmalarında NOx emisyonunu 500-600 mg/Nm^3 olarak ölçmüşlerdir. Varol ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmalarda linyit ve orman atıkları ve bunların karışımlarının dolaşımlı akışkan yatakta yanmalarını incelemişlerdir. Yalnızca linyitin yandığı süreçlerde baca gazlarındaki NO emisyonunu 250-500 mg/Nm^3 (%6 O_2) olarak ölçmüşlerdir.

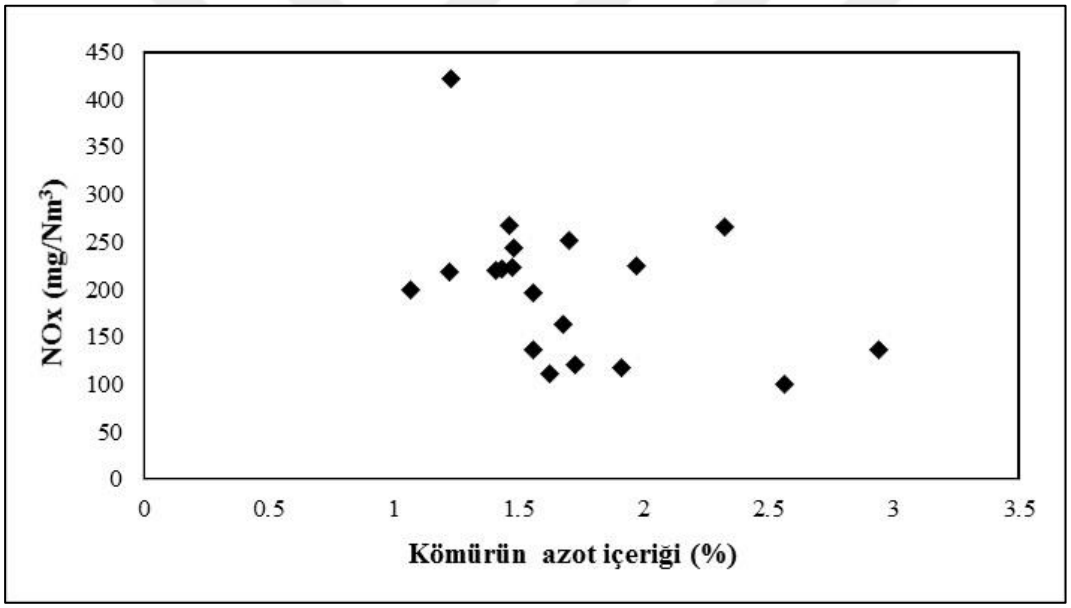
Literatürde yapılan bir modelleme çalışmasında düşük kaliteli linyitler DAY yakma sisteminde yanması sırasında ortaya çıkan kirleticiler tahmini olarak hesaplanmıştır. Çalışmada, üç farklı linyit için uygulanan çalışma koşullarına bağlı olarak NOx emisyonlarının 100-700 mg/Nm^3 seviyelerinde olabileceği hesaplanmıştır. Model sonuçları HFK ve linyitin tanecik boyutunun NOx emisyonlarını etkileyebildiğini ve NOx emisyonunun bu iki parametrenin artmasıyla azaldığını göstermiştir (Güngör, 2009).

Çizelge 3.4' de elementel analiz sonuçları, çalışmada kullanılan linyitlerin kuru temelde azot içeriklerinin %0.60-2.44 gibi geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Kömür örneklerinin kül içeriklerinin birbirinden çok farklı olduğu göz önünde bulundurulduğunda kıyaslamanın kuru külsüz temelde yapılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir. Kuru külsüz temelde azot içeriklerinin %1.07-2.93 gibi geniş aralıkta değiştiği görülmektedir.

Linyitlerin NOx emisyonları ile azot içerikleri arasındaki ilişki Şekil 4.19'da görülmektedir. Şekil 4.19 incelendiğinde, linyitlerin azot içerikleriyle ile bunların yanması sırasında ortaya çıkan NOx emisyonları arasında sistematik bir bağıntı görünmemektedir. Bazı kömürlerin azot içerikleri %1.50 ile %1.90 arasında değişen kömürlerin NOx emisyonları hemen hemen aynı seviyelerde (250 mg/Nm^3) ölçülmüştür. Yani azot içeriği %125 oranında değişmesine karşın, NOx emisyonları benzer seviyelerde gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra tersi durumlar da söz konusu olabilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, azot miktarında 0.5-0.75 gibi görece küçük değişimler, NOx emisyonlarında 2.5 kat gibi bir artışa neden olarak emisyonları 200 mg/Nm^3'den 700 mg/Nm^3'e taşıyabilmektedir. Şekil 4.17'de de görüldüğü gibi, örneğin en yüksek azot içeriğine (%2.93) sahip olan L2 linyitinin yanma sürecinde ölçülen NOx miktarları 135-185 mg/Nm^3 seviyelerinde iken, %1.07 oranında azot içeren L15 linyitinin NOx emisyonları 200-360 mg/Nm^3 gibi daha yüksek olabilmektedir. Bu sonuçlar, yakıttaki azotun tümüyle NOx'lara dönüşmediğinin bir

göstergesi olarak değerlendirilebilir. Çeşitli yakıtlarla yapılan ve literatüre geçen çalışmalarda, NOx emisyonlarıyla yakıtların azot içerikleri arasında, bu çalışmada da gözlendiği gibi, bir ilişki görülmemiştir. Öyle ki, aynı oranlarda azot içeren yakıtların yanması sırasında salınan NOx miktarları birbirinden çok farklı olabilmiştir. Uçucu madde içeriği yüksek olan linyitlerin NOx emisyonlarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Lupianez ve diğ, 2013).

Zhu ve diğ. (2013) de yakıtların yanma sürecinde ortaya çıkan NOx emisyonlarının yakıtın içerdiği azot miktarıyla bire bir uyumlu olmadığını, başka bir ifadeye azotun tümüyle NOx'a dönüşmediğine dair bulguları rapor etmişlerdir. Bu araştırmacılar, çalışmalarında bitümlü kömür, antrasit ve yarıkok yanma süreçlerini incelemiş ve yakıttaki azotun NOx emisyonlarına dönüşüm oranlarını sırasıyla %29, %24 ve %57 olarak bulmuşlardır.



Şekil 4.19 : Linyitlerin yanması sürecinde ortaya çıkan NOx emisyonlarının (kuru temelde, %6 O_2) linyitlerin azot içerikleriyle değişimi (%N kuru külsüz temelde verilmiştir.)

Diğer taraftan, yakıttaki azotun oksitlenmesi açısından O/N oranlarının azotun fonksiyonelliğinden daha önemli olduğu ve NO oluşumunun O/N oranı yükseldikçe arttığı bazı araştırmacılar tarafından öne sürülmüştür (Fan ve diğ, 2010; Yang ve diğ, 2014). Bu çalışmada kullanılan linyitlere ait NO emisyonları ve O/N oranları Çizelge 4.15'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde göze çarpan genel eğilim O/N oranı yüksek olan kömürlerin yanma sürecinde oluşan NOx emisyonunun da daha düşük olmasıdır. Ancak bu genel eğilimin geçerli olmadığı kömürler de söz konusudur. Örneğin O/N =

11 civarında olan bir kömürün (Örneğin L11) ürettiği NOx miktarı (121 mg/Nm^3), O/N oranı 5.91 olan bir kömürün (Örneğin L6) ürettiği NO miktarından (266 mg/Nm^3) daha düşük olabilmektedir. Çizelge 4.15 incelendiğinde bu örneğe uyan başka kömürlerin de olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.15 : Linyitlerin NOx emisyonları ve O/N oranları.

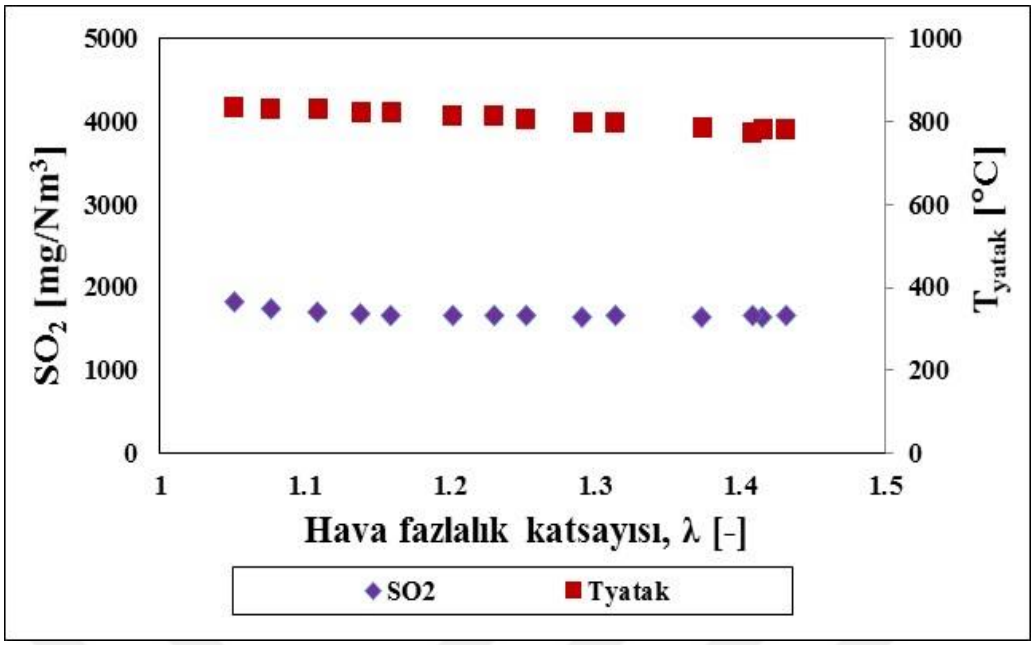
Kömür	O/N (-)	NOx (mg/Nm^3)
L1	2.84	101
L2	2.38	136
L3	10.41	136
L4	10.70	197
L5	10.60	111
L6	5.91	266
L7	13.32	220
L8	19.49	422
L9	12.68	218
L10	9.55	223
L11	11.56	121
L12	12.40	117
L13	9.65	225
L14	15.66	243
L15	13.92	200
L16	9.86	164
L17	7.99	252
L18	10.09	222
L19	13.70	267

Şekil 4.16 ile Şekil 4.18 karşılaştırıldığında, CO ve NOx emisyonlarının hava fazlalık katsayısındaki değişimlerden farklı şekillerde etkilendiklerini ortaya koymaktadır. Bu iki emisyondaki değişim zıt yönlerde olmuştur. Başka bir ifadeyle NOx emisyonu arttıkça CO emisyonu azalmış, NOx emisyonu azaldıkça CO emisyonu artmıştır. Yakıtın yanması sırasında oluşan NOx emisyonları zıt yönde gelişen iki süreçten etkilenebilmektedir: **1.** Yakıtın içerdiği azotun oksijen ile birleşerek NOx bileşiklerine dönüşmesi, **2.** Yakıtın termal dönüşümü sırasında ortaya çıkan ve ortamda bulunan çeşitli indirgeyici ajanların, süreç sırasında oluşan NOx bileşikleriyle etkileşime girerek bunları indirgemesi. Bu indirgeyici bileşikler arasında en çok dikkati çekenler arasında hidrokarbon radikalleri ve CO yer almaktadır (Stadler ve diğ, 2011). Yüksek hava fazlalık katsayısı ilk NOx oluşum sürecinin gelişmesi lehine bir ortam yaratmaktadır. Bu ortamda NO'in kok yüzeylerinde CO tarafından indirgenmesi süreci zayıflamakta ve ve bunun sonucunda NOx emisyonları artmaktadır (Feng ve diğ, 1996;

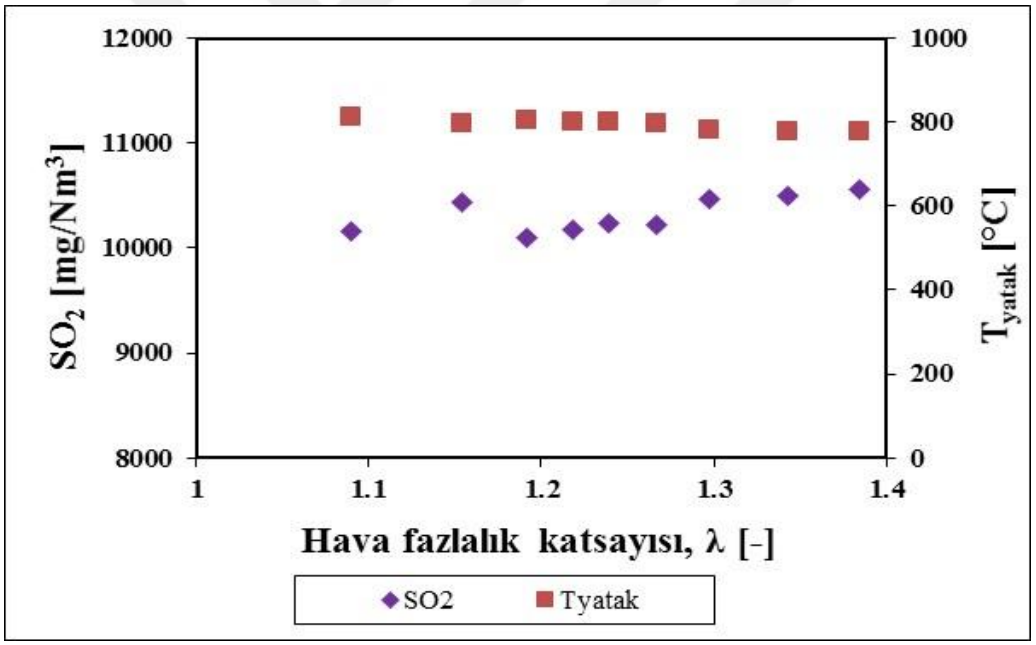
Sanger ve diğ, 2001). Düşük HFK ile gerçekleşen yanma sürecinde ise ortamda oksijen derişimi az olduğundan daha fazla CO oluşmaktadır. Benzer bulgular daha önce yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir (Jensen ve diğ, 1995; Aarna ve Suuberg, 1999; Xu ve diğ, 2017). CO varlığında NO'in indirgenmesinin gerçekleşmesi konusunda öne sürülen hipotezlerden bir tanesine göre bu gelişme iki olaydan kaynaklanmaktadır: **1.**NO'nun kok yüzeyi tarafından katalitik etkisiyle CO ile doğrudan reaksiyona girmesi, **2.** CO'in, NO'dan kaynaklanan ve tanecik yüzeyine kimyasal olarak adsorbe olan oksijenle reaksiyon girmesi, bunun sonucunda NO'in indirgenmesine yol açan aktif alanların oluşmasıdır. Her iki durumda da NO, N_2'e indirgenmektedir (Aarna ve Suuberg, 1997; Li ve diğ, 1998). %3 oranında CO içeren atmosferde, karbonla NO arasındaki reaksiyonun hiç CO'in olmadığı atmosfere oranla 3 kat daha fazla olabileceği gözlenmiştir (Li ve diğ, 1998).

Havayla Yanma Sürecinde SO_2 Emisyonu

Kömürlerin yanması sırasında ortaya çıkan en önemli kirleticilerden bir tanesi kükürt oksitlerdir. Havayla yapılan yanma çalışmalar sırasında yanma gazlarındaki kükürt dioksit (SO_2) miktarı sürekli olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçları, SO_2'i tutmak için herhangi bir adsorbanın kullanılmadığı yanma deneylerine aittir. Çizelge 4.3'de görüldüğü gibi linyitlerin toplam kükürt içerikleri %0.73-5.69 yanar kükürt miktarları ise % 0.15-4.48 gibi geniş aralıklarda değişmektedir. Buna bağlı olarak, tahmin edilebileceği gibi, ortaya çıkan SO_2 emisyonlarının miktarı da çok değişik olacaktır. Bazı kömürlerin yanma sürecinde ölçülen SO_2 emisyonları Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu şekiller sırasıyla en düşük, orta ve yüksek oranlarda kükürt içeren linyitleri temsilen seçilen sırasıyla, L6 (S_{yanar}:% 0.49), L12 (S_{yanar}:% 1.22), L18 (S_{yanar}:% 3.23) ve L17 (S_{yanar}:% 4.48) linyitlerinin SO_2 emisyonlarının HFK ile değişimini göstermektedir. Diğer kömürlerin SO_2 emisyonları Ek C, Şekil C.1(b) - Şekil C.14 (b)'de verilmiştir. Sonuçlar baca gazında kuru temelde %6 O_2 fazlalığına göre sunulmuştur**.**

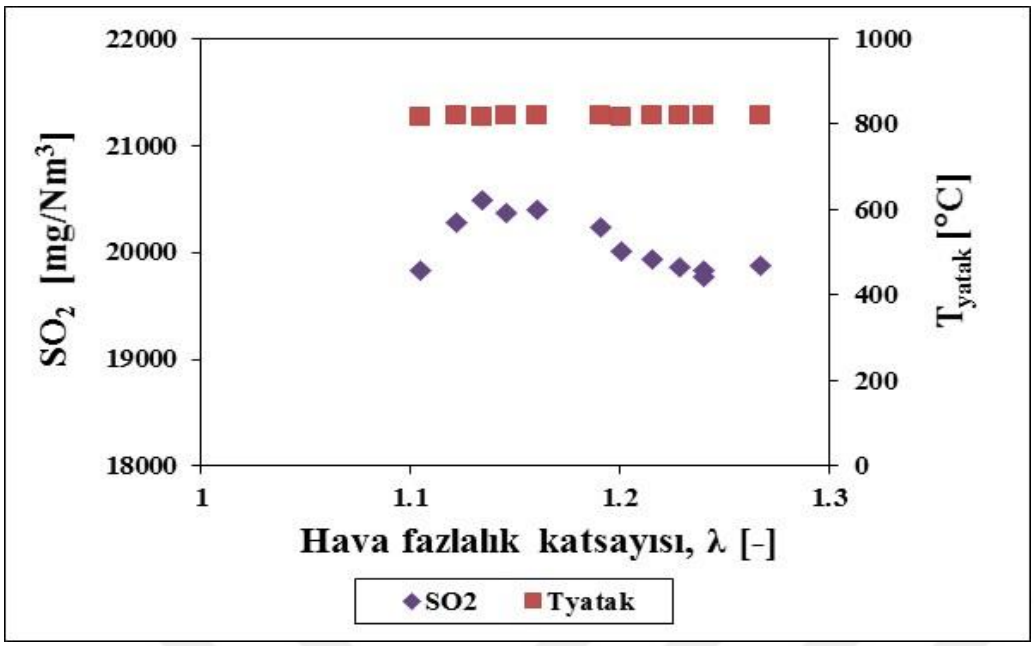


a)

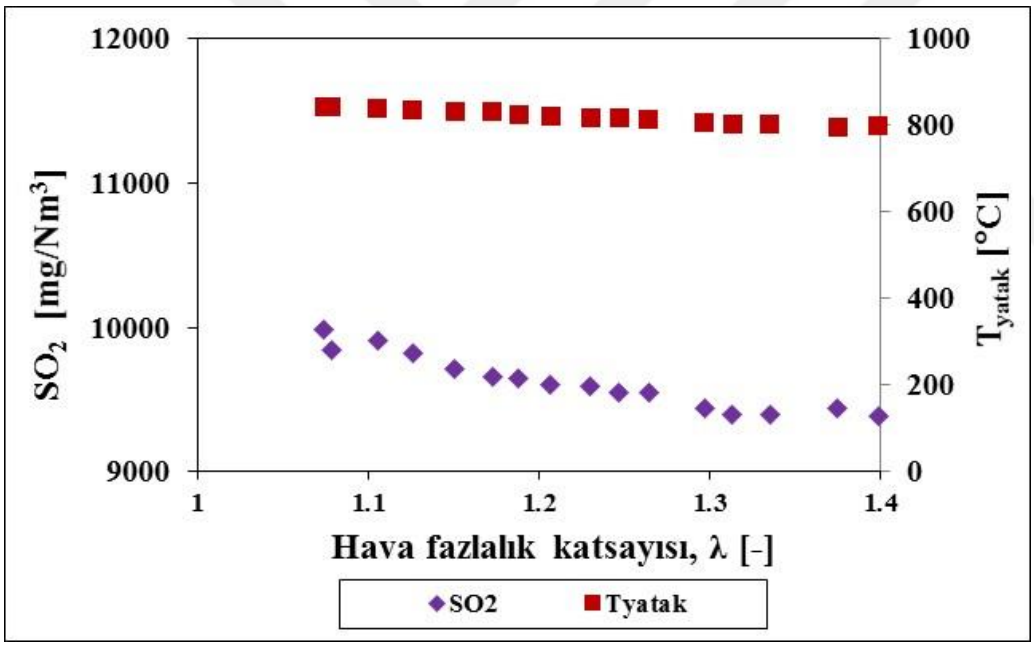


b)

Şekil 4.20 : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan SO_2 emisyonları (kuru temelde, %6 O_2 (a) L6, (b) L12, (c) L17, (d) L18.



c)

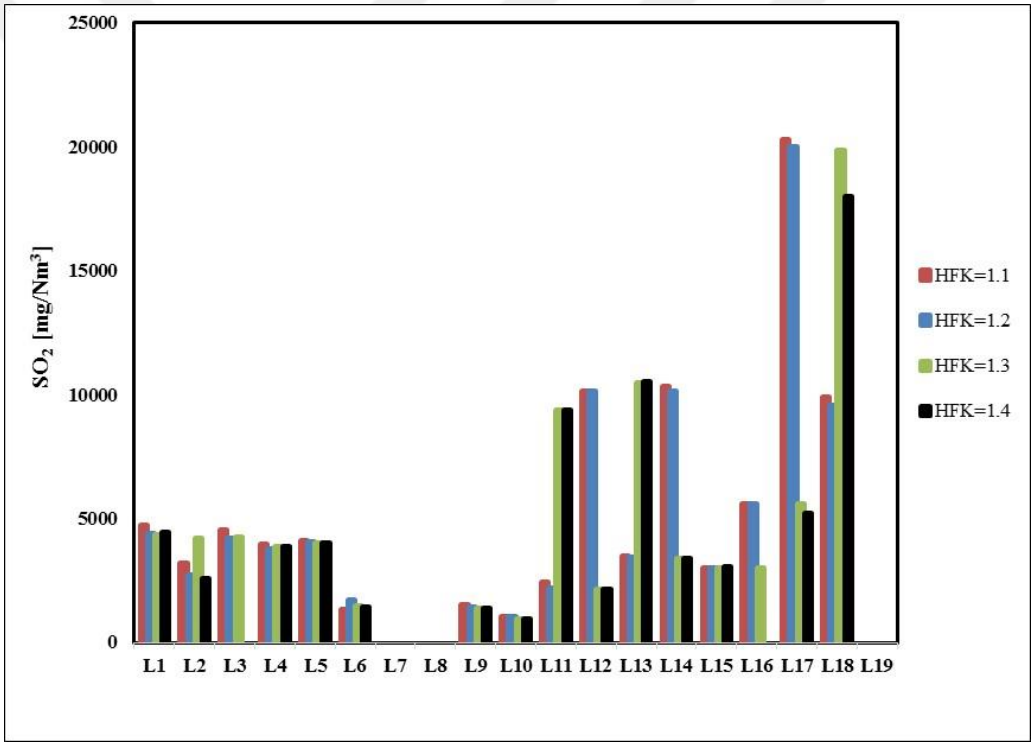


d)

Şekil 4.20 (devam) : Linyitlerin hava ortamında yanma süreçlerinde açığa çıkan SO_2 emisyonları (kuru temelde, %6 O_2 (a) L6, (b) L12, (c) L17, (d) L18.

Şekil 4.21'de linyitlerin SO_2 emisyonları toplu olarak verilmiş ve kıyaslanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, L7, L8 ve L19 hariç diğer kömürlerin SO_2 emisyonu 1100 mg/Nm^3 ile 20,000 mg/Nm^3 gibi çok geniş bir aralıkta değişmiştir. Bu da yanabilir kükürt içeriğinin geniş dağılım aralığıyla, %0.15-%4.48 ile uyumludur. Yakma deneylerinde değiştirilen tek parametre HFK olmuştur. Şekilde bu parametrenin SO_2

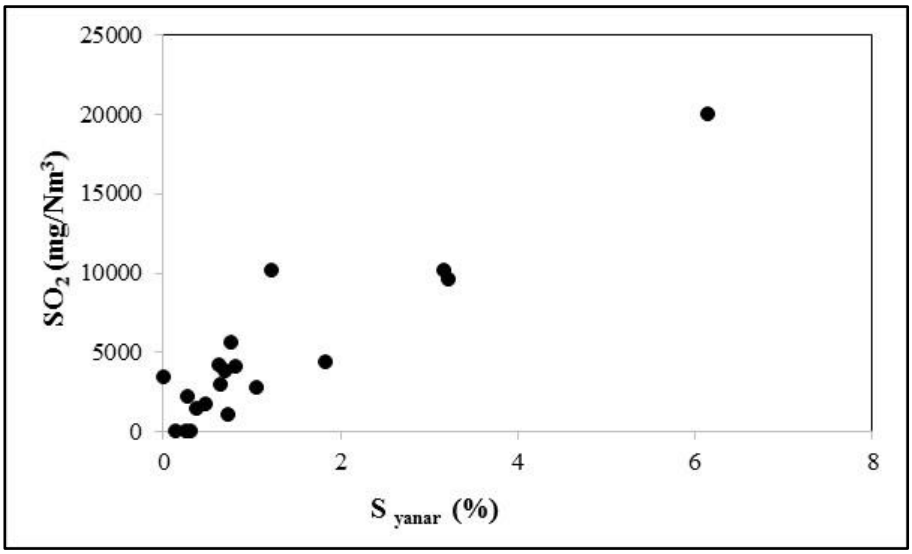
emisyonuna etkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi sistemin uygun (optimum) bir HFK'da çalıştırılması durumunda emisyon aralığı daha dar olabilmekte ve daha düşük seviyelere kayabilmektedir. Ancak bütün kömürler için geçerli olabilecek en uygun (optimum) HFK söz konusu değildir. Her kömür için farklı bir HFK seviyesine ihtiyaç vardır. Şekilden görüldüğü gibi HFK değiştirilerek SO_2 emisyonları biraz düşürülmüştür. Linyitlerin çoğu için yüksek HFK'da baca gazındaki SO_2 derişiminde bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni, tahmin edilebileceği gibi, hava fazlalığının seyreltme etkisidir. SO_2 giderimi için herhangi bir adsorban kullanılmaksızın işletme koşulları optimize edilerek linyitlerin SO_2 emisyonu linyitlerin %81'i için 5000 mg/Nm^3 seviyesinin, %44'ü için ise 2000 mg/Nm^3 seviyesinin altına düşürülebilmiştir.



Şekil 4.21 : Linyitlerin yanması sürecinde ortaya çıkan SO_2 emisyonlarının hava fazlalık katsayısıyla değişimi (kuru temelde, %6 O_2).

Yakıtların yanma süreçlerinde ortaya çıkan SO_2 emisyonları yakıtların içerdiği yanabilir kükürtten kaynaklanmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında baca gazında ölçülen SO_2 emisyonunun linyitlerin yanabilir kükürt oranlarıyla değişimi Şekil 4.22'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, linyitlerin yanabilir kükürt içeriği ile baca gazındaki SO_2 emisyonu arasında, azot içeriği ile NOx emisyonu arasında ilişkinin tersine ve bazı sapmalara karşın, sistematik bir ilişki göze çarpmaktadır. Bu ilişkiye

göre incelenen kömürler için SO_2 emisyonu, yanar küküt miktarıyla lineer olarak artmaktadır. Bununla uyumlu olarak en düşük SO_2 emisyonları, beklendiği gibi, en düşük yanabilir kükürt içeriğine sahip olan L7 (S_{yanar}: %0.32) ve L8 (S_{yanar}: %0.26) linyitleri, en yüksek SO_2 emisyonları ise en yüksek yanabilir kükürt içeriğine sahip olan L17 (S_{yanar}: %4.48) ve L18 (S_{yanar}: %3.23) linyitlerinin yanması sırasında ölçülmüştür. L7, L8 ve L19'un kükürt emisyonları ölçme cihazının ölçüm sınırlarında kalarak ölçülememiştir. Onun için grafikte görünmemektedirler. Bu durumun iki faktörün bir bileşkesi olarak ortaya çıktığı tahmin edilmektedir: **1.** Yanar kükürt oranlarının düşük olması, **2.** Külde görece yüksek miktarlarda alkali oksitlerin bulunması. Bu çalışmada, külün anorganik bileşiminin yanma sırasında ortaya çıkan kükürtü yerinde ne oranda tuttuğu konusunda herhangi bir araştırma yapılmamışsa da, literatürde yanma sırasında ortaya çıkan SO_2'nin bir kısmının kül tarafından adsorbe olduğu konusunda görüşler bulunmaktadır (Fleig ve diğ, 2011; Belo ve diğ, 2014). L7, L8 ve L19 görece yüksek miktarlarda CaO ve Fe_2O_3 içeriklerine sahiptirler. Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi, toplam CaO and Fe_2O_3 miktarı L7, L8 ve L19 için sırasıyla %25, %17 ve %26 civarındadır. Bu iki bileşik akışkan yatak yakma sistemlerde SO_2'i en etkin şekilde tutan başlıca oksitler arasında yer almaktadır. Fe_2O_3 kükürt tutma kapasitesi ise CaO'den daha yüksektir (Liang ve diğ, 2016). Diğer taraftan, yakıtların içermiş olduğu kükürdün tümü değil yalnızca bir kısmı yanma sırasında SO_2'e dönüşmektedir (Fleig ve diğ, 2011). Bütün bunlar, bazı kömürlerin yanması sırasında kükürt emisyonlarının ölçülmeyecek derecede düşük olmasında rol oynayabilmektedir.



Şekil 4.22 : Linyitlerin yanma sürecinde SO_2 emisyonu (kuru temelde, %6 O_2).

Havayla Yanma Sürecinde Baca Gazlarındaki SO_2 'i Tutma

Deneysel çalışmalar sırasında bazı kömürlerin yanma süreçlerinde yanma gazlarındaki kükürt dioksit (SO_2) miktarlarını düşürmek amacıyla SO_2 tutma çalışmaları da yapılmıştır. SO_2'i tutmak için Türkiye'nin değişik bölgelerinde alınan kireçtaşı örnekleri kullanılmıştır. Kükürt dioksit tutma açısından kireçtaşının içerdiği en etkin bileşen $CaCO_3$ (CaO) dır. Deneylerde kullanılan kireçtaşlarının $CaCO_3$ (CaO) içerikleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Uygulama kolaylık ve ekonomik avantaj sağlaması göz önüne alınarak, SO_2 tutma deneylerinde kullanılan kömürlerle kireçtaşlarının aynı bölgelerden olmasına dikkat edilmiştir. Buna göre, TKİ'nin Güney Ege Linyitleri İşletmelerinden (GELİ) alınan linyitlerin yanma deneylerinde bu bölgeden alınan kireçtaşı (KT2), Bursa Linyit İşletmesinden (BLİ) alınan Keles linyitinin yanma deneylerinde bu bölgeden alınan kireçtaşı (KT3), Yeniköy Linyit İşletmeleri'nden (YLİ) alınan linyitlerin yanma deneylerinde bu bölgeden alınan kireçtaşı (KT4), ve Ilgın Linyitleri İşletmesinden (ILİ) alınan linyitin yanma deneylerinde ise yine bu bölgeden alınan kireçtaşı (KT5) kullanılmıştır. Garp Linyitleri İşletmesi, Ege Linyitleri İşletmesi, Seyitömer Linyitleri İşletmesi ve Çan Linyit İşletmesi'nden alınan toplam 11 adet linyitten 4 tanesinin yanma deneylerinde açığa çıkan SO_2 emisyonu çevre limitlerinin altında olduğundan SO_2 tutmak için herhangi bir absorban kullanılmamıştır. 8 adet linyitin SO_2 tutma deneylerinde reaktivitesi çok yüksek olan ve bileşimi Çizelge 4.11'de verilen Çanakkale bölgesinden alınan kireçtaşı kullanılmıştır.

Kükürt dioksit tutma deneylerinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.16'da verilmiştir. Deneylerde kullanılan kireçtaşı (adsorban) miktarı kömürdeki kükürt miktarı ve Ca/S mol oranı esas alınarak belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle, kullanılan adsorbant miktarı kömürdeki kükürt miktarına bağlı olarak değişmiştir. Kükürt tutma işlemi bazı kömürler için değişik Ca/S oranlarında, bazıları için ise tek bir oran için gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda Ca/S oranı genel olarak 1-3 aralığında değiştirilmiştir (Ca/S = 1-3). Bu çalışmaların amacı, bu çalışmada incelenen kömürlerin dolaşımlı akışkan yatak tipi yakma sistemlerinde yakılmaları durumunda *Hava Kalitesi Yasasına göre* (Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü (SKHKKY) Yönetmeliği, 03/07/2009 tarihli 27277 sayılı resmi gazete) ön görülen standartların sağlanıp sağlanmadığını görmektir. SKHKKY'de SO_2 emisyonları için ön görülen üst sınır değerler Çizelge 4.17' de verilmiştir. Buna göre SO_2 emisyonu için sınır,

kapasitesi 50-100 MW olan tesisler için 850 mg/Nm^3, kapasitesi 100 MW'dan büyük olanlar için ise 200 mg/Nm^3'dür. İncelenen kömürlerin yanma süreçlerinde, SO_2 de dahil, ortaya çıkan çeşitli emisyonların ülkemiz ve Avrupa Birliği (AB) yasalarında katı yakıt yakan termik santraller için öngörülen emisyon sınırları açısından ayrıntılı bir değerlendirilmesi daha sonraki bir bölümde ayrıca yapılacaktır. Burada konu daha çok adsorban (kireçtaşı) kullanılarak SO_2 emisyonlarının düşürülmesi açısından incelenecektir. Çizelge 4.16 incelendiğinde göze çarpan ilginç bir nokta adsorbanın kullanıldığı yanma süreçlerinde, yanma gazlarındaki SO_2 derişiminde gerçekleşen düşme oranlarının kömürden kömüre çok farklı olmasıdır. Genel olarak bakıldığında, Ca/S oranına bağlı olarak SO_2 miktarında gerçekleşen düşme kabaca %24-98 arasında değişmiştir. Kömürlerin kükürt içeriği ve kullanılan adsorban miktarı ile baca gazı SO_2 miktarında meydana gelen düşme oranı arasında herhangi bir sistematik ilişki görülmemektedir. Bununla birlikte L13, L14, L17, L18 gibi yüksek miktarlarda kükürt içeren kömürlerin yanma süreçlerinde adsorban kullanarak SO_2 emisyonunda yüksek oranlarda bir düşmenin gerçekleşebileceği dikkati çekmektedir. L17 (Çanakkale-Çan) ve L18 (Konya-Ilgın), kullanılan kömürler içinde en yüksek miktarlarda kükürt içeren iki kömürdür. Bu kömürlerin kükürt içerikleri sırasıyla %5.69 (yanar kükürt: %4.48) ve %5.02 (yanar kükürt: %3.23)'dir. Adsorban kullanıldığında bu kömürlerin yanma süreçlerinde SO_2 emisyonlarında sırasıyla %98 ve %78'e varan oranlarda iyileştirme sağlanabilmiştir. L17 (Çanakkale-Çan kömüründe Çan kireçtaşı (KT1) kullanılmış olup L18 (Konya-Ilgın) kömüründe ise Ilgın bölgesinden alınan kireçtaşı kullanılmıştır. Bu iki kömür için SO_2 tutmada ortaya çıkan farkın kısmen, Çanakkale bölgesinden alınan kireçtaşının $CaCO_3$ içeriğinin Ilgın bölgesinden alınan kireçtaşının $CaCO_3$ içeriğinden daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SO_2 tutma açısından, kireçtaşı bileşiminin yanı sıra reaktivitesi de önemli bir rol oynamaktadır. Yanma gazlarındaki SO_2 miktarında gerçekleşen düşüş deneylerde kullanılan Ca/S oranı ile değişebilmektedir. Beklendiği üzere Ca/S oranı arttıkça SO_2 emisyonlarında sağlanan iyileşme de artmaktadır. Buna karşın bu çalışmada uygulanan koşullarda (Ca/S oranlarında) adsorban kullanarak SO_2 emisyonlarını kömür yakma tesisleri için konulan sınır emisyon değerlerinin altına düşürmek incelenen kömürlerin çok büyük bir bölümü için mümkün olmamıştır. Yalnızca 6 linyit için (L1, L2, L9, L13, L15 ve L17) SO_2 emisyonları 850 mg/Nm^3 veya altına düşürülebilmiştir. Kullanılan kömürler içerisinde, en düşük kükürt

oranlarına sahip üç kömürün (L7, L8 ve L19) yanma sürecinde ise, daha önce de belirtildiği gibi, baca gazlarındaki kükürt oksitler ölçülemeyecek derecede düşük olmuştur ve ayrıca adsorban kullanmaya gerek kalmamıştır. Böylece 19 kömürden 10 tanesi (%53) için adsorban olarak kullanılan kireçtaşı ile bu çalışmada uygulanan koşullarda SO_2 emisyonlarını 850 mg/Nm^3'ün altına düşürmek mümkün olmamıştır. Öte yandan kireçtaşıyla yalnızca bir kömür (L15) için SO_2 emisyonları 200 mg/Nm^3 altına düşürülebilmiştir.

Çizelge 4.16 : Havayla yanma sürecinde baca gazlarındaki SO_2'i tutma koşulları ve SO_2 tutma oranları.

Kömür	Ca/S	Kömürdeki toplam kükürt(%) (kuru temelde)	Kömürdeki yanar kükürt(%) (kuru temelde)	T_{AY} (°C)	Hava fazlalık katsayısı (λ_{hava})	Baca Gazındaki SO_2 miktarı (mg/Nm^3)	SO_2 miktarındaki düşme oranı (%)
L1	-	2.39	1.83	820±20	1-1.30	4800-4200	-
	KT1 (Ca/S=2)			820±20	1.15-1.30	4300-4200	10-12.5
	KT1 (Ca/S=3)			820±20	1.10-1.40	2000-850	58-82
L2	-	1.49	1.06	850±20	1-1.25	3500-2500	-
	KT1 (Ca/S=2)			840±20	1-1.40	2000-1000	43-71
	KT1 (Ca/S=2.5)			830±20	1.2-1.45	1000-950	71-73
	KT1 (Ca/S=3)			840±20	1.2-1.45	1000-850	71-76
	KT1 (Ca/S=3.5)			830±20	1.1-1.4	900-500	74-86
L3	-	2.51	0.64	790±10	1-1.2	4600-4400	-
	KT1 (Ca/S=2)			770±30	1-1.3	4500-4000	2-13
	KT1 (Ca/S=3)			780±20	1.1-1.3	3500-1500	24-67
L4	-	2.19	0.70	770±30	1.1-1.4	4000-3800	-
	KT1 (Ca/S=2)			780±30	1-1.3	1600-1200	60-70
	KT1 (Ca/S=2.5)			790±20	1-1.4	1100-1000	72.5-75
L5	-	2.55	0.83	770±30	1-1.35	4200-4000	-
	KT1 (Ca/S=2)			805±5	1.1-1.4	2500-1500	40-64
	KT1 (Ca/S=2.5)			815±15	1.1-1.3	1100-1000	74-76
L6	-	1.01	0.49	805±5	1-1.4	2200-1600	Adsorban yok.
L7	-	0.92	0.32	810±10	1.1-1.5	0	Adsorban yok.
L8	-	0.77	0.26	805±5	1.1-1.4	0	Adsorban yok.
L9	-	079	0.38	805±45	1-1.4	1600-1400	-
	KT1 (Ca/S=1)			820±20	1-1.4	1000-500	37.5-69
	KT1 (Ca/S=1.5)			805±25	1-1.4	750-480	53-70
L10	-	1.34	0.74	805±5	1-1.4	1000-900	Adsorban yok.

Çizelge 4.16 (devam) : Havayla yanma sürecinde baca gazlarındaki SO_2'i tutma koşulları ve SO_2 tutma oranları.

Kömür	Ca/S	Kömürdeki toplam kükürt(%) (kuru temelde)	Kömürdeki yanar kükürt(%) (kuru temelde)	T_{AY} (°C)	Hava fazlalık katsayısı (λ_{hava})	Baca Gazındaki SO_2 miktarı (mg/Nm^3)	SO_2 miktarındaki düşme oranı (%)
L11	-	1.31	0.28	795±15	1-1.4	1600-1300	-
	KT2 (Ca/S=1)			785±15	1-1.3	1300-1100	19-25
L12	-	2.50	1.22	790±20	1-1.4	10500-10000	-
	KT2 (Ca/S=2)			810±10	1-1.4	6000-3200	43-69
L13	-	4.30	1.01	805±5	1.1-1.4	3500-3400	67-68
	KT3 (Ca/S=2)			805±5	1.1-1.4	500-370	Adsorban yok.
L14	-	5.11	3.17	735±15	1-1.4	10500-10000	-
	KT3 (Ca/S=2)			730±10	1-1.4	2800-1750	73-83
L15	-	2.18	0.79	805±5	1-1.4	3250-3000	-
	KT1 (Ca/S=1)			805±5	1-1.4	2800-2000	14-38
	KT1 (Ca/S=2)			825±15	1.1-1.4	75-50	98-98.4
L16	-	1.97	0.59	810±10	1-1.4	6000-5500	-
	KT4 (Ca/S=2)			805±5	1-1.4	2500-2200	58-63
L17	-	5.69	4.48	835±15	1-1.2	20000-18000	-
	KT1 (Ca/S=2)			805±5	1-1.3	3000-2000	85-90
	KT1 (Ca/S=3)			820±10	1-1.4	800-300	96-98.5
L18	-	5.02	3.23	805±5	1-1.4	10000-9300	-
	KT5 (Ca/S=2)			805±5	1-1.6	3000-2200	70-78
L19	-	0.73	0.15	770±15	1-1.4	0	-

SO_2 emisyonlarının adsorbanla (kireçtaşı) ulusal yasalarda yakma sistemleri için konulan sınırların altına düşürülememesi başlıca iki nedenden kaynaklamaktadır: **1.** kömürlerin yüksek miktarda kükürt içermesi, dolayısıyla baca gazlarındaki SO_2 miktarlarının yüksek olması **2.** yakma süreci koşullarının SO_2 emisyonları açısından optimize edilmemiş olmasıdır. Bunlardan birincisi için alınacak önlemler bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Ancak yakma sisteminin çalışma koşullarının SO_2 emisyonları için iyileştirmek mümkündür. Bunun için, çalışma sıcaklığının kireçtaşının SO_2'ı tutması için en uygun seviyelerde (850-900 ^oC) tutmak, Ca/S oranlarının SO_2 emisyonuna olan etkisinin daha ayrıntılı bir şekilde incelemek ve yakma sisteminin çalışmasını bozmaksızın SO_2 miktarını minimize edecek optimum adsorban oranlarını belirlemek, daha etkin adsorbanlar kullanmak gibi çeşitli yollara başvurulabilir.

Türk Linyitlerinin DAY yakma süreçlerinin emisyonlar açısından Türkiye ve Avrupa Birliği Yönetmeliklerine göre değerlendirilmesi

Fosil yakıt yakan santrallerden kaynaklanan emisyonlar, hava kalitesini bozarak insan sağlığı ve çevre için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Çevre kirliliği ve artan küresel zorluklar konusunda kamuoyunun bilinçlendirilmesine paralel olarak, hava kirliliği ile ilgili düzenlemeler tüm dünyada daha ciddi bir şekilde ele alınmaktadır. Burada Türk linyitlerinin DAY yakma sistemlerinde yakılmasının emisyonlar açısından özellikle Türkiye ve Avrupa Birliği'nin (AB) ilgili regülasyonları açısından değerlendirilecektir. Enerji santrallerindeki önemli emisyonların (CO, SO_2, NOx ve toz..gibi) sınırları Türkiye'de *Hava Kalitesi Yasası* (Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, 03/07/2009 tarihli 27277 sayılı resmi gazete) AB'de ise Ocak 2016'dan başlayarak, *2015/2193 sayılı AB Direktifi* (2015/2193 sayılı AB Direktifi) tarafından düzenlenmiştir. Türkiye'deki ve AB'deki emisyon sınırları sırasıyla Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18'de verilmiştir. AB yasalarında CO emisyonları için herhangi bir düzenleme ön görülmemiştir.

Çizelge 4.17 : Türkiye'de enerji santrallerinde uygulanan emisyon sınırları (Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, 03/07/2009 tarihli 27277 sayılı resmi gazete).

Yakıt türü	Yakma Sisteminin Termal Kapasitesi (MW)	Toz (mg/Nm^3)	SO_2 (mg/Nm^3)	NOx (mg/Nm^3)	CO (mg/Nm^3)
Katı yakıt	50-100	50	850	400	150
	≥100	30	200	200	200
Petrol koku	50-100	20	400	400	150
	≥100	20	200	200	200
Biyokütle	50-100	-	200	400	-
	50-300	-	200	300	-
	≥300	-	200	200	-

NOT: Katı yakıtlı yakma tesislerinde mg/Nm^3 olarak baca gazında % 6 hacimsel oksijen (O_2) esas alınarak aşağıdaki emisyon sınır değerleri aşılamaz.

Çizelge 4.18 : Avrupa Birliği'nde enerji santrallerinde uygulanan emisyon sınırları (2015/2193 sayılı AB Direktifi).

Yakıt türü	Yakma Sisteminin Termal Kapasitesi (MW)	Toz^E (mg/Nm^3)	$SO_2{}^E$ (mg/Nm^3)	NOx^E (mg/Nm^3)	Toz^Y (mg/Nm^3)	$SO_2{}^Y$ (mg/Nm^3)	NOx^Y (mg/Nm^3)
Katı	1-5	50	200	650	20	200	300
biyokütle	≥5	30	200	650			
Diğer katı	1-5	50	1100	650	20	400	300
yakıtlar	≥5	30	400	650			

E: AB ülkelerindeki mevcut santraller; Y: AB ülkelerinde yeni kurulacak santraller.

Bu çalışmada kullanılan linyitlerin DAY yakma sisteminde yakılması sırasında yanma gazlarında ölçülen başlıca emisyonlar, CO, NOx ve SO_2, daha önceki bölümlerde verilmiş ve tartışılmıştı. Bu emisyonların Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18'de verilmiş olan Türk ve AB emisyon sınır değerleriyle kıyaslanması Çizelge 4.19'da yapılmıştır. Bu çizelgede kullanılan işaret ve simgelerin anlamları şöyledir:

(+): bu çalışmada ölçülen emisyon değerlerinin yasalarla belirlenmiş sınır değerlerin altında kaldığını, yani yasal sınırları sağladığını göstermektedir.

(-): bu çalışmada ölçülen emisyon değerlerinin yasalarla belirlenmiş sınır değerlerin üstünde kaldığını, yani yasal sınırları sağlamadığını göstermektedir.

Çizelge incelendiğinde şu noktalar dikkati çekmektedir:

CO Emisyonu: 16 linyitin, yani incelenen linyitlerin %84'nün yanma surecinde ortaya çıkan CO emisyonları Türk Hava Kalitesi Yönetmeliğinde küçük enerji santralleri (50-100 MW) için belirlenmiş olan 150 mg/Nm^3 seviyesinin üstünde kalmıştır. Buna karşın aynı yönetmelikte büyük enerji santralleri (>100 MW) için konulmuş CO emisyon sınırı (200 mg/Nm^3) açısından daha iyi bir durum söz konusudur. Linyitlerden 8 tanesinin (yaklaşık % 45) yanma sürecinde ölçülen CO emisyonları bu sınırların altında kalmıştır. Linyitlerin %55'nin CO emisyonları ise bu sınırın üstünde kalmıştır. Deneylerde, kömürlerin yakılması için gerekli olan havanın tümü birincil hava olarak dağıtıcı elek vasıtasıyla yanma odasına gönderilmiştir. Havanın kademeli olarak akışkan yatağa beslenmesi, başka bir ifadeyle yakma havasının bir kısmının ikincil hava olarak, daha üst bölgelerden yanma oadasına gönderilmesi ve operasyon sıcaklıklarının biraz daha yüksek tutulması yoluyla CO emisyonlarını düşürmek mümkün olacaktır. AB'nın enerji santralleriyle lgili direktiflerde CO için herhangi bir düzenleme yapılmadığı için bu konuda herhangi bir değerlendirme yapılmamıştır.

Çizelge 4.19 : Çalışmada kullanılan linyitlerin dolaşımlı akışkan yatakta havayla yakma sürecinde ortaya çıkan emisyonların Türk ve AB yasalarında enerji santralleri için düzenlenen emisyon değerleriyle kıyaslanması.

Kömür	$CO^{Ö}$ (mg/Nm^3)	$NOx^{Ö}$ (mg/Nm^3)	$SO_2{}^{Ö}$ (mg/Nm^3)	CO^{T} (mg/Nm^3)	NOx^{T} (mg/Nm^3)	$SO_2{}^{T}$ (mg/Nm^3)	NOx^{AB} (mg/Nm^3)	$SO_2{}^{AB}$ (mg/Nm^3)
L1	324	101	4435	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: -	B: +	B: -	Y: +	Y: -
L2	100	150	2580	K: +	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: +	B: +	B: -	Y: +	Y: -
L3	193	231	10078	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: +	B: -	B: -	Y: +	Y: -
L4	232	250	3880	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: -	B: -	B: -	Y: +	Y: -
L5	640	163	4022	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: -	B: +	B: -	Y: +	Y: -
L6	184	265	1043	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: +	B: -	B: -	Y: +	Y: -
L7	400	220	0	K: -	K: +	K: +	E: +	E: +
				B: -	B: -	B: +	Y: +	Y: +
L8	240	422	0	K: -	K: -	K: +	E: +	E: +
				B: -	B: -	B: +	Y: -	Y: +
L9	132	218	1387	K: +	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: +	B: -	B: -	Y: +	Y: -
L10	135	222	0	K: +	K: +	K: +	E: +	E: +
				B: +	B: -	B: +	Y: +	Y: +
L11	360	124	2200	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: -	B: +	B: -	Y: +	Y: -

Çizelge 4.19 (devam) : Çalışmada kullanılan linyitlerin dolaşımlı akışkan yatakta havayla yakma sürecinde ortaya çıkan emisyonların Türk ve AB yasalarında enerji santralleri için düzenlenen emisyon değerleriyle kıyaslanması.

Kömür	$CO^{Ö}$ (mg/Nm^3)	$NOx^{Ö}$ (mg/Nm^3)	$SO_2{}^{Ö}$ (mg/Nm^3)	CO^{T} (mg/Nm^3)	NOx^{T} (mg/Nm^3)	$SO_2{}^{T}$ (mg/Nm^3)	NOx^{AB} (mg/Nm^3)	$SO_2{}^{AB}$ (mg/Nm^3)
L12	384	117	2145	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: -	B: +	B: -	Y: +	Y: -
L13	280	110	2050	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: -	B: +	B: -	Y: +	Y: -
L14	185	225	3443	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: +	B: -	B: -	Y: +	Y: -
L15	127	199	3003	K: +	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: +	B: +	B: -	Y: +	Y: -
L16	400	220	0	K: -	K: +	K: +	E: +	E: +
				B: -	B: -	B: +	Y: +	Y: +
L17	500	251	5200	K: -	K: +	K: -	E: +	E: -
				B: -	B: -	B: -	Y: +	Y: -
L18	199	221	9913	K: -	K: +	K: +	E: +	E: -
				B: +	B: -	B: +	Y: +	Y: -
L19	820	452	0	K: -	K: -	K: +	E: -	E: +
				B: -	B: -	B: +	Y: -	Y: +

Ö: Ölçülen emisyon değerleri

T: Türk yasası;

K: 50-100 MW termal kapasiteli küçük termik santraller; CO =150 mg/Nm^3, NOx = 400 mg/Nm^3; SO_2 =850 mg/Nm^3

B: >100 MW termal kapasiteli büyük termik santraller ; CO =200 mg/Nm^3, NOx = 200 mg/Nm^3; SO_2 =200 mg/Nm^3

E : Mevcut termik santraller (AB); NOx = 650 mg/Nm^3; SO_2 =850 mg/Nm^3

Y: Yeni termik santraller (AB); NOx = 300 mg/Nm^3; SO_2 =200 mg/Nm^3

***NOx Emisyonu*:** Çalışmadan elde edilen sonuçlar, linyitlerin yanma süreçlerinin NOx için Türkiye'de ve AB'de konulmuş normları karşılama açısından daha etkin ve temiz olduğunu olduğunu göstermektedir. Çalışmalardan kullanılan 19 kömürden 17'sinin (%89) yanması sırasında baca gazlarında ölçülen NOx miktarları Hava Kalitesi Yönetmeliğinde küçük enerji santralleri (50-100 MW) için belirlenmiş olan 400 mg/Nm^3 seviyesinin altında kalmıştır. L8 (Manisa-İmbat tüvenan) ve L19 (Manisa-Soma) sırasıyla 422 mg/Nm^3 ve 452 mg/Nm^3'lık bir emisyonla sınırın biraz üzerinde kalmıştır. Hava Kalitesi Yönetmeliğinde büyük enerji santralleri (>100 MW) açısından bakıldığında ise NOx emisyon normlarını sağlayan kömür sayısının azaldığı görülmektedir. Bu santraller için konulmuş olan 200 mg/Nm^3'lık koşulu kömürlerin yalnızca yaklaşık %40'ı (7 adet) sağlamaktadır. Bununla birlikte sınırın üstünde kalan kömürlerin 7 tanesinin NOx emisyon değerleri 220 ile 231 mg/Nm^3 arasında değişmektedir. Yani bu kömürler sınırı yalnızca maksimum %11-16 oranında aşmaktadırlar.

AB'nin ilgili direktifinde NOx emisyon sınırı halen kurulu olan eski ve katı yakıt yakan elektrik santralleri için, herhangi bir kapasite sınırı olmaksızın, 650 mg/Nm^3, yeni kurulacak olan santraller için ise 300 mg/Nm^3'dır. Bu değerler göz önüne alındığında, bu çalışmada kullanılan bütün linyitler için DAY yakma sistemi AB tarafından halen kurulu bulunan/çalışmakta olan elektrik santralleri için konulmuş olan üst NOx sınırının rahatlıkla sağlandığı görülmektedir. Ölçülen NO_X emisyonları genellikle bu sınırın çok altında kalmaktadır. Ölçülen en yüksek 452 mg/Nm^3'lık NOx emisyonu göz önüne alındığında, en kötü performansı sergileyen kömür için dahi bu sınırın yaklaşık %35 oranında üstünde kalındığı ortaya çıkmaktadır. AB'nin yeni kurulacak santraller için belirlediği üst sınır (300 mg/Nm^3) açısından NOx emisyonları incelendiğinde ise L8 ve L19 hariç, bütün linyitler için emisyonlar sınırın altında kalmaktadır.

CO ve NOx emisyonları karşılaştırıldığında bunlar arasında, daha önce de belirtildiği gibi, ters bir etkileşim söz konusudur. Karbon monoksitin ortamda yüksek miktarlarda bulunması NOx oluşumunu baskılamaktadır. CO miktarı düştükçe ise NOx emisiyonunda artma eğilimi güçlenmektedir. Her ne kadar bu durum her iki emisyonu birden kontrol altına alınmasında bir güçlük yaratıyor görünse de, akışkan yatak yakma sisteminin çalışma koşullarının uygun seçilmesi ile bu iki emisyonu aynı anda kontrol etmek ve ilgili sınırlar içinde kalmak mümkündür. Bunun bir yolu yakma havasını

kademelendirerek yakma odasına göndermektir. Bunun hem yanma verimini arttırdığı hem de CO ve NOx emisyonları düşürebildiği belirtilmektedir (Varol ve diğ, 2014a; Fan ve diğ, 2010; Yang ve diğ, 2014).

***SO_2 Emisyonu*:** Çizelge 4.19 incelendiğinde, bu çalışmada ölçülen emisyonlar ile yasalarda belirlenen sınır değerler arasındaki en büyük fark SO_2 emisyonları için görülmektedir. Bu durum bu çalışmada kullanılan linyitlerin yakıt olarak kullanılması durumunda elektrik santralleri ve genel olarak çevre için belirlenmiş olan ulusal ve uluslararası standartlarda düzenlenmiş emisyon hedeflerini tutturmak açısından en büyük sorunun SO_2 emisyonlarından kaynaklanacağını göstermektedir. Özellikle L1, L2, L17 ve L18 gibi bazı linyitler yakıldığında açığa çıkan SO_2 derişimi Türkiye'deki çevre yönetmeliği ile belirlenen sınır değerlerden 1.24 ile 50 kat daha yüksek olabilmektedir. İncelenen kömürlerden yalnızca 5 tanesinin (L7, L8, L10, L16 ve L19) yanma süreçlerinde SO_2 emisyonları Hava Kalitesi Yönetmeliğinde küçük santraller (50-100 MW) için belirlenmiş olan 850 mg/Nm^3 altında ölçülmüştür. Diğerleri için SO_2 emisyonları bu sınırın üstünde kalmıştır. Benzer bir durum büyük santraller (>100 MW) için de geçerlidir. Yalnızca 4 linyitin (L7, L8, L10 ve L19) yanması sürecinde baca gazlarında ölçülen SO_2 miktarları bu santraller için konulan 200 mg/Nm^3 sınırının altında kalmış, gerisi için emisyonlar bu sınırın üstünde gerçekleşmiştir.

Linyitlerin SO_2 emisyonları, AB emisyon regülasyonları ışığında değerlendirildiğinde ise, Türkiye için saptanan duruma benzer bir tabloyla karşılaşılmıştır. Çizelge 4.18'de görüldüğü gibi, AB ülkelerinde halen devrede olan ve yeni yapılacak santraller için izin verilen SO_2 emisyonlarının üst sınırı sırasıyla 400 mg/Nm^3 ve 200 mg/$Nm^{3'}$ dır. On dokuz kömürden yalnızca 4 tanesi (L7, L8, L10 ve L19) AB'de hem halen çalışmakta olan hem de yeni kurulacak santraller için öngörülen bu SO_2 emisyon sınırları içinde kalmaktadır. Bu da linyitlerin sadece %21'nin, DAY tipi elektrik santrallerinde yakıt olarak kullanıldıklarında herhangi bir kükürt giderme işlemi olmaksızın Türk ve AB emisyon standartlarını sağlayabileceğini anlamına gelmektedir. Çizelge 4.3'den görüldüğü gibi bu 4 linyit incelenen linyitler içerisinde en düşük kükürt içeriklerine sahip linyitler arasında yer almaktadır. Bu kömürlerin toplam ve yanar kükürt miktarları sırasıyla %0.73-1.34 ve %0.15-0.74 aralığında değişmektedir.

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, ölçülen SO_2 emisyon miktarları linyitlerin yanabilir kükürt oranları ile örtüşmektedir. Deneysel sonuçlar bu yakıtların

kullanıldığı termik santrallerde ulusal ve uluslararası yasalarda belirlenen emisyon sınır değerlerinin sağlanabilmesi için SO_2 tutmak için önlem alınması gerektiğini göstermektedir.

Yanma Verimi

Yanma sistemlerinin performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan en önemli parametrelerden bir tanesi de *yanma verimidir* (η). Yanma verimi değişik şekillerde tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada yanma verimi ısı kayıplarına dayanılarak hesaplanmıştır. Bunun için deneyler sonlandırıldıktan sonra sistem soğumaya bırakılmıştır. Soğuma gerçekleştirildikten sonra ve yataktan çekilen kül (taban külü), ikinci siklon ve torbalı filtrede toplanan uçucu küllerde numuneler alınarak bunlarda yanmamış karbon analizi yapılmıştır. Yanma verimi (η), yanma esnasında meydana gelen ısı kayıplarından (yanmamış karbon) hareketle yapılan bir verim hesabıdır. Yanma kayıpları temel olarak bileşeni vardır. Bunlar;

CO oluşumundan kaynaklanan karbon kaybı (K_{CO}),

$$K_{CO} = \frac{(COxV_{bg}xAID_{CO})}{10000xAID_{yakıt}} \quad (4.6)$$

Burada,

K_{CO} = CO oluşumundan kaynaklanan toplam karbon kaybı (%)

CO = Baca gazında ölçülen ortalama CO derişimi ($ppmv_)$

$V_{bacagazı}$= Birim yakıt başına oluşan baca gazı hacmi (Nm^3/kg)

AID_{CO} = CO'in yanma ısısı (12.64 MJ/Nm^3)

$AID_{yakıt}$ = Kullanılan yakıtın alt ısıl değeri (MJ/kg)

Taban külündeki yanmamış karbondan kaynaklanan karbon kaybı (K_{dk})

$$K_{dk} = \frac{(M_{dk}xC_{dk}xAID_{dk})}{m_{yakıt}xAID_{yakıt}}x100 \quad (4.7)$$

Burada,

K_{dk} = Taban külündeki yanmamış karbondan kaynaklanan toplam karbon kaybı (%)

M_{dk} = Yanma süresince oluşan taban külü miktarı (kg/saat)

C_{dk} = Taban külündeki yanmamış karbon miktarı (kg C/ kg kül)

AID_{dk} = C'nin yanma ısısı (32.79 MJ/kg C)

$M_{yakıt}$ = Yakıt besleme hızı (kg yakıt/saat)

Uçucu küldeki yanmamış karbondan kaynaklanan karbon kaybı (K_{uk})'dır.

$$K_{uk} = \frac{(M_{uk} x C_{uk} x AID_{uk})}{m_{yakıt} x AID_{yakıt}} x100 \quad (4.8)$$

Burada,

K_{uk} = Uçucu küldeki yanmamış karbondan kaynaklanan toplam karbon kaybı (%)

M_{uk} = Yanma süresince oluşan uçucu kül miktarı (kg/saat)

C_{uk} = Uçucu küldeki yanmamış karbon miktarı (kg C/ kg kül)

AID_{uk} = C'nin yanma ısısı (32.79 MJ/kg C)

$m_{yakıt}$ = Yakıt besleme hızı (kg yakıt/saat)

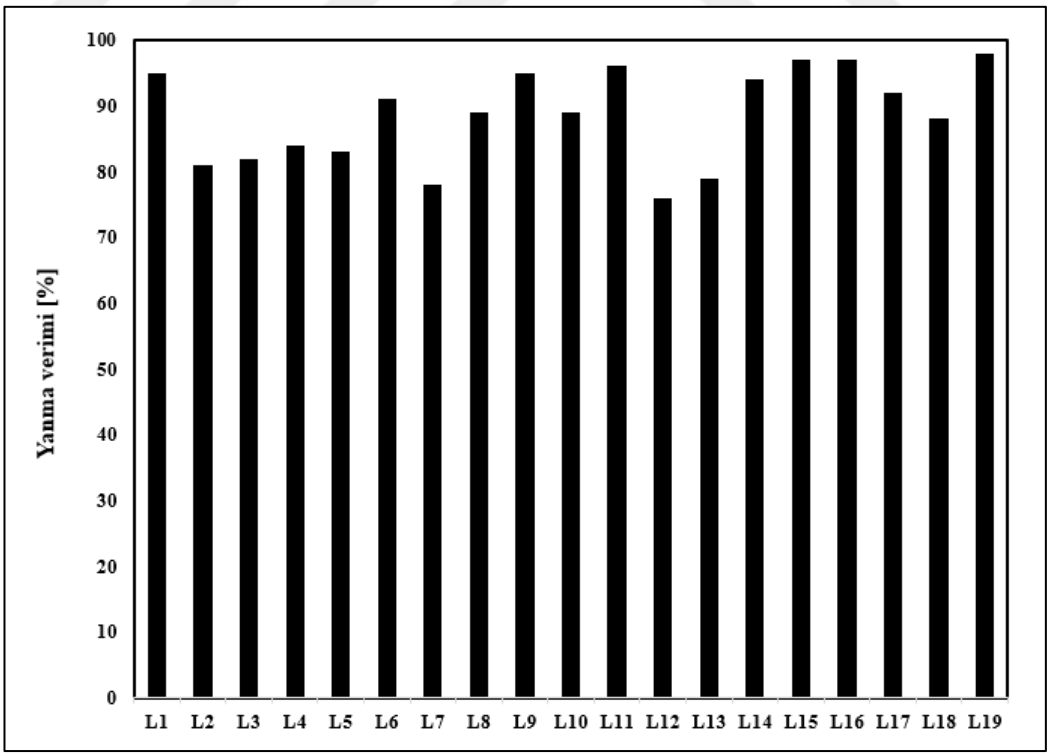
Bu yanma kayıpları aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (ASME PTC 4-1998):

Sistemin yanma verimi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\eta = 100 - (K_{CO} + K_{dk} + K_{uk}) \quad (4.9)$$

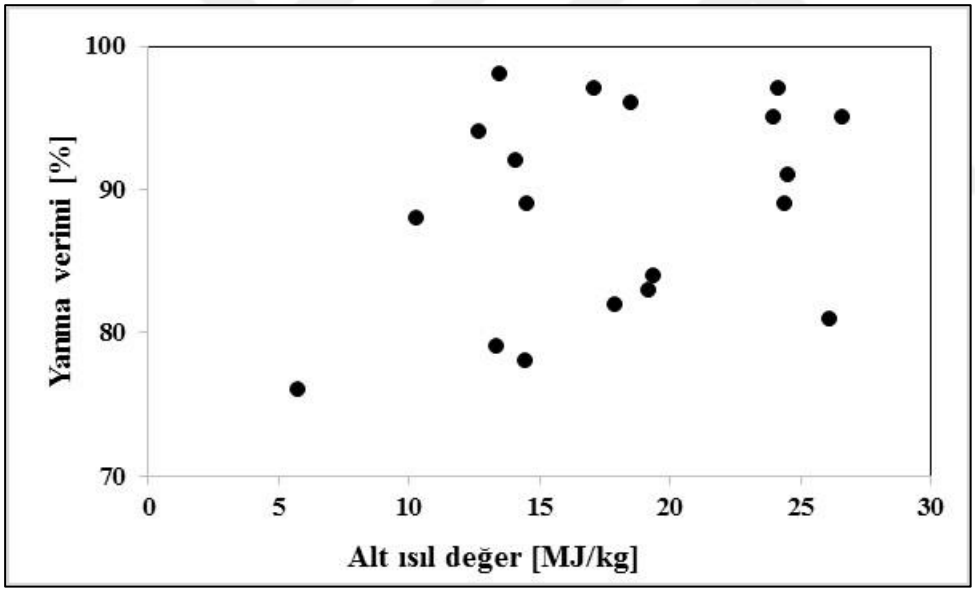
Çalışmada kullanılan linyit örneklerinin havayla yanma sürecidneki yanma verimleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, linyitlerin yanma verimleri %76-98 aralığında değişmiştir. Bu sonuçlar, söz konusu linyitlerin dolaşımlı akışkan yatak yakma süreçlerinde oldukça yüksek yanma verimlerine ulaşmanın mümkün olduğunu göstermektedir. Yakma deneyleri sırasında sistemden çekilen taban külü ve uçucu kül tüm deney boyunca toplanmış, deneyler bittikten sonra her birinde bir bütün olarak yanmamış karbon analizleri yapılmıştır. Toplanan küllerin sistemin henüz dengeye ulaşmadığı ve yanma verimlerinin görece düşük kaldığı yanma sürecinin ilk aşamalarında oluşan külleri de içerdiği gözden kaçırılmamalıdır. Böylece hesaplanan yanma verimleri biraz daha düşük ancak daha gerçekçi olmuştur. Çalışmada hesaplanan en düşük yanma verimi TKİ GELİ'den sağlanan linyitler arasında yer alan Tınaz (L12) ile TKİ YLİ'den sağlanan Hüsamlar krible (L13) linyitlerine aittir. Bu linyitler aynı zamanda çalışmada kullanılan kömürler içinde en düşük ısıl değerlere

(L12:AID=5.74 MJ/kg; L13:AID=13.37 MJ/kg) sahip olan kömürdür. L1 (Kütahya-Tunçbilek Lavvar), L9 (Manisa-Kısrakdere), L11 (Eskihisar), L14 (İkizköy-Işıkdere), L15 (Bursa-Orhaneli), L16 (Bursa-Keles) ve L19 (Manisa-Soma) kömürleri ise en yüksek yanma verimlerine ulaşmışlardır. Bütün bu 7 kömürün, yani çalışmada kullanılan kömürlerin % 37'nin yanma verimleri %95'den yüksek olmuştur. Kömürlerin %50'nin yanma verimi %90'nin üstüne çıkmıştır. On üç kömürün, yani tüm linyitlerin %68'nin yanma verimi ise %85'in üstünde olmuştur. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.23 bir arada incelendiğinde ısıl değerleri birbirine yakın olan bazı kömürlerin yanma verimlerinin birbirinden bir hayli farklı olduğu dikkati çekmektedir. Örneğin ısıl değerleri sırasıyla 26.61 MJ/kg ve 26.12 MJ/kg olan L1 (Kütahya-Tunçbilek) ve L2 (Kütahya-Ömerler) linyitlerinin yanma verimleri yine sırasıyla %95 ve %81 olarak bulunmuştur. Bunun, kömürlerin fiziksel/mekaniksel özelliklerinden kaynaklanması mümkündür. Örneğin, kömürlerin kırılganlık (fragmantation) ve aşınma (attrition) özelliklerinin farklı olması bunda bir rol oynamış olabilir. Ancak bu tezde kömürlerin fiziksel/mekaniksel özellikleri konusunda bir çalışma yapılmadığı için, bu özelliklerin kömürlerin yanma verimlerini hangi ölçülerde etkilediğini söylemek mümkün olmamıştır.



Şekil 4.23 : Linyitlerin dolaşımlı akışkan yatakta havayla yanma sürecindeki yanma verimleri.

Kömürlerin yanma verimleri ile alt ısıl değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.24'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, kömürlerin yanma verimleriyle ısıl değerleri arasında sistematik ve belirgin bir ilişki görülmemektedir. Buna karşın, incelenen kömürler için yanma veriminin genel olarak, ısıl değer arttıkça yükselme eğilimi içinde olduğu görülmektedir. Ancak bu genel eğilimin dışında kalan bir hayli kömür bulunmaktadır. Yani, daha önce de belirtildiği gibi, bazı kömürlerin ısıl değerleri birbirine yakın olmasına rağmen yanma verimleri çok farklı olabilmiştir. Kömürlerin yanma verimleri, hem yakma koşulları hem de kömürlerin kimyasal, fiziksel/mekaniksel özellikleri tarafından etkilenebilmektedir. Bu çalışmada kömürlerin yakılma (yakma sisteminin çalışma) koşulları çok benzer olmasına rağmen kömürlerin özellikleri bir hayli farklıdır. Kömürlerin parçalanma (fragmentation) ve aşınma (attrition) gibi fiziksek özellikleri yanma verimini etkileyebilmektedir (Chirone ve diğ, 1991; Pinho, 2006; Scala ve diğ, 2013). Bu, ayrıca araştırılması gereken bir konudur.



Şekil 4.24 : Linyitlerin dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde yanma verimleriyle alt ısıl değerleri arasındaki ilişki.

4.4.2 Linyitlerin Oksijence Zengin Havayla Yanma Süreci

Daha önce de belirtildiği gibi, bu tez çalışmasında linyitlerin dolaşımlı akışkan yatakta (DAY) yanma süreçleri incelenmiştir. Bu çerçevede 3 tip çalışma yapılmıştır: **1.** Linyitlerin *hava ortamında* yanmaları, **2.** Linyitlerin *oksijence-zengin havayla (OZH)* yanmaları, **3.** Linyitlerin *oksiyanma* koşullarında yanmaları. Hava ortamında yapılan yakma çalışmaları Bölüm 4.4.1' de anlatılmıştır. Bu çalışmalarda 19 adet kömür

kullanılmıştır. Bu kömürler arasından seçilen *Bursa-Orhaneli (Orhaneli)* ve *Manisa-Soma (Soma*) kömürlerinin ayrıca hem *oksijence zengin hava ortamındaki hem de oksiyanma koşullarındaki yanma süreçleri incelenmiştir.* Bu kömürler sırasıyla L15 ve L19 olarak da kodlanmıştır.

Bu bölümde Orhaneli (L15) ve Soma (L19) kömürlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksijence zengin hava ortamında yakılması deneylerinden elde edilen sonuçlar tartışılacaktır. Bu kömürler ülkemizin bilinen en önemli kömür rezervleri arasında yer almaktadırlar ve bu nedenle incelenmek üzere seçilmişlerdir. Bu çalışma, bu kömürlerin dolaşımlı akışkan yatakta oksijence-zengin hava ortamında yakılması konusunda ülkemizde yapılan *ilk çalışmadır*.

Oksijence zengin hava ortamında yanma ve oksiyanma çalışmalarında kullanılan bu kömürlerin özellikleri Bölüm 4, Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'de verilmiştir. Bu çizelgelerden de görüleceği gibi, kömürler birbirinden bir hayli farklı özelliklere sahiptir. Orhaneli kömürü genel olarak Soma linyitinden daha kaliteli bir kömürdür. Ancak bu kömürün kükürt miktarı Soma linyitine kıyasla daha yüksektir.

Yakma deneylerinin gerçekleştirilmesinde Bölüm 3.6'da belirtilen çalışma yöntemi uygulanmıştır. Buna göre kömür yanma deneylerine önce havayla başlatılmış, sistem kararlı hale gelinceye kadar buna devam edilmiştir. Kararlı koşullara ulaşıldıktan sonra, oksijence zengin havayla yanma ve oksiyanma deneylerine geçilmiştir. Oksiyanma çalışmaları Bölüm 4.4.3'de tartışılmıştır.

Oksijence zengin hava (OZH) ile yapılan yakma deneyleri için akışkanlaştırma ve yanma için kullanılan hava içerisine önceden belirlenen oranlarda oksijen beslenmiştir. Böylece atmosferik oranın (%21) üzerinde ve değişik oranlarda oksijen içeren oksijence zengin hava akışkan yatağa beslenmiştir. Çalışmalarda havadaki oksijen oranı %21 ile %28 arasında ayarlanmıştır. Hava ve OZH ile gerçekleştirilen yakma deneylerinin koşulları Çizelge 4.20'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin havayla ve oksijence zengin havayla yapılan deneylerin koşulları.

	Orhaneli (L15)	**Soma (L19)**
Linyit tanecik boyutu (mm)	1-2	1-2
Linyit besleme hızı (kg/sa)	4-5	7-8
Hava besleme şekli	Tümü birincil hava	Tümü birincil hava
Hava besleme debisi (Nm^3/sa)	32-33	26-31
Yakma havasındaki oksijen oranı (%)	21-27	21-28
Deney süresi (saat)	8	9

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda tartışılmıştır.

Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksijence Zengin Hava Ortamında Yanma Sürecinde Sıcaklık Dağılımı

Oksijence zengin hava ile yakma deneyleri değişik işletme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bunun için çalışmalar sırasında hava fazlalık katsayısı (HFK) ve oksijence zengin havadaki oksijen yüzdesinin kömürlerin yanma süreçlerine olan etkileri incelenmiştir. Havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde olduğu gibi, OZH ile gerçekleştirilen deneylerde de deney süresince akışkan yatak içerisinde eksen boyunca sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Akışkan yatakta sıcaklık dağılımı yanmanın kalitesi ve kararlılığı hakkında önemli bilgiler içerebilmektedir. Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin havayla ve OZH ile gerçekleştirilen yanma deneyleri sırasında akışkan yatakta ölçülen sıcaklık dağılımları Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Şekillerdeki sıcaklıklar kararlı yanma koşullarında ölçülen sıcaklıkları göstermektedir. Yanma deneyleri değişik hava fazlalık katsayılarıyla (λ) ve oksijen yüzdeleriyle gerçekleştirilmiştir. Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitleri için hava fazlalık katsayısı sırasıyla 1.05-1.20 ve 1.10-1.40 aralığında ve ±0.02 sapmayla değiştirilmiştir. Oksijen yüzdeleri ise Orhaneli ve Soma için sırasıyla %21-%27 ve %21-28 aralığında değişmiştir. Havayla gerçekleştirilen yanma deneyleri sırasında, yakıcı ekseni boyunca ortaya çıkan sıcaklık profili, diğer kömürlerin yanma süreçlerinde (bkz. Bölüm 4.4.1) ortaya çıkan profillere benzer olmuştur. Yani, Şekil 4.25a ve Şekil 4.25b'de de görüldüğü gibi, dağıtıcı elekten itibaren yukarıya doğru gidildikçe sıcaklıklar önce yükselmekte, bir maksimumdan geçtikten sonra reaktör çıkışına doğru kademeli olarak azalmaktadır. Böylece yakıcıda termal açıdan kabaca 3 bölge ortaya çıkmaktadır: **1.** Dağıtıcı elekten itibaren yaklaşık h = 50-60 cm yüksekliğe kadar uzanan ve sıcaklığın ortalama yatak sıcaklığı altında kaldığı *alt*

bölge, **2.** Sıcaklığın ortalama yatak sıcaklığı üstünde kaldığı, maksimuma ulaştığı ve h = 50-300 cm arasında yer alan *orta bölge*, **3.** Sıcaklıkların ortalama yatak sıcaklığına yakın olduğu ancak yakıcı çıkışına doğru kademeli olarak azaldığı ve h = 300 ile reaktör çıkışı arasında yer alan *üst bölge*. Ancak burada belirtilen bölgelerin keskin sınırlarla birbirinden ayrılmadığı, sistemin çalışma koşullarına ve kömürün tipine bağlı olarak bölge sınırlarının değişebileceği gözden kaçırılmamalıdır. Bu bölgelerle ilgili ayrıntılı değerlendirmeler Bölüm 4.4.1'de yapılmıştır.

Şekil 4.25a ve Şekil 4.25b gözden geçirildiğinde, kömürün tipine bağlı olarak sıcaklık seviyelerinde farlılıklar görülmesine karşın, hava fazlalık katsayısındaki değişmenin her iki kömür için de sıcaklık dağılımı profilini çok fazla etkilemediği ve yukarıda sözü edilen 3 farklı bölgenin açık bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Orhaneli linyitinin yanması sırasında sistem 800-820 °C aralığında kararlı bir şekilde çalışmıştır. Bu durum uygulanan bütün HFK'de seviyelerinde devam etmiştir. Soma linyitinin yanma sürecinde ise sıcaklıklar biraz daha düşük olmuştur. Bu kömür yanma sırasında bütün koşullarda (HFK'da) yanma 770-805 °C aralığında kararlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Her iki kömür için de en yüksek sıcaklıklar kömür besleme noktasının üstündeki 150-200 cm yükseklikteki bölgede, en düşük sıcaklıklar ise yakıcının çıkışında ölçülmüştür. Bölüm 4.2'de de belirtildiği gibi akışkan yataklarda sıcaklık dağılımı kullanılan yakıtın özellikleri ve operasyon koşulları tarafından etkilenebilmektedir. Kömürün kül içeriği, ısıl değeri, aşınma (attrition) ve parçalanma (fragmantation) gibi özellikleri sıcaklık dağılımında farklılıklara neden olabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan Soma kömürü, Orhaneli kömürüne kıyasla %37 daha düşük alt ısıl değere sahiptir. Sıcaklık dağılımındaki homojenlik derecesi Soma kömürü için biraz daha düşüktür. Ancak homojenlik dereceleri arasındaki farkın, ısıl değerler arasındaki farktan bir hayli düşük olduğu da gözden kaçırılmamalıdır. Bu da ısıl değerin sıcaklık dağılımına etkisinin bu kömürler için sınırlı olduğunu göstermektedir.

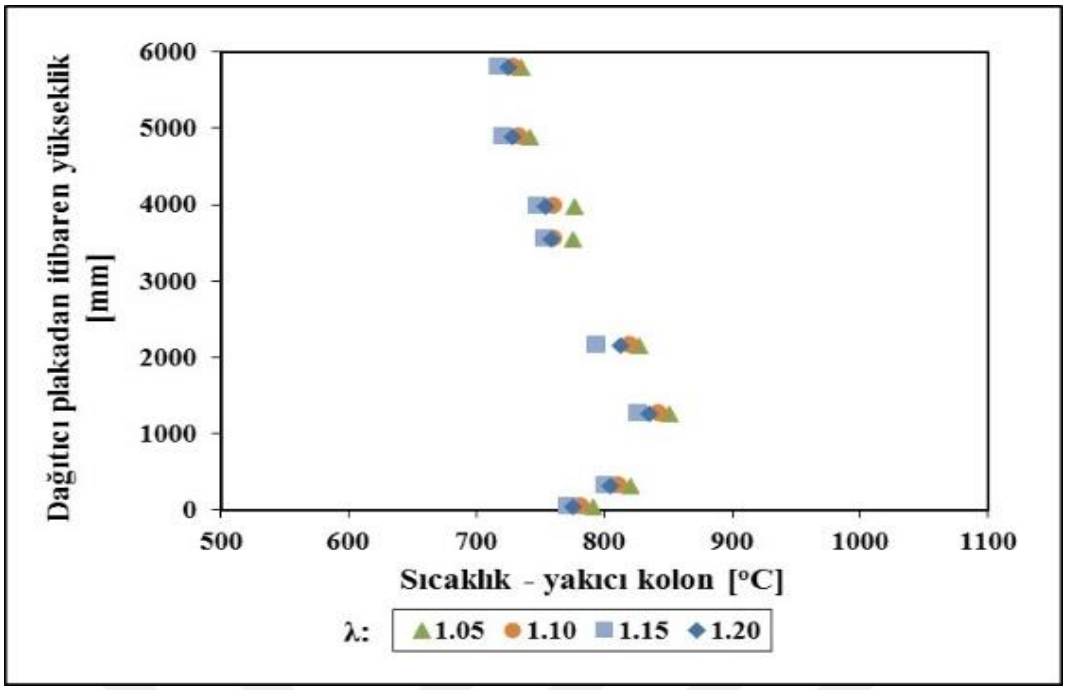
Sıcaklık dağılımındaki homojenlik derecesi (ΔT_{AY}) olarak tanımlanan en yüksek ve en düşük sıcaklıklar arasındaki fark Orhaneli ve Soma linyitleri için sırasıyla yaklaşık 106-110 ^{o}C ve 100-130 ^{o}C aralığında değişmiştir. Bu durum, sıcaklık dağılımı açısından iki kömür arasında önemli bir fark olmadığının her iki kömür için de görece homojen bir sıcaklık dağılımının gerçekleştiğine işaret etmektedir. Yanma sürecinde daha yüksek ısıl değere sahip Orhaneli kömürü için, Soma kömürüne kıyasla, kömür

besleme noktasının hemen üstündeki bölgede sıcaklıkların biraz daha (~30-40°C) yüksek seviyelere çıktığı görülmektedir. Bu da sıcaklık dağılımında homojenliği olumsuz etkilemiştir. Fakat bu sıcaklıklar, bu kömürler için kararlı ve güvenli yanma için en üst sıcaklık sınırları olarak görmemek gerekiyor. Söz konusu kömürlerle oksiyanma koşullarında gerçekleştirilen yanma deneylerinde yatak sıcaklığı 950 °C' a kadar çıkmış ve bu seviyelerde yanma kararlı bir şekilde sürdürülebilmiştir. Bölüm 4.2'de belirtildiği gibi, kömürlerin güvenli yanma sınırları kömürlerin kül ergime sıcaklıkları tarafından belirlenmektedir. Yatak (operasyon) sıcaklığı = 950 °C temel alındığında, güvenlik marjı ($\Delta T_{güvenlik}$) Orhaneli için $\Delta T_{güvenlik}$ = ~180 °C ve Soma için $\Delta T_{güvenlik}$ = ~40 °C civarında olduğu tahmin edilmektedir. Bu durum, bu seviyedeki bir operasyon sıcaklığında Soma kömürü için güvenlik marjının bir hayli dar olduğunu ortaya koymaktadır.

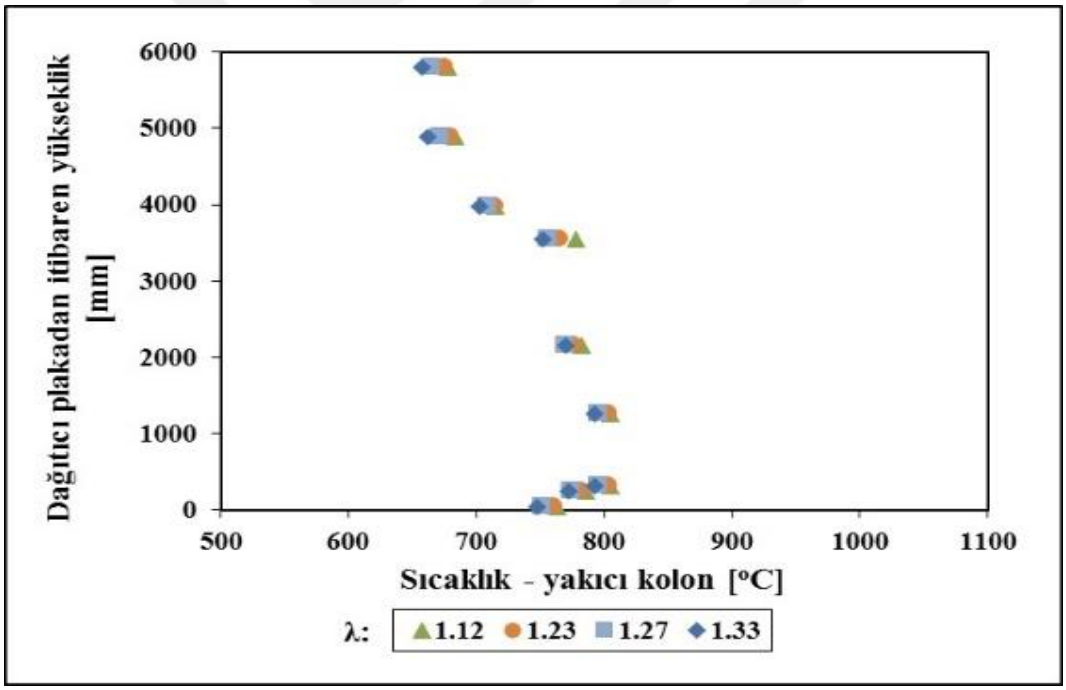
Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin oksijence zengin hava (OZH) ortamında gerçekleşen yanma süreçlerinde yakıcıda oluşan sıcaklık profilleri sırasıyla Şekil 4.25 c ve Şekil 4.25 d'de görülmektedir. Oksijence zengin hava ortamında elde edilen sıcaklık dağılımının hava ortamında elde edilen sıcaklık dağılımından bir hayli farklı olduğu görülmektedir. Her iki linyit için sıcaklığın maksimuma ulaştığı bölgeler dağıtıcı plakadan itibaren 30-1250 cm yüksekliğe doğru kaymıştır. Yani kömürün yanması kömür besleme noktasının bulunduğu (h = 50 cm) dağıtıcı elek yakın bölgelerde yoğunlaşmış görünmektedir. Bölüm 4.2'de de belirtildiği gibi, bütün yanma deneylerinde (hava, oksijence zengin hava ve oksiyanma koşullarında) yanma için kullanılan hava, OZH ve CO_2-O_2 karışımının tümü birincil gaz olarak hava odası ve dağıtıcı plaka vasıtasıyla yanma odasına beslenmiştir, bunların beslenmesinde herhangi bir kademelendirmeye gidilmemiştir. Bu nedenle, oksijence zengin hava ortamından kömürün beslendiği bölge (h = 50 mm) ve hem üstündeki bölgelerde daha yoğun bir yanma ve ısı salınımı gerçekleşmektedir. Şekil 4.25'de görüldüğü gibi, oksijence zengin hava ortamında gerçekleşen yanma süreçlerinde sıcaklık dağılımı, hava ortamında gerçekleşen yanma süreçlerine kıyasla daha kötüdür. Bu durum oksijence zengin hava ortamında ölçülen maksimum sıcaklık farkları (ΔT_{yatak}) tarafından da ortaya konulmuştur. Orhaneli ve Soma kömürleri için yakıcıda ölçülen ΔT_{yatak} değerleri sırasıyla 100-215 °C ve 120-190 °C olmuştur. Bu değerler hava ile gerçekleşen yanma süreçlerinde ölçülen ΔT_{yatak} değerlerinden bir hayli yüksektir. ΔT_{yatak}' nın kömür besleme noktasının hemen üstündeki bölge ile yakıcının çıkış

noktası arasındaki sıcaklık farkı olduğu göz önüne alındığında, oksijen oranın en yüksek olduğu yakıcının alt bölgesinde daha hızlı ve yoğun bir yanmanın gerçekleştiği ve bunun sonucunda daha az miktarlarda kömürün yakıcının üst bölgelerinde ulaşarak buralarda yandığı anlaşılmaktadır. Bu durum alt ve üst bölgeler arasında daha büyük sıcaklık farklarının oluşmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, sıcaklık profilleri yakma sisteminin bu çalışmalar sırasında test edilen maksimum çalışma sıcaklığı olan 950 °C gibi yüksek sıcaklıklarda kararlı bir halde çalışabileceğini göstermektedir. Oksijence zengin hava ortamında gerçekleşen yanma süreçlerinde yakıcıda oluşan sıcaklık profilinin yanma havasındaki O_2 oranı tarafından da etkilendiği anlaşılmaktadır. Deneylerde yanma havasındaki O_2 derişimi % 21 ile % 28 arasında değiştirilmiştir. Şekil 4.25 c ve 4.25 d' de görüldüğü gibi, yakma havasındaki oksijen miktarı artıkça, yanma yoğunluğu yakıcının alt bölgelerinde gittikçe artmış, üst bölgelerinde ise azalmıştır. Bu da yatak içinde sıcaklık gradyenin büyümesine, başka bir ifadeyle sıcaklık dağılımının kötüleşmesine neden olmuştur. Örneğin Orhaneli kömürü için hava ortamında (%21 O_2) 130-140 °C civarında olan ΔT_{yatak}, O_2 oranı %27 olduğunda 240 °C' a kadar yükselmiştir. Soma kömürü için de benzer bir durum söz konusudur. ΔT_{yatak} büyüdükçe yanma, başka bir ifadeyle sistemin çalışma kararlılığının bozulması olasılığı artmaktadır.

Şekil 4.25'de görüldüğü gibi, hava ve oksijence zengin hava ortamında gerçekleşen yanma süreçlerinde elde edilen sıcaklık profilleri benzer olsa da, oksijence zengin hava ortamında yakıcıdaki sıcaklıklar daha yüksek olmuştur. Orhaneli kömürünün yanma sürecinde yakıcıda ulaşılan maksimum sıcaklık havayla 850 °C civarında iken, oksijence zengin hava ortamında 880 °C olmuştur. Soma kömürü için havayla yanma sürecinde ölçülen en yüksek sıcaklık 810°C olmuştur. Oksijence zengin havayla yanma koşullarında bu sıcaklık 900°C'ın üstüne çıkmıştır.

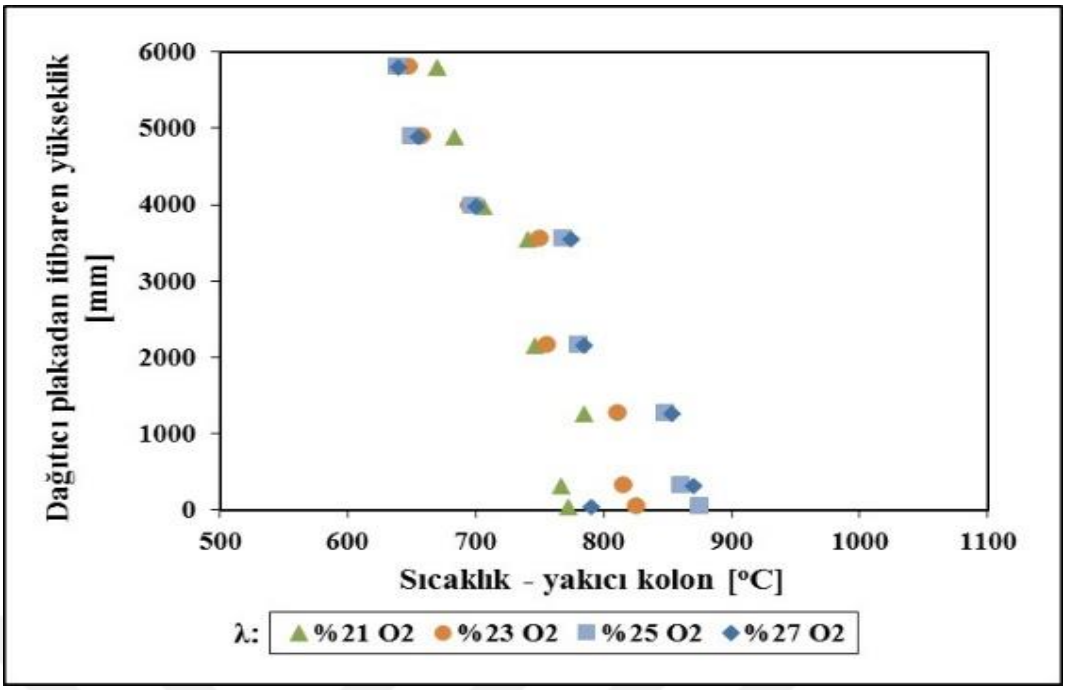


a)

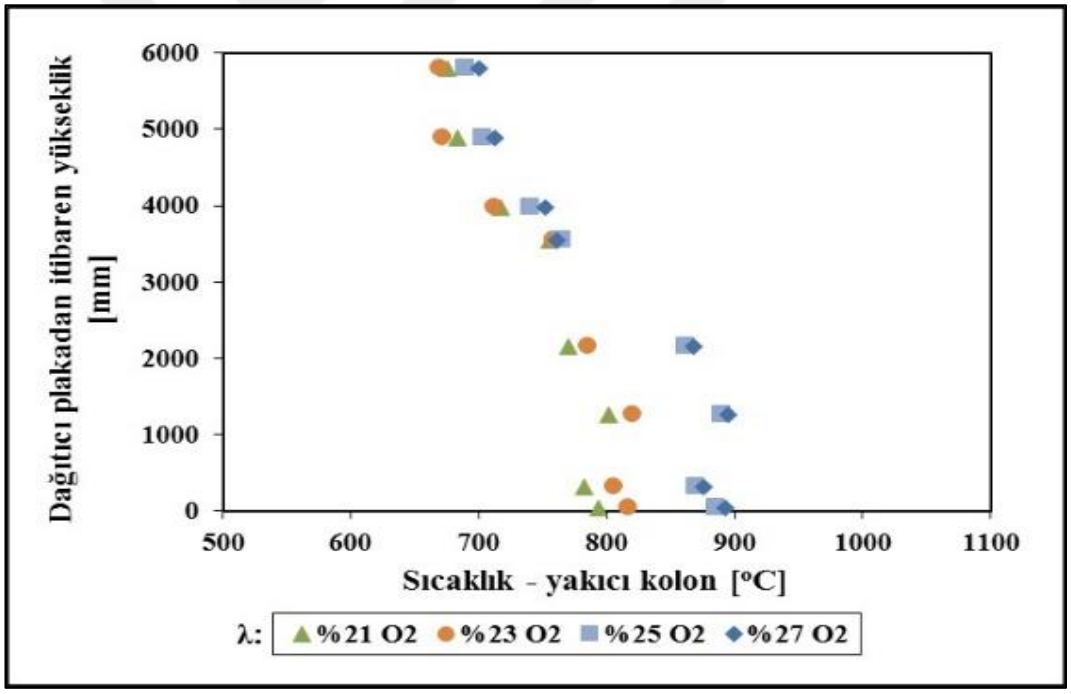


b)

Şekil 4.25 : Hava ve oksijence zengin hava ortamında akışkan yatakta sıcaklık dağılımları, a) Orhaneli kömürü, havayla yakma, b) Soma kömürü, havayla yakma, c) Orhaneli kömürü, oksijence zengin hava ortamında yakma, d) Soma kömürü, oksijence zengin hava ortamında yakma.



c)



d)

Şekil 4.25 (devam) : Hava ve oksijence zengin hava ortamında akışkan yatakta sıcaklık dağılımları, a) Orhaneli kömürü, havayla yakma, b) Soma kömürü, havayla yakma, c) Orhaneli kömürü, oksijence zengin hava ortamında yakma, d) Soma kömürü, oksijence zengin hava ortamında yakma.

Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksijence Zengin Havayla Yanma Sürecinde Emisyonlar

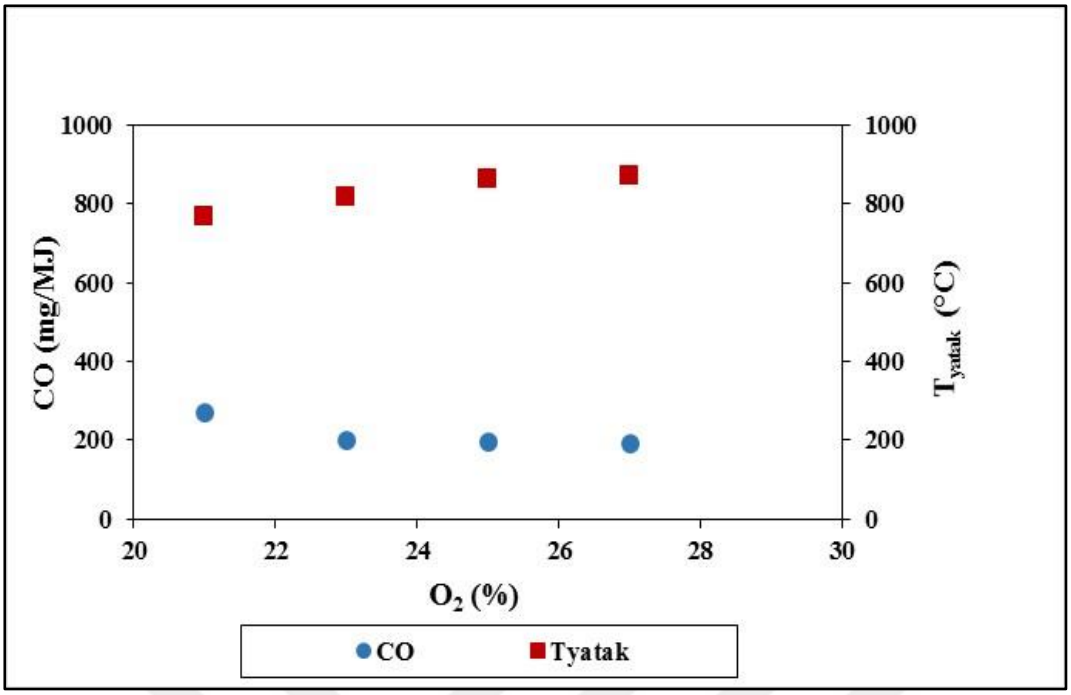
Bu bölümde Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin hava (OZH) ile gerçekleştirilen yanma süreçlerinde ortaya çıkan emisyonlar tartışılacaktır. Bölüm 4.4.1'de de belirtildiği gibi, düşük kaliteli kömürlerin akışkan yatakta yakılmaları sonucunda çevreye olan etkilerini incelemek amacıyla CO, NO_X and SO_2 gibi ana kirletici emisyonları ölçülmektedir. Ölçülen kirleticilerin derişimleri standart sıcaklık ve basınçta ve baca gazında %6 O_2 temel alınarak mg/MJ olarak sunulmuştur. Sunulan bu emisyon değerleri, kararlı yanma koşullarında yaklaşık 9 saat süren deneyler süresince yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak bulunan değerlerdir. Deneyler havayla yapılan yakma çalışmalarında değişik hava fazlalık katsayıları ve oksjence zengin havayla yapılan deneylerde ise değişik oksijen oranları için tekrarlanarak, hava fazlalık katsayısı ve oksijen oranının emisyonlara olan etkisi araştırılmıştır. *Hava fazlalık katsayısı* birincil hava debisi sabit tutularak kömür besleme hızının değiştirilmesi suretiyle ayarlanmıştır. Havadaki oksijen oranı ise yakma havasının içerisine oksijen eklenerek artırılmıştır. Bu kömürlerin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde ortaya çıkan emisyonlar ve hava fazlalık katsayısının emisyonlara olan etkileri Bölüm 4.4.1'de tartışılmıştı. Burada kömürlerin oksijence zengin hava ortamında gerçekleştirilen yakma deneyleri sırasında açığa çıkan emisyonlar tartışılacaktır.

Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksijence Zengin Havayla Yanma Sürecinde CO ve CO_2 Emisyonları

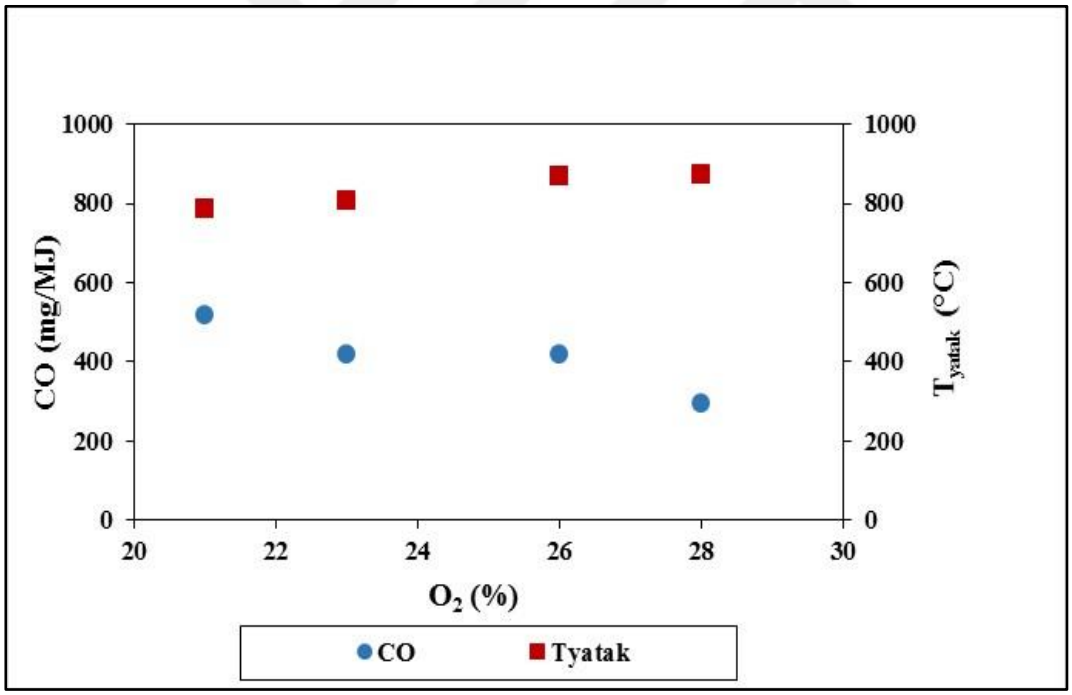
Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin oksijence zengin havayla yanma süreçlerinde ölçülen CO ve CO_2 emisyonları sırasıyla Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de oksijen oranının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Orhaneli linyitinin oksijence zengin hava ortamında yanma deneylerinde oksijen oranı %21-27 aralığında değişirken, Soma linyitinde %21-28 aralığında değişmiştir. Şekillerde %21 O_2 oranı hava ortamını göstermektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, en yüksek CO emisyonları her iki kömür için de %21'lik O_2 oranı, başka bir ifadeyle havayla yapılan deneyler sırasında ölçülmüştür. Havadaki oksijen miktarı artıkça, yine her iki kömür için geçerli olmak üzere, CO emisyonu gittikçe azalmıştır. Bu durum yanma sürecinin temel

prensipleriyle uyum içerisindedir. Şekillerden görüleceği gibi, oksijen miktarındaki artışa paralel olarak, ortalama yatak sıcaklığı da bir miktar artmıştır. Oksijen miktarı ve sıcaklıktaki artışların her ikisi de yanma verimini artıran faktörlerdir. Bilindiği gibi, yakma ortamındaki oksijen miktarı artıkça kömür taneciklerinin yanma verimi artmakta ve tam yanma gerçekleşmektedir. Bu da eksik yanma ürünü olan CO miktarının düşmesine yol açmaktadır. Nitekim oksijen miktarı artıkça CO_2 emisyonu, CO emisyonunun tersine ve beklendiği üzere, artmıştır. Şekil 4.26'da görüldüğü gibi, Orhaneli kömürünün yanması sırasında baca gazında %21 O_2 (hava) için yaklaşık 270 mg/MJ ölçülen CO miktarı, oksijen derişimindeki artışa bağlı olarak azalmış ve %27 O_2 için 190 mg/MJ'a kadar düşmüştür. Bu yaklaşık %30'luk bir azalma anlamına gelmektedir. Şekil 4.27 incelendiğinde ise CO_2 emisyonunun da, CO miktarındaki azalmayla uyumlu bir şekilde aşağı yukarı aynı oranda arttığı görülmektedir. Benzer bir eğilim Soma linyiti için de geçerlidir. Ancak Soma linyiti için CO seviyesinin, Orhaneli kömürüne kıyasla, genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu kömür için de, oksijen miktarı %21'den %28'e çıkınca, baca gazındaki CO derişimi yaklaşık %43 azalarak 520 mg/MJ'den 295 mg/MJ seviyesine kadar inmiştir. Her iki linyit için de, oksijen seviyesi %23'e ulaştıktan sonra CO oksijen seviyesindeki düşme yavaşlamaktadır. Ancak bu düşmenin derecesi kömüre bağlı olarak değişmektedir.

Bütün emisyonlarda olduğu gibi, CO emisyonları da hem kömürün özellikleri hem de yanma koşulları tarafından etkilenebilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada gözlenen emisyon seviyelerinin bu çalışmanın koşullarında oluşan seviyeler olduğu ve koşullar değiştikçe değişebileceği gözden kaçırılmamalıdır. Burada havadaki O_2 değişimine bağlı olarak emisyonlarda ortaya çıkan değişim eğilimi veya yönü önemlidir.



a)

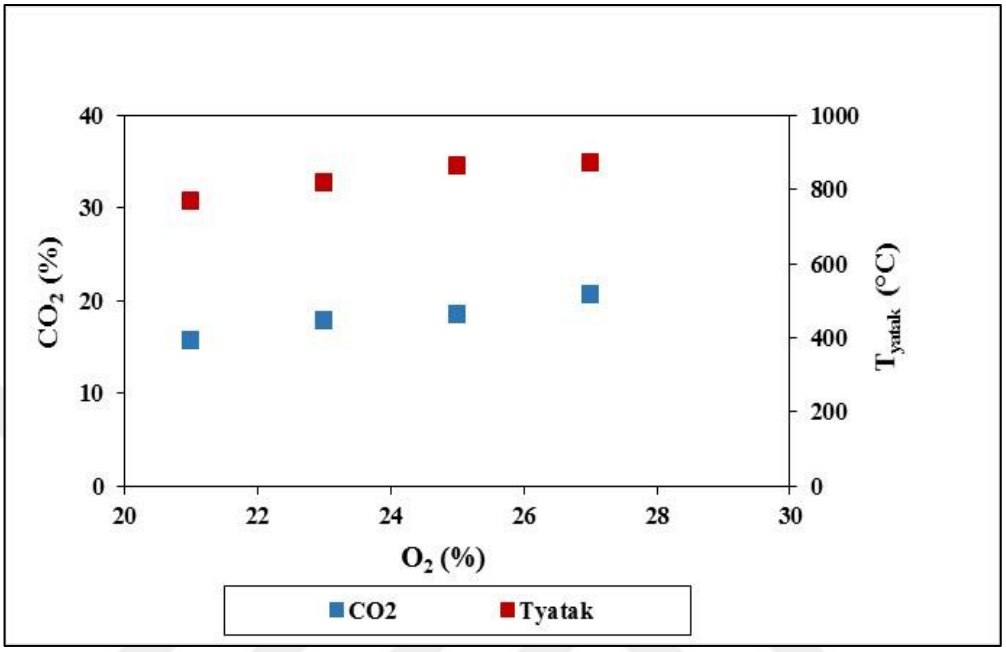


b)

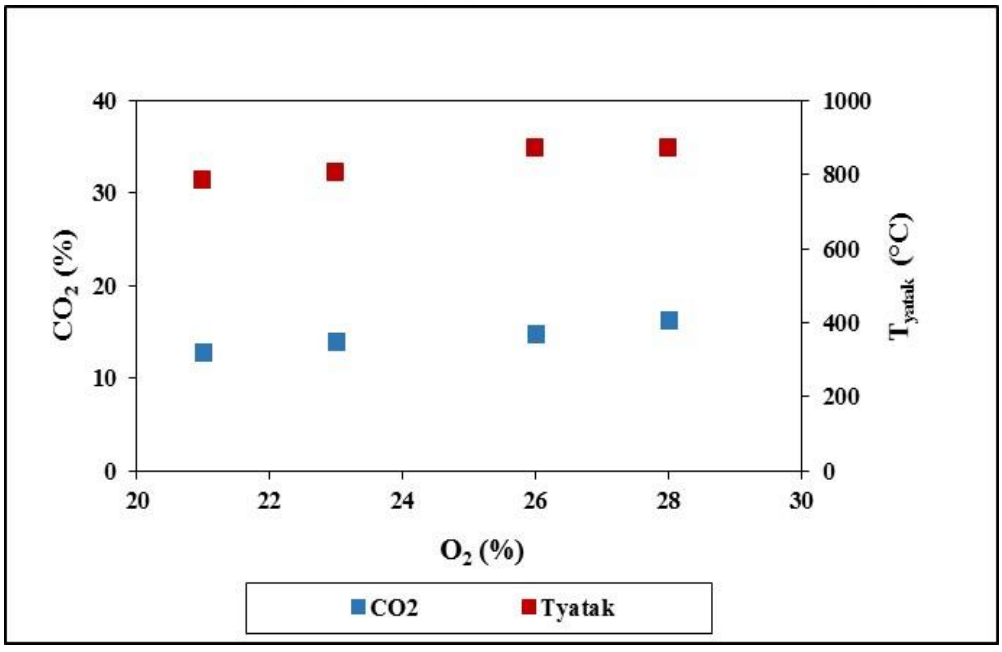
Şekil 4.26 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde açığa çıkan CO emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).

Şekil 4.27'de görüldüğü ve yukarıda da değinildiği gibi, baca gazlarındaki CO_2 miktarı yakma havasındaki oksijen miktarı artıkça, yanma kalitesinin/veriminin

yükselmesinden dolayı artmıştır. Baca gazlarındaki CO_2 miktarı havayla yanmada Orhaneli linyiti için %16, Soma linyiti için %13 civarında seyrederken, yakma havasındaki O_2 miktarı artınca artmış ve Orhaneli linyiti için %21, Soma linyiti için %16'ya kadar çıkmıştır.



a)



b)

Şekil 4.27 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde açığa çıkan CO_2 emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).

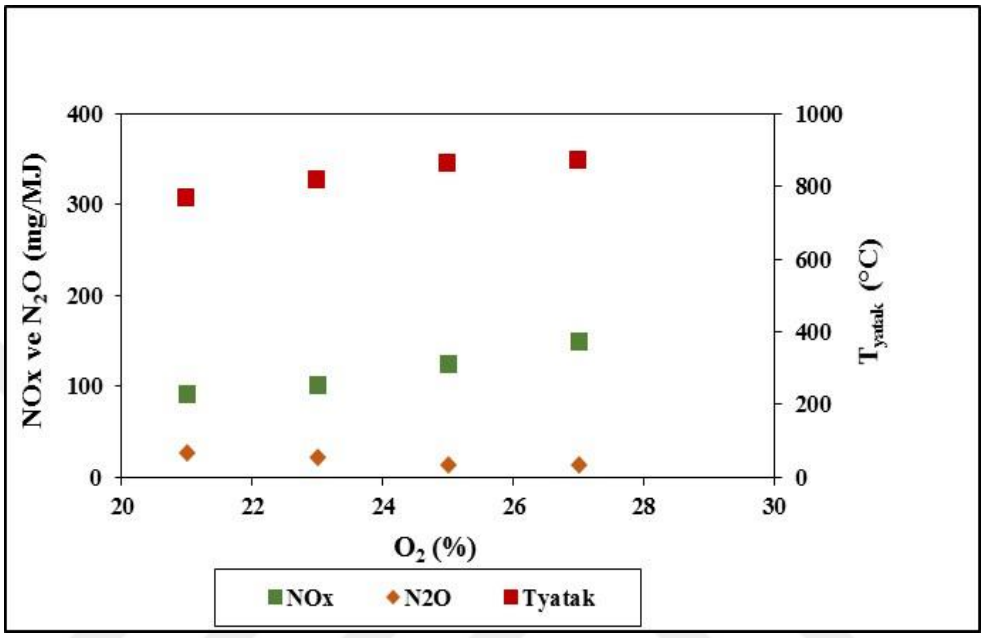
Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksijence Zengin Havayla Yanma Sürecinde NOx Emisyonları

Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin oksijence zengin havayla yanma süreçlerinde salınan NOx ve N_2O emisyonları Şekil 4.28'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, her iki kömür için de NOx emisyonu, havadaki oksijen miktarındaki artışa paralel bir artış eğilimi içinde olmuştur. Ancak kömürler için bu artış oranları farklılık göstermiştir. Havadaki oksijen derişimi %21'den %27'ye çıkarıldığında NOx emisyonu Orhaneli (L15) linyiti için %66'lık bir artışla 90 mg/MJ'den 150 mg/MJ civarına, Soma (L19) linyiti için ise %33'lük bir artışla 150 mg/MJ'den 200 mg/MJ'e yükselmiştir. Spma linyitinin oksijen yüzdesi %28 oranına kadar yükselmiştir. Oksijen oranının %28 olduğu durumda NOx emsiyonu 210 mg/MJ'e yükselmiştir. Bütün bu değerlerin yaklaşık değerler olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte bu deneysel veriler yakma havasındaki oksijen seviyesindeki değişme bağlı olarak NOx emisyonlarında ortaya çıkan değişimdeki genel eğilimi açık bir şekilde ortaya koyabilmektedir.

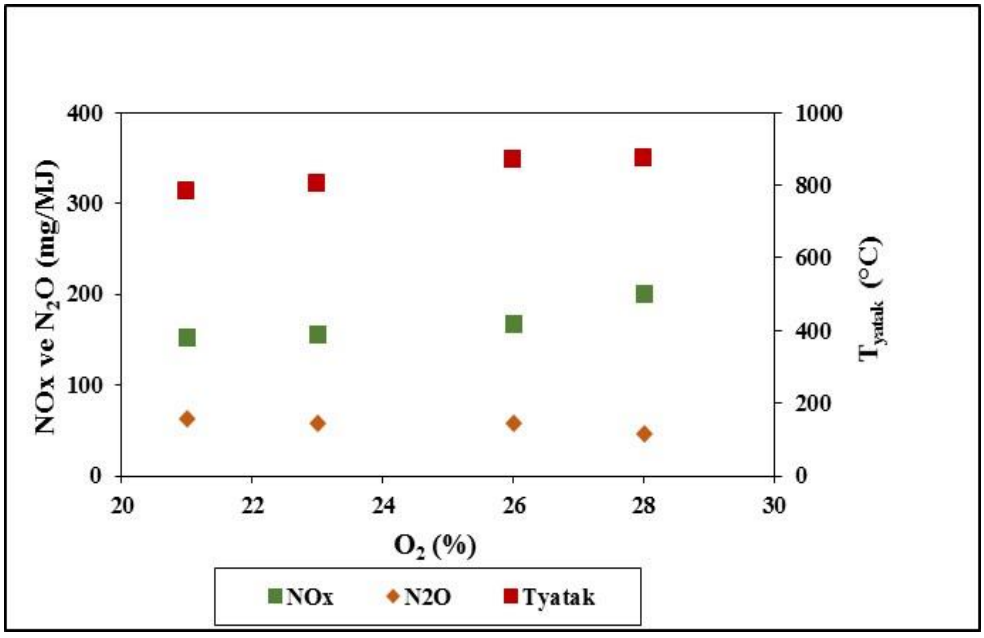
Linyitlerin azot içerikleri (Çizelge 4.2) ile açığa çıkan NOx emisyonları karşılaştırıldığında, azot içerikleriyle NOx emisyonları arasında tutarlı bir ilişki görülmemektedir. Kuru temelde, Orhaneli kömürünün azot içeriği (%0.97), Soma kömürünün azot içeriğinden (%0.84) yüksek olmasına rağmen, NOx emisyonları açısından tersi bir durum söz konusudur. Öte yandan, linyitlerin kuru külsüz temelde azot içerikleri karşılaştırıldığında ise tam tersi bir durumla karşılaşılmaktadır. Kuru külsüz temelde Orhaneli linyitinin azot içeriği %1.21, Soma linyitinin azot içeriği ise %1.47 olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda kömürlerin azot içerikleriyle ile NOx emisyonları arasında bir paralellik ortaya çıkmaktadır. Yani azot içeriği yüksek olan kömürün yanma sürecinde NOx emisyonu da yüksek olmaktadır. Kömürlerin havayla yanma sürecinde ortaya çıkan NOx emisyonlarıyla kömürün özellikleri arasındaki ilişkiler, çeşitli faktörlerin bu emisyonlara olan etkileri ile NOx ve CO emisyonları arasındaki ilişkiler konusunda Bölüm 4.4.1'de literatürdeki veriler, görüşler ve tartışmalar ışığında ayrıntılı bir değerlendirilme yapılmıştır. Bu değerlendirmeler oksijence zengin hava ortamında gerçekleşen kömür yanma süreçlerindeki NOx emisyonları ve bunların CO emisyonlarıyla etkileşimleri için de geçerlidir.

Öte yandan, şekillerden açık bir şekilde görüldüğü gibi, oksijen seviyesindeki artışa bağlı olarak NOx ile CO emisyonlarında meydana gelen değişimler birbirleriyle zıt yönde gerçekleşmiştir. Başka bir ifadeyle, yanma havasındaki oksijen miktarı artıkça NOx

emisyonu artma, CO emisyonu ise düşme eğilimi içinde olmuştur. Çalışmada elde edilen bu deneysel sonuçlar oksijence zengin hava ortamında kömürün yakılması konusunda daha önce yapılan ve literatüre yansıyan çalışmaların sonuçları ile uyum içinde olmuştur (Liu ve diğ, 2005; Shaddix ve Molina, 2011; Lupianez ve diğ, 2013; Stadler ve diğ, 2011; Fan ve diğ, 2010).



a)



b)

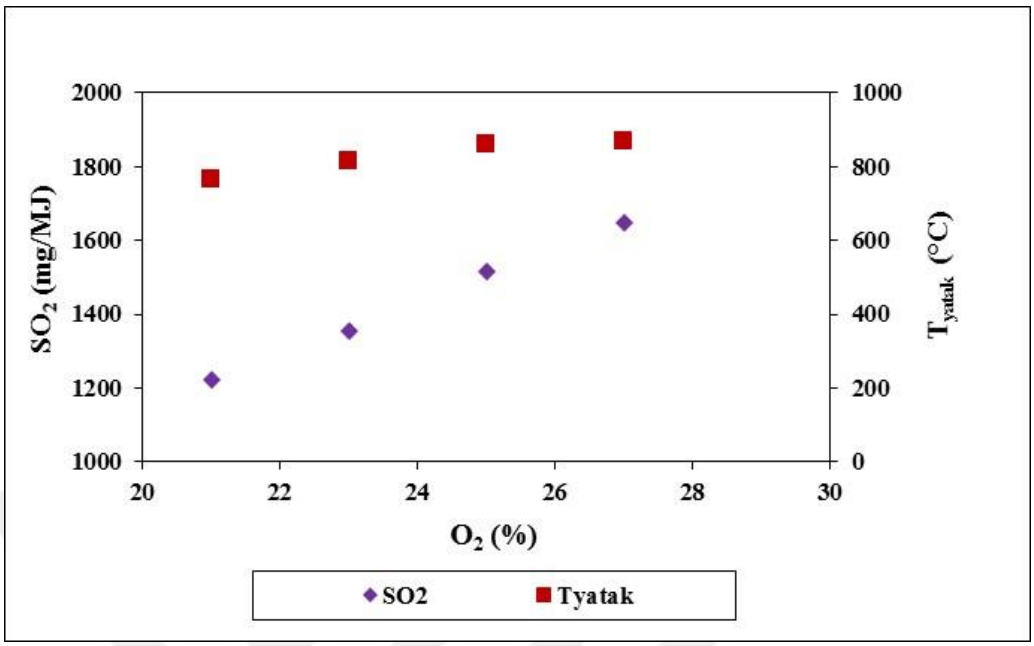
Şekil 4.28 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).

Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksijence Zengin Havayla Yanma Sürecinde SO_2 Emisyonları

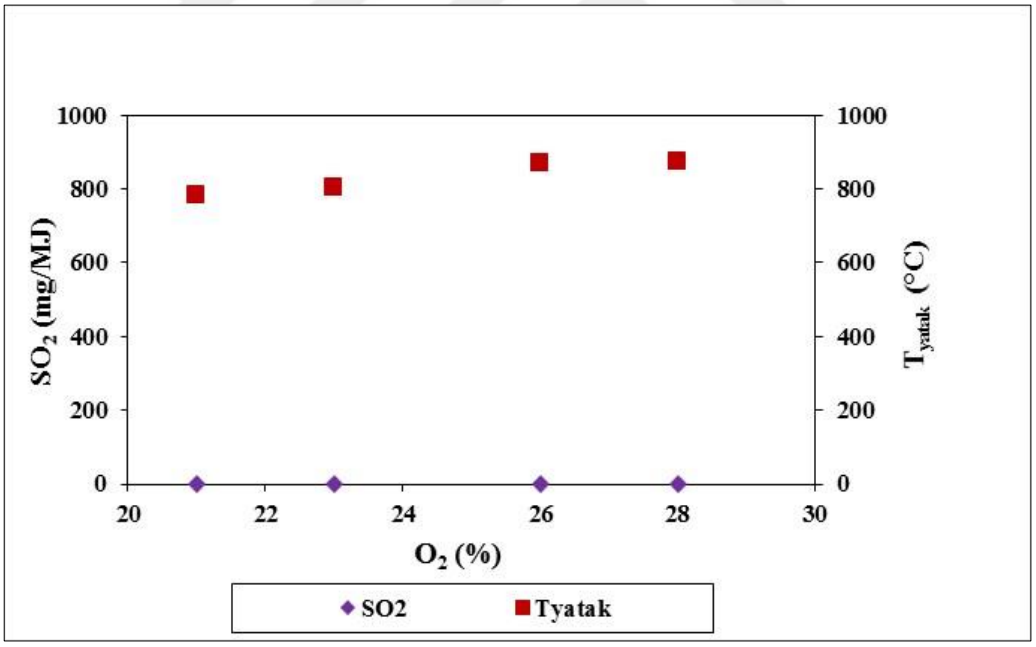
Orhaneli ve Soma linyitlerinin oksijence zengin havayla yanma süreçlerinde ortaya çıkan kükürt dioksit (SO_2) emisyonları Şekil 4.29'da sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde, SO_2 emisyonları arasında iki kömür arasında önemli bir farklılığın olduğu dikkati çekmektedir. Orhaneli (L15) kömürü için baca gazlarında 1223-1650 mg/MJ aralığında değişen miktarlarda SO_2 emisyonu gözlenmişken, Soma (L19) kömürünün yanması sırasında baca gazlarındaki emisyon ölçülmeyecek derecede düşük olmuştur. Orhaneli ve Soma kömürlerinin toplam kükürt miktarları kuru temelde sırasıyla %2.2 ve % 0.73 oldukları göz önüne alındığında SO_2 emisyonlarının linyitlerin kükürt içerikleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Havayla yapılan deneylerde, bazı kömürlerin yanması sırasında baca gazlarında kükürt ölçülemediği belirtilmiş ve bunun olası nedenleri, literatür verileri ışığında, değerlendirilmişti (bkz. Bölüm 4.4.1 SO_2 Emisyonu). Orada da belirtildiği gibi, kömürdeki kükürt miktarının düşük ve/veya küldeki alkali oksit ($Na_2O+K_2O+CaO+Fe_2O_3$) miktarlarının yüksek olması durumunda SO_2 emisyonları çok düşük seviyelerde kalabilmektedir. Bu oksitlerden özellikle CaO ve Fe_2O_3'in kükürt oksitleri tutmada önemli rol oynadıkları belirtilmektedir (Liang ve diğ., 2016). Burada kullanılan Orhaneli ve Soma kömürlerinin külleri sırasıyla yaklaşık %37 ve %27 oranında $CaO + Fe_2O_3$ içermektedir (Çizelge 4.3). Buna karşın, Soma kömürünün kuru temelde kül miktarı (%43) Orhaneli kömürünün (%9.3) kül miktarından yaklaşık 4.6 kat daha yüksektir. Bunun yanı sıra Soma kömürünün kükürt içeriği Orhaneli kömürünün içerdiği kükürdün yaklaşık 1/3'i seviyesindedir (Çizelge 4.2). Soma kömürünün yanması sırasında ortaya çıkan kükürt oksitlerin önemli bir miktarının kül tarafından tutulduğu anlaşılmaktadır.

Orhaneli kömürünün oksijence zengin havayla yanma süreci incelendiğinde havadaki oksijen derişimi arttıkça SO_2 emisyonu arttığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Oksijen derişiminin yüksek olduğu atmosferlerde karbon bazında daha iyi bir yanma gerçekleşmektedir. Dolayısıyla kömürün yanma verimindeki yükselmeye paralel olarak okside olan kükürt miktarı da artmaktadır. Bu bulgular Hu ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarıyla örtüşmektedir. Öte yandan kömürün yanması sırasında ortaya çıkan SO_2 miktarı operasyon sıcaklığındaki artışa bağlı olarak artmaktadır (Fleig ve diğ., 2011). Şekil 4.29 incelendiğinde, oksijen miktarı ve yanma sıcaklığının paralel

bir şekilde arttıkları görülmektedir. Bu durum SO_2 miktarının artmasına uygun bir ortam yaratmıştır.



a)



b)

Şekil 4.29 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma süreçlerinde açığa çıkan SO_2 emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).

4.4.3 Linyitlerin Oksiyanma Süreci

Bölüm 4.4.1 ve Bölüm 4.4.2'de linyit kömürlerinin dolaşımlı akışkan yatakta *hava* ve *oksijence zengin hava* atmosferinde yanma süreçleri incelenmişti. Bu bölümde Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin *oksiyanma* koşullarında yanmalarıyla ilgili olarak yapılan deneylerin sonuçları sunulup tartışılacaktır. Giriş bölümünde de belirtildiği gibi, oksiyanma (oxy-fuel combustion), son yıllarda gelişen ve kömürün yanmasını ve CO_2 tutmayı bir arada gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen bir teknolojidir. Böylece, kömüre dayalı elektrik üretimini, CO_2 emisyonları radikal bir şekilde azaltarak, daha temiz bir şekilde gerçekleşmesini mümkün kılabilmektedir (Stanger ve diğ., 2015). Oksiyanmada, kömür hava yerine O_2/CO_2 karışımıyla yakılmaktadır. Bunun için baca gazları belirli oranlarda geri döndürülerek O_2 ile karıştırılmakta ve yakma odasına beslenmektedir. Karbon dioksitin etkin bir şekilde tutulması ve uzaklaştırılabilmesi/taşınabilmesi için baca gazındaki CO_2 oranının mümkün olduğu kadar yüksek olması istenmektedir (>%60). Bu çalışma, kömürün dolaşımlı akışkan yatakta (DAY) oksiyanma koşullarında yakılması konusunda ülkemizde yapılan ilk çalışmadır.

Kömürlerin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma deneyleri Bölüm 3.6 (Deney Prosedürü) belirtildiği yöntemle yürütülmüştür. Kısaca yanma deneyleri önce havayla başlatılmış ve kararlı yanma koşullarına ulaşılması beklenmiştir. Daha sonra yakma havası kademeli olarak azaltılmış ve geri döndürülen *baca gazı+oksijen* karışımıyla yer değiştirmiştir. Böylece yanma *O_2/N_2 (hava)* yerine *O_2/CO_2 karışımıyla* devam etmiştir. Deneylerde baca gazı %70 oranında geri döndürülmüş ve oksijen-baca gazı karışımının tümü, diğer deneylerde olduğu gibi, yine dağıtıcı elek vasıtasıyla yanma bölgesine gönderilmiştir. Oksiyanma çalışmalarında, oksijen miktarının yanma sürecine olan etkilerini incelemek amacıyla *O_2/CO_2* karışımındaki oksijen oranı değiştirilmiştir. Yakma gazındaki oksijen oranı *oksijen fazlalık katsayısıyla* (λ_{O2}) ifade edilmiştir:

$$\lambda_{O2} = \frac{\text{Yakıcıdaki Oksijen Derişimi (\%)}}{\text{Yakıcıdaki Oksijen Derişimi(\%)} - \text{Baca gazındaki Oksijen Derişimi(\%)}} \qquad (4.10)$$

Bu çalışmada, dolaşımlı akışkan yatakta gerçekleştirilen oksiyanma çalışmaları *oksijen ve geri döndürülen baca gazı (DBG) karışımlarıyla* (O_2/DBG) ile

gerçekleştirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirilmesi sırasında uygulanan çalışma koşulları Çizelge 4.21'de görülmektedir.

Çizelge 4.21 : Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin oksiyanma deneylerinin koşulları.

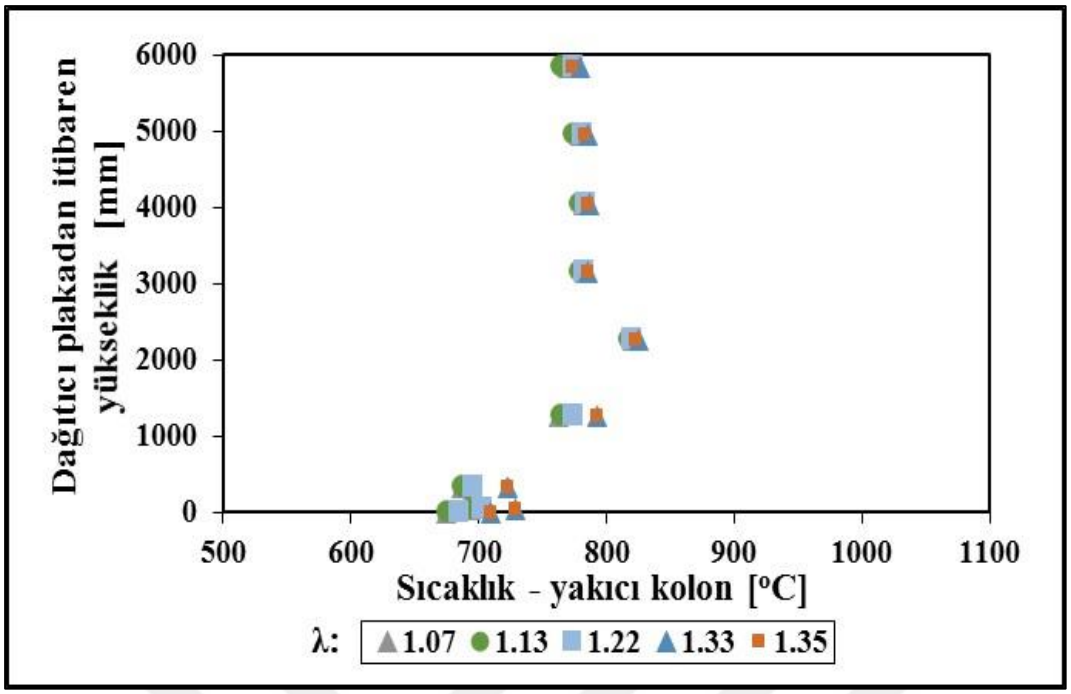
	Koşullar
Linyit tanecik boyutu (mm)	1-2
Linyit besleme hızı (kg/sa)	4
Hava besleme şekli	Tümü birincil hava
DBG oranı (%)	70
Deney süresi (saat)	8

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda tartışılmıştır.

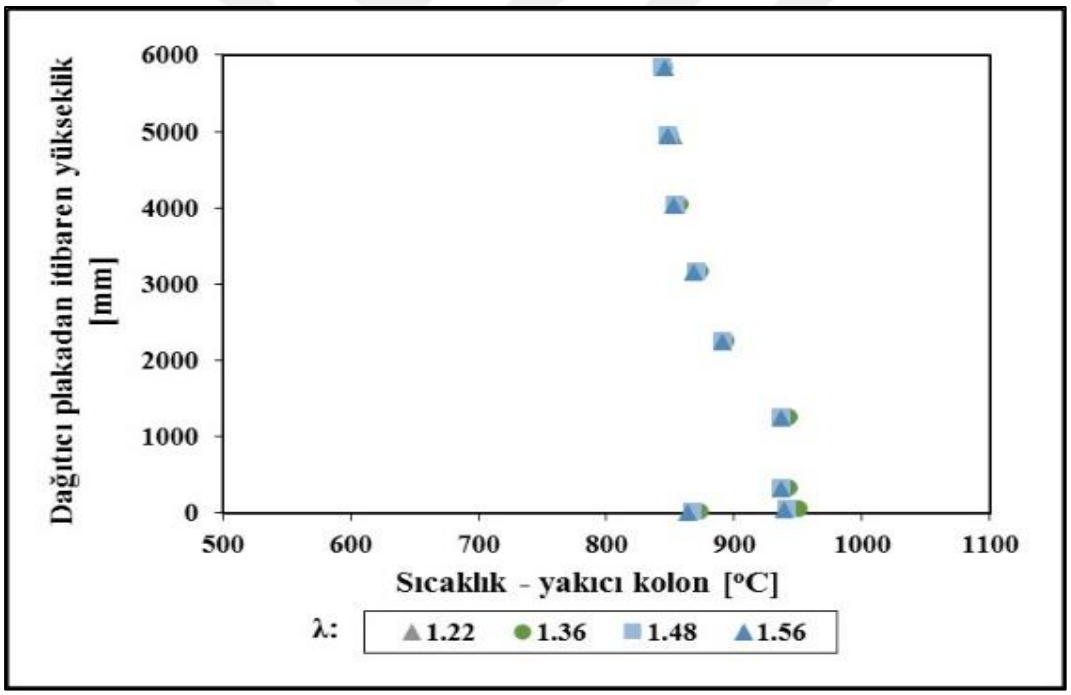
Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksiyanma Sürecinde Yakıcıda Sıcaklık Dağılımı

Kömürlerin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma deneyleri Bölüm 3.6 (Deney Prosedürü) belirtildiği yöntemle yürütülmüştür. Havayla ve oksijence zengin havayla yapılan deneylerde olduğu gibi bu deneylerde de yakıcı içerisinde sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.30'da sunulmuştur. Çalışmalarda kullanılan iki kömürün oksiyanma süreçlerinden ortaya çıkan sıcaklık profilleri çok benzer olduğu için burada her iki kömürü temsil eden tek bir şekil verilmiştir. Oksiyanma sıcaklık profilleri, hava ve oksijence zengin havayla gerçekleştirilen yanma deneylerinde görülen sıcaklık profillerine benzer olmuştur. Özetle, dağıtıcı elekten itibaren sıcaklıklar önce artmakta (Alt bölge: h = 0-50 cm), bir maksimumdan (Orta bölge: h = 50-150 cm) geçtikten sonra tekrar kademeli olarak düşmektedir (Üst bölge: h >150 cm). Ancak oksiyanma koşullarında orta bölge daralmış, üst bölge genişlemiş görünmektedir. Havayla ve OZH ile yanma süreçlerine kıyasla yanma bölgesinde daha homojen sıcaklık dağılımı gerçekleşmiş görünmektedir.

Yanma süreci değişik oksijen oranlarında yürütülmüştür. Yanma gazlarındaki oksijen miktarı, daha önce de belirtildiği gibi, oksijen fazlalık katsayısıyla (λ_{O2}) tanımlanmıştır. Deneyler sırasında λ_{O2} = 1.22-1.56 ±0.02 aralığında değiştirilmiştir. Şekil 4.30'da görüldüğü gibi, incelenen aralıkta, oksijen miktarındaki değişiklik sıcaklık profilinde ve sıcaklık seviyelerinde önemli bir değişiklik yaratmamıştır.



a)



b)

Şekil 4.30 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta, oksiyanma koşullarında gerçekleşen yanma sürecinde sıcaklık dağılımı, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).

Oksiyanma sürecinde dikkati çeken diğer bir nokta ise sıcaklıkların yüksek seviyelerde seyretmesidir. Yakıcı içerisinde sıcaklık 950°C seviyelerine kadar çıkmıştır. Sıcaklıklar, hava ve oksijence zengin havayla yanma süreçlerine kıyasla ortalama 150-

160^{o}C daha yüksek olmuştur. Bu sıcaklık seviyelerinde, Bölüm 4.4.1 Yanma Sürecinin Kararlılığı ve Güvenliği Bölümü'nde belirtildiği gibi, kömürlerin kül ergime sıcaklıkları ile kömür taneciklerinin sıcaklıkları arasındaki fark (güvenlik marjı = $\Delta T_{güvenlik}$) bir hayli daralmaktadır. İki kömür için yakıcıda ölçülen maksimum sıcaklık gradyenleri ve güvenlik marjları ($\Delta T_{güvenlik}$) her üç yanma atmosferi için Çizelge 4.22'de kıyaslanmıştır. Çizelgedeki değerler, bu çalışmada uygulanan işletme koşullarında gözlenen yaklaşık değerlerdir ve operasyon koşullarının değişmesine bağlı olarak değişmeleri mümkündür. Bununla birlikte güvenlik marjının yanma atmosferinden nasıl etkilendiğini göstermesi açısından fikir vermektedirler. Çizelgeden görüldüğü gibi, oksiyanma koşullarında kömürlerin güvenlik marjları, diğer iki yanma rejimine göre bir hayli daralmış görünmektedir. Bu da sistemi agglomerasyona/sinterleşmeye karşı daha hassas bir hale getirmektedir. Bu durum oksiyanma koşullarında kararlı yanmanın sürdürülebilmesi için daha dikkatli davranılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.22 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin havayla yanma, oksijence zengin havayla yanma ve oksiyanma koşullarında, yatak içi maksimum sıcaklık gradyeni (ΔT_{AY}) ve güvenlik marjları ($\Delta T_{güvenlik}$).

	Yanma Süreci	**Orhaneli (L15)**	**Soma (L19)**
ΔT_{AY} (°C)[a]	Havayla yanma	106-110	100-130
	OZH[c] yanma	100-215	120-190
	Oksiyanma süreci	~100	~100
$\Delta T_{güvenlik}$ (^{o}C)[b]	Havayla yanma	~280	~180
	OZH[c] yanma	~250	~90
	Oksiyanma	~180	~40

[a] ΔT_{AY} : Yakıcıdaki maksimum sıcaklık gradyeni, [b] $\Delta T_{güvenlik}$: Güvenlik marjı,

[c] OZH: Oksijence zengin hava

Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksiyanma Sürecinde Emisyonlar

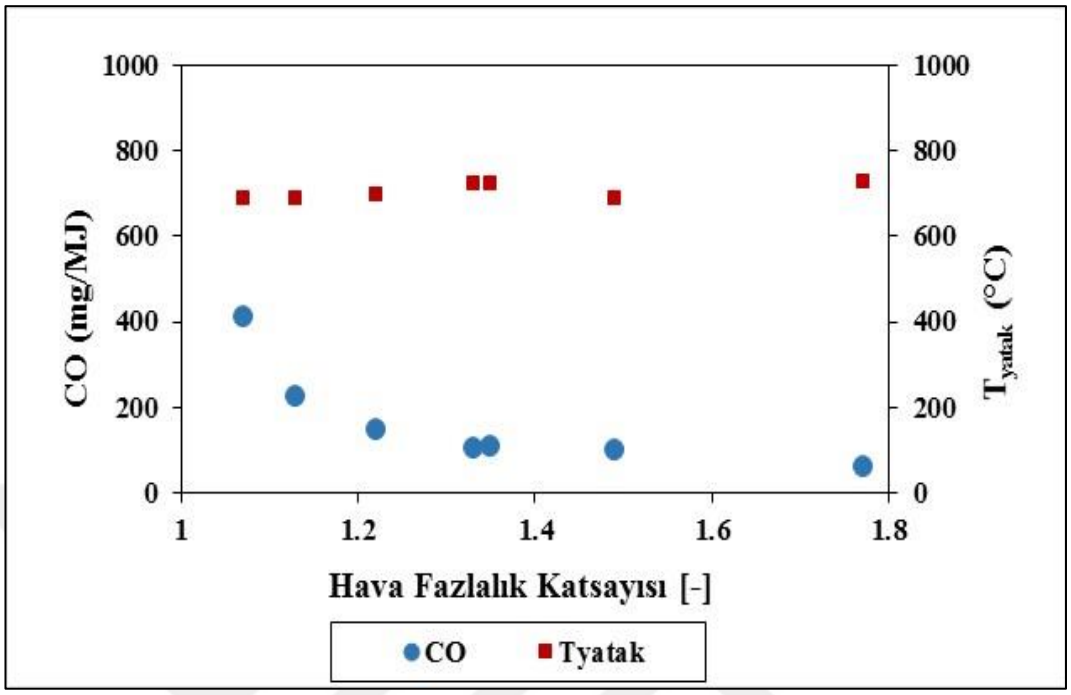
Bölüm 4.4.1 ve Bölüm 4.4.2'de Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta hava ve oksijence zengin hava (OZH) koşullarındaki yanma süreçleri incelenmişti. Bu bölümde ise yine aynı kömürlerin oksiyanma, yani hava (O_2/N_2 karışımı) yerine O_2/CO_2 karışımıyla yanma sürecinde ortaya çıkan ana kirletici (CO, CO_2, NOx, N_2O, SO_2) emisyonlarıyla ilgili elde edilen deneysel sonuçlar sunulacak ve incelenecektir. Emisyonlar *kuru baca* gazındaki %6 oksijen fazlalığı temel alınarak sunulmuştur.

Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksiyanma Sürecinde CO ve CO_2 Emisyonları

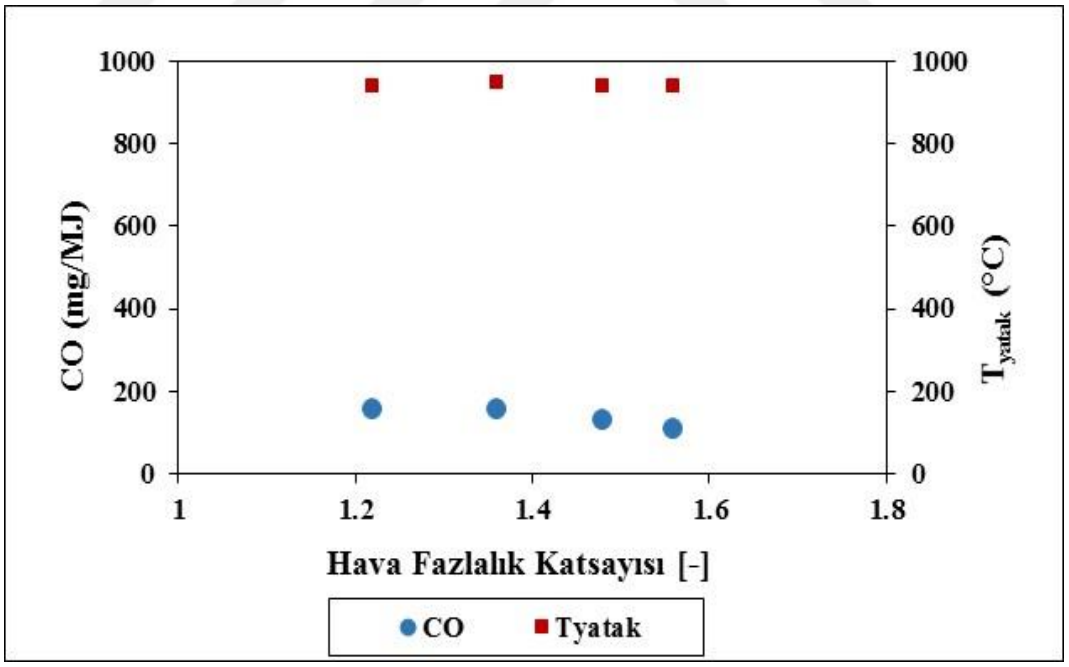
Orhaneli ve Soma linyitlerinin oksiyanma süreçlerinde gözlenen CO ve CO_2 emisyonları, sırasıyla, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Bu şekillerde oksijen fazlalık katsayısının (λ_{O2}) CO emisyonlarına olan etkisi de izlenebilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, CO emisyonu yakma gazındaki (O_2/CO_2) oksijen miktarı tarafından belirli ölçülerde etkilenebilmektedir. CO emisyonu her iki kömür için de, yakma gazındaki (O_2/CO_2) oksijen miktarındaki artışa bağlı olarak artmıştır. Diğer yanma süreçlerinde olduğu gibi, oksiyanma sürecinde de emisyonlar yalnız çalışma koşulları tarafından değil, kullanılan kömürün özellikleri tarafından da etkilenebilmektedir. Nitekim, baca gazlarındaki CO emisyonunun oksijen fazlalık katsayısı tarafından etkilenme derecesi bu çalışmalarda kullanılan iki kömür için de farklı olmuştur. Seviye açısından bakıldığında, CO emisyonu Orhaneli ve Soma linyiti için oksijen miktarına bağlı olarak sırasıyla 409 - 60 mg/MJ ve 156-104 mg/MJ aralığında değişmiştir. $\lambda_{O2} > 1$ olduğu koşullarda CO emisyonu her iki kömür için de 200 mg/MJ seviyelerinde seyretmiştir. Kömürlerin oksijence zengin hava (OZH) (Şekil 4.26) ve oksiyanma (Şekil 4.31) süreçleri CO emisyonları açısından kıyaslandığında oksiyanma sürecinde emisyonların her iki kömür için de daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Oksijence zengin hava ile yanma sürecinden oksiyanma sürecine geçildiğinde CO emisyonundaki düşme her iki kömür için de %60-70 seviyelerine kadar çıkmıştır.

Kömürlerin oksiyanma süreçlerinde baca gazlarındaki CO_2 oranının değişimi, Şekil 4.32'de görülmektedir. Bu şekilde baca gazındaki CO_2 miktarı, literatürdeki çalışma sonuçlarıyla kıyaslama açısından, baca gazının hacimsel yüzdesi şeklinde ifade edilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, yakma gazındaki (O_2+CO_2) oksijen oranındaki değişme baca gazındaki CO_2 miktarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Beklendiği gibi, O_2 miktarı artışına paralel olarak her ki kömür için de CO_2 miktarı hızla artmıştır. O_2 artışına bağlı olarak baca gazındaki CO ve CO_2 miktarlarında meydana gelen değişimler zıt yönde olmuştur. O_2 miktarı artıkça daha etkin bir yanma ortamı oluşmakta ve kömürlerin yanma verimi ve kalitesi yükselmektedir. Bu da tam yanma ile sonuçlanmaktadır. Şekillerden görüldüğü üzere, uygun koşullarda çalışması durumunda kömürlerin yanma süreçlerinde baca gazındaki CO_2 miktarı kuru temelde oldukça yüksek değerlere çıkabilmektedir. Örneğin, baca gazlarındaki CO_2 oranı λ_{O2}

≥ 1.4 olduğu koşullarda %90'nin üstüne, $\lambda_{O2} \geq 1.7$ olduğunda ise CO_2 derişimi %96 seviyesine çıkabilmiştir.

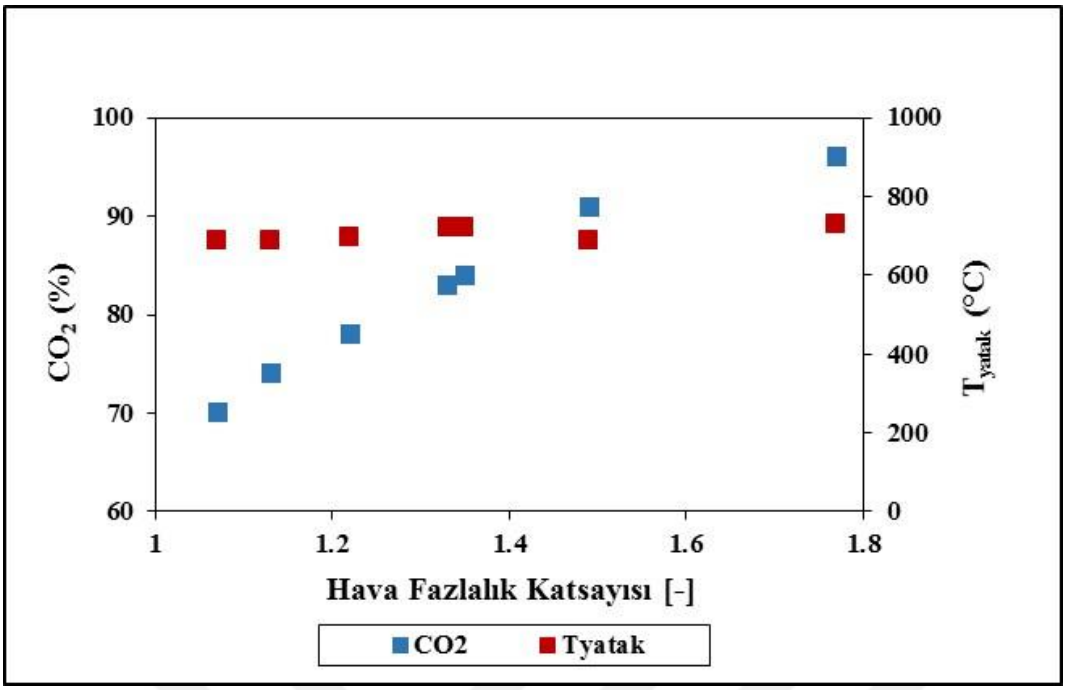


a)

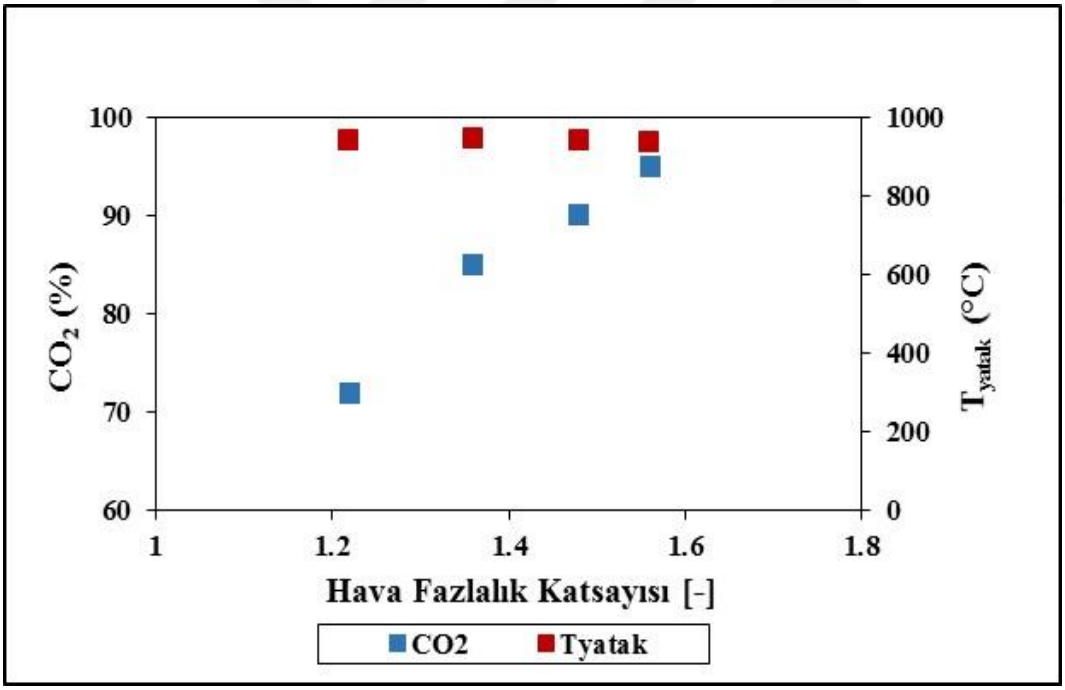


b)

Şekil 4.31 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan CO emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).



a)

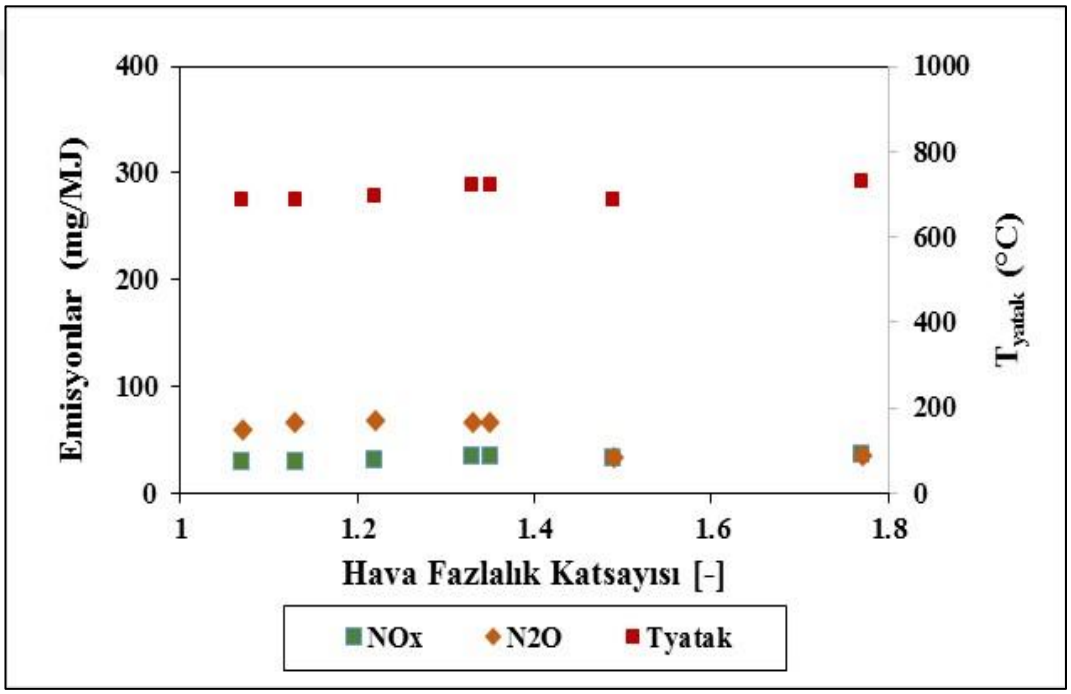


b)

Şekil 4.32 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan CO_2 emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).

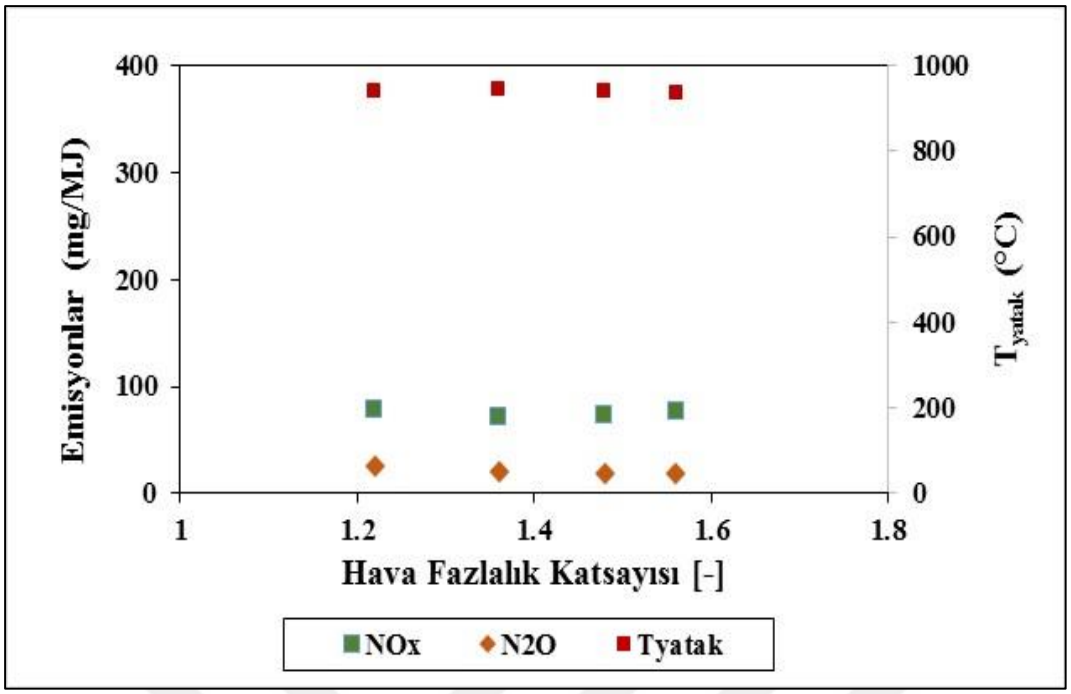
Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksiyanma Sürecinde NOx ve N_2O Emisyonları

Kömürlerin oksiyanma süreçlerinde baca gazında ölçülen NOx ve N_2O emisyonları Şekil 4.33'de verilmiştir. Şekillerden her iki kömür için de NOx emisyonunun, CO ve CO_2 emisyonlarının tersine, oksijen fazlalık katsayısındaki değişim tarafından çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Örneğin oksijen fazlalık katsayısı 1.0'den 1.7'e yükseltildiğinde, NOx emisyonu hafifçe değişerek 30 mg/MJ'den 36 mg/MJ'e yükselmiştir. Soma linyitinin yanma sürecinde ise benzer bir durum söz konusudur. Bu kömür için baca gazındaki NOx emisyonu 80 mg/MJ civarında hemen hemen sabit kalmış görünmektedir.



a)

Şekil 4.33 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).



b)

Şekil 4.33 (devam) : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan NOx ve N_2O emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).

Kömürlerin oksijence zengin hava (OZH) ortamında gerçekleştirilen yanma süreçleriyle (Şekil 4.28) oksiyanma yanma süreçleri (Şekil 4.33) kıyaslandığında, oksiyanma koşullarında açığa çıkan NOx emisyonlarının radikal bir şekilde düştüğü görülmektedir. Çizelge 4.23'de ise kömürlerin her üç yanma rejimi sırasında baca gazlarında ölçülen NOx emisyonlarının derişimi (mg/Nm^3) ve üretilen birim enerji başına miktarları (mg/MJ) kıyaslanmıştır. Çizelgedeki deneysel sonuçlar incelendiğinde, her iki kömür için de OZH havayla yanma sürecinde baca gazlarındaki NOx derişiminin (mg/Nm^3) diğer iki yanma süreçlerine göre görece daha yüksek seviyelere çıkabildiği görülmektedir. En düşük NOx derişimleri ise oksiyanma süreçlerinde gözlenmiştir. Birim enerji başına oluşan NOx miktarları (mg/MJ) gözden geçirildiğinde ise, yukarıda da belirtildiği gibi, yine en düşük NOx salınımları oksiyanma rejiminde görülmüştür. Havayla yanma ve OZH yanma süreçlerinde ölçülen NOx miktarları ise birbirlerine yakın olmuştur. Bu iki rejimde ölçülen NOx emisyonlarının sıralaması iki kömür için farklı olmuştur. Çizelgeden görüldüğü gibi, oksiyanma sürecinde NOx emisyonları, Orhaneli (L15) kömürü için, havayla ve OZH ile yanma süreçlerine kıyasla yaklaşık %82 ve %70 oranında daha düşük olmuştur.

Soma (L19) kömürü için ise bu oranlar yine sırasıyla %53 ve %59 civarında olmuştur.

Yanma süreçleri NOx emisyonları açısından şu şekilde sıralanmaktadır:

- NOx derişimi (mg/Nm^3): *OZH ile yanma > havayla yanma > Oksiyanma (O_2/DBG)*
- NOx miktarı (mg/MJ): *OZH ile yanma ≥ havayla yanma > Oksiyanma (O_2/DBG)*

Bu sonuçlar, daha önce yapılan ve literatüre yansıyan bazı çalışmaların sonuçlarıyla uyuşmaktadır (Okazaki ve Ando, 1997; Andersson ve diğ, 2008b; Normann ve diğ, 2009; Yoshii ve diğ, 2011; Hu ve diğ, 2016). Bu güne kadar yapılan çalışmalar, oksiyanma koşullarında gerçekleştirilen yanma süreçlerinde ortaya çıkan NO emisyonlarının havayla yanmada ortaya çıkanın kabaca 1/3'ü kadar olduğunu göstermektedir. Oksiyanma koşullarında NO emisyonun düşmesi aşağıdaki nedenlere bağlanmaktadır (Zhang ve diğ., 2011; De Diego ve diğ., 2013a) : **1.** Oksiyanmada, N_2'un CO_2 ile yer değiştirmiş olması hava ile yanma rejiminde görülen N_2'un termal yolla NOx'e dönüşmesi ortadan kaldırmaktadır/azaltmaktadır, **2.** Oksiyanma ortamındaki yüksek CO_2 derişimi, yakıttaki azottan NOx oluşumunu düşük alev sıcaklığından dolayı baskılamaktadır, **3.** Kömürle CO_2 arasında gerçekleşen gazlaşma yüksek miktarda CO ve hidrokarbonların oluşmasına yol açmaktadır. Bunların varlığı NO indirgenmesini artırmaktadır, **4.** Yakma bölgesine geri beslenen gazların içermiş olduğu NO etkin bir şekilde indirgenmektedir.

Çizelge 4.23 : Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin havayla yanma, oksijence zengin havayla yanma ve oksiyanma süreçlerinde ortaya çıkan NOx emisyonları.

	NOx (mg/Nm^3)			NOx (mg/MJ)			
Kömür	Havayla yanma	OZH yanma	Oksiyanma	Havayla yanma	OZH yanma	Oksiyanma	Değişim[b]
Orhaneli (L15)	177-353 (265)[a]	181-405 (293)[a]	20-38 (29)[a]	89-128 (108.5)[a]	92-150 (121)[a]	30-35 (32.5)[a]	82 ; 70
Soma (L19)	372-480 (426)[a]	327-986 (657)[a]	535-550 (543)[a]	185-247 (216)[a]	160-200 (180)[a]	76-78 (77)[a]	53 ; 59

a: Ortalama değerler, b: İlk değer oksiyanma sırasında açığa çıkan NOx emisyonunun havayla yanmaya göre değişimi, ikinci değer ise oksiyanma sırasında açığa çıkan NOx emisyonunun OZH yanmaya göre değişimini göstermektedir.

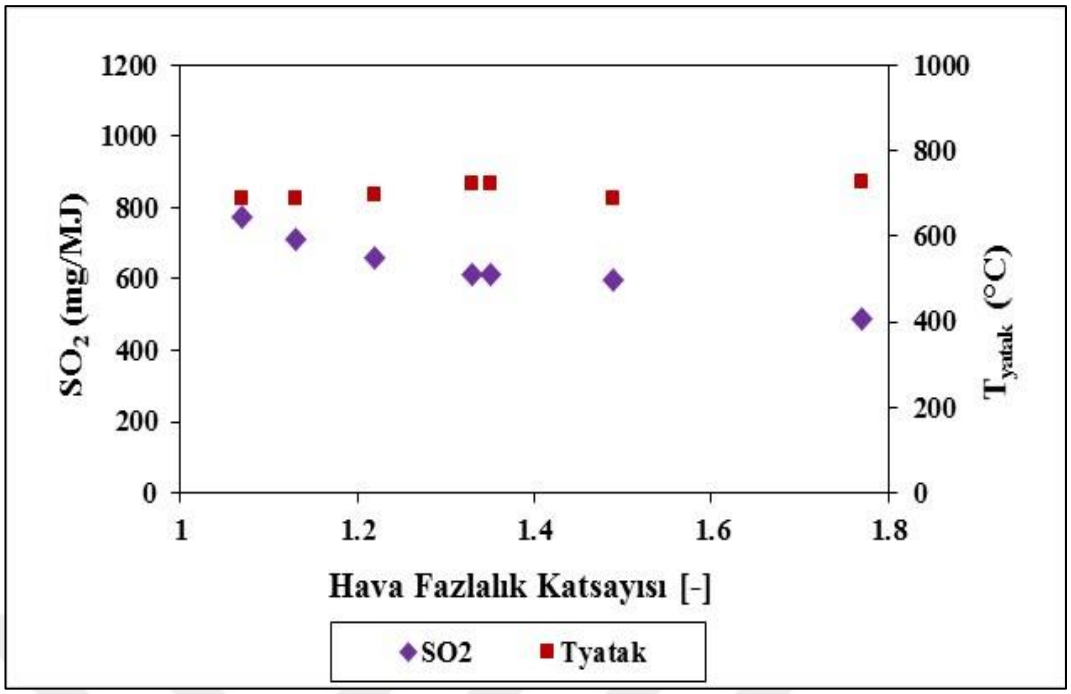
Pulverize kömür yakan 20 kW'lık dikey bir yakıcıda yapılan çalışmada % 30O_2/%70 CO_2 gaz karışımıyla yapılan oksiyanma çalışmasında, baca gazıyla geri döndürülen NO'ın %92'e varan oranlarda indirgendiği ve bunun havayla olan yanmaya göre daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Liu ve diğ, 2005). Düşen (Drop) tüp tipi bir fırında yapılan pulverize kömür yakma çalışmalarında O_2/CO_2 atmosferindeki NOx emisyonlarının, aynı O_2 derişimi için O_2/N_2 atmosferinde açığa çıkan NOx emisyonlarından %19-43 oranında daha düşük olduğu bildirilmiştir (Kazanç ve diğ, 2011; Hu ve diğ, 2016). Andersson ve diğ. (2008a) 100kW kapasiteye sahip bir pulvarize kömür yakma sistemi kullanarak yapmış oldukları çalışmada, baca gazını yakıcıya geri besleyerek kömürün oksiyanma koşullarında yanmasını sürecini incelemişlerdir. Araştırmacılar, havayla yanmaya kıyasla, oksiyanma sürecinde sisteme beslenen birim enerji başına NO emisyonlarının %70-75 oranında düştüğünü gözlemişlerdir. Bu durumun, oksiyanma koşullarında, yanma sırasında oluşan ve baca gazlarıyla yakıcıya geri beslenen NO'ın hava ortamına kıyasla daha büyük miktarlarda indirgenmesinden/tahrip edilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, %25-29 arasında değişen O_2 oranlarıyla yaptıkları çalışmada O_2'in NO emisyonlarına önemli bir etkide bulunmadığını da bildirmişlerdir. Pilot ölçekli bir kömür yakma sisteminde farklı atmosferlerde gerçekleştirilen yanmada NOx emisyonları incelenmiştir. Yanma; hava, O_2/CO_2 ve geri döndürülen ve oksijence zenginleştirilmiş baca gazlarıyla gerçekleştirilmiştir. Hava ve O_2/CO_2 ile yapılan çalışmalarda O_2 miktarı artıkça NOx emisyonlarının da arttığı gözlenmiştir. Döndürülen baca gazlarıyla yapılan yanmada ise, NOx emisyonlarının havayla yanmaya göre %40-50 oranında azaldığı belirlenmiştir. Geri döndürülen baca gazlarındaki NOx yayınımında meydana gelen düşmenin yalnızca geri döndürülen NOx indirgenmesinden kaynaklanmadığı, buna yakıttaki azotun NO'a dönüşmesinde meydana gelen azalmanın da katkıda bulunduğu öne sürülmüştür (Stadler ve diğ, 2011). 0.1 MW_{th} 'lık dolaşımlı akışkan yatak yakma sisteminde yapılan kömürün oksiyanma çalışmalarda yakma gazlarında oksijen fazlalığının düşük tutulmasının yakıttaki azotun dönüşümünü baskıladığı belirtilmektedir (Li, S. ve diğ, 2015). Kömürün oksiyanması sırasında, döndürülen baca gazının içermiş olduğu NO'nun önemli miktarlarda indirgendiği başka araştırmacılar tarafından da gözlenmiştir (Xu ve diğ, 2017).

Yine kömürlerin çeşitli yakma sistemlerinde oksiyanma koşullarında yakılması konusunda yapılan birçok çalışma, baca gazlarının geri döndürülmesiyle gerçekleştirilen oksiyanma süreçlerinde, yakıcının tasarımına, kömürün tipine ve çalışma koşullarına bağlı olarak, havayla yakmaya göre, NOx emisyonlarının %60-70 oranında düştüğü görülmüştür (Hu ve diğ, 2000, Liu ve diğ, 2005, Zhang ve diğ, 2011, De Diego ve diğ, 2013a).

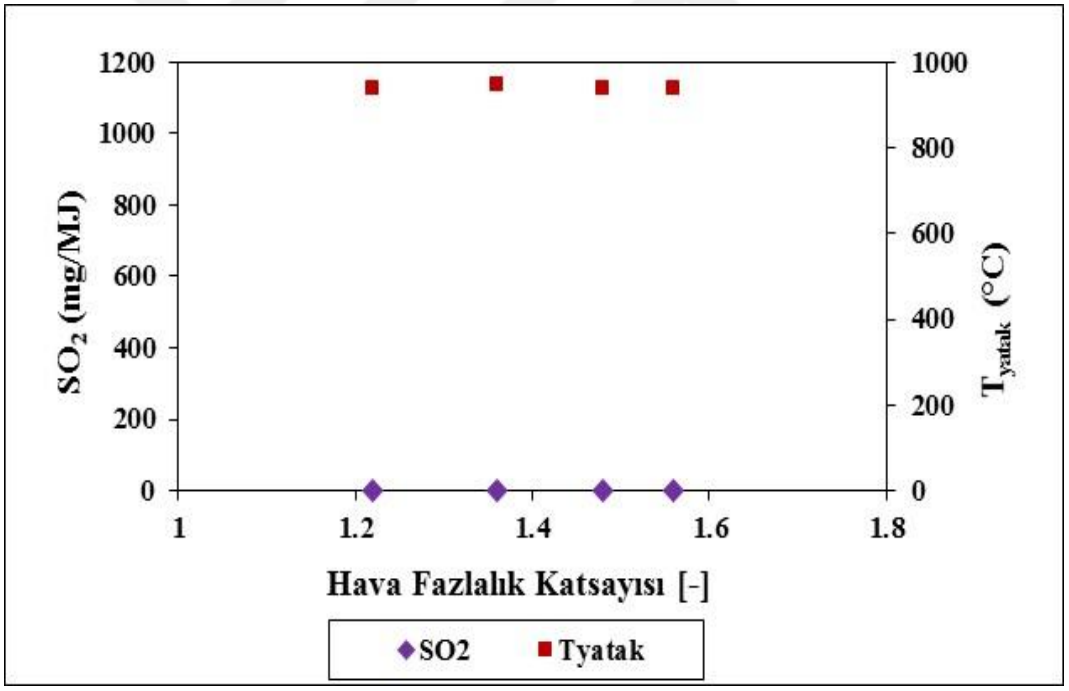
Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Oksiyanma Sürecinde SO_2 Emisyonları

Deneylerde kullanılan iki kömürün oksiyanma süreçleri boyunca kükürt dioksit (SO_2) emisyonları izlenmiştir. Bu kömürlerden Soma (L19) kömürünün yanması sırasında, aynı kömürün oksijence zengin havayla (OZH) yanma sürecinde olduğu gibi, gaz analiz sistemlerinin hassasiyeti içerisinde baca gazlarında SO_2 gözlenmemiştir. Bunun olası nedenleri Bölüm 4.4.2'de (OZH ortamında yakma) irdelenmiştir. O irdelemeler oksiyanma süreci için de geçerlidir.

Orhaneli (L15) kömürünün oksiyanma sürecinde baca gazlarında ölçülen SO_2 miktarları Şekil 4.34'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, üretilen birim enerji başına ortaya çıkan SO_2 miktarı, geri döndürülen baca gazındaki oksijen miktarı, başka bir deyişle oksijen fazlalık katsayısı (λ_{O2}) tarafından etkilenebilmektedir. Yine şekilde görüldüğü gibi, oksijence zengin yanma ortamında baca gazlarındaki SO_2 emisyon miktarı biraz daha düşük olabilmektedir. Stokiyometrik orana yakın O_2 seviyelerinde (λ_{O2}) 770 mg/MJ olan SO_2 miktarı, λ_{O2} = 1.8 olduğunda 490 mg/MJ seviyesine kadar düşmüştür.



a)



b)

Şekil 4.34 : Orhaneli ve Soma linyitlerinin dolaşımlı akışkan yatakta oksiyanma sürecinde açığa çıkan SO_2 emisyonları, a) Orhaneli (L15), b) Soma (L19).

İki kömürün *havayla yanma, OZH ile yanma* ve *oksiyanma (O_2/DBG)* süreçlerinde baca gazlarında ölçülen SO_2 miktarları Çizelge 4.24'de kıyaslanmıştır. Tabloda SO_2 emisyonu iki farklı şekilde ifade edilmiştir: **1.** Derişim şeklinde (mg/Nm^3), **2.** Üretilen

birime enerji başına ortaya çıkan miktar (mg/MJ). Daha önceki bölümlerde (Bölüm 4.4.1 ve Bölüm 4.4.2) belirtildiği gibi, Soma (L19) kömürü için her üç yanma süreci boyunca baca gazlarındaki SO_2 miktarı ölçülemeyecek derecede düşük olmuştur. Onun için çizelgede bu kömürle ilgili herhangi bir değer yazılmamıştır. Değerlendirmeler Orhaneli (L15) kömürü temel alınarak yapılacaktır. Literatürde emisyonun tarifine bağlı olarak, emisyonlarda farklı ve çelişkili eğilimlerin olabileceğine işaret edilmesine rağmen, bu çalışmada SO_2 emisyonları her iki tamım için, aşağıda görüldüğü gibi, benzer bir seyir izlemiştir.

- SO_2 emisyonu (mg/Nm^3): *OZH ile yanma >havayla yanma > Oksiyanma (O_2/DBG)*
- SO_2 emisyonu (mg/MJ): *OZH ile yanma >havayla yanma > Oksiyanma (O_2/DBG)*

Çizelge 4.24 : Orhaneli (L15) ve Soma (L19) linyitlerinin havayla yanma, oksijence zengin havayla yanma ve oksiyanma süreçlerinde ortaya çıkan SO_2 emisyonları.

	SO_2 (mg/Nm^3)			SO_2 (mg/MJ)			
Kömür	Havayla yanma	OZH yanma	Oksiyanma	Havayla yanma	OZH yanma	Oksiyanma	Değişim[b]
Orhaneli (L15)	3017-3095 (3056)[a]	3014-3330 (3172)[a]	1012-2264 (1638)[a]	1197-1556 (1377)[a]	1223-1650 (1437)[a]	490-770 (630)[a]	60 ; 58
Soma (L19)	-	-	-	-	-	-	-

a: Ortalama değerler, **b:** İlk değer oksiyanma sırasında açığa çıkan SO_2 emisyonunun havayla yanmaya göre değişimi, ikinci değer ise oksiyanma sırasında açığa çıkan SO_2 emisyonunun OZH yanmaya göre değişimini göstermektedir. **c:** Soma kömürünün yanması sırasında baca gazlarındaki SO_2 miktarı ölçülmeyecek kadar düşük olmuştur.

Ortalama SO_2 miktarları göz önüne alındığında, oksiyanma koşullarında baca gazlarındaki SO_2 derişiminin (mg/Nm^3) havayla yanmaya göre %46, OZH ile yanmaya göre %48 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Kömürlerin yanmasıyla üretilen birim enerji başına ortaya çıkan SO_2 miktarları açısından bakıldığında ise oksiyanma sürecindeki SO_2 miktarları havayla yanmaya göre yaklaşık % 58, OZH ile yanmaya göre ise %60 daha düşük olduğu dikkati çekmektedir.

Oksiyanma (O_2/DBG) koşullarında gerçekleştirilen yanma süreçlerinde baca gazlarındaki SO_2 derişimleri (mg/m^3) havayla yanma sürecine göre genel olarak daha yüksek olmaktadır. Bu durum, yakıcıya geri döndürülen baca gazlarındaki SO_2 ve bunun birikimli olarak artmasından kaynaklanmaktadır (Fleig ve diğ., 2011). Buna karşın, oksiyanma sürecinde ortaya çıkan SO_2 miktarları üretilen birim enerji başına (mg/MJ) ve kütlesel (kg) bazda çıkan SO_2 hesaplandığında ise tam tersi bir durum söz konusu olabilmektedir (Stanger ve Wall, 2011; Duan ve diğ., 2014; Li ve diğ., 2015). Oksiyanma sırasında salınan toplam kükürt miktarının (mg/MJ) genel olarak havayla yanma sürecinde salınan toplam kükürt miktarının 2/3 kadar olduğu, bunun geri döndürülen baca gazı (DBG) oranının artırılmasıyla çok az miktarda arttığı belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, oksiyanma sürecinde oluşan SO_3 miktarının ise havayla yanmaya göre 2.5-3 kat daha yüksek olduğu iddia edilmektedir (Wall ve diğ, 2009).Yani oksiyanma sürecinde baca gazlarında bulunan SO_2 miktarı, havayla yanmaya oranla daha düşük kalmaktadır. Bu durum aşağıda belirtilen nedenden kaynaklanabilmektedir (Fleig ve diğ, 2009; Fleig ve diğ, 2011; Stanger ve diğ, 2015, Tian ve diğ, 2016).

1. Oksiyanma sürecinde kömürdeki kükürdün SO_2'e dönüşüm oranlarının, havayla yanma süreçlerine kıyasla daha düşük kalması,
2. Oksiyanma sürecinde, ortamda azotun olmaması nedeniyle birim yakıt başına oluşan baca gazı hacimlerinin, yine havayla yanma süreçlerine oranla azalmasıdır.
3. CO_2 yüksek ısı kapasitesinden dolayı yanmanın düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi,
4. Küllerin kükürt tutma kapasitesinin oksiyanma koşullarında artması
5. Yakıttaki kükürdün, SO_2 dışındaki kükürt gazlarına dönüşmesi

0.71 MW kapasitedeki bir pulverize kömür yakma sistemiyle yapılan çalışmada, bir adet bitümlü kömür hava, O_2/CO_2 ve geri döndürülen baca gazlarıyla (O_2/DBG) olmak üzere 3 değişik rejimde ve değişik koşullarda yakılmıştır. Kömürdeki kükürdün kükürt oksitlere dönüşümü bu rejimler için sırasıyla %91, %73-79, %56-66 olarak gözlenmiştir. Ancak bunun neden kaynaklandığı tam olarak açıklanamamıştır. Birim enerji başına ortaya çıkan SO_2 emisyonu açısından ise yanma rejimleri şu şekilde sıralanmıştır: O_2/CO_2 ile yanma > havayla yanma > O_2/DBG (kuru). Bununla birlikte aynı çalışmada baca gazlarındaki SO_2 derişimi (ppmv) açısından en yüksek değer DBG (oksiyanma), en düşük değerler ise havayla olan yanmada gözlenmiştir. Oksiyanmada görülen yüksek SO_2 derişimlerinin en büyük nedeni, N_2 yokluğunda baca gazı hacimlerinin küçülmesi olarak belirtilmiştir (Croiset ve Tambimuthu, 2001). Değişik kalitede kömürlerle yapılan bir diğer çalışmada da benzer sonuçlarla karşılaşılmıştır. Bu çalışmada O_2/DBG ortamında ölçülen SO2 emisyonları havayla yanmaya kıyasla 3-4 kat daha yüksek olmuştur. Buna karşın SO_2'in kütlesel emisyonları havayla yanma rejiminkilerden genellikle daha düşük olmuştur (Tan ve diğ, 2006). Moron ve Rybak (2015) değişik kömür, biyokütle ve bunların karışımlarıyla yaptıkları çalışmada, bu yakıtların hava ile yanma ve oksiyanma (O_2/DBG) süreçlerini kıyaslamışlardır. Araştırmacılar yakıtların oksiyanma süreçlerinde ortaya çıkan SO_2 ve NOx emisyonlarının kütlesel olarak havayla yanma süreçlerine göre daha düşük olduğunu gözlemişlerdir. Oksiyanma koşullarında SO_X emisyonları kütlesel olarak havayla yanmaya kıyasla ortalama olarak %15 oranında daha düşük olmuştur. Bu durum oksiyanma koşullarında baca gazı miktarlarının daha az olmasına dayandırılmıştır. Yakıtların oksiyanma (O_2/DBG) süreçlerinde, yüksek oksijen oranlarında SO_2 emisyonları da daha yüksek ölçülmüştür. Bu sonuç bu çalışmada gözlenen durumla çelişmektedir. Araştırmacılar, kömüre biyokütlenin eklenmesinin NOx ve SO_2 emisyonlarının önemli ölçüde düşmesine katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

Orhaneli (L15) ve Soma (L19) Linyitlerinin Havayla Yanma, Oksijence Zengin Havayla Yakma ve Oksiyanma Süreçlerinde Ortaya Çıkan Emisyonların Türk ve Avrupa Birliği Yasalarındaki Emisyon Değerleriyle Kıyaslanması

Kömürlerin yanma süreçlerini Türk ve AB yasalarında yakma sistemleri için belirlenmiş emisyon sınırları ışığında değerlendirmek amacıyla, kömürlerin değişik

yanma süreçleri sırasında ölçülen emisyonlarla bu yasalardaki sınır değerler Çizelge 4.25'de kıyaslanmıştır.

Türkiye ve AB yasalarında kömür yakan yakma sistemleri ve elektrik santrallerinde uyulması gereken emisyon sınırları sırasıyla Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18'de verilmiştir. Daha önceki bölümlerde tartışıldığı gibi kömürlerin yanması sırasında ortaya çıkan emisyonların miktarları yanma sürecinin tipine (yanma rejimi) ve koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Çizelgede oksijence zengin hava (OZH) ile yanma ve oksiyanma süreçlerinde ölçülen en düşük ve en yüksek emisyonlar değerleri verilmiştir. Yasalardaki emisyon sınırlarıyla kıyaslamalar yapılırken bu çalışma sırasında ölçülen en düşük emisyon değerleri temel alınmıştır. Dolayısıyla, bu kömürlerin yakıldığı yakma sistemlerinin yasalarda belirtilen emisyon sınırlarını sağlayıp sağlamadığı konusunda burada yapılan değerlendirmelerin çalışmada uygulanan bütün koşullar için geçerli olmadığı gözden kaçırılmamalıdır.

Çizelge 4.25 : Orhaneli (L15) ve Soma (L19) kömürlerinin havayla yanma, oksijence zengin havayla yakma ve oksiyanma süreçlerinde ortaya çıkan emisyonların Türk ve AB yasalarında enerji santralleri için düzenlenen emisyon değerleriyle kıyaslanması.

Kömür		$CO^{Ö}$ (mg/Nm^3)	$NOx^{Ö}$ (mg/Nm^3)	$SO_2^{Ö}$ (mg/Nm^3)	CO^{T} (mg/Nm^3)	NOx^{T} (mg/Nm^3)	SO_2^{T} (mg/Nm^3)	NOx^{AB} (mg/Nm^3)	SO_2^{AB} (mg/Nm^3)
Orhaneli (L15)	Havayla yanma	270	177-353	3017-3095	K: - B: -	K: + B: +	K: - B: -	E: + Y: +	E: - Y: -
	OZH yanma	190-195	181-405	3014-3330	K: - B: +	K: + B: +	K: - B: -	E: + Y: +	E: - Y: -
	Oksiyanma	60-409	20-38	1012-2224	K: + B: +	K: + B: +	K: - B: -	E: + Y: +	E: - Y: -
Soma (L19)	Havayla yanma	520	372-480	-	K: - B: -	K: + B: -	K:+ B: +	E: + Y: -	E: + Y: +
	OZH yanma	295-400	327-986	-	K: - B: -	K: + B: -	K: + B: +	E: + Y: -	E: + Y: +
	Oksiyanma	104-156	535-550	-	K: + B: +	K: - B: -	K: + B: +	E: + Y: -	E: + Y: +

Ö: Ölçülen emisyon değerleri

T: Türk yasası;

K: 50-100 MW termal kapasiteli küçük termik santraller; CO =150 mg/Nm^3, NOx = 400 mg/Nm^3; SO_2 =850 mg/Nm^3

B: >100 MW termal kapasiteli büyük termik santraller ; CO =200 mg/Nm^3, NOx = 200 mg/Nm^3; SO_2 =200 mg/Nm^3

E : Mevcut termik santraller (AB); NOx = 650 mg/Nm^3; SO_2 =850 mg/Nm^3

Y: Yeni termik santraller (AB); NOx = 300 mg/Nm^3; SO_2 =200 mg/Nm^3

CO Emisyonu: AB yasalarında kömürlerin yakıt olarak kullanıldığı yakma sistemlerinin CO emisyon değerler için herhangi bir sınır belirtilmediği için çalışmanın sonuçları CO emisyonları açısından yalnızca Türkiye'deki emisyon değerleri açısından değerlendirilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi, *havayla yanma* sürecinde her iki kömür için de CO emisyonları Türk yasalarında yer alan *Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde* küçük ölçekli yakma sistemleri (50-100 MW) için verilen sınırın (150 mg/Nm^3) üstünde, büyük yakma sistemleri (>100 MW) için verilen sınırın (200 mg/Nm^3) ise çok az bir farkla altında kalmıştır. Soma kömürünün yanma sürecinde ise CO emisyonları bütün yakma sistemleri için sınırların üstünde olmuştur. CO emisyonlarının düşürülmesi için bu kömürlerin yakıldığı sistemlerde yanma verimin artırılması ve CO miktarının düşürülmesi için hava fazlalık katsayısının optimize edilmesi, yakma havasının yakıcıya kademeli olarak beslenmesi gibi yöntemlere başvurulabilir.

Orhaneli (L15) kömürünün *oksijence zengin havayla (OZH*) yanma sürecinde baca gazındaki CO miktarı; Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde küçük yakma sistemleri için öngörülen sınırların üstünde, büyük yakma sistemleri için öngörülen sınırların altında kalmıştır. Buna karşın Soma (L19) linyiti için CO emisyonları her iki gruptaki tüm sistemler için konulmuş sınırların üstünde kalmıştır.

Oksiyanma sürecinde her iki kömür için de CO emisyonlarında diğer yakma rejimlerine kıyasla önemli bir düşüş olduğu daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Bunun sonucunda, bu kömürlerin CO emisyonları tüm yakma sistemleri için SKHKKY'de öngörülen üst sınırların bir hayli altında kalmıştır. Bu durum, bu kömürlerin oksiyanma koşullarında yakılması durumunda, yakma sistemleri için günümüzde geçerli yasal CO emisyon sınırlarını sağlamada bir sorunla karşılaşılmayacağına işaret etmektedir.

NOx Emisyonu: Çizelge 4.25 incelendiğinde NOx emisyonları açısından kömürlerin farklı sonuçlar sergilediğini görülmektedir. Orhaneli (L15) kömürünün her üç yanma sürecininde de baca gazlarındaki NOx emisyonları hem Türk hem de AB yasalarında kömür yakan yakma sistemlerinin tümü için konulan sınırların altında kaldığı görülmektedir. Özellikle oksiyanma sürecinde, bu kömürün NOx emisyonları söz konusu yasal sınır değerler içinde en düşük değer olan HKY'de büyük ölçekli yakma sistemleri için konulan sınırın (200 mg/Nm^3) hemen hemen %50 altında ölçülmüştür.

Soma (L19) kömürü NOx emisyonu açısından daha sorunlu görünmektedir. Bu kömürün oksiyanma sürecinde ölçülen NOx emisyonları HKY'deki sınırların üstünde kalmıştır. Bu NOx emisyonları, AB yasalarında eski elektrik santralleri için uygulanan emisyon sınırlarının altında, yeni kurulacak olan santraller için belirlenmiş sınırların ise üstünde kalmıştır.

SO_2 Emisyonu: Çizelgeden görüldüğü ve beklendiği gibi, Soma (L19) kömürünün her üç yanma sürecinde de baca gazlarındaki SO_2 miktarı hem Türkiye'deki hem AB yasalarındaki emisyon sınırlarının altında kalmıştır. Bu kömürün yanma süreçlerinde baca gazlarındaki SO_2 miktarı ölçülmeyecek ölçüde düşük olduğu göz önüne alındığında, bu beklenen bir sonuçtur. Orhaneli (L15) kömürü için ise tersi bir durum söz konusudur. Bu kömürün her üç yanma sürecinde de baca gazlarında ölçülen SO_2 miktarları hem Türk hem AB yasalarında yakma sistemleri için belirlenmiş olan SO_2 emisyon sınırlarının üstünde kalmıştır. Bu durum, daha önce de belirtildiği gibi, bu kömürün yakıt olarak kullanıldığı yakma sistemlerinde SO_2 emisyonun önemli bir sorun olabileceğini ve buna karşın önlem alınması gerekeceğini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Türk linyit kömürlerinin dolaşımlı akışkan yatak (DAY) yakma sisteminde yanma süreçleri konusunda geniş kapsamlı bir deneysel çalışma yürütülmüştür. Çalışmalarda 30 kW_{th} kapasitesinde bir akışkan yatak ve Türkiye'nin değişik bölgelerinde toplanmış toplam 19 adet linyit numunesi kullanılmıştır. Yanma deneyleri *hava*, *oksijence zengin hava* ve *oksiyanma* olmak üzere 3 değişik atmosferde yürütülmüştür. Çalışmalarda kullanılan kömürlerin tümünün havayla yanma süreçleri, 2 tanesinin (Orhaneli ve Soma kömürlerinin) ise her üç tip yanma süreci incelenmiştir. Çalışmada linyit kömürlerinin yanma süreçleri hem yanmanın kararlılığı ve sürdürülebilirliği hem de emisyonlar açısından incelenmiştir. Çalışma, Türkiye'de bu ölçek, bu kapsam ve nitelikte yapılmış olan ilk çalışmadır. Çalışmada ulaşılan başlıca vargılar aşağıda özetlenmiştir.

Linyit Analizleri

1. 19 adet linyit örneğinin yakıt özelliklerinin araştırılmasına yönelik detaylı analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kömürlerin Van Krevelen grafikleri, incelenen kömürlerin çok değişik kömürleşme kalitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Kömürlerin büyük bir bölümü söz konusu grafikteki O/C sınırları içinde kalmış, ancak hemen hemen tümü H/C sınırlarının dışında kalmıştır. Kömürlerin O/C oranları geniş bir aralıkta dağılmıştır. Bu durum kömürlerin kısa ve elementel analiz sonuçlarıyla uyum içinde olmuştur.
2. 19 adet linyit arasından seçilen iki adet linyitin (L3 (Kütahya-Ayvalı pano) ve L7 (Manisa-İmbat araürün)) hava ve oksiyanma koşullarında termogravimetrik analiz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yanma kinetiği modele bağlı (model fitting) ve modelden bağımsız (model-free) kinetik yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Modele bağlı kinetik yaklaşımda Coats-Redfern yöntemi kullanılmıştır. Modelden bağımsız yöntemde ise

Friedman (FR), Flynn-Wall-Ozawa (FWO) ve Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) yöntemleri ile kinetik analiz yapılmıştır.

3. Her iki kömürde de tipik yanma adımları (nem çıkışı, uçucu çıkışı ve yanması, kok yanması) gözlenmiştir. L3 kömürü L7 kömürüne göre daha düşük kül içeriği, daha yüksek karbon içeriği ve daha yüksek uçucu madde içeriğine sahip olmakla birlikte daha dik bir ağırlık kayıp profili göstermektedir. Bu, yanma atmosferinden bağımsız olarak daha hızlı bir yanma sürecine işaret etmektedir.
4. Yanma atmosferindeki oksijen derişimi arttıkça DTG profillerinin daha düşük sıcaklığa doğru kaydığı ve yanmanın daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir.
5. Her iki kömür için oksiyanma koşullarında hesaplanan aktivasyon enerjisi hava ortamında hesaplanan aktivasyon enerjisinden daha düşüktür. Oksiyanma atmosferindeki oksijen derişimi arttıkça aktivasyon enerjisinin azaldığı ve yanmanın kolaylaştığı görülmektedir.

Havayla Yanma

6. Çalışmada kullanılan bütün kömürler için dolaşımlı akışkan yatakta yatışkın, stabil ve uzun süreli yanma süreçleri gerçekleştirilebilmiştir.
7. Yanma süreci boyunca akışkan yatakta termal açıdan kabaca 3 bölge oluşmaktadır: 1.dağıtıcı elekten itibaren sıcaklığın yükseklikle arttığı *Alt bölge* (h = 0-50 cm), 2. Sıcaklıklarının maksimum seviyelerde olduğu *Orta bölge* (h = 50-150 cm), 3. Sıcaklıkların yatağın çıkışına doğru kademeli olarak düştüğü *Üst bölge* (h >150 cm). Bu durum kullanılan bütün kömürler ve denen bütün çalışma koşulları için geçerlidir. Ancak bölgelerin sınırları/genişlikleri, kullanılan kömürün çeşidine ve çalışma koşullarına bağlı olarak belirli ölçülerde değişebilmektedir.
8. Akışkan yataktaki sıcaklık profilinin niteliği, başka bir ifadeyle üniformluk derecesi yakıcıda ölçülen maksimum ve minimum sıcaklıklar arasındaki fark, $\Delta T_{AY} = T_{AY,mak}-T_{AY,min}$ temel alınarak irdelenmiştir. Havayla yanma sürecinde, bir kömür (L13) hariç diğer tüm kömürler için ΔT_{AY} =30 - 80 ^{o}C aralığında değişmiştir.
9. Kömürlerin yanma kararlılığı ve güvenliği $\Delta T_{güvenlik} = T_{ID} - (T_{AY,\,mak}+200)$ bağıntısıyla tanımlanan *güvenlik marji* ($\Delta T_{güvenlik}$) kullanılarak

değerlendirilmiştir. Kömürlerin güvenlik marji etkileyen ve belirleyen en önemli faktör külün başlangıç deformasyon sıcaklığı (T_{ID}) dır. İncelenen kömürlerin güvenlik marjı 90-560 °C gibi oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir. En düşük $\Delta T_{güvenlik}$ değeri L3 (Kütahya- Ayvalı pano), en yüksek $\Delta T_{güvenlik}$ değeri ise L17 (Çanakkale-Çan) kömürleri için belirlenmiştir.

10. Linyitlerin yanması sırasında ortaya çıkan NOx emisyonları hava fazlalık katsayısı tarafından etkilenmektedir. İncelenen linyitlerin yanma sürecinde baca gazlarındaki NOx emisyonları, bir kömür (L18) hariç, genellikle 100-200 mg/Nm^3 aralığında değişmiştir.
11. NOx emisyonlarıyla yakıtların azot içerikleri arasında, herhangi bir sistematik ilişki görülmemiştir.
12. Çalışmalardan kullanılan 19 kömürlerin %90'i ulusal *Sanayii Kaynaklı Hava Kalitesi Koruma Yönetmeliği'*nde (SKHKKY)'de küçük enerji santraller (50-100 MW), %40 ise yine aynı yönetmelikte büyük santraller (>100 MW) için konulan NOx emisyon sınırlarını (sırasıyla 400 mg/Nm^3 ve 200 mg/Nm^3) sağlamaktadır. Kömürlerin %90'ı için NOx emisyonları AB'nin yeni kurulacak santraller için belirlediği üst sınırın (300 mg/Nm^3) altında kalmaktadır.
13. Kömürlerin yanma sürecinde ortaya çıkan SO_2 emisyonları, kömürlerin yanabilir kükürt içerikleriyle orantılı olmuş ve 1100 mg/Nm^3 ile 20,000 mg/Nm^3 gibi çok geniş bir aralıkta gerçekleşmiştir. Emisyonlar hava fazlalık katsayısından (HFK) etkilenmektdir ve genellikle yüksek HFK'da SO_2 emisyonları düşme eğilimi içinde olmaktadır.
14. Çalışmanın sonuçları incelenen linyitlerin yakıt olarak kullanılması durumunda ulusal ve uluslararası standarlarda elektrik santralleri ve genel olarak çevre için belirlenmiş emisyon hedefleriin tuturmak açısından en büyük sorunun SO_2 emisyonları olacağını göstermektedir. SO_2 emisyonu, incelenen kömürlerin yalnızca yaklaşık 1/4'ü için ulusal SHKKKY'de elektrik santralleri belirlenmiş üst sınırın (850 mg/Nm^3) altında kalmaktadır. AB emisyon regülasyonları açısında da benzer durum söz konusudur.
15. İncelenen kömürlerin havayla yakma süreçlerinde yüksek yanma

verimlerine ulaşmak mümkündür. Yanma verimi kömürlerin % 37'si için %95, %50'si için %90 ve %70'i için %85'in üstünde olmuştur.

Oksijence Zengin Havayla Yanma

16. İncelenen bütün kömürler için oksijence zengin hava (OZH) atmosferinde kararlı bir yanma süreci gerçekleştirilmiştir.

17. Yakıcının içinde sıcaklık profili, oksijen oranı tarafından etkilenmektedir. Yüksek oksijen oranlarında yatağın alt bölgelerindeki yanma yoğunluğu artmakta ve yatak içindeki sıcaklık profili olumsuz şekilde etkilenmektedir.

18. Besleme havasındaki oksijen derişimi ana kirletici emisyonlarını etkilenmiştir. Oksijen derişimi arttıkça her iki kömür için de birim enerji başına salınan NOx miktarı artmıştır. Orhaneli (L15) kömürünün yanma sürecinde yüksek oksijen oranlarında SO_2 emisyonu azalma eğilimi içinde olmuştur. Soma kömürü için ise baca gazındaki SO_2 miktarı ölçülmeyecek derecede düşük olmuştur.

19. Her iki kömür için de NOx emisyonları (mg/Nm^3 ve mg/MJ) OZH ortamında, havayla yanma sürecine kıyasla daha yüksek olmuştur.

20. Orhaneli kömürünün OZH havayla yanma sürecindeki SO_2 emisyonu (mg/Nm^3 ve mg/MJ) havayla yanma sürecine göre daha yüksek olmuştur.

Oksiyanma

21. Her kömür için de oksiyanma süreci %70 oranında döndürülen baca gazları (DBG) ve O_2 karışımla (O_2/DBG) kullanılarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

22. Oksiyanma sürecinde baca gazlarındaki CO_2 derişimi, yakıcıya beslenen O_2/DBG karışındaki oksijen oranı tarafından önemli ölçüde etkilenmiştir. Baca gazındaki CO_2 derişimi, oksijen oranındaki artışa paralel olarak hızla artmıştır ve kuru temelde %96 ulaşılmıştır.

23. Oksijence zengin hava ile yanma sürecinden oksiyanma sürecine geçildiğinde CO emisyonundaki düşme her iki kömür için de %60-70 seviyelerine kadar çıkmıştır.

24. Oksiyanma koşullarında NOx emisyonlarında önemli bir düşme gerçekleşmiştir. Orhaneli (L15) kömürünün yanması sırasında NOx emisyonları, havayla ve OZH ile yanma süreçlerine kıyasla sırasıyla yaklaşık %82 ve %70 oranında daha düşük olmuştur. Soma (L15) kömürü

için ise bu oranlar yine sırasıyla %53 ve %59 civarında olmuştur. NOx emisyonu açısından yanma süreçleri azalan yönde şu şekilde sıralanmaktadır: *OZH ile yanma > havayla yanma > Oksiyanma* (O_2/DBG).

25. Soma (L19) kömürü için hava ve OZH ile yanmada olduğu gibi, oksiyanm sürecinde de baca gazlarındaki SO_2 miktarı ölçülemeyecek derecede düşük olmuştur. Orhaneli (15) kömürünün oksiyanma sürecinde baca gazlarındaki SO_2 miktarında düşme gerçekleşmiştir. Oksiyanma sürecinde ortaya çıkan SO_2 miktarı (mg/MJ) havayla ve OZH ile yanmaya göre yaklaşık %58-60 oranında daha düşük olmuştur. Benzer bir durum mg/Nm^3 cinsinde de geçerlidir, ancak bu kez düşme %50 civarında kalmıştır. Böylece 3 yanma süreci SO_2 emisyonu açısından azalan yönde olmak üzere, şu şekilde sıralanmaktadır: SO_2 emisyonu (mg/MJ): *OZH ile yanma >havayla yanma > Oksiyanma (O_2/DBG).*

26. Orhaneli (L15) kömürü uygulanan oksiyanma koşullarında *Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği* ve AB yasalarında enerji santralleri (büyük ve küçük) için konulmuş olan NOx maksimum emisyon sınırlarının altında kalabilmektedir. Soma (L19) ise bu sınırların üstünde kalmaktadır. Öte yandan Soma kömürü hem ulusal hem AB mevzuatında santraller için konulmuş olan SO_2 emisyon koşullarını sağlamaktadır (SO_2 ölçülemeyecek derecede düşük). Orhaneli (L15) kömürü ise ne ulusal ne AB yasalardaki SO_2 koşullarını sağlayabilmektedir.

KAYNAKLAR

Aarna, I. & Suuberg, E. M. (1997). A review of the kinetics of the nitric oxide-carbon reaction, *Fuel, 76* (6), 475-491.

Abraham, B., Asbury, J., Lynch, E., Teotia, A. (1982). Coal-oxygen process provides carbondioxide for enhanced recovery, *Oil Gas Journal, 80,* 68-70.

Altındağ, H., Göğebakan, Y., Selçuk, N. (2004). Sulfur capture for fluidized-bed combustion of high-sulfur content lignites, *Applied Energy, 79,* 403-424.

Andersen, R. E., MacAdam, S., Viteri, F., Davies, D. O., Downs, J. P., Paliszewski, A. (2008). In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for land, sea and ai*r. Berlin, Almanya.

Andersson, K., Johansson, R., Hjartstam, S., Johnsson, F., Leckner, B. (2008a). Radiation intensity of lignite-fired oxy-fuel flames. *Experimental Thermal and Fluid Science, 33,* 67-76.

Andersson, K., Normann, F., Johnsson, F., Leckner, B. (2008b). NO Emission during Oxy-Fuel Combustion of Lignite, *Industrial & Engineering Chemistry Research, 47* (6), 1835-1845.

Ansolobehere, S., Beer, J., Deutch, J., Ellerman, A.D., Friedman, J., Herzog, H., ..., Steinfeld, E. (2007). MIT Disiplinlerarası Çalışma Raporu, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Raporu.

Armesto, L., Boerrigter, H., Bahillo, A., Otero, J. (2003). N_2O emissions from fluidised bed combustion: The effect of fuel characteristics and operating conditions, *Fuel, 82,* 1845-1850.

ASME PTC 4 (1998). Indirect Method: Stack Loss Method.

ASTM (2015). *Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis* (ASTM D7582-15). Retrieved from https://www.astm.org/Standards/D7582.htm.

ASTM (2016). *Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke* (ASTM D7582-16). Retrieved from https://www.astm.org/Standards/D5373.htm.

ASTM (2014). *Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion* (ASTM D4239-14). Retrieved from https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D4239-14.htm.

ASTM (2015). *Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke* (ASTM D3176-15). Retrieved from https://www.astm.org/Standards/D3176.htm.

ASTM (2013). *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke* (ASTM D5865-13). Retrieved from https://www.astm.org/Standards/D5865.htm.

ASTM (2009). *Solid mineral fuels -- Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value* (ISO 1928:2009). Retrieved from https://www.iso.org/standard/41592.html.

ASTM (2010). *Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash* (ASTM D1857/D1857M-04(2010)). Retrieved from https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1857D1857M-04R10.htm.

Atakül, H. & Ekinci, E. (1989). Agglomeration of Turkish (Çan) lignites in a fluidised bed combustor, *Journal of the Energy Institute, 60,* 56-61.

Atakül, H. & Ekinci, E. (1990). Agglomeration in flotsam - and jetsam-rich systems, *Powder Technology, 60,* 77-82.

Atakül, H., Hilmioğlu, B., Ekinci, E. (2005). The relationship between the tendency of lignites to agglomerate and their fusion characteristics in a fluidized bed combustor, *Fuel Processing Technology, 86,* 1369-1383.

Atımtay, A. T. (1987). Combustion of volatile matter in fluidized beds, *Industrial & Engineering Chemistry Research, 26,* 452-455.

Atımtay, A.T. & Topal, H. (2004). Co-combustion of olive cake with lignite coal in a circulating fluidized bed, *Fuel, 83,* 859-867.

Atımtay, A.T., Kayahan, U., Ünlü, A., Engin, B., Varol, M., Olgun, H., Atakül, H. (2017). Co-firing of pine chips with Turkish lignites in 750 kWth circulating fluidized bed combustion system, *Bioresource Technology, 224,* 601-610.

Atımtay, A.T., Olgun, H., Bardakçıoğlu, G. (2012). "Biyokütle ve Biyokütle/Kömür Karışımlarını Dolaşımlı Akışkan Yatakta Yakma Teknolojilerinin Geliştirilmesi" Projesi Sonuç Raporu. Ankara : TÜBİTAK 1007 Kamu Araştırmaları Destek Grubu (KAMAG), 105G023.

Basu, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds.* CRC Press (1727). ASIN: B01K2P3SDS.

Belo, L.P., Spörl, R., Shah, K.V., Elliott, L.K., Stanger, R.J., Maier, J., Wall, T.F. (2014). Sulfur capture by fly ash in air and oxy-fuel pulverized fuel combustion, *Energy Fuels, 28,* 5472-5479.

Buhre, B. J. P., Elliott, L. K., Sheng, C. D., Gupta, R. P., Wall, T. F. (2005). Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation, *Progress in Energy and Combustion Science, 31,* 283-307.

BP Energy Outlook : 2019 Edition, 2019.

Cahyadi, C., Surjosatyo, A., Nugroho, Y. S. (2013). Predicting Behavior of Coal Ignition in Oxy-fuel Combustion, *Combustion Energy Procedia, 37,* 1423-1434.

Chaiklangmuang, S., Jones, J. M., Pourkashanian, M., Williams, A. (2002). Conversion of volatile-nitrogen and char-nitrogen to NO during combustion, *Fuel, 81* (18), 2363-2369.

Chalmers, H., Riaza, J., Manalhaes, D., Kazanç, F., Erensoy, S., Kabaklı, Ö. (2017). Combustion of Turkish lignites and olive residue: Experiments and kinetic modelling, *Fuel, 203,* 868-876.

Chen, L., Yong, S. Z., Ghoniem, A. F. (2012). Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling, *Progress in Energy and Combustion Science, 38,* 156 -214.

Chirone, R., Massimilla, L., Salatino, P. (1991). Comminution of carbons in fluidized bed combustion, *Progress in Energy and Combustion Science, 17,* 297-326.

Croiset, E. & Thambimuthu, K. V. (2001). NOx and SO_2 emissions from O_2/CO_2 recycle coal combustion, *Fuel, 80,* 2117-2121.

Czakiert, T., Bis, Z., Muskala, W., Nowak, W. (2006). Fuel conversion from oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed, *Fuel Processing Technology, 87,* 531-538.

De Diego, L.F., De las Obras-Loscertales, M., Rufas, A., García-Labiano, F., Gayán, P., Abad, A., Adánez, J. (2013a). Pollutant emissions in a bubbling fluidized bed combustor working in oxy-fuel operating conditions: effect of flue gas recirculation, *Applied Energy, 102,* 860-867.

De Diego, L.F., Rufas, A., García-Labiano, F., De las Obras-Loscertales, M., Abad, A., Gayán, P., Adánez, J. (2013b). Optimum temperature for sulphur retention in fluidised beds working under oxy-fuel combustion conditions, *Fuel, 114,* 106-113.

DIN EN (2017). *Chemicals used for treatment of water intended for human consumption - Calcium carbonate, high-calcium lime, half-burnt dolomite, magnesium oxide, calcium magnesium carbonate and dolomitic lime - Test methods* (DIN EN 12485). Retrieved from https://www.en-standard.eu/din-en-12485-chemicals-used-for-treatment-of-water-intended-for-human-consumption-calcium-carbonate-high-calcium-lime-half-burnt-dolomite-magnesium-oxide-calcium-magnesium-carbonate-and-dolomitic-lime-test-methods/?gclid=Cj0KCQjwkIzlBRDzARIsABgXqV9MnB6tO-c-f9hFonvo8uXb-SmVxJZyhzH90qk_uOJWxesbkxFxKNUaAmduEALw_wcB.

DIN EN (2007). *Characterization of waste and soil - Determination of elemental composition by X-ray fluorescence* (DIN EN 15309). Retrieved from https://www.en-standard.eu/din-en-15309-characterization-of-waste-and-soil-determination-of-elemental-composition-by-x-ray-fluorescence/?gclid=Cj0KCQjwkIzlBRDzARIsABgXqV8N8KJtEWh_X7dg5BqRyizRqXEb9yOYkyucOeRfroUmyj4eTpTnhs0aAv3BEALw_wcB.

Duan, L., Sun, H., Zhao, C., Zhou, W., Chen, X. (2014). Coal combustion characteristics on an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor with warm flue gas recycle, *Fuel, 127*, 47-51.

Dunnu, G., Maier, J., Scheffknecht, G. (2010). Ash fusibility and compositional data of solid recovered fuels, *Fuel, 89,* 1534–1540.

Ekinci, E., Atakül, H., Tolay, M. (1990). Detection of segregation tendencies in a fluidised bed using temperature profiles, *Powder Technology, 61,* 185-192.

Engin, B., Ünlü, A., Kayahan, U., Aksoy, P. (2015). Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü, "Kömür Karakterizasyonu ve Yanma Davranışlarının İncelenmesi" Projesi Sonuç Raporu.

Engin, B. & Atakül, H. (2018). Air and oxy-fuel combustion kinetics of low rank lignites, *Journal of the Energy Institute, 91,* 311-322.

Engin B., Atakül H., Ünlü A., Olgun Z. (2019). CFB combustion of low-grade lignites: Operating stability and emissions, *Journal of the Energy Institute, 92,* 3, 542-553.

Ersoy, M. (2015). Role of coal in Turkey: Workshop on Best Practices in Production of Electricity from Coal, Geneva, Switzerland.

Fan, W., Lin, Z., Kuang, J., Li, Y. (2010). Impact of air staging along furnace height on NOx emissions from pulverized coal combustion, *Fuel Processing Technology, 91,* 625-634.

Farzan, H., Vecci, S. J., Chatel, F., Pranda, P., Bose, A. C. (2005). Pilot-scale evaluation of coal combustion in an oxygen-enriched recycled flue gas, In *The 30th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems,* the Sheraton Sand Key, Clearwater, Florida, ABD: April 17-21.

Fassbender, A. G., Henry, R. S., Tao, L. (2009). Analysis of ThermoEnergy integrated power system for new power facilities using Alaskan and reference coal types, *AEA Report, AEA Grant Number - AEA 07-014.*

Feng, B., Liu, H., Yuan, J.W., Lin, W.J., Liu, D. (1996). Nitrogen Oxides Emission from a Circulating Fluidized Bed Combustor, *International Journal of Energy Research, 20,* 1015-1025.

Fleig, D., Andersson, K., Johnsson, F., Leckner, B. (2011). Conversion of Sulfur during Pulverized Oxy-coal Combustion, *Energy Fuels, 25,* 647-655.

Fleig, D., Normann, F., Andersson, K., Johnsson, F., Leckner, B. (2009). The fate of sulphur during oxy-fuel combustion of lignite, *Energy Procedia, 1,* 383-390.

García-Labiano, F., Rufas, A., De Diego, L. F., Adánez, J. (2011). Calcium-based sorbents behaviour during sulphation at oxy-fuel fluidised bed combustion conditions, *Fuel, 90* (10), 3100-3108.

Gil, S. (2012). Fuel-N Conversion to NO, N_2O and N_2 During Coal Combustion. In Khan, S., *Fossil Fuel and the Environment* (Open access peer-reviewed Edited Volume). Retrieved from https://www.intechopen.com/books/fossil-fuel-and-the-environment/fuel-n-conversion-to-no-n2o-and-n2-during-coal-combustion.

Glarborg, P., Jensen, A.D., Johnsson, J.E. (2003). Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems, *Progress in Energy and Combustion Science, 29,* 89-113.

Guo, F. & Hecker, W. C. (1998). Kinetics of NO reduction by char: effects of coal rank, In: *27th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute,* (pp. 3085-3092). Pittsburgh, Pennsylvania, ABD.

Güngör, A. (2009). Prediction of SO_2 and NOx emissions for low-grade Turkish lignites in CFB combustors, *Chemical Engineering Journal, 146,* 388–400.

Hong, J., Chaudhry, G., Brisson, J. G., Field, R., Gazzino, M., Ghoniem, A. F. (2009). Analysis of oxy-fuel combustion power cycle utilizing a pressurized coal combustor, *Energy, 34,* 1332-1340.

Hu, X., Li, X., Luo, G., Yao, H. (2016). Homogeneous and heterogeneous contributions of CO_2 and recycled NO to NO emission difference between air and oxy-coal combustion, *Fuel, 163,* 1-7.

Hu, Y. Q., Naito, S., Kobayashi, N., Hasanati, M. (2000). CO_2, NOx and SO_2 emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases, *Fuel, 79* (15), 1925-1932.

Huffman, G.P., Huggings, F.E., Dunmyre, G.R. (1981). Investigation of the high-temperature behavior of coal ash in reducing and oxidizing atmospheres, *Fuel, 60,* 585-597.

Huggings, F.E. & Kosmack, D.A. (1981). Correlation between ash-fusion temperatures and ternary equilibrium phase diagrams, *Fuel, 60,* 577-584.

IEA World Energy Outlook, 2017. http://dx.doi.org/10.1787/weo-2017-en ISBN: 978-92-64-28230-8 (online) ISBN: 978-92-64-28205-6 (print) © OECD/IEA.

Jensen, A., Johnsson, J.E., Andries, J., Laughlin, K., Read, G., Mayer, M., …, Bonn, B. (1995). Formation and reduction of NOx in pressurized fluidized bed combustion of coal, *Fuel, 74,* 1555-1569.

Jia, L., Tan, Y., Anthony, E. J. (2010). Emissions of SO_2 and NOx during Oxy-Fuel CFB Combustion Tests in a Mini-Circulating Fluidized Bed Combustion Reactor, Energy *Fuels, 24,* 910-915.

Jia, L., Tan, Y., McCalden, D., Wu, Y., He, I., Symonds, R., Anthony, E.J. (2012). Commissioning of a 0.8 MWth CFBC for oxy-fuel combustion, *International Journal of Greenhouse Gas Control, 7,* 240–243.

Jia, L., Tan,Y., Wang, C. Anthony, J. E. (2007). Experimental Study of Oxy-Fuel Combustion and Sulfur Capture in a Mini-CFBC, *Energy & Fuels, 21,* 3160-3164.

Kayahan, U. (2017). *Experimental and theoretical investigation of oxy-combustion in fluidized beds* (Doktora tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kazanç, F., Khatami, R., Crnkovic, P. M., Levendis, Y. A. (2011). Emissions of NOx and SO_2 from Coals of Various Ranks, Bagasse, and Coal-Bagasse Blends Burning in O_2/N_2 and O_2/CO_2 Environments, *Energy and Fuels, 25* (7), 2850-2861.

Kissenger, H.E. (1957). *Reaction Kinetics in DTA,* Analytical Chemistry (Cilt 29, Sf. 1702-1706).

Kojima, T., Ohtan, T., Shimiza, T., Furusawa, T. (1993). Effect of coal ash properties and burning temperature on behavior of minerals with vitrification and sintering of ash, *Fuel Processing Technology, 36*, 129-135.

Kök, M. V. (2005). Temperature-controlled combustion and kinetics of different rank coal samples, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 79,* 175-180.

Krzywanski, J., Czakiert, T., Muskala, W., Sekret, R., Nowak, W. (2010). Modeling of solid fuels combustion in oxygen-enriched atmosphere in circulating fluidized bed boiler. Part 1. The mathematical model of fuel combustion in oxygenenriched CFB environment, *Fuel Processing Technology, 91* (3), 290-295.

Kunii, D. & Levenspiel, O. (1991). Fluidization Engineering. Butterworth-Heinemann.

Li, F., Xu, M., Wang, T., Fang, Y., Ma, M. (2015). An investigation on the fusibility characteristics of low-rank coals and biomass mixtures, *Fuel, 158,* 884-890.

Li, Q., Zhao, C., Chen, X., Wu, W., Li, Y. (2009). Comparison of pulverized coal combustion in air and in O_2/CO_2 mixtures by thermo-gravimetric analysis, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 85,* 1-2.

Li, S., Li, W., Xu, M., Wang, X., Li, H., Lu, Q. (2015). The experimental study on nitrogen oxides and SO2 emission for oxy-fuel circulation fluidized bed combustion with high oxygen concentration, *Fuel, 146,* 81-87.

Li, Y.H., Lu, G.Q., Rudolph, V. (1998). The kinetics of NO and N_2O reduction over coal chars in fluidised-bed combustion, *Chemical Engineering Science, 53* (1), 1-26.

Liang, P., Jiang, W.M., Zhang, Y.Q., Wang, X.H., Zhu, J.L. (2016). Effect of circulating ash on sulfur conversion characteristics in the coal polygeneration process, *Fuel Processing Technology, 150,* 16-22.

Linjewile, T.M.,. Hull, A.S., Agarwal, P. (1994). Optical probe measurements of the temperature of burning particles in fluidized beds, *Fuel, 73,* 1880–1888.

Liu, B., He, Q., Jiang, Z., Xu, R., Hu, B. (2013). Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures, *Fuel, 105,* 293–300.

Liu, H. Zailani, R., Gibbs, B. M. (2005). Pulverized coal combustion in air and in O_2/CO_2 mixtures with NO*x* recycle, *Fuel, 84* (16), 2109-2115.

Lupiáñez, C., Guedea, I., Bolea, I., Díez, L. I., Romeo, L. M. (2013). Experimental study of SO2 and NOx emissions in fluidized bed oxy-fuel combustion, *Fuel Processing Technology, 106,* 587-594.

Lupion, M., Alvarez, I., Otero, P., Kuivalainen, R., Lantto, J., Hotta, A., Hackc, H. (2013). 30 MWth CIUDEN Oxy-cfb Boiler-First Experiences, *Energy Procedia, 37,* 6179-6188.

Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü 2017 Faaliyet Raporu, 2018. http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/kurumsal/belgeler/faaliyet_raporu_2017.pdf.

Maier, J., Dhungel, B., Monckert, P., Kull, R., Scheffnecht, G. (2008). Impact of recycled gas species (SO_2, NO) on emission behavior and fly ash quality during oxy-coal combustion, In *The 33rd International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems,* Clearwater, Florida, USA, 1-5 Haziran 2008.

Manzoori, A. R. & Agarwal, P. K. (1992). The fate of organically bound inorganic elements and sodium chloride during fluidized bed combustion of high sodium, high sulphur low rank coal, *Fuel, 71,* 513-522.

Manzoori, A. R. & Agarwal, P. K. (1993). The role of inorganic matter in coal in the formation of agglomerates in circulating fluid bed combustors, *Fuel, 72,* 1069-1075.

Manzoori, A. R. & Agarwal, P. K. (1994). Agglomeration and defluidization under simulated circulating fluidized-bed combustion conditions, *Fuel, 73,* 563-568.

Margarita, A., Dmitrienko, G., Nyashina, S., Strizhak, P. A. (2018). Major gas emissions from combustion of slurry fuels based on coal, coal waste, and coal derivatives, *Journal of Cleaner Production, 177,* 284-301.

Mendiara, T. & Glarborg, P. (2009). Reburn chemistry in oxy-fuel combustion of methane, *Fuel, 23* (7), 3565-3572.

Moron, W. & Rybak, W. (2015). NOx and SO_2 emissions of coals, biomass and their blends under different oxy-fuel atmospheres, *Atmospheric Environment, 116,* 65-71.

Muzio, L.J. & Quartucy, G.C. (1997). Implementing NOx control: research to application, *Progress in Energy and Combustion Science, 23,* 233-266.

Niu, S., Lu, C.M., Han, K., Zhao, J.L. (2009). Thermogravimetric analysis of combustion characteristics and kinetic parameters of pulverized coals in oxy-fuel atmosphere, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 98,* 267-274.

Normann, F., Andersson, K., Leckner, B., Johnsson, F. (2009). Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process, *Progress in Energy and Combustion Science, 35* (5), 385-397.

Okazaki, K. & Ando, T. (1997). NOx reduction mechanism in coal combustion with recycled CO_2, *Energy, 22* (2-3), 207-215.

Okutan, H., Yozgatlıgil, A., Engin, B., Olgun, H., Özkaymak, M. (2017). "Dolaşımlı Akışkan Yatak Yakma Sisteminde Linyit ve Biyokömürün Oksijence Zengin Ortamda Yakılması" Projesi Sonuç Raporu. Ankara: TÜBİTAK 1003 Araştırma Destek Programları Başkanlığı (ARDEB), 113M003.

Orta Ölçekli Yakma Tesislerinden Kaynaklanan Kirletici Emisyon Limitleri Yönetmeliği. (2015). *2015/2193 sayılı AB Direktifi,* 25 Kasım 2015.

Park, D. (1989). Estimation of temperature difference between char particles and the fluidized bed in char combustion, *Fuel, 68,* 1320– 1324.

Payne, R., Chen, S. L., Wolsky, A.M., Richter, W. F. (1989). CO_2 recovery via coal combustion in mixtures of oxygen and recycled flue gas, *Combustion Science and Technology, 67,* 1-16.

Pinho, C. (2006). Fragmentation on batches of coke or char particles during fluidized bed combustion, *Chemical Engineering Journal, 115,* 147-155.

Riaza, J., Gil, M. V., Alvarez, L., Rubiera, F. (2012). Oxy-fuel combustion of coal and biomass blends, *Energy, 41* (1), 429-435.

Roy, B. & Bhattacharya, S. (2014). Oxy-fuel fluidized bed combustion using Victorian brown coal: An experimental investigation, *Fuel Processing Technology, 117,* 23-29.

Sanger, M., Werther, J., Ogada, T. (2001). NOx and N_2O emission characteristics from fuidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge, *Fuel, 80,* 167-177.

Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği. (2009). *T. C. Resmi Gazete, 27277,* 03 Temmuz 2009.

Scala, F., Chirone, R., Salatino, P. (2013). Attrition phenomena relevant to fluidized bed combustion and gasification systems In F. Scala (Ed.), *Fluidized bed technologies for near-zero emission combustion and gasification* (First Edition., Vol. 1, p. 254) Cambridge, UK: Woodhead Publishing in Energy: Number 59.

Scheffknecht, G., Al-Makhadmeh, L., Schnell, U., Maier, J. (2011). Oxy-fuel coal combustion - A review of the current state-of-the-art, *International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 5,* Supplement 1, S16-S35.

Seepana, S. & Jayanti, S. (2008). A new stable operating regime for oxyfuel combustion. In: ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Boston, MA, 435-444.

Seepana, S. & Jayanti, S. (2010). Steam-moderated oxy-fuel combustion, *Energy Conversion and Management, 51,* 1981-1988.

Selçuk, N. & Özkan, M. (2011). Simulation of circulating fluidized bed combustors firing indigenous lignite, *International Journal of Thermal Sciences, 50,* 1109-1115.

Shaddix, C. R. & Molina, A. (2011). Fundamental investigation of NOx formation during oxy-fuel combustion of pulverized coal, *Proceedings of the Combustion Institute, 33* (2), 1723-1730.

Shah, K., Moghtaderi, B., Wall, T. (2013). Effect of flue gas impurities on the performance of a chemical looping based air separation process for oxy-fuel combustion, *Fuel, 103,* 932-942.

Singh, V.K. & Kumar, E.A. (2016). Comparative Studies on CO_2 Adsorption Kinetics by Solid Adsorbents, *Energy Procedia, 90,* 316-325.

Song, W., Tang, L., Zhu, X., Wu, Y., Rong, Y., Zhu, Z., Koyama, S., (2009). Fusibility and flow properties of coal ash and slag, *Fuel, 88,* 297-304.

Stadler, H. Christ, D., Habermehl, M., Heil, P., Kellermann, A., Ohliger, A., …, Kneer, R. (2011). Experimental investigation of NOx emissions in oxycoal combustion, *Fuel, 90,* 1604-1611.

Stanger, R. & Wall, T. (2011). Sulphur impacts during pulverised coal combustion in oxy-fuel technology for carbon capture and storage, *Progress in Energy Combustion Science, 37,* 69-88.

Stanger, R., Wall, T., Spörl, R., Paneru, M., Grathwohl, S., Weidmann, M., ..., Kathere, A. (2015). Oxyfuel combustion for CO_2 capture in power plants, *International Journal of Greenhouse Gas Control, 40,* 55-125.

Şengüler, I. (2010). Coal explorations in Turkey: new projects and new reserves, In: *Twenty-seventh Annual International Pittsburgh Coal Conference,* Abstract Booklet, 11, İstanbul.

Tan, Y., Croiset, E., Douglas, M. A., Thambimuthu, K. V. (2006). Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas, *Fuel, 85,* 507-512.

Tan, Y., Jia, L., Wu, Y., Anthony, J. E. (2012). Experiences and results on a 0,8 MWth oxy-fuel operation pilot-scale circulating fluidized bed, *Applied Energy, 92,* 343-347.

Tian, L., Yang, W., Chen, Z., Wang, X., Yang, H., Chen, H. (2016). Sulfur behavior during coal combustion in oxy-fuel circulating fluidized bed condition by using TG-FTIR, *Journal of the Energy Institute, 89,* 264-270.

Toftegaard, M. B., Brix, J., Jensen, P. A., Glarborg, P., Jensen, A. D. (2010). Oxy-fuel combustion of solid fuels, *Progress in Energy and Combustion Science, 36,* 581-625.

Topal, H., Atımtay, A.T., Durmaz, A. (2003). Olive cake combustion in a circulating fluidized bed, *Fuel, 82,* 1049-1056.

Urkan, K. & Arıkol, M. (1994). Burning times of volatiles from Turkish coals during fluidized bed combustion, *Fuel, 73,* 768-772.

Url-1 < *https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Komur* > erişim tarihi 11.04.2018.

Url-2 < *https://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tablolari/Denge-Tablolari*>, erişim tarihi 11.03.2018.

Url-3 < http://www.emo.org.tr/ekler/c5aa4d5e03b92df_ek.pdf > erişim tarihi 13.03.2019.

Van Krevelen, D.W. (1950). Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal, *Fuel, 29,* 269-284.

Varol, M., Atimtay, A.T., Olgun, H., Atakül, H. (2014a). Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high-sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor, Part 1. Effect of excess air ratio, *Fuel, 117,* 792-800.

Varol, M., Atımtay, A.T., Olgun, H., Atakül, H. (2014b). Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high-sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor, Part 2. Effect of secondary air and its location, *Fuel, 130,* 1-9.

Varol, M. & Atımtay, A. T. (2015). Effect of biomass-sulfur interaction on ash composition and agglomeration for the co-combustion of high-sulfur lignite coals and olive cake in a circulating fluidized bed combustor, *Bioresource Technology, 198,* 325-333.

Vassilev, S.V., Kitano, K., Takeda, S., Tsurue, T. (1995). Influence of mineral and chemical composition of coal ashes on their fusibility, *Fuel Processing Technology, 45,* 27-51.

Wall, T., Liu, Y., Spero, C., Elliott, L., Khare, S., Rathnam, R., ..., Yu, J. (2009). An overview on oxyfuel coal combustion-state of the art research and technology development, *Chemical Engineering Research and Design, 87* (8), 1003-1016.

Wentlandt, W.WM. (1986). *Thermal Analysis.* John Wiley and Sons, Inc., New York.

Xu, M., Li, S., Wu, Y. Jia, L., Lu, Q. (2017). The characteristics of recycled NO reduction over char during oxy-fuel fluidized bed combustion, *Applied Energy, 190,* 553-562.

Xu, J., Liu, X., Zhao, F., Wang, F., Guo, Q., Yu, G. (2014). Study on fusibility and flow behavior of high-calcium coal ash, *Journal of Chemical Engineering of Japan, 47* (9), 711-716.

Yang, J., Sun, R., Sun, S., Zhao, N., Hao, N., Chen, H., ..., Meng, J. (2014). Experimental study on NOx reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals. Part 1. Air staging, *Fuel Processing Technology, 126,* 266-275.

Yang, T., Hunt, P., Lisauskas, R., Ballas, E. N., Vitalis, B. (2010). Pressurized Oxycombustion Carbon Capture Power System, In: The 35th international technical conference on clean coal & fuel systems Clearwater, FL.

Yin, C. & Yan, J. (2016). Oxy-fuel combustion of pulverized fuels: Combustion fundamentals and modeling, *Applied Energy, 162,* 742-762.

Yoshiie, R., Kawamoto, T., Hasegawa, D., Ueki, Y., Naruse, I. (2011). Gas-phase reaction of NOx formation in oxyfuel coal combustion at low temperature, *Energy Fuels, 25*, 2481-2486.

Yüzbaşı, N. S. & Selçuk, N. (2011). Air and oxy-fuel combustion characteristics of biomass/lignite blends in TGA-FTIR, *Fuel Processing Technology, 92* (5), 1101-1108.

Zhang, Y., Zhang, J., Sheng, C., Liu, Y., Zhao, L., Ding, Q. (2011). Quantitative analysis of NOx reduction in oxy-coal combustion, *Energy Fuels, 25,* 1146-1152.

Zheng, L. (2011). *Oxy-fuel combustion for power generation and carbon dioxide (CO_2) capture.* Woodhead Publishing Series in Energy: Number 17.

Zhu, J., Ouyang, Z., Lu, Q. (2013). An Experimental Study on NOx Emissions in Combustion of Pulverized Coal Preheated in a Circulating Fluidized Bed, *Energy Fuels, 27,* 7724−7729.

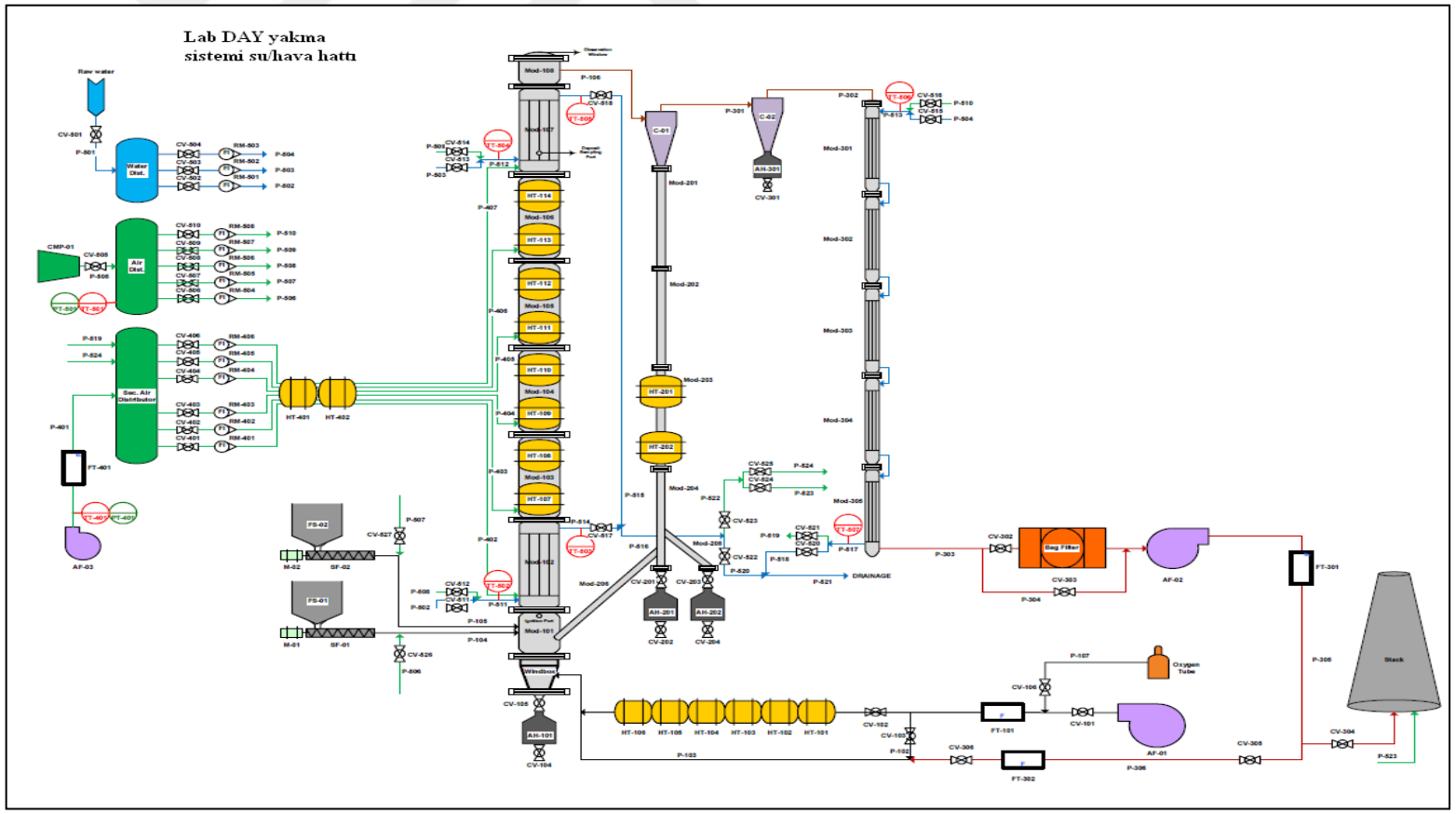
EKLER

EK A: Lab DAY Yakma Sistemi Diyagramları

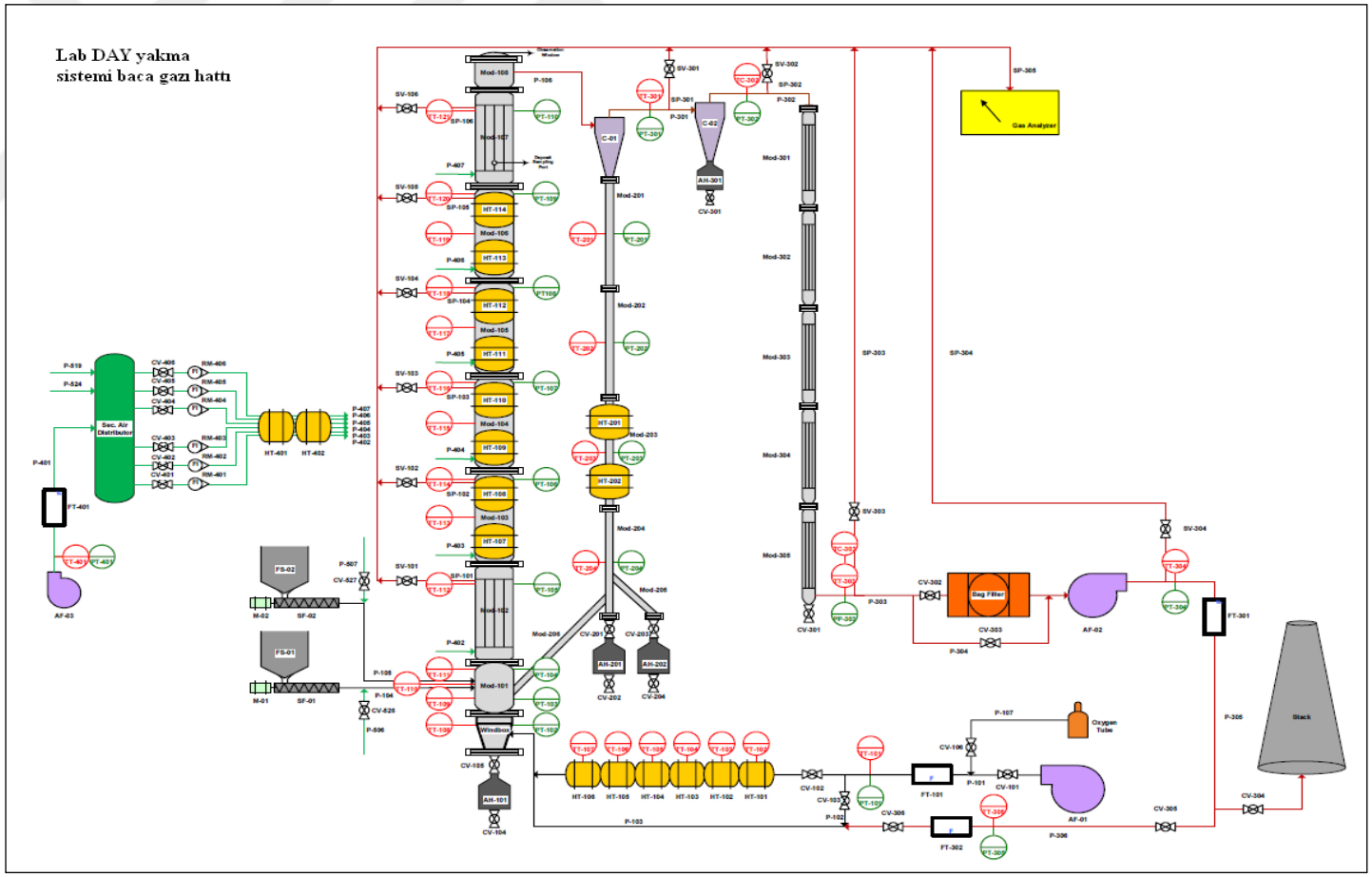
EK B: Havayla Yakma Deneylerinde Sıcaklık Dağılım Grafikleri

EK C: Havayla Yakma Deneylerinde Emisyon Grafikleri

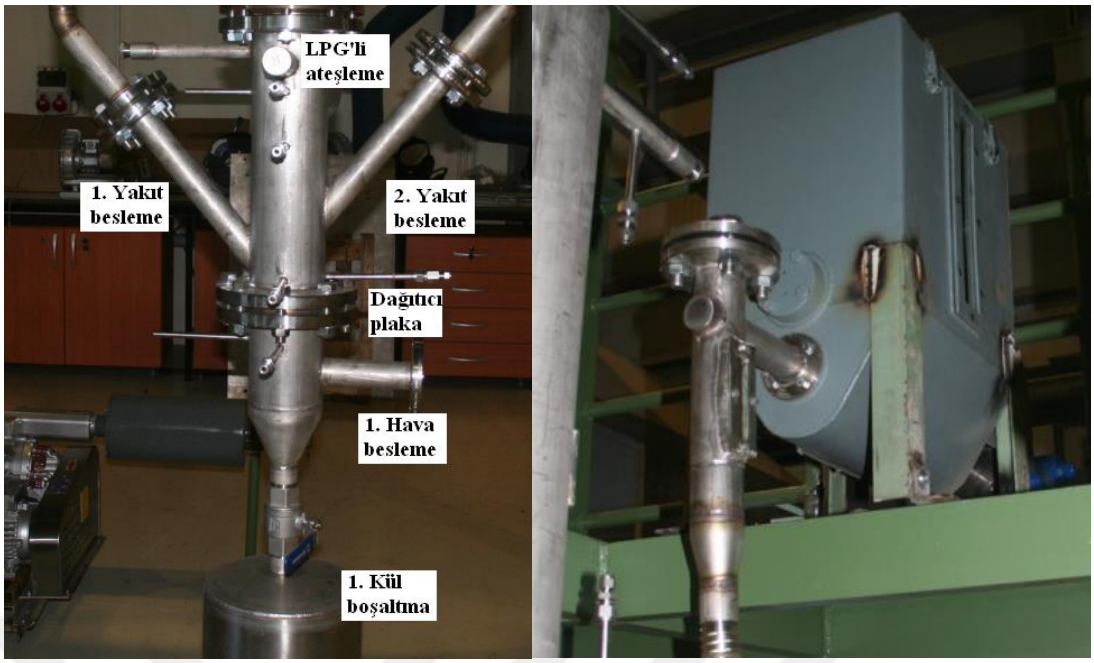
EK A: Lab DAY Yakma Sistemi Diyagramları



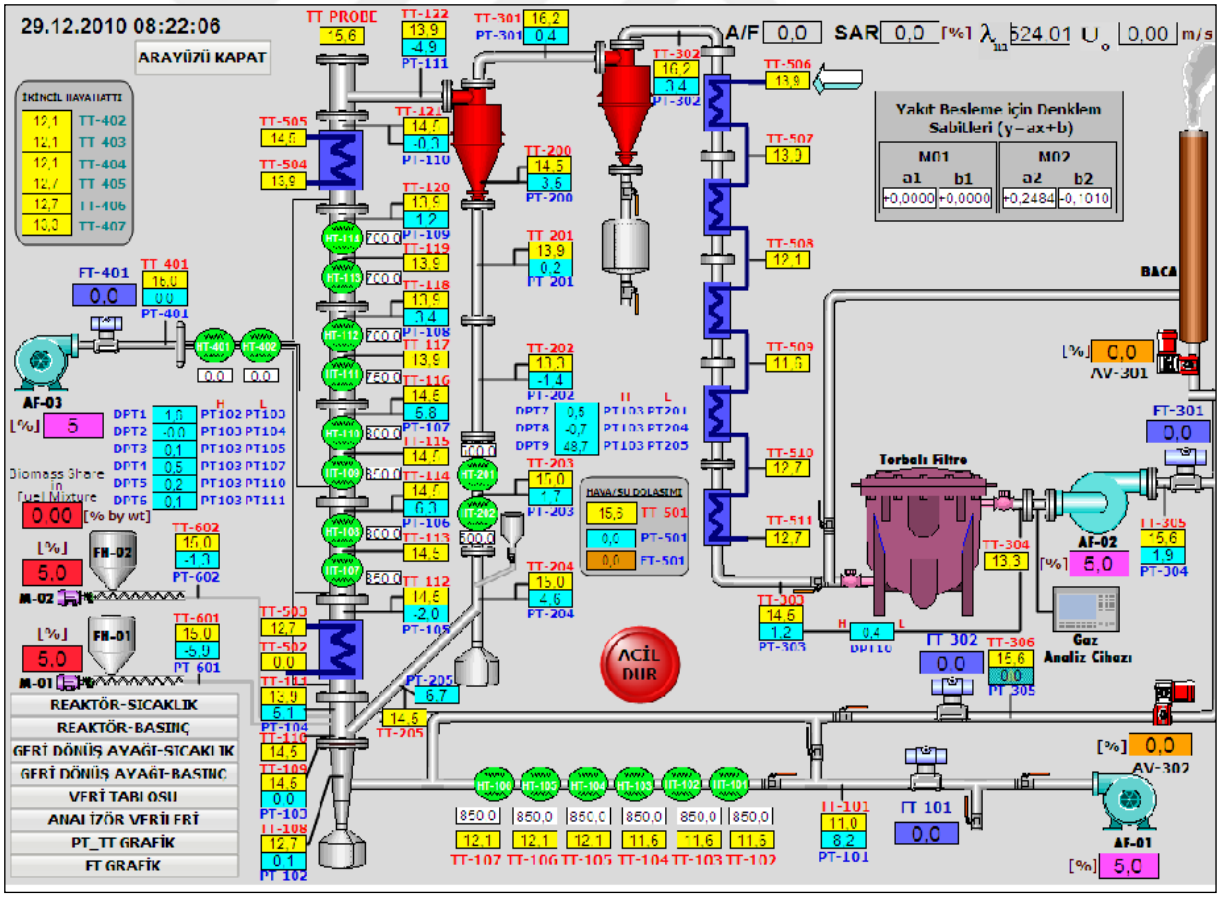
Şekil A.1 : Lab DAY yakma sistemi su/hava hattı PID diyagramı.



Şekil A.2 : Lab DAY yakma sistemi baca gazı hattı PID diyagramı.

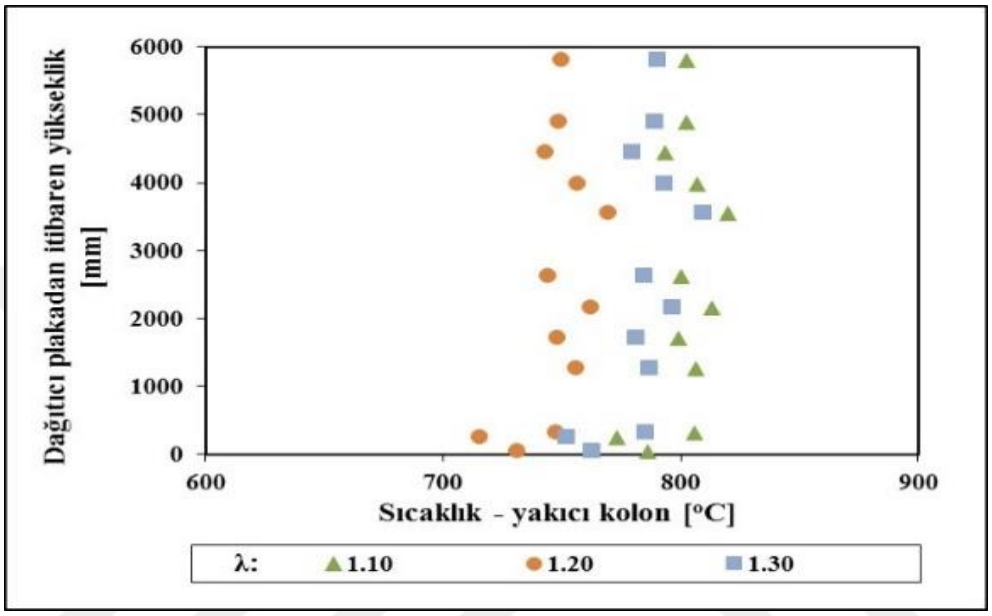


Şekil A.3 : Yakıt/adsorban besleme sistemi.

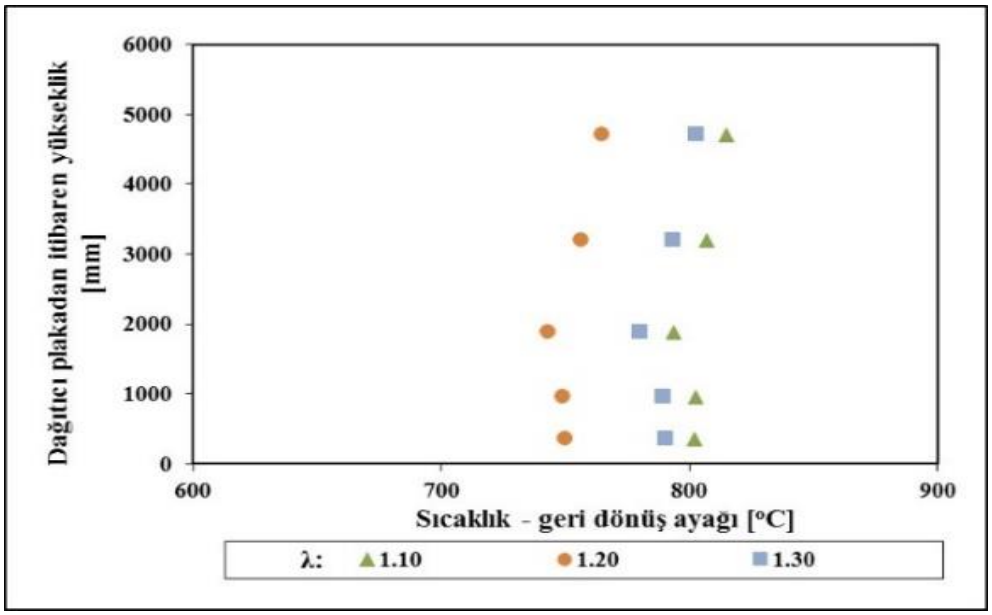


Şekil A.4 : Lab DAY sistemi kontrol arayüzü.

EK B: Havayla Yakma Deneylerinde Sıcaklık Dağılım Grafikleri

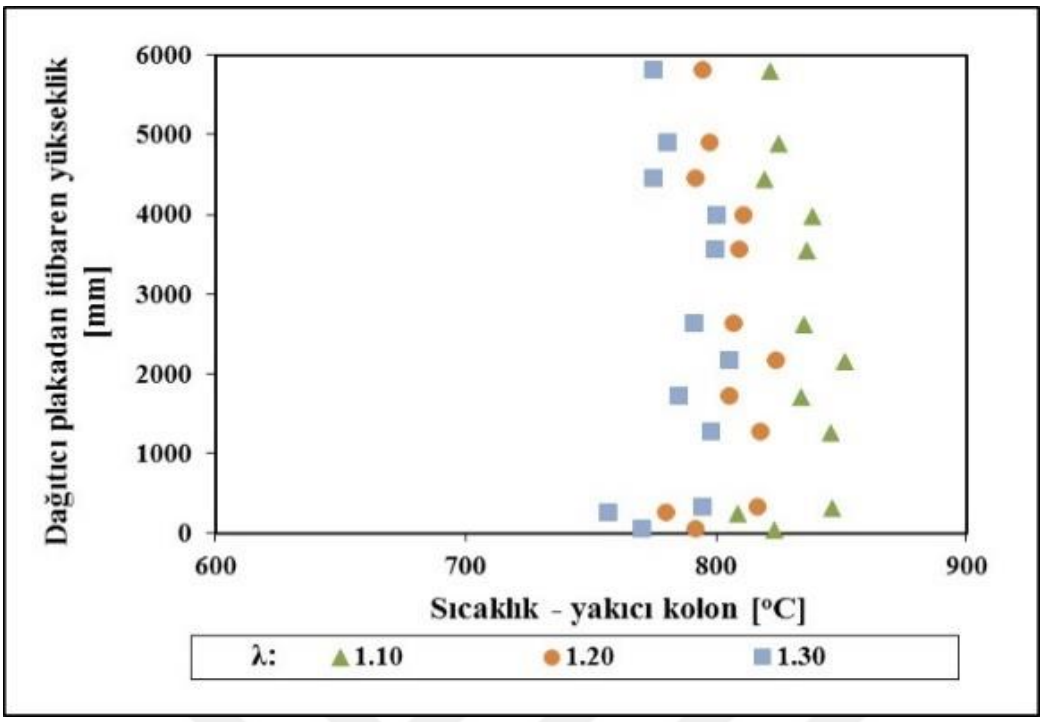


a) Akışkan yatak,

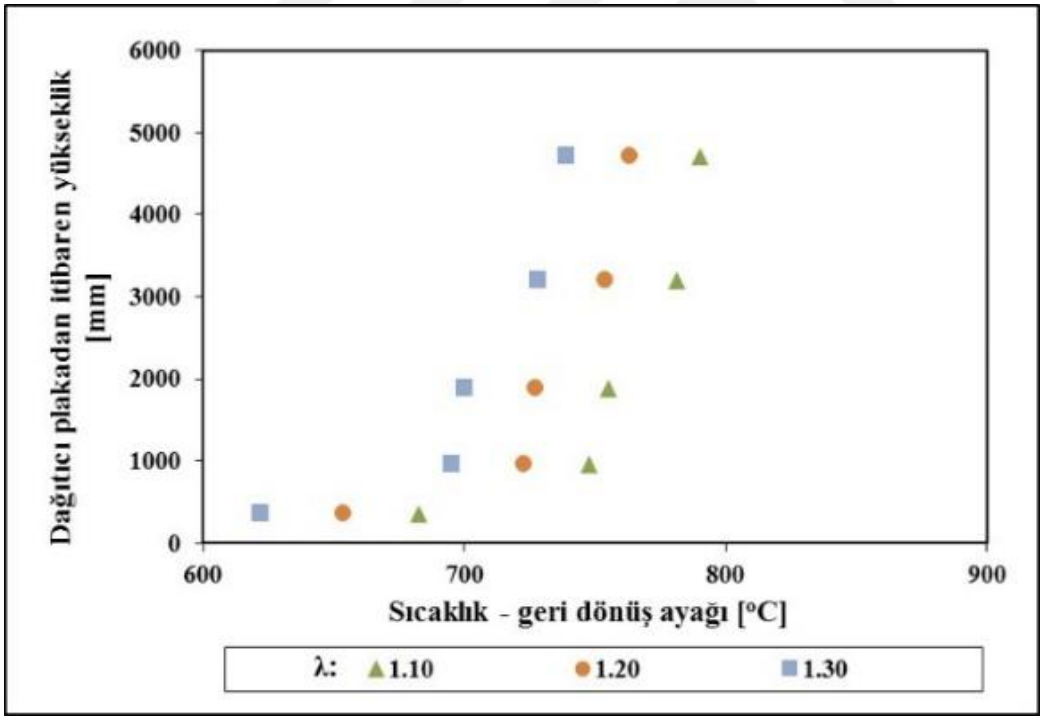


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.1: L3 (Kütahya-Ayvalı pano) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

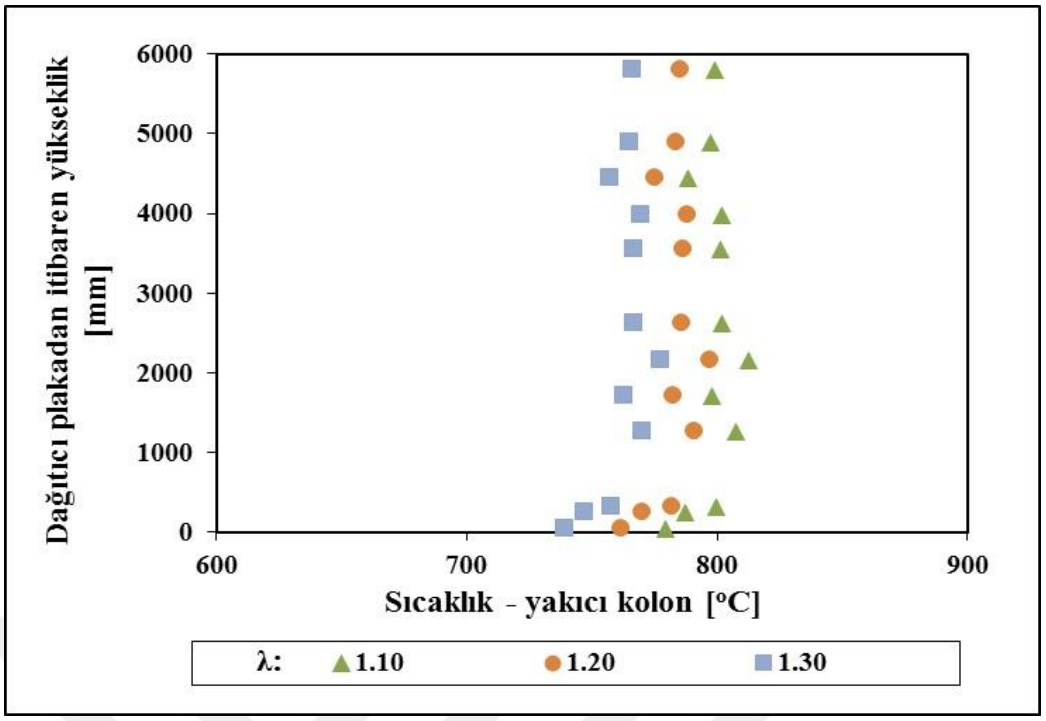


a) Akışkan yatak,

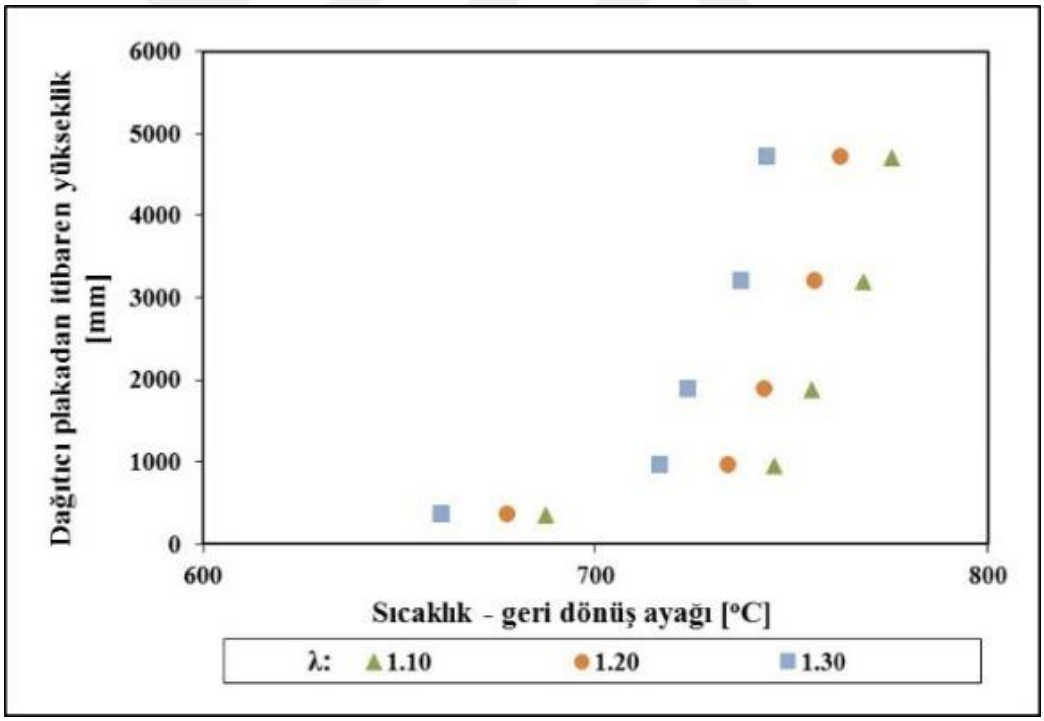


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.2: L4 (Kütahya-Höyükaltı krible) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

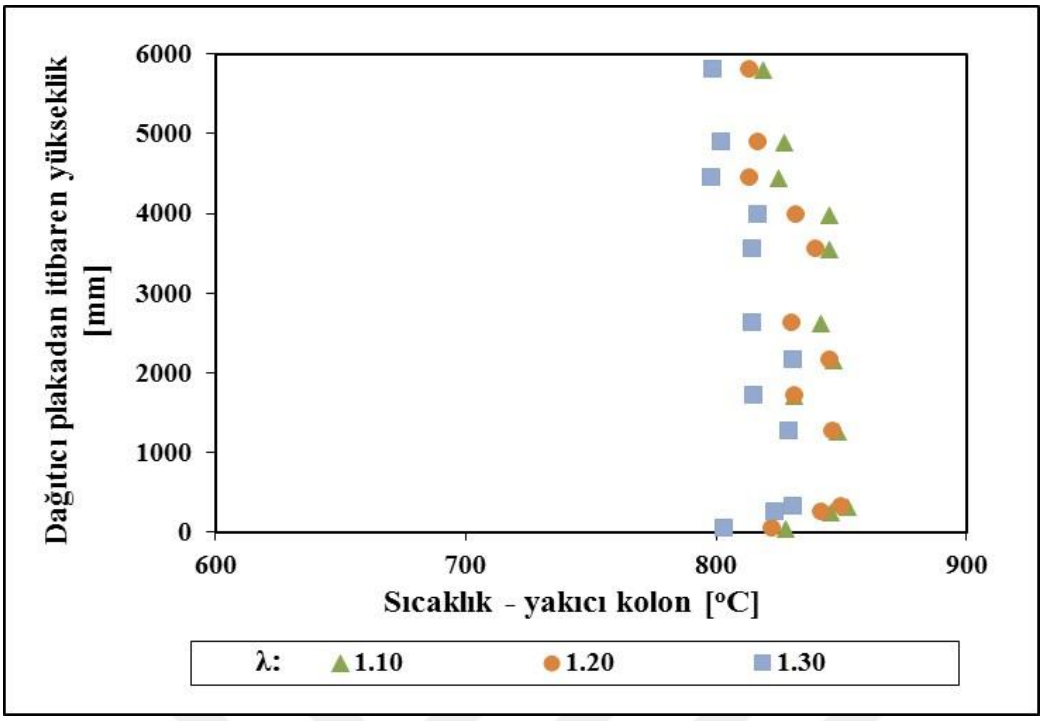


a) Akışkan yatak,

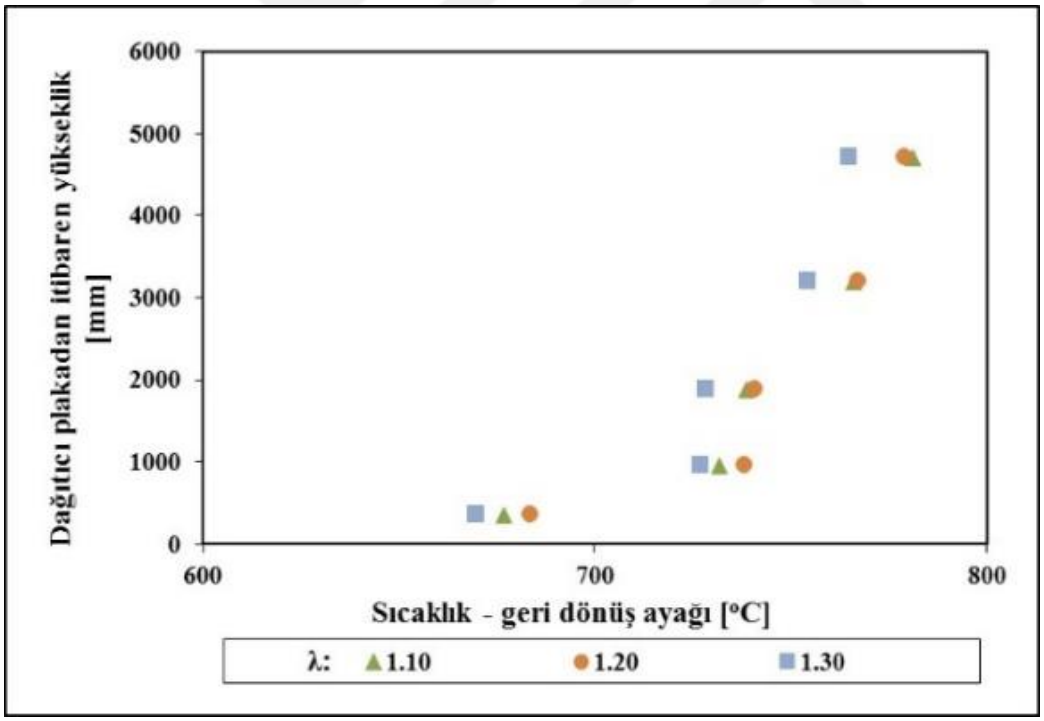


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.3: L5 (Kütahya-S48 Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

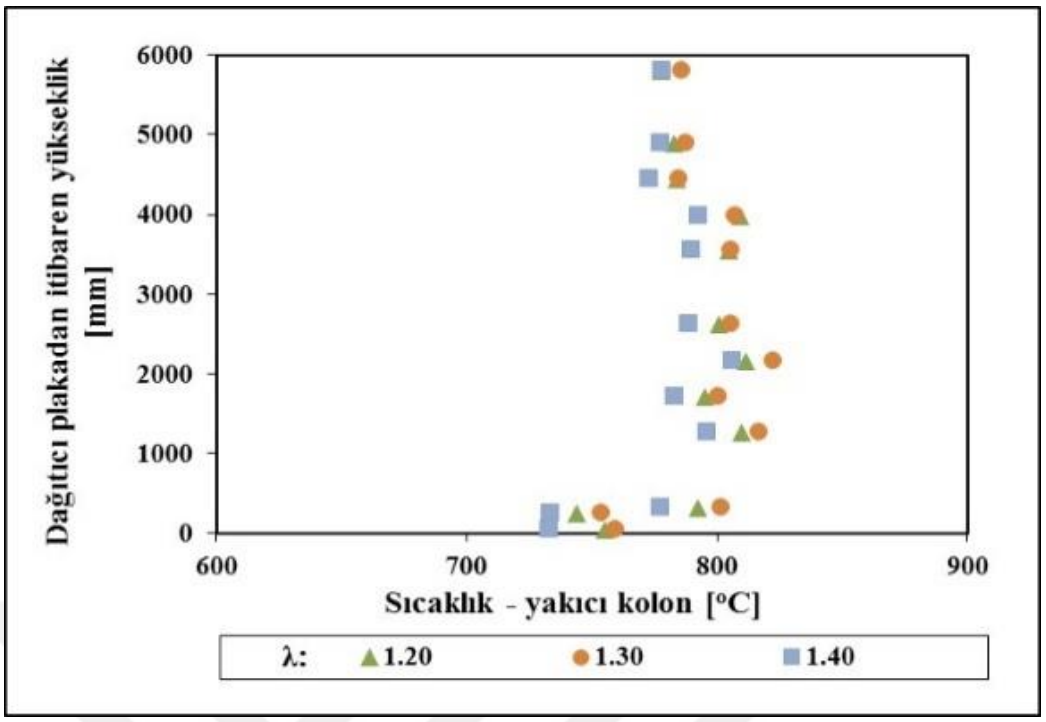


a) Akışkan yatak,

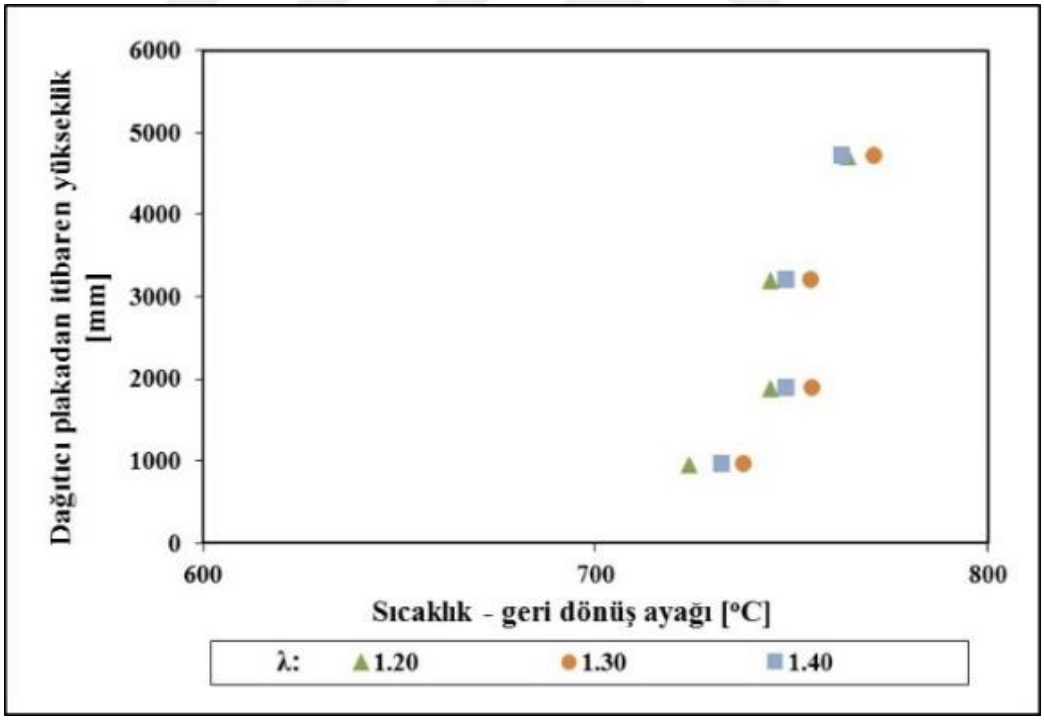


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.4: L6 (Manisa-İmbat Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

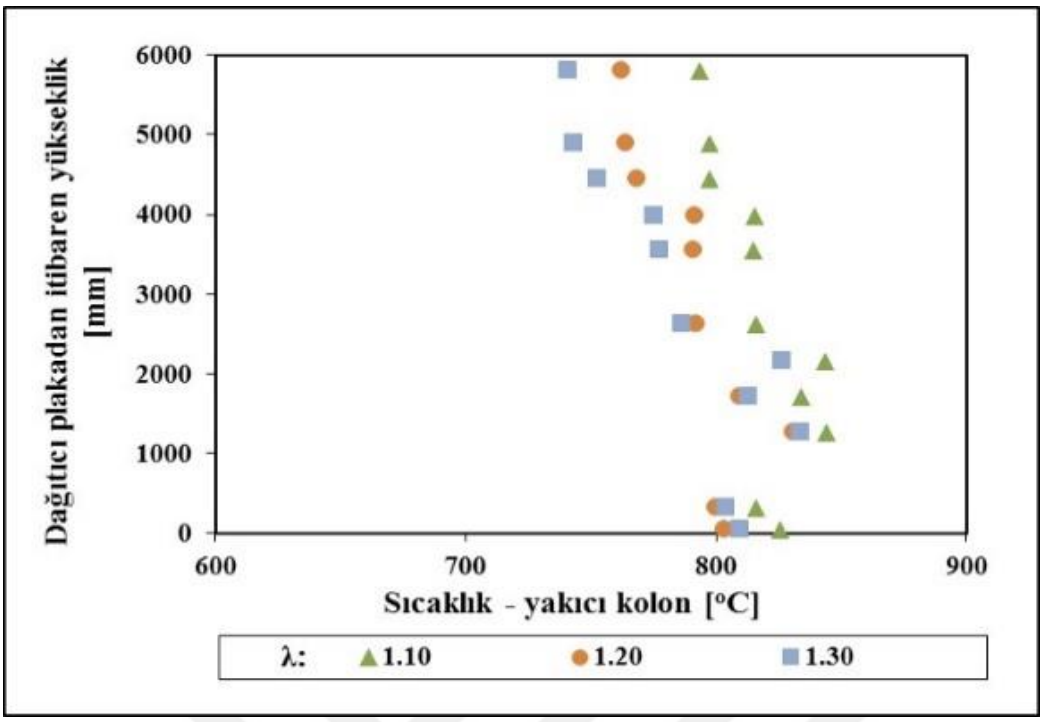


a) Akışkan yatak,

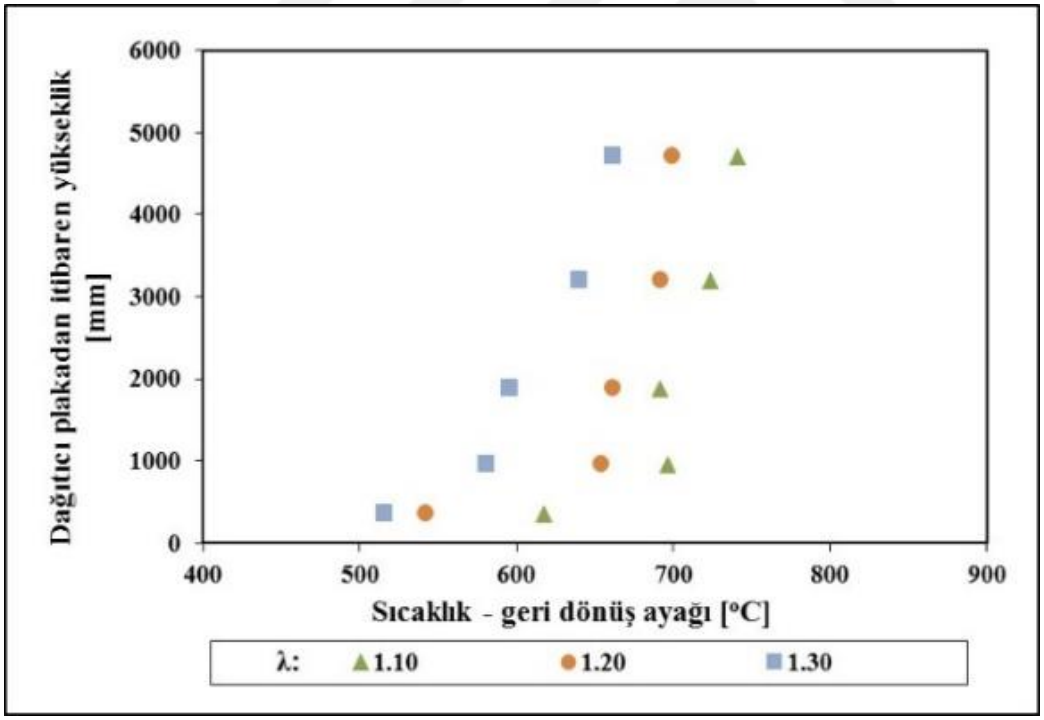


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.5: L7 (Manisa-İmbat araürün) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

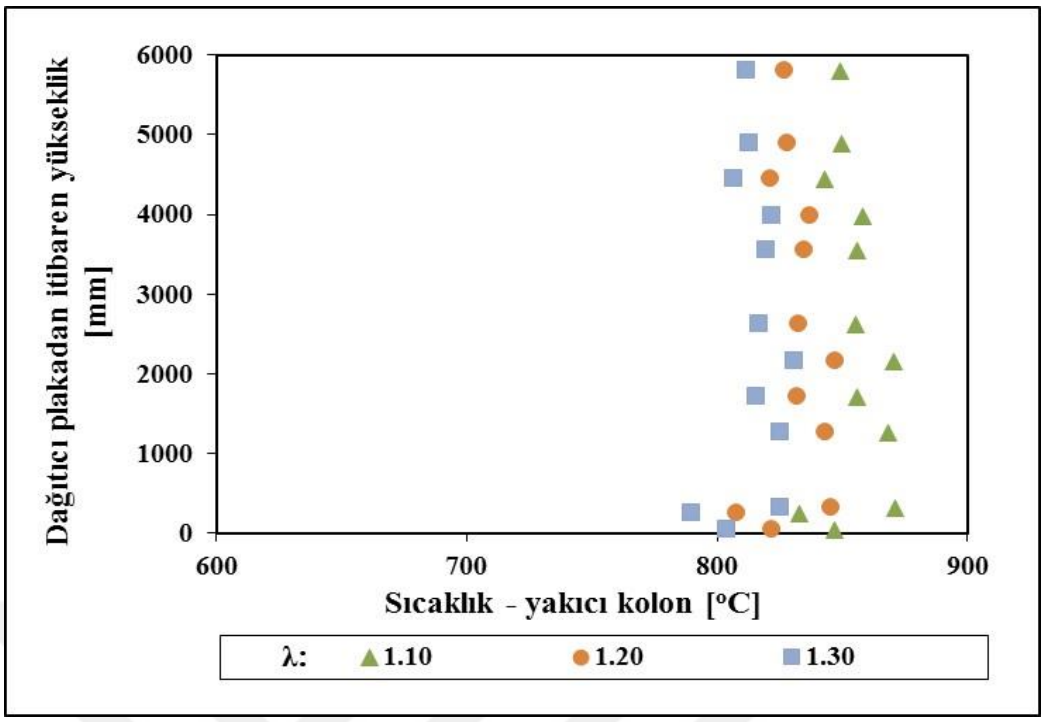


a) Akışkan yatak,

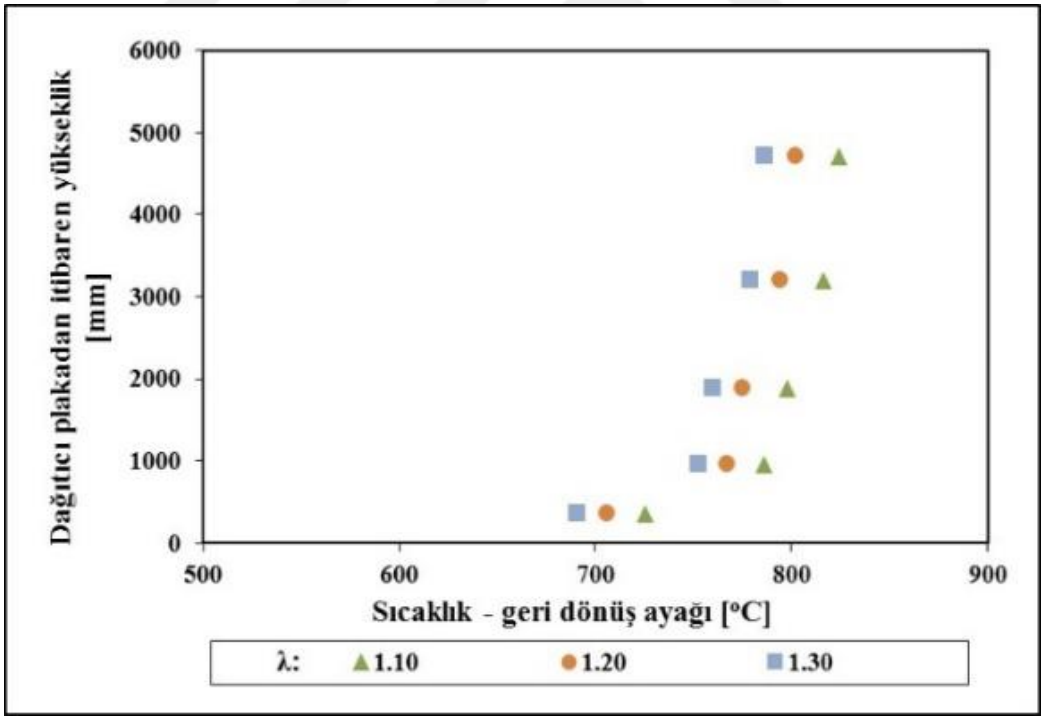


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.6: L8 (Manisa-İmbat tüvenan) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

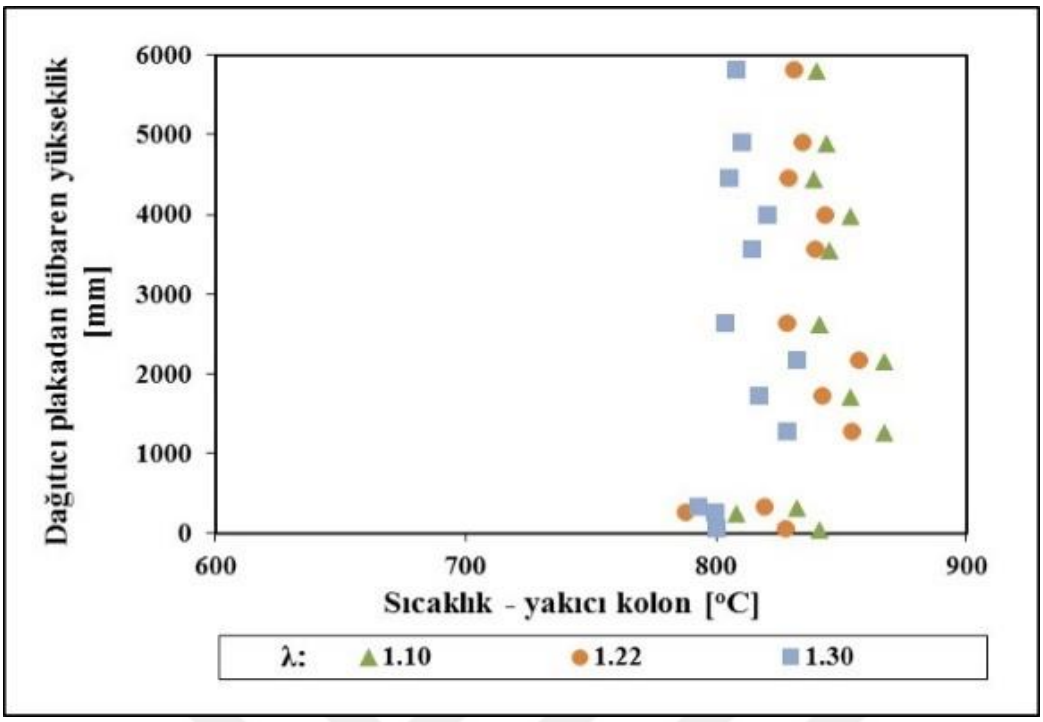


a) Akışkan yatak,

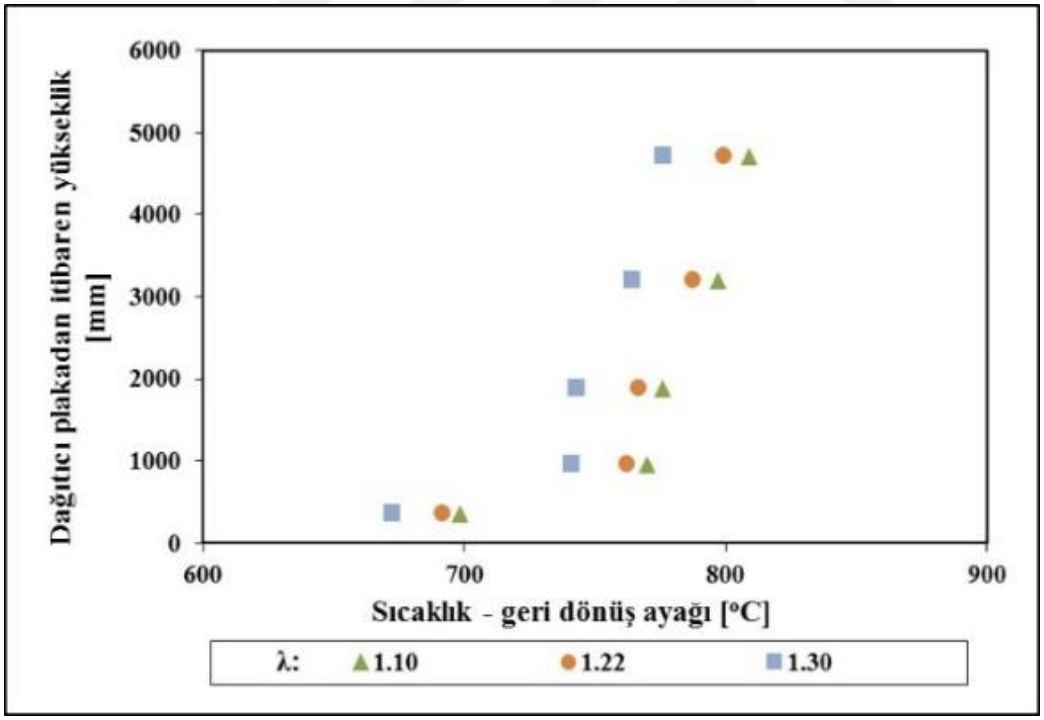


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.7: L9 (Manisa-Kısrakdere) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

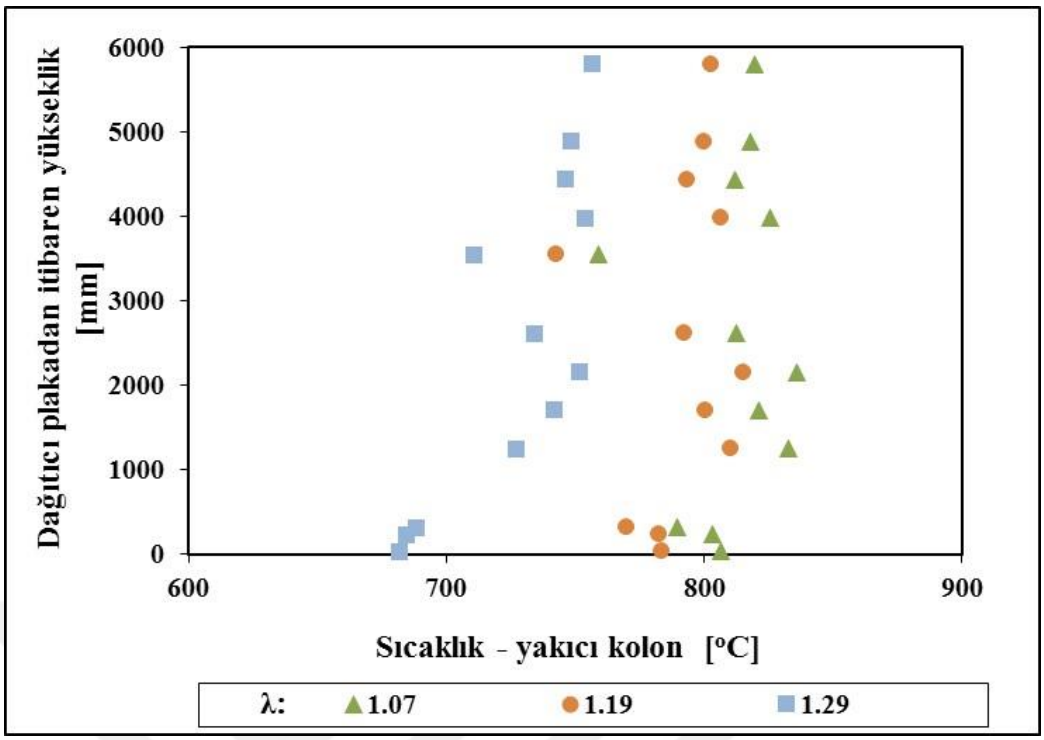


a) Akışkan yatak,

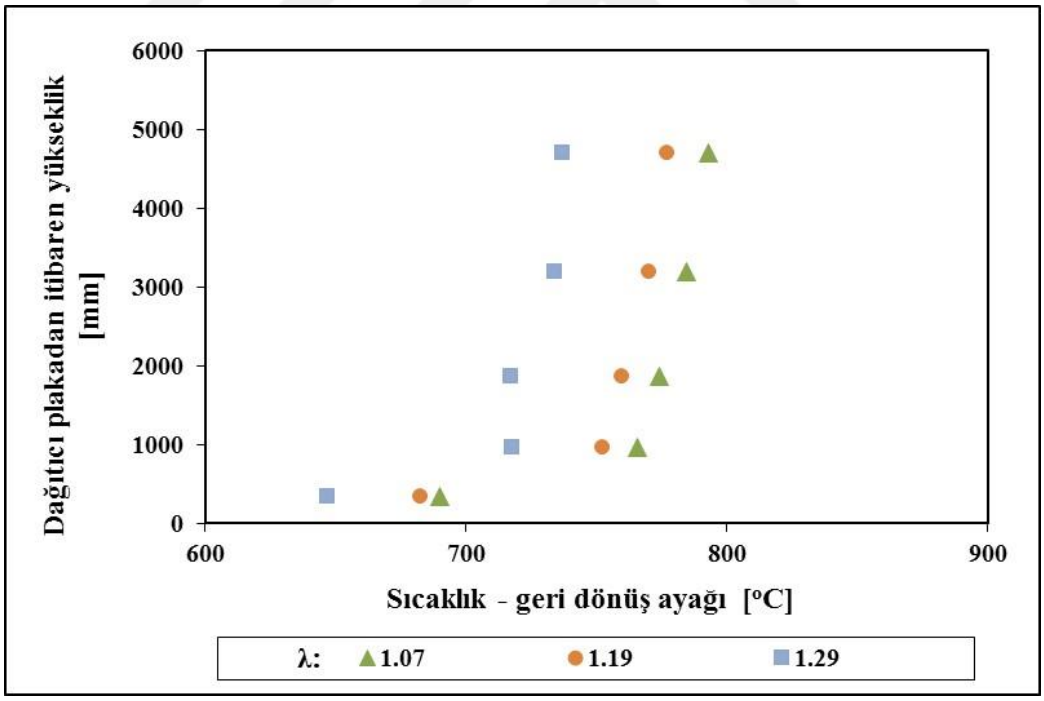


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.8: L10 (Manisa-Dereköy Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

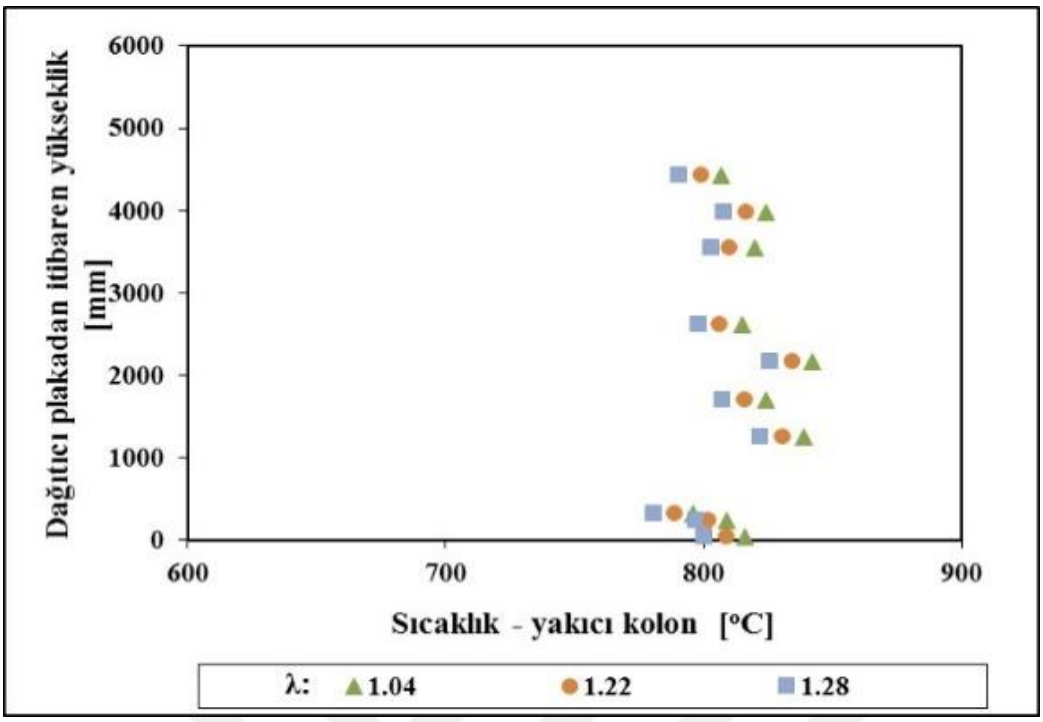


a) Akışkan yatak,

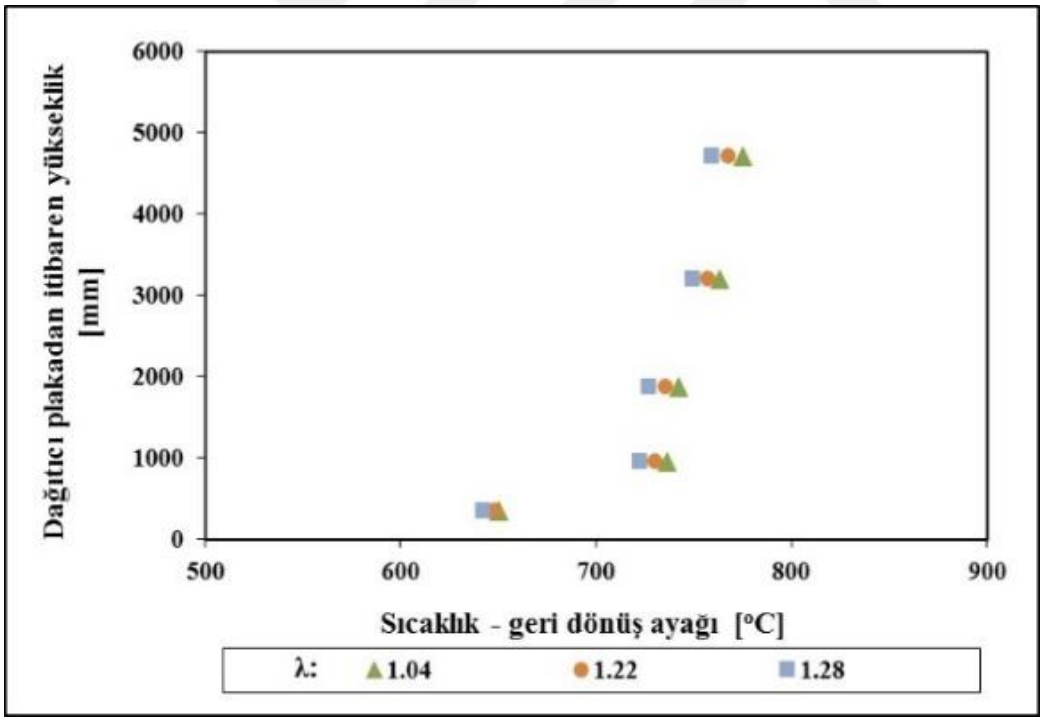


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.9: L11 (Muğla-Eskihisar) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

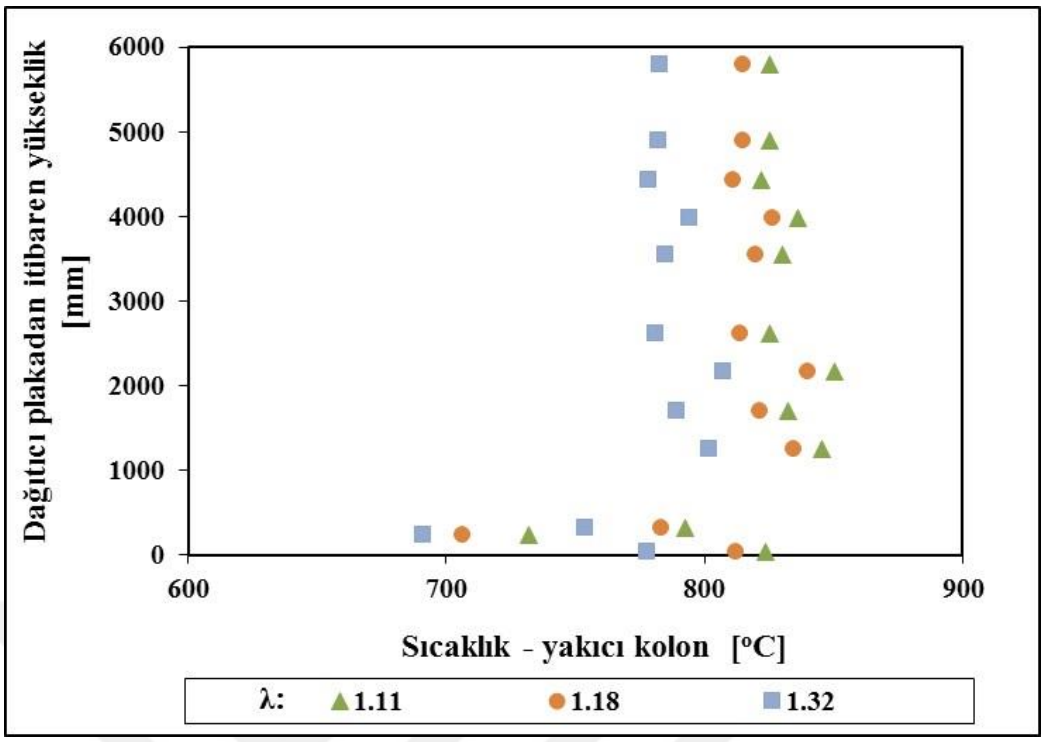


a) Akışkan yatak,

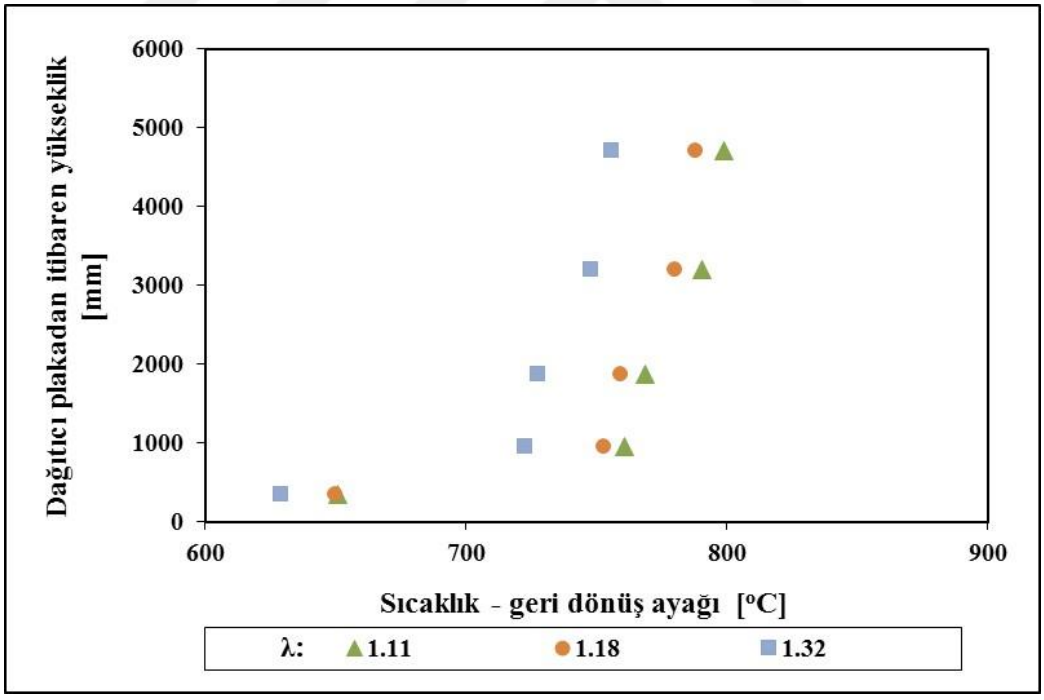


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.10: L13 (Muğla-Hüsamlar krible) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

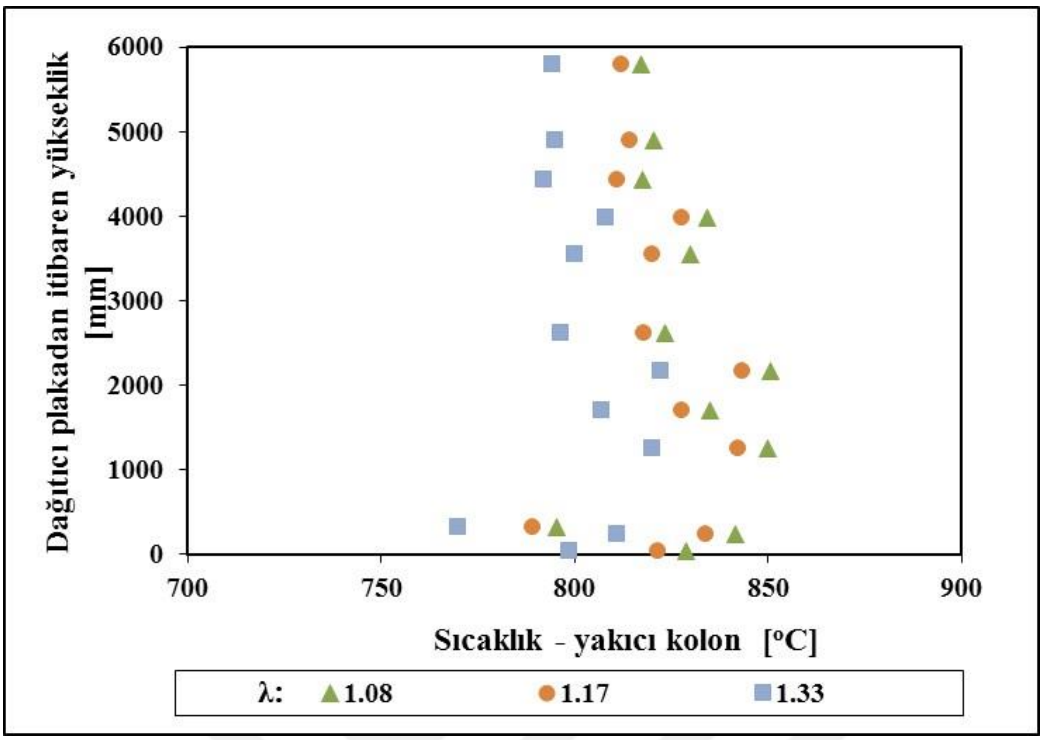


a) Akışkan yatak,

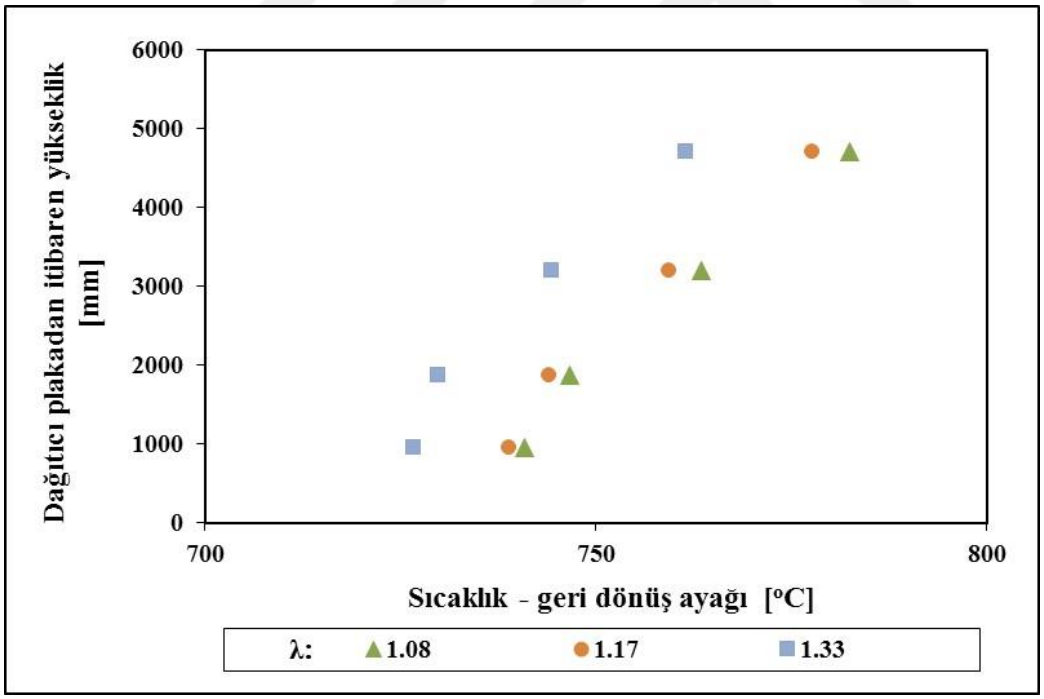


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.11: L14 (Muğla-İkizköy Işıkdere) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

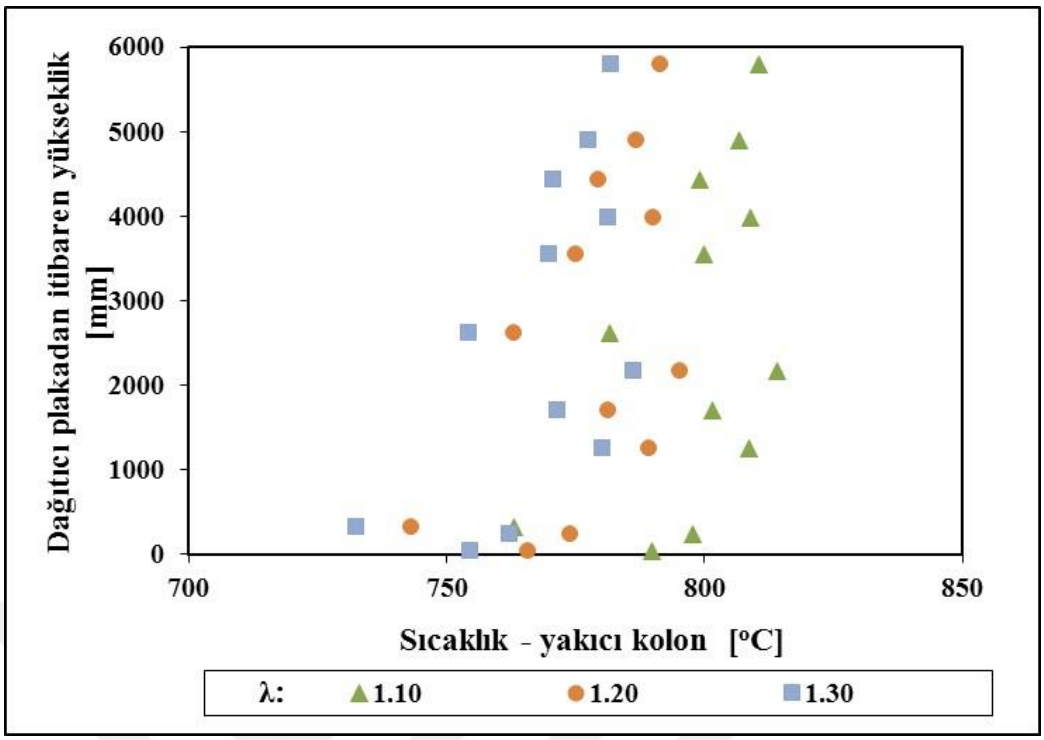


a) Akışkan yatak,

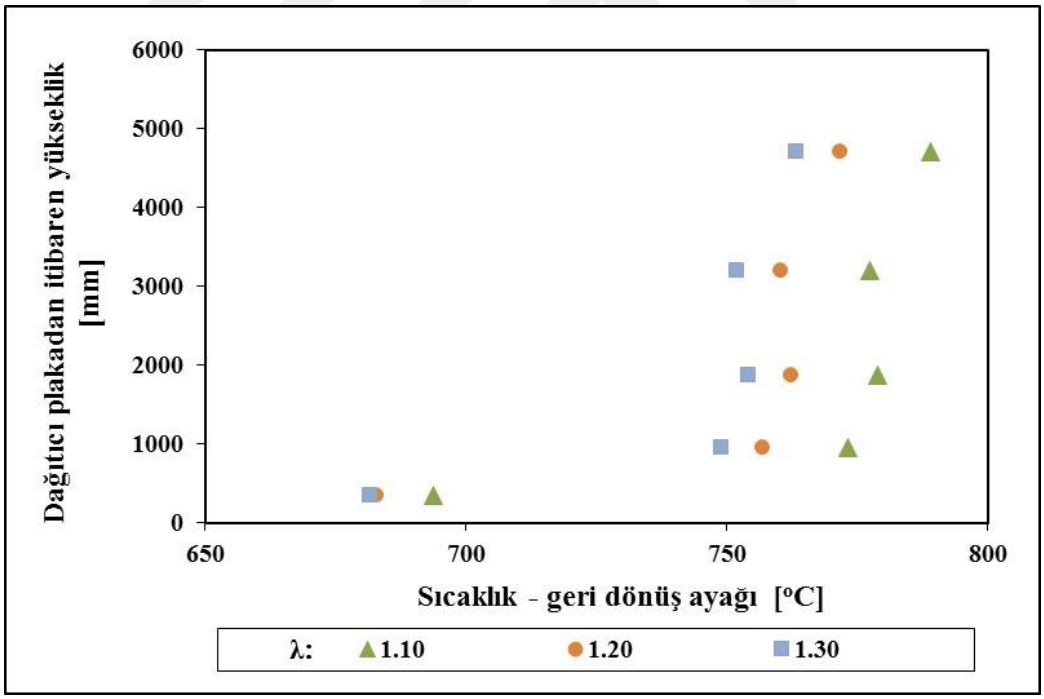


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.12: L15 (Bursa-Orhaneli) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

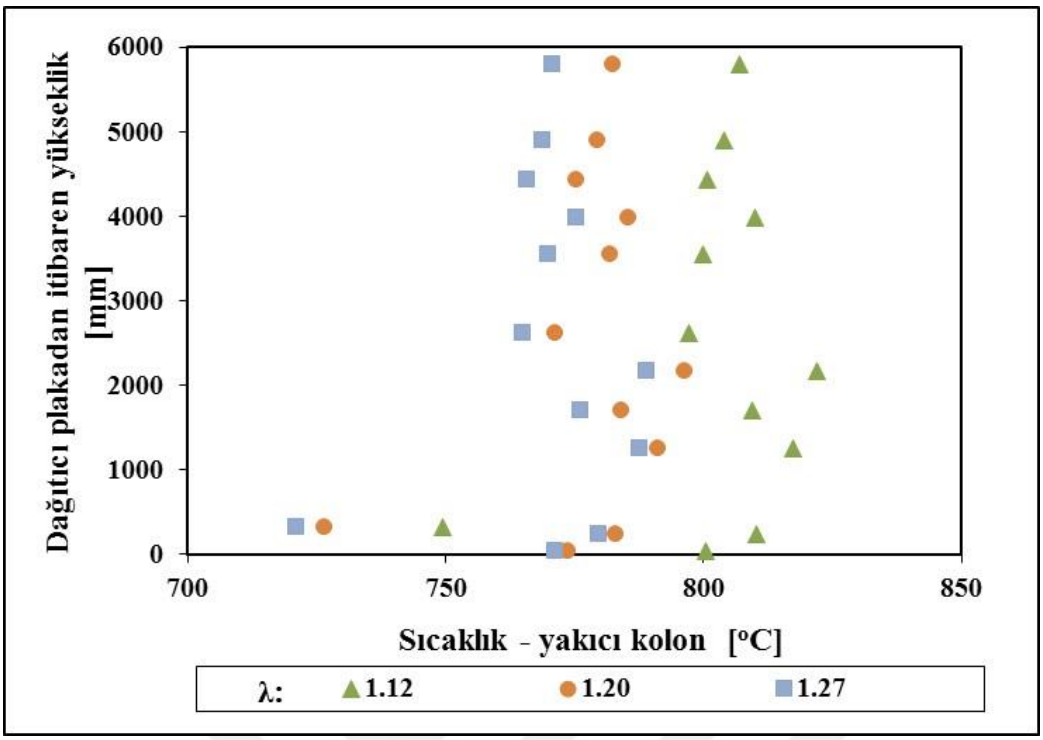


a) Akışkan yatak,

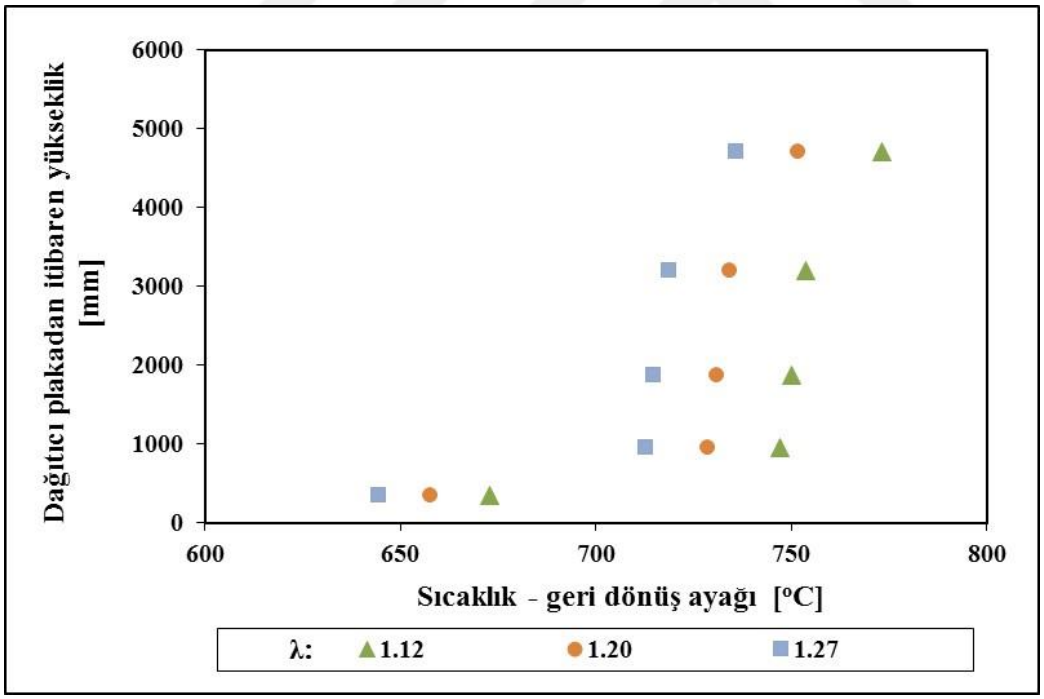


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.13: L16 (Bursa-Keles) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

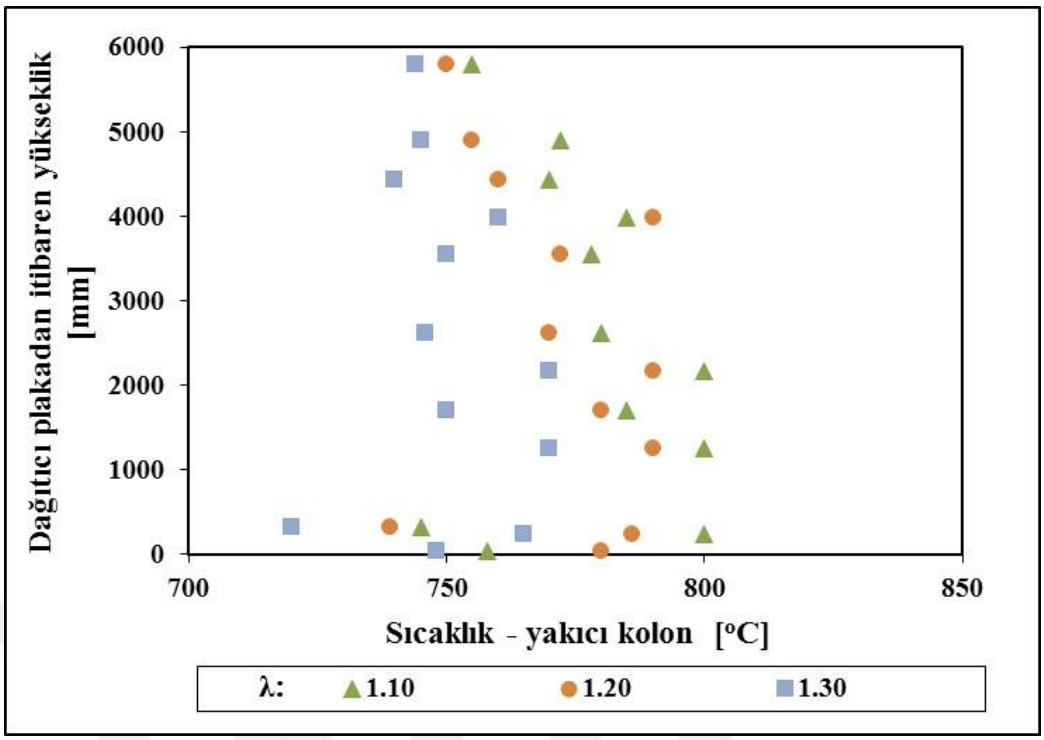


a) Akışkan yatak,

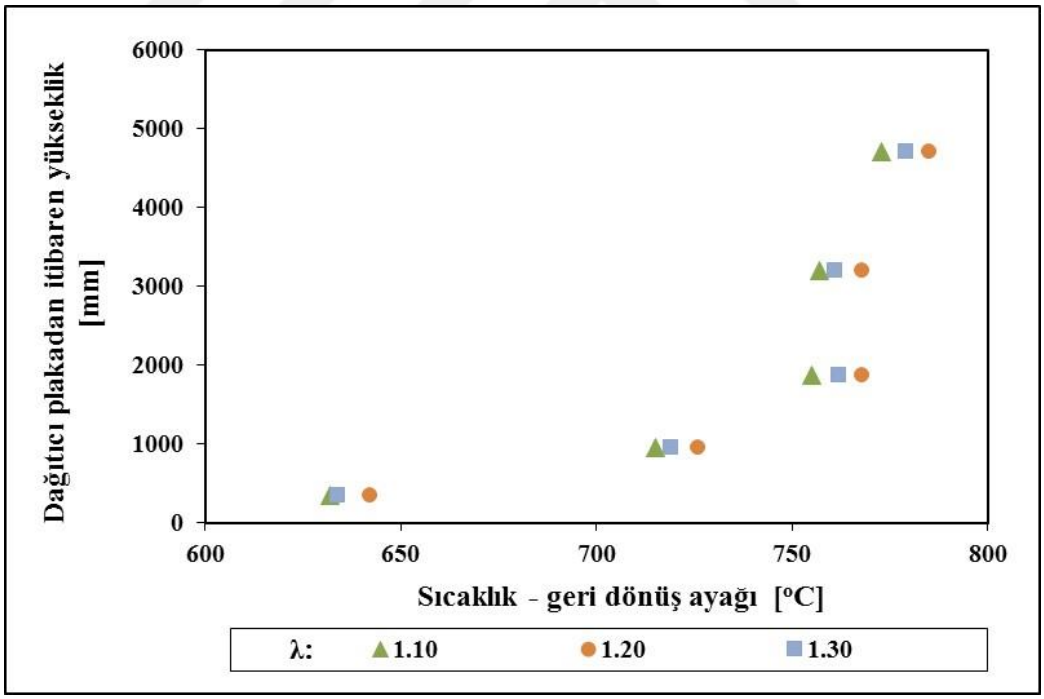


b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.14: L17 (Çanakkale-Çan) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.



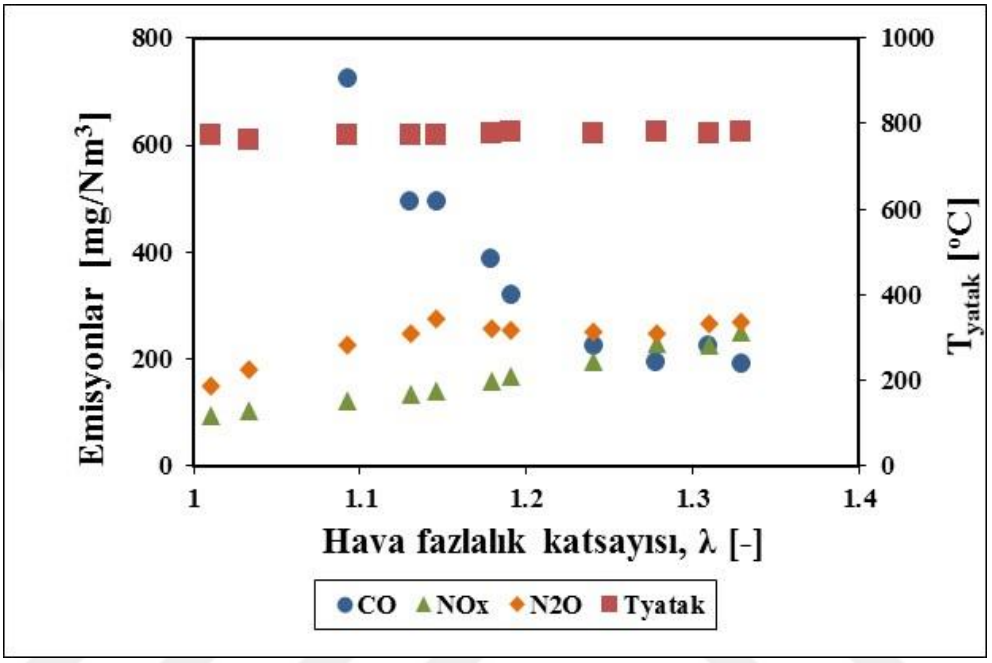
a) Akışkan yatak,



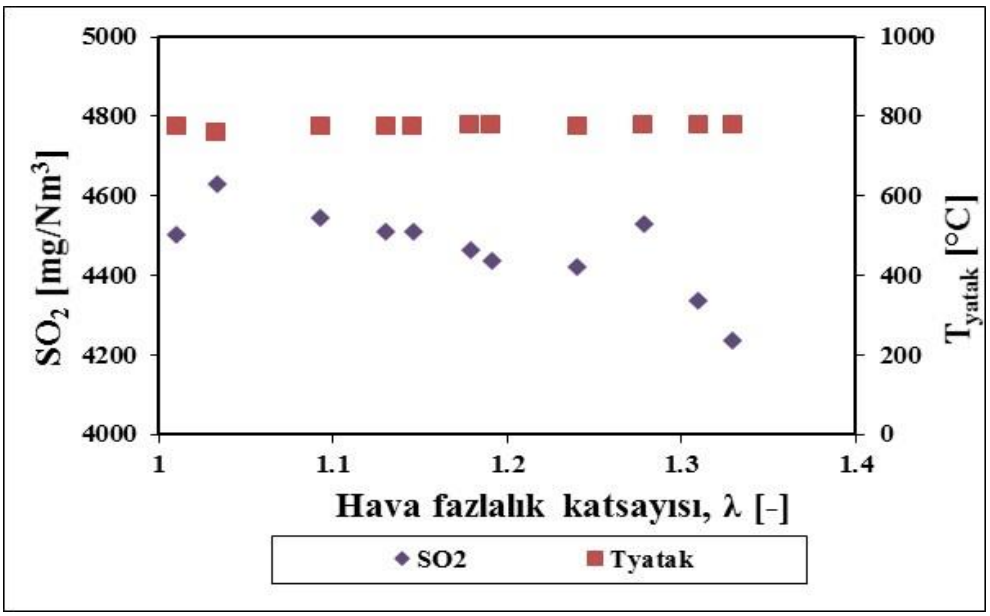
b) Geri dönüş ayağı.

Şekil B.15: L19 (Manisa-Soma) linyitinin havayla yanma sürecinde akışkan yatakta ve geri dönüş ayağında sıcaklık profilleri.

EK C: Havayla Yakma Deneylerinde Emisyon Grafikleri

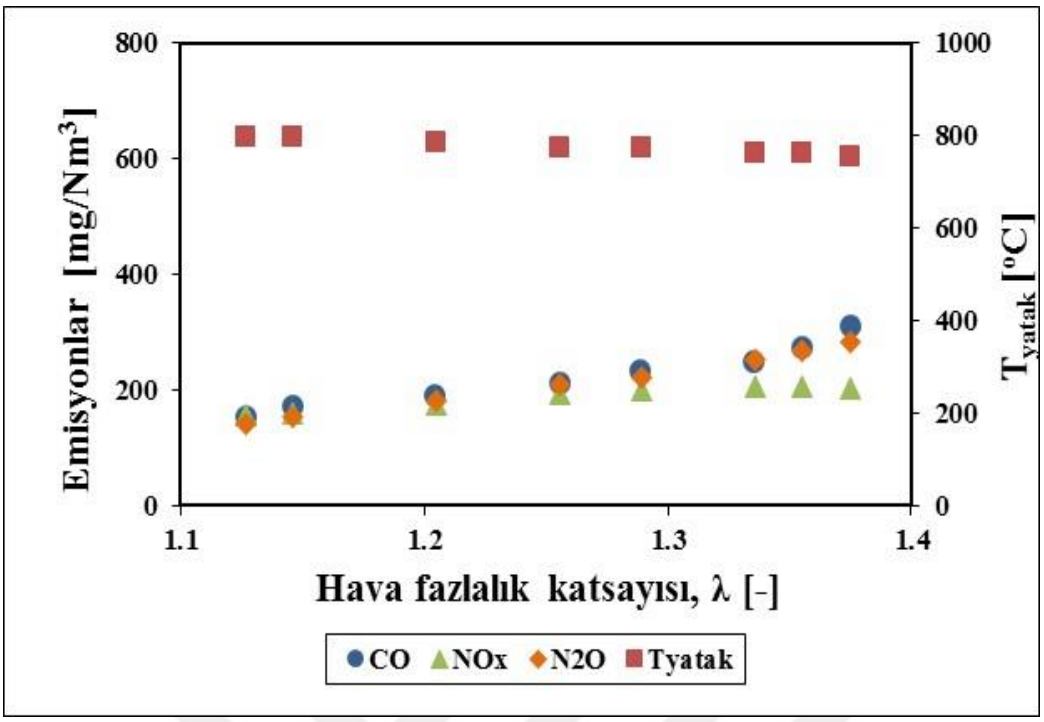


a) CO, NOx ve N_2O.

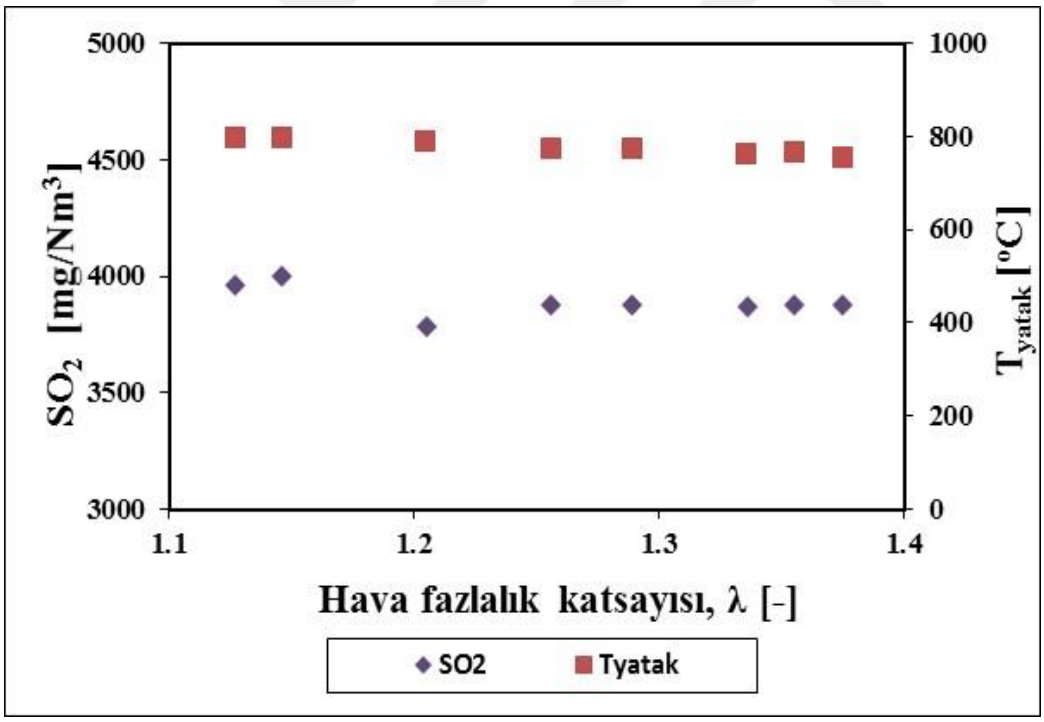


b) SO_2.

Şekil C.1: L3 (Kütahya-Ayvalı pano) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

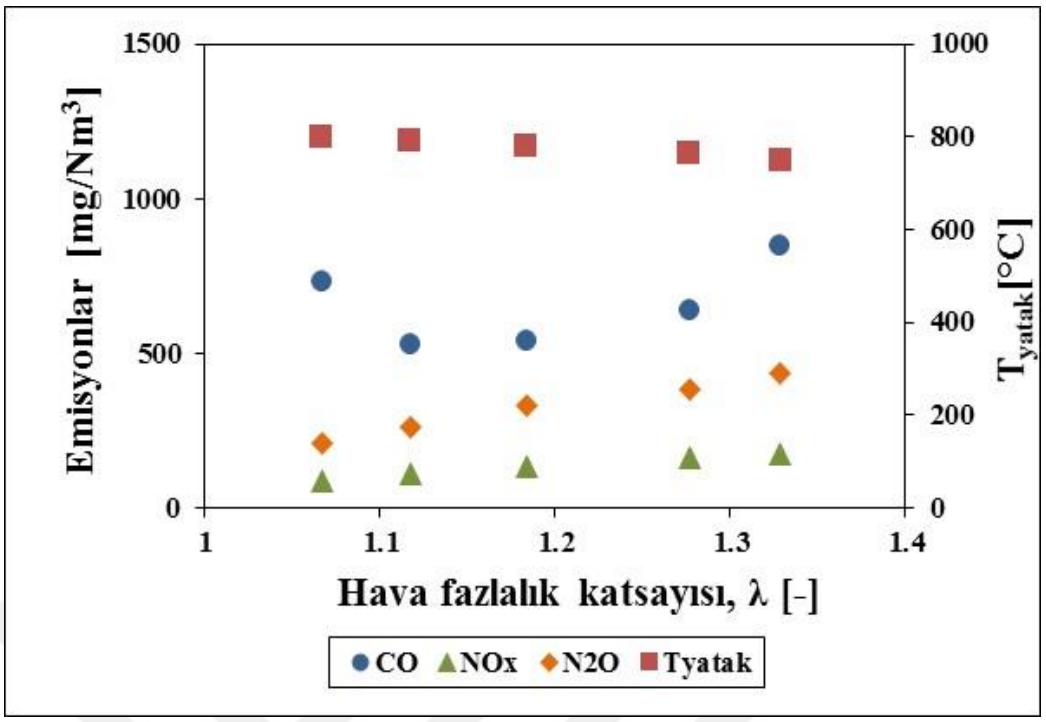


a) CO, NOx ve N_2O.

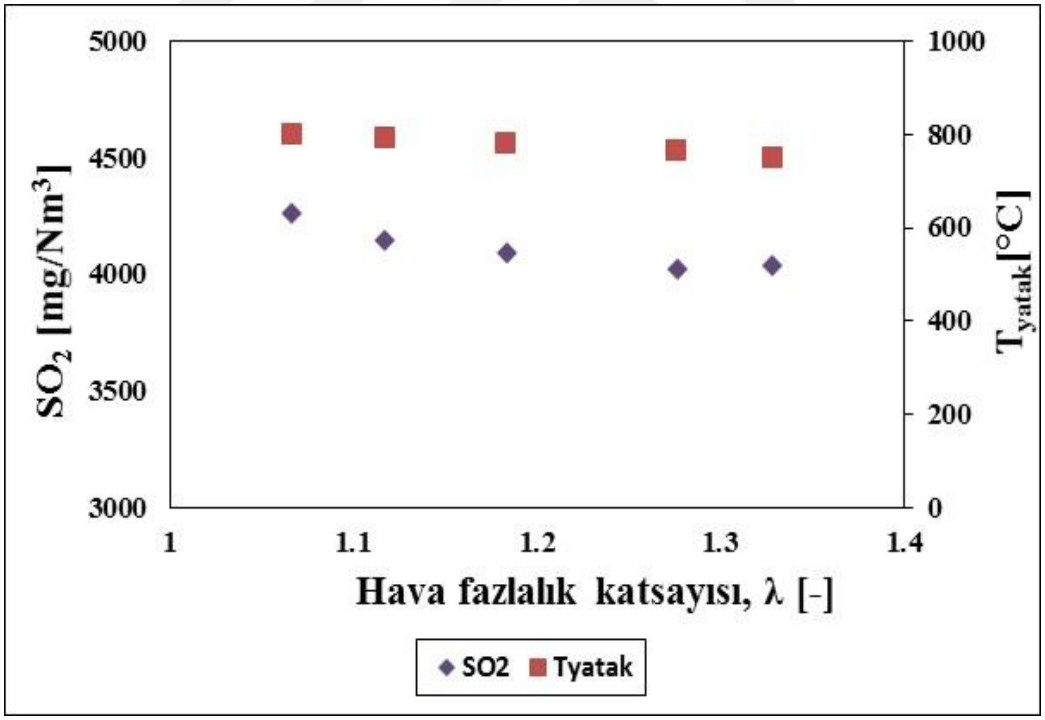


b) SO_2.

Şekil C.2: L4 (Kütahya-Höyükaltı krible) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

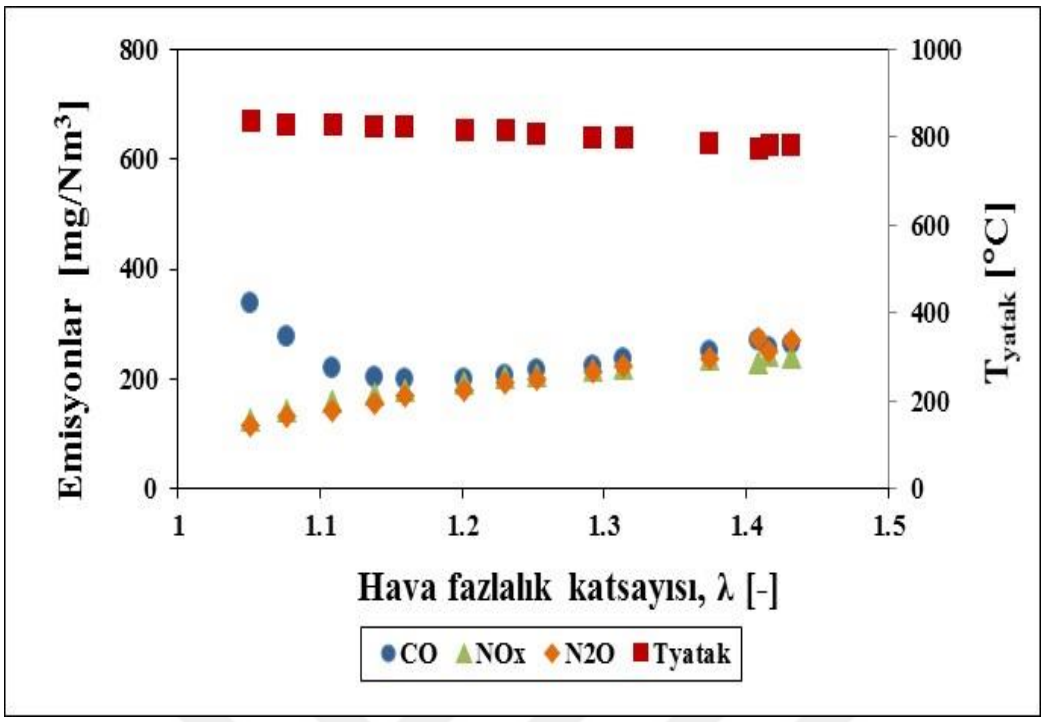


a) CO, NOx ve N_2O.

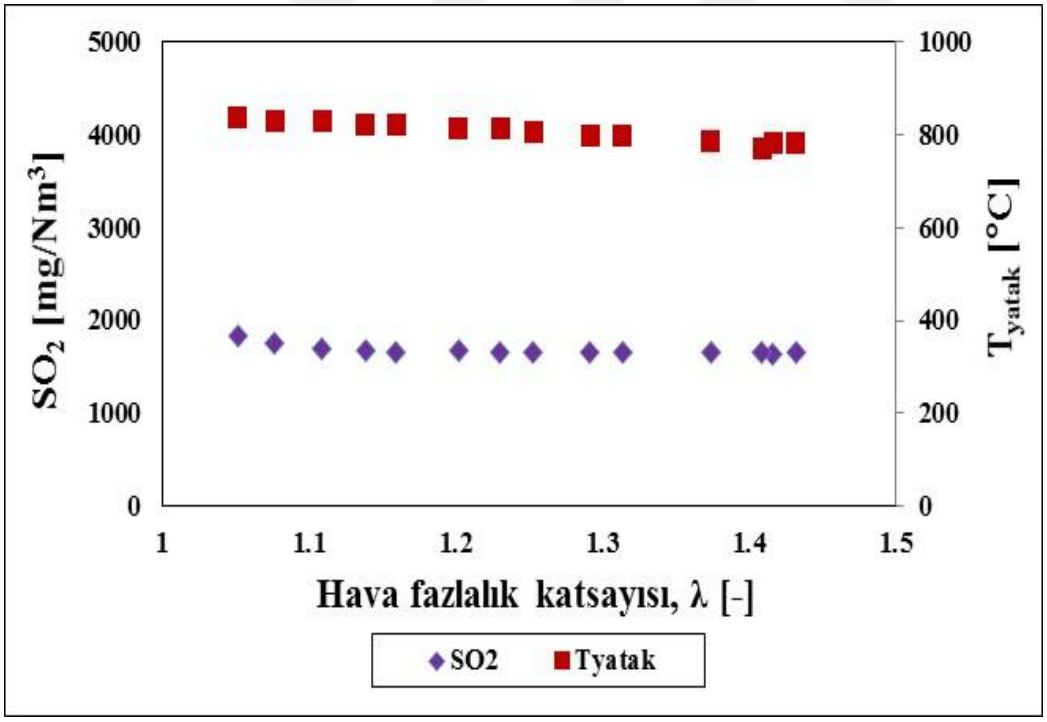


b) SO_2.

Şekil C.3: L5 (Kütahya-S48 Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

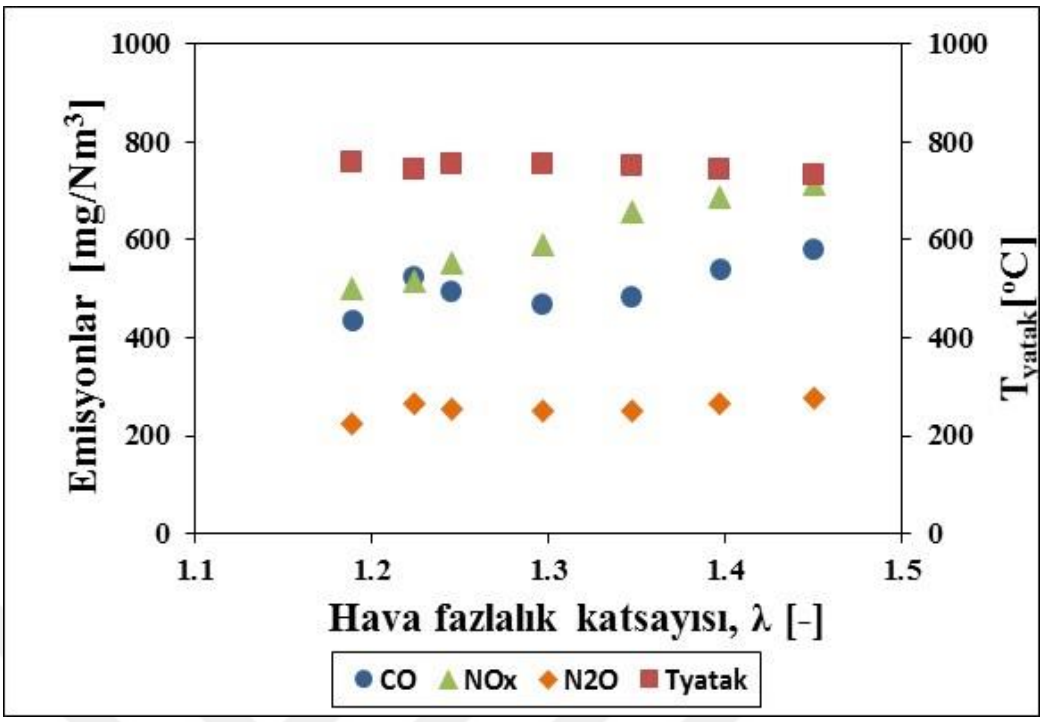


a) CO, NOx ve N_2O.

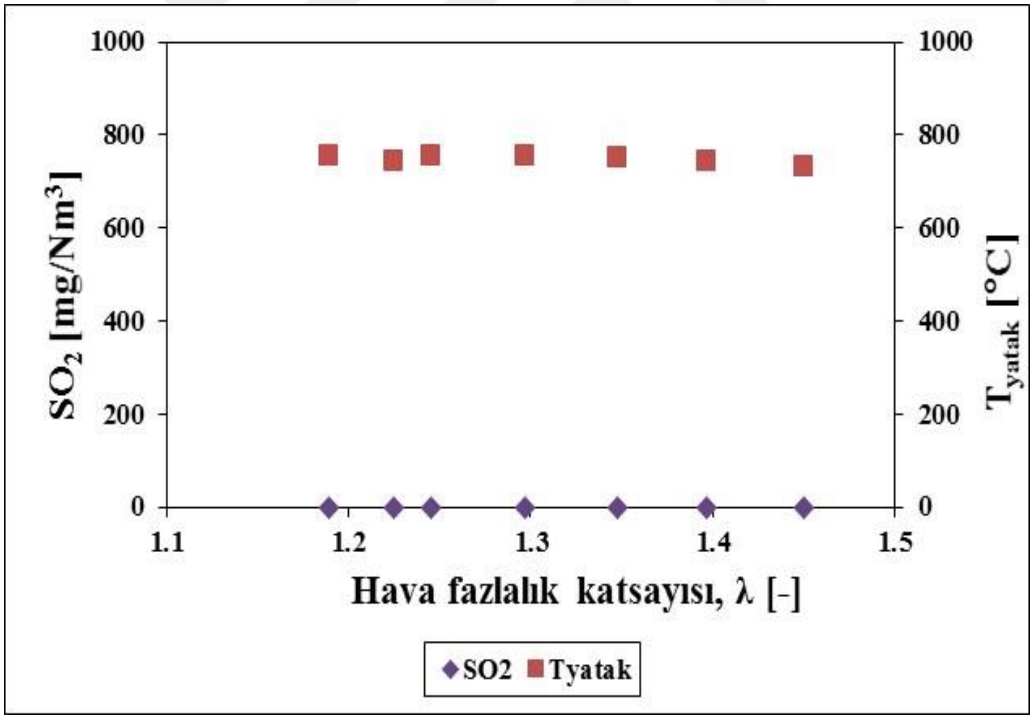


b) SO_2.

Şekil C.4: L6 (Manisa-İmbat Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

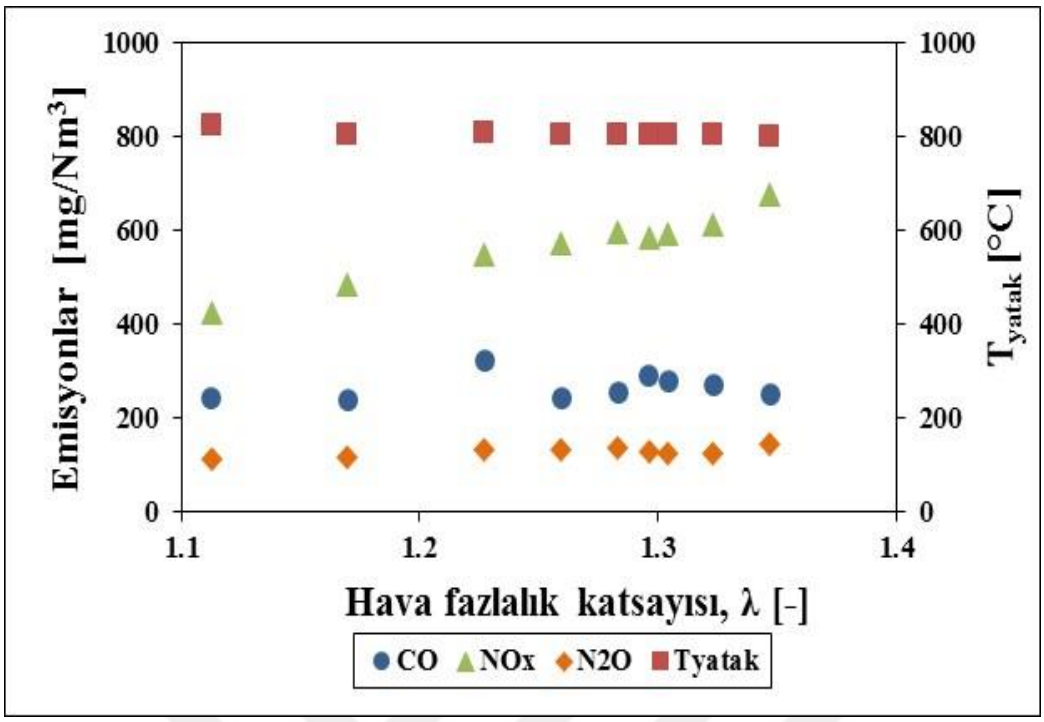


a) CO, NOx ve N_2O.

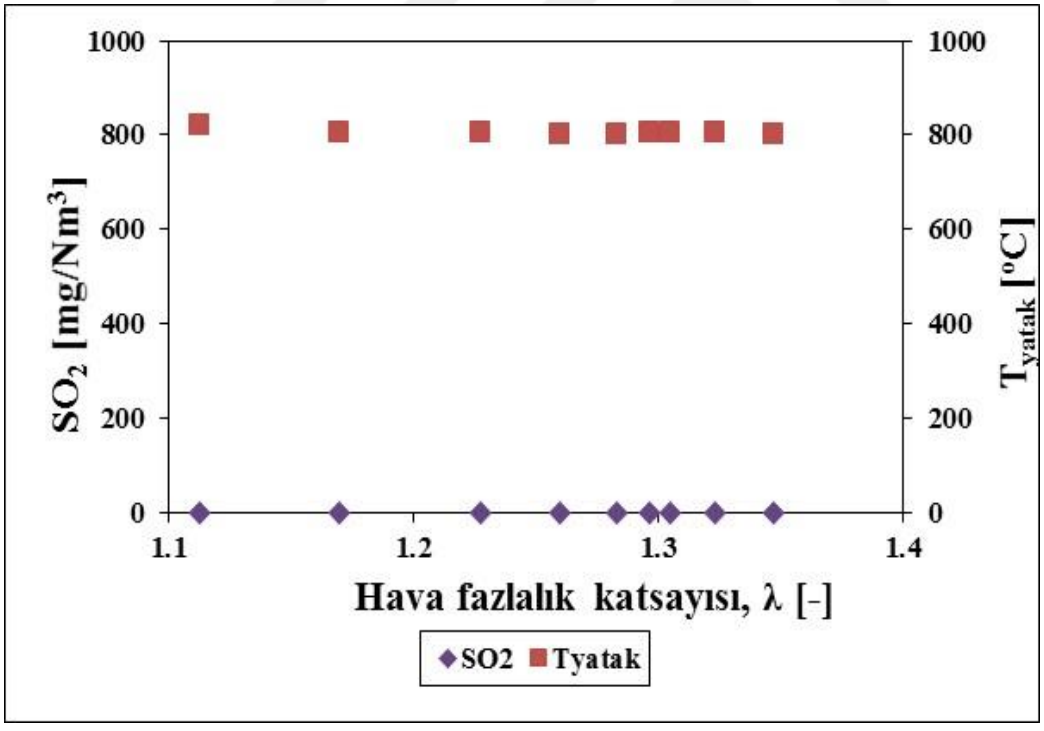


b) SO_2.

Şekil C.5: L7 (Manisa-İmbat araürün) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

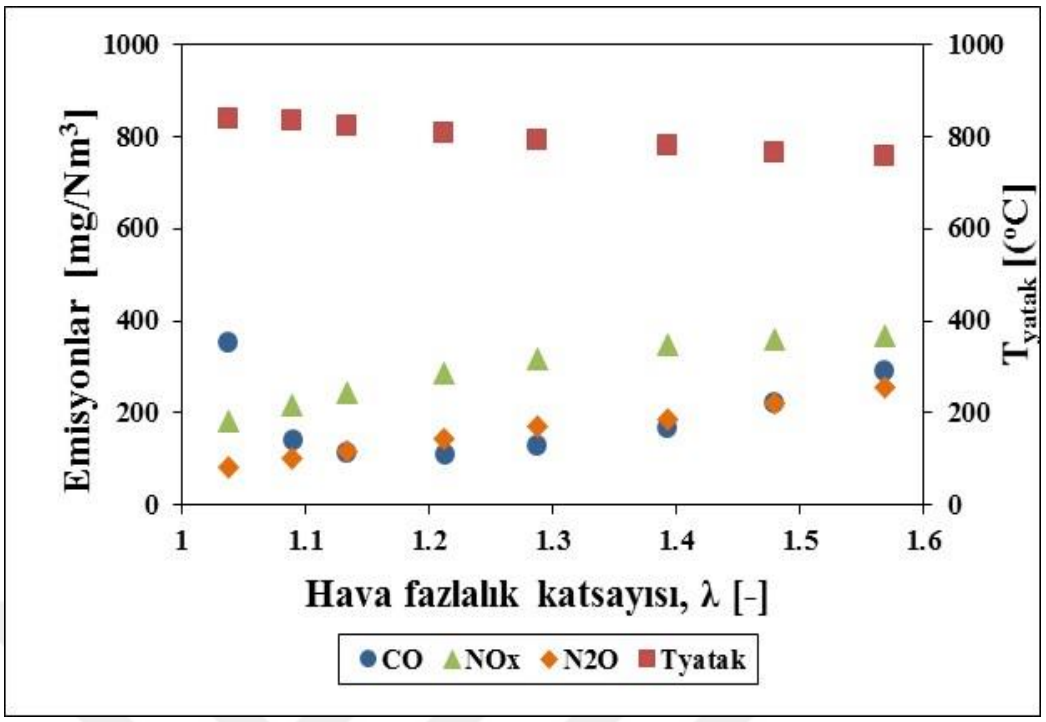


a) CO, NOx ve N_2O.

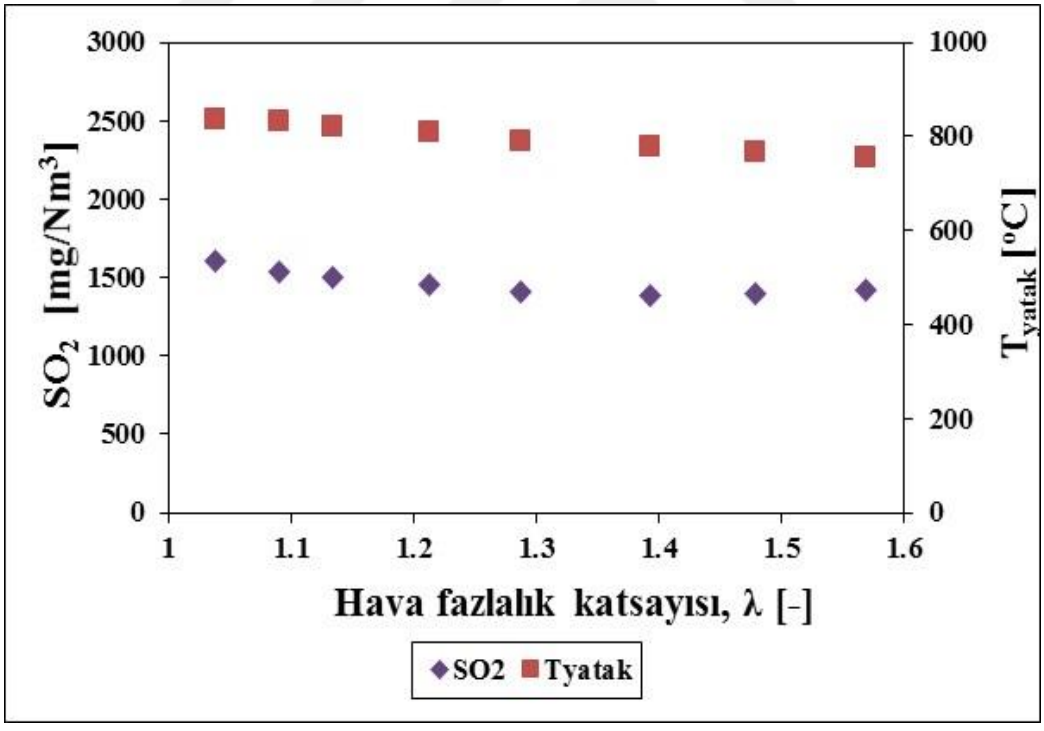


b) SO_2.

Şekil C.6: L8 (Manisa-İmbat tüvenan) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

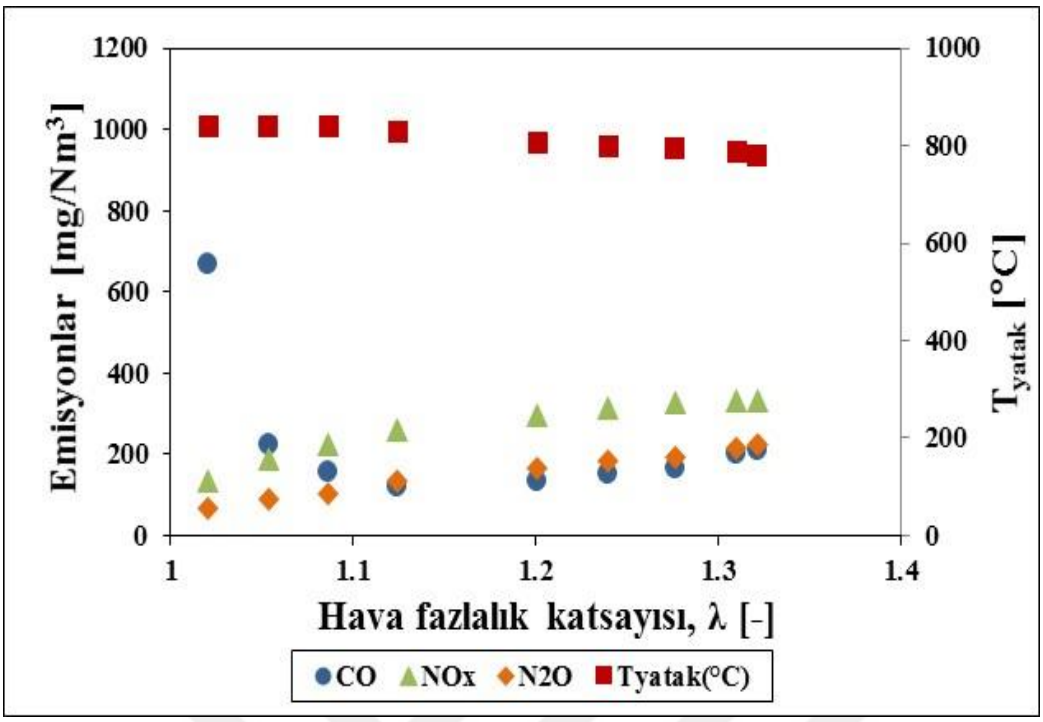


a) CO, NOx ve N_2O.

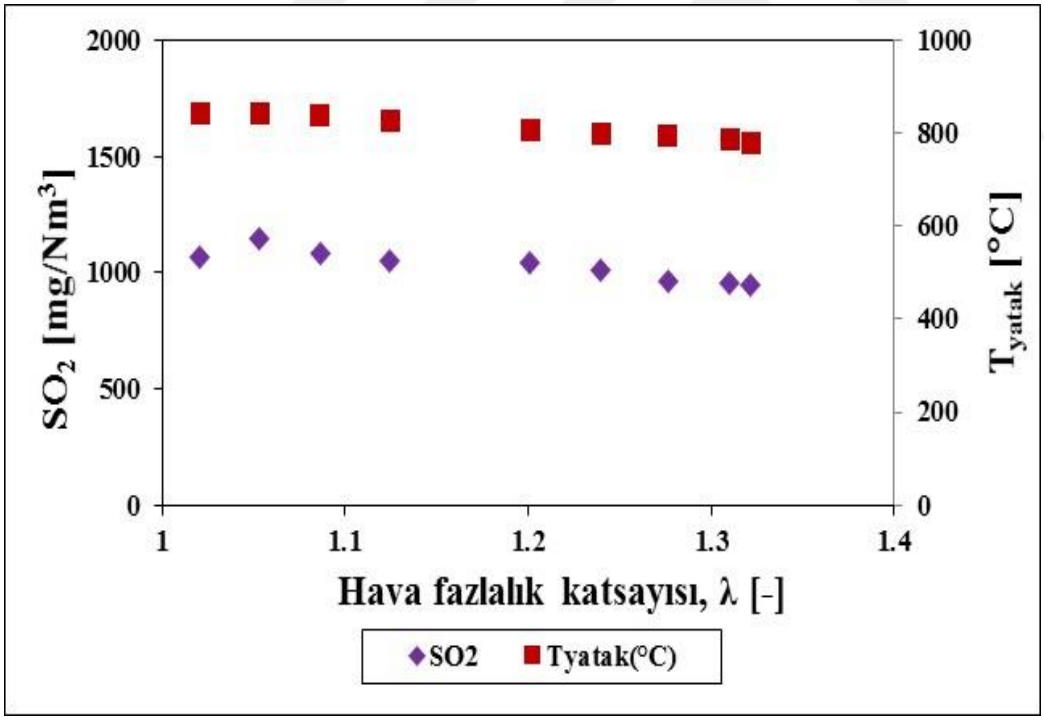


b) SO_2.

Şekil C.7: L9 (Manisa-Kısrakdere) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

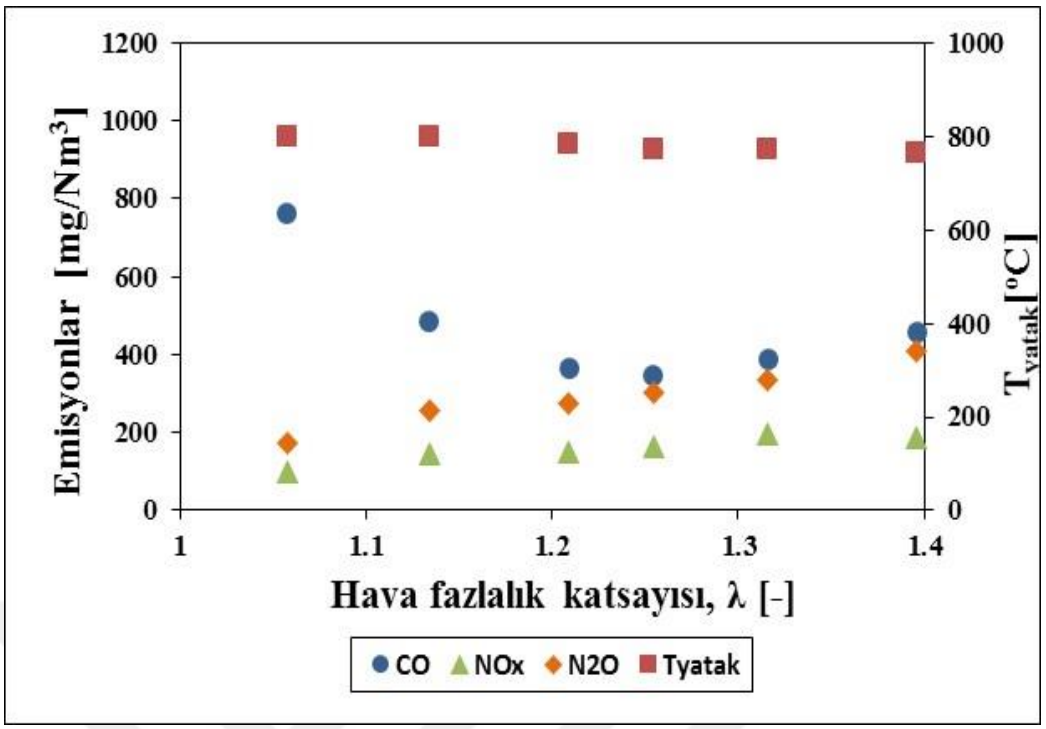


a) CO, NOx ve N_2O.

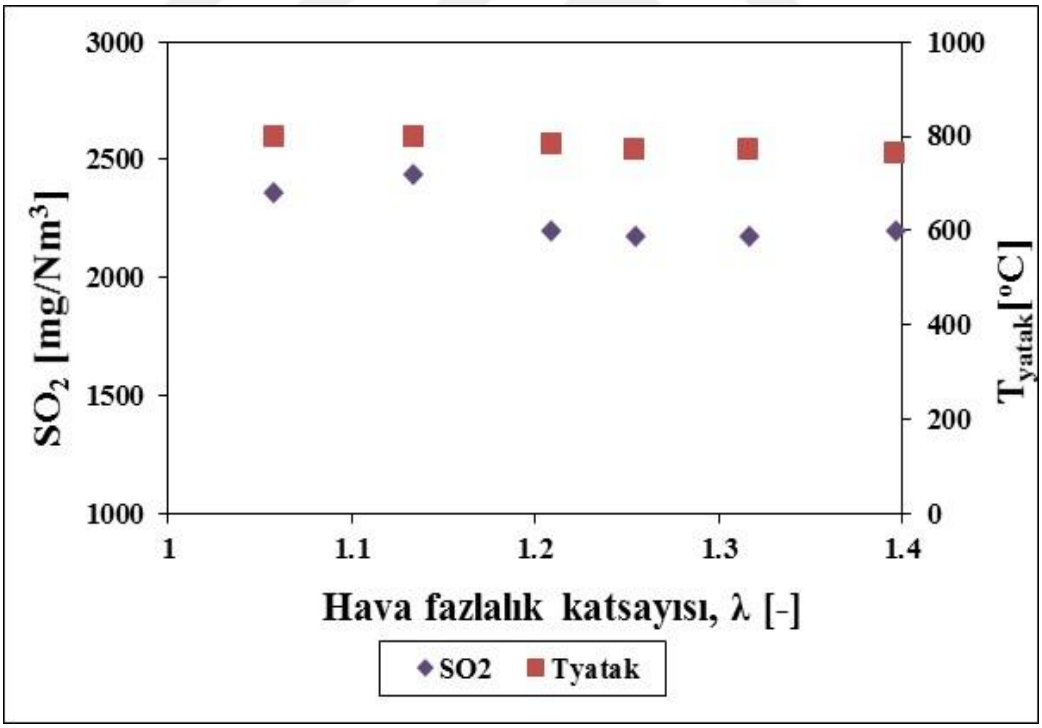


b) SO_2.

Şekil C.8: L10 (Manisa-Dereköy Lavvar) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

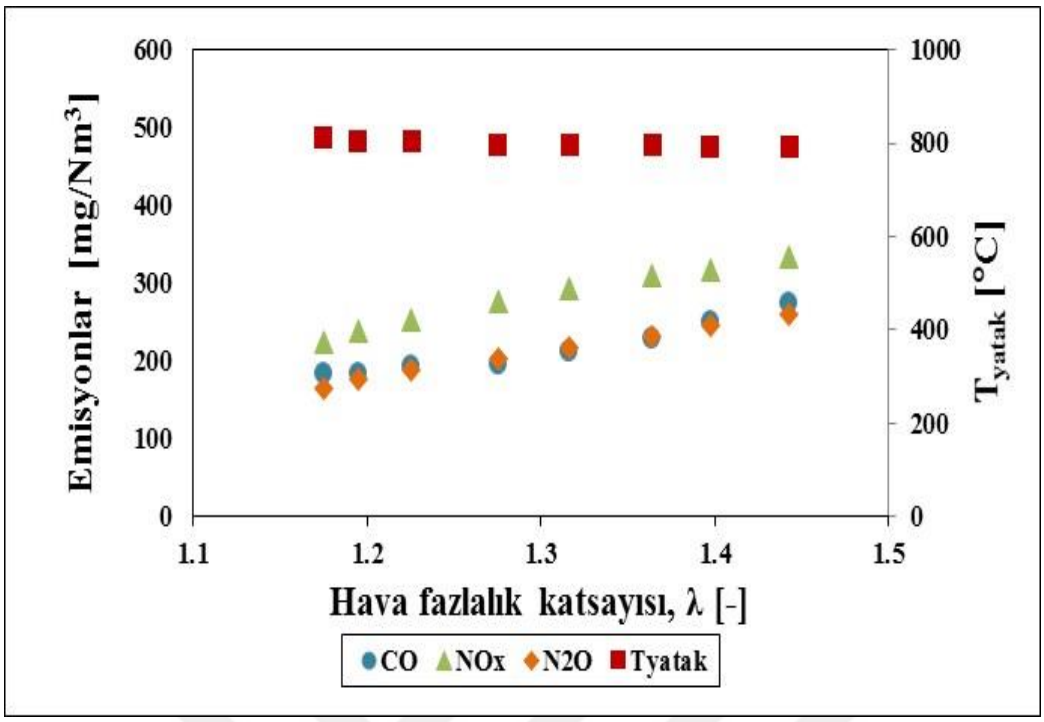


a) CO, NOx ve N_2O.

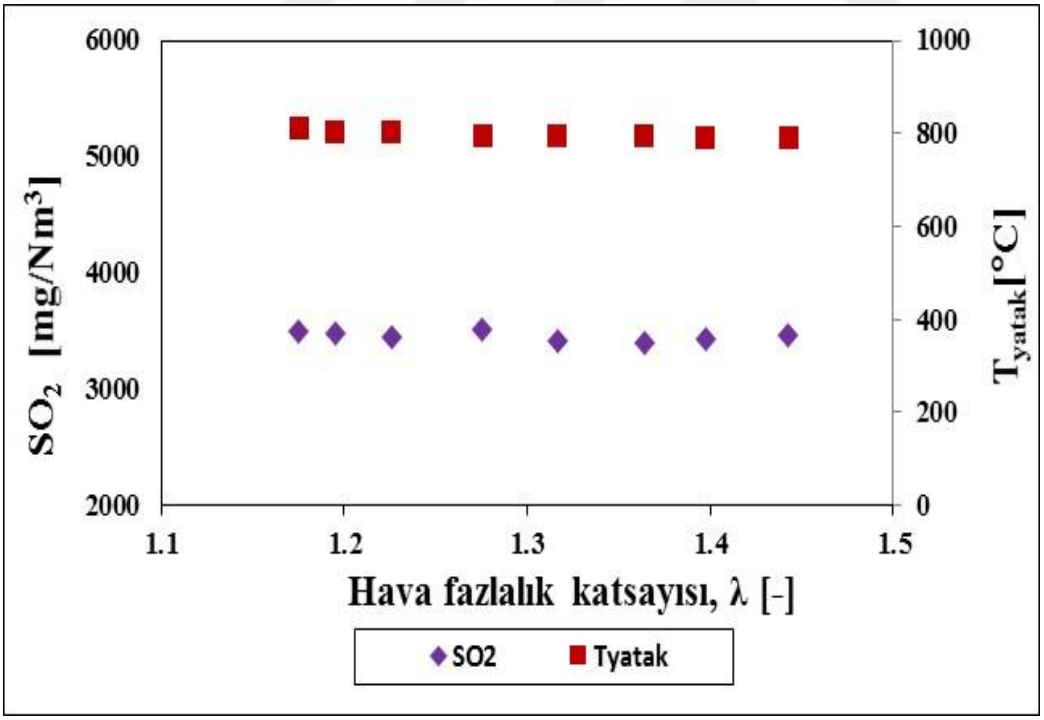


b) SO_2.

Şekil C.9: L11 (Muğla-Eskihisar) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

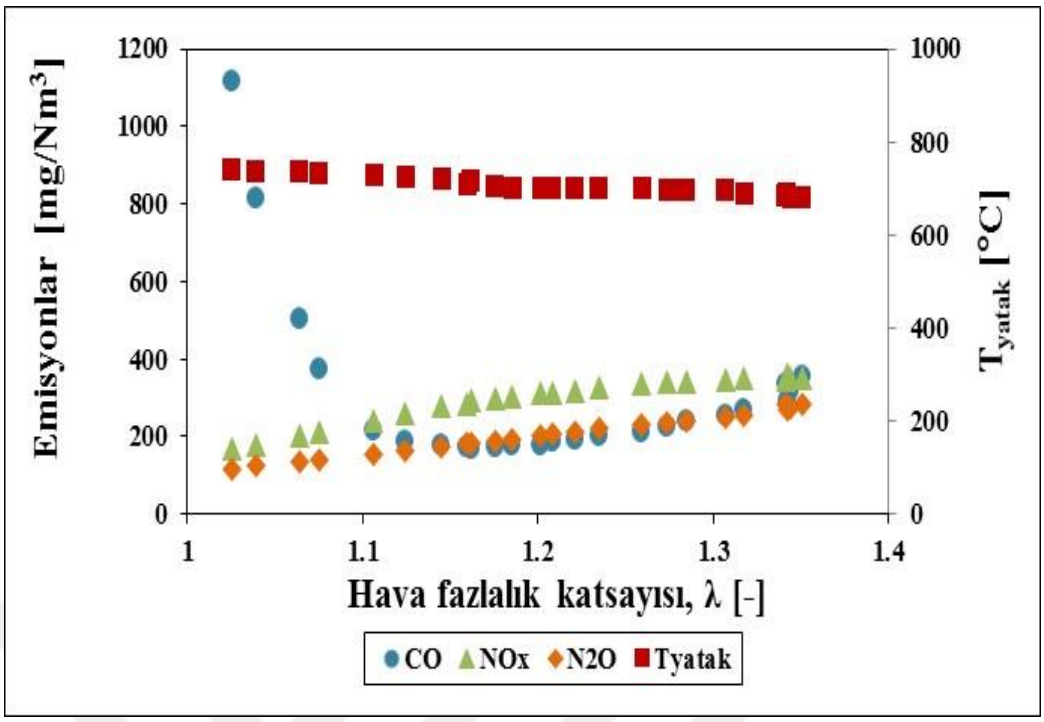


a) CO, NOx ve N_2O.

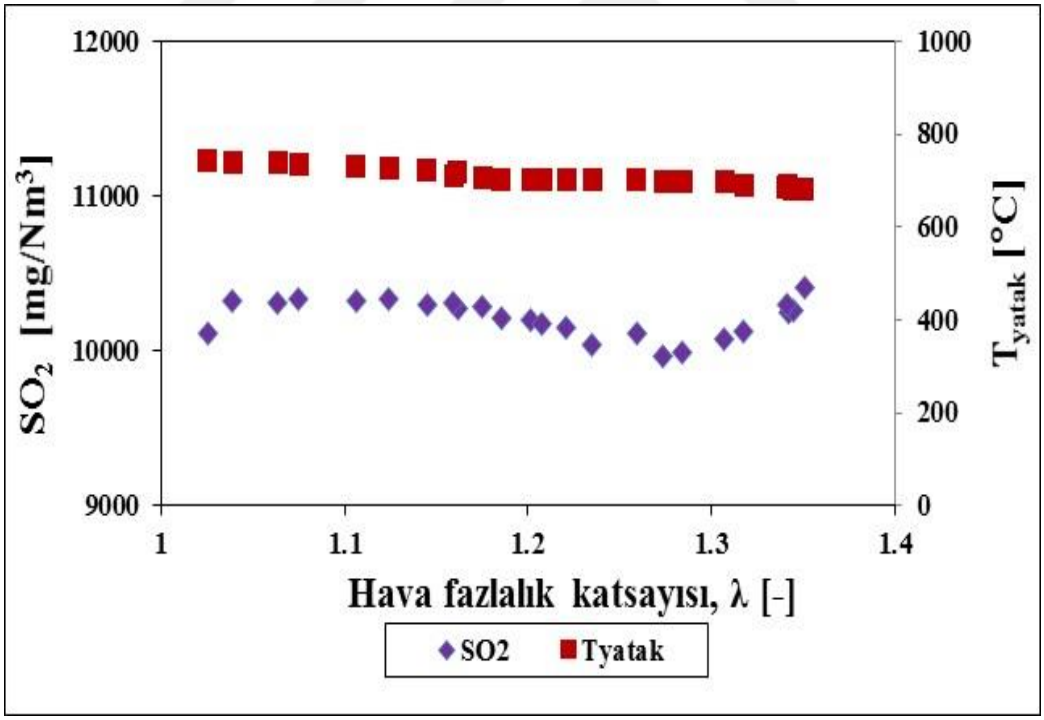


b) SO_2.

Şekil C.10: L13 (Muğla-Hüsamlar krible) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

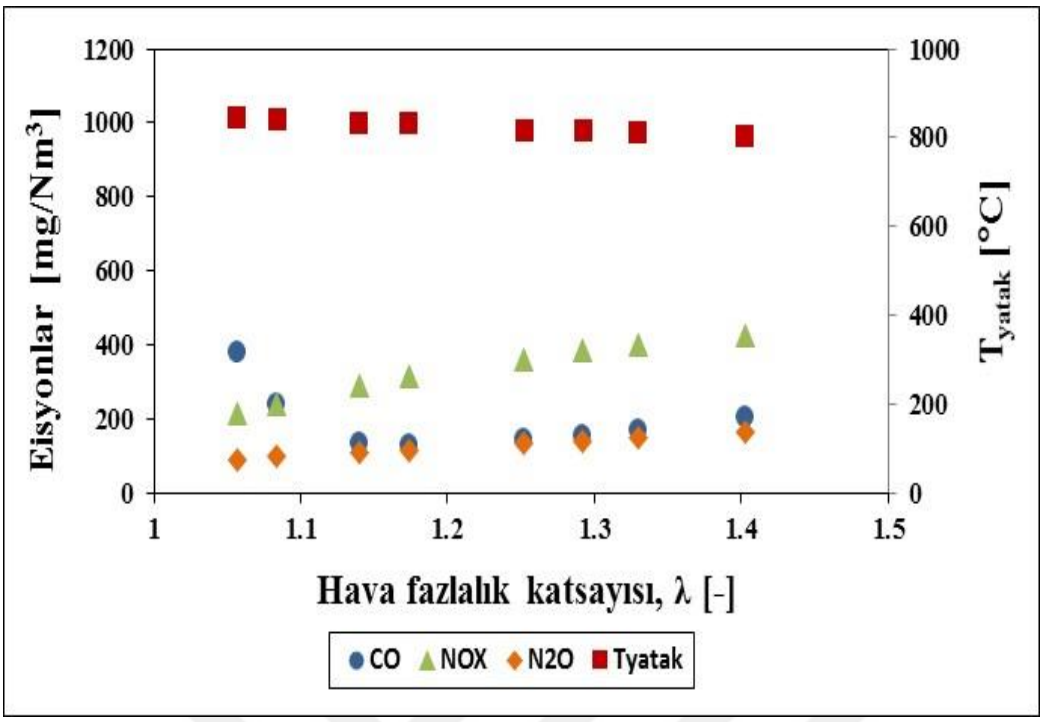


a) CO, NOx ve N_2O.

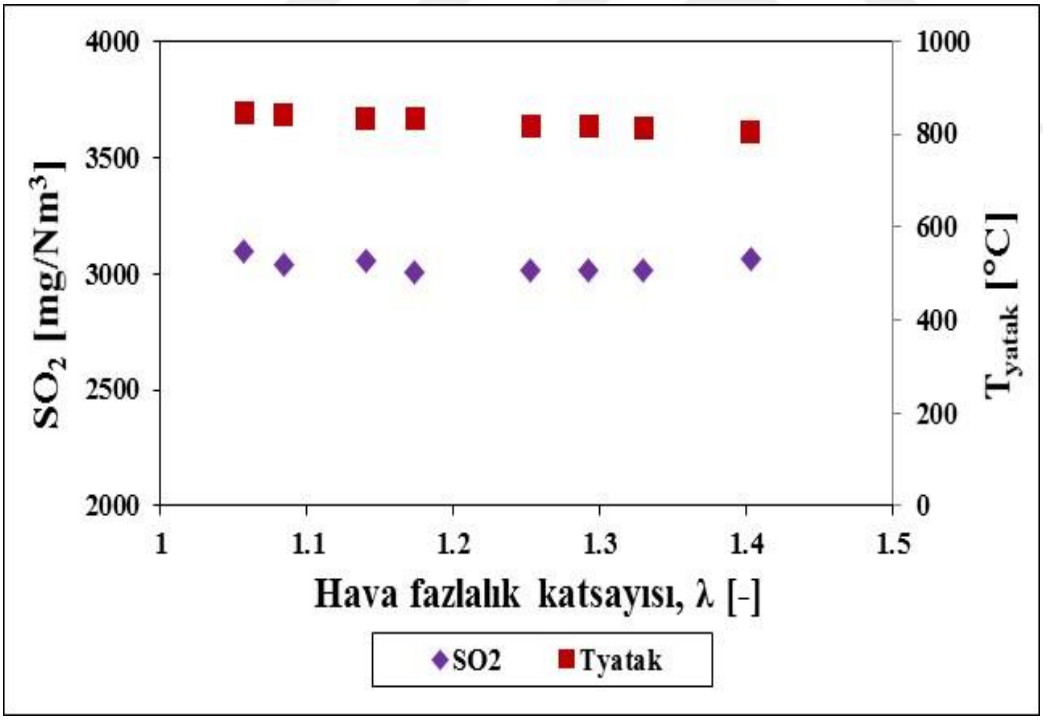


b) SO_2.

Şekil C.11: L14 (Muğla-İkizköy Işıkdere) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

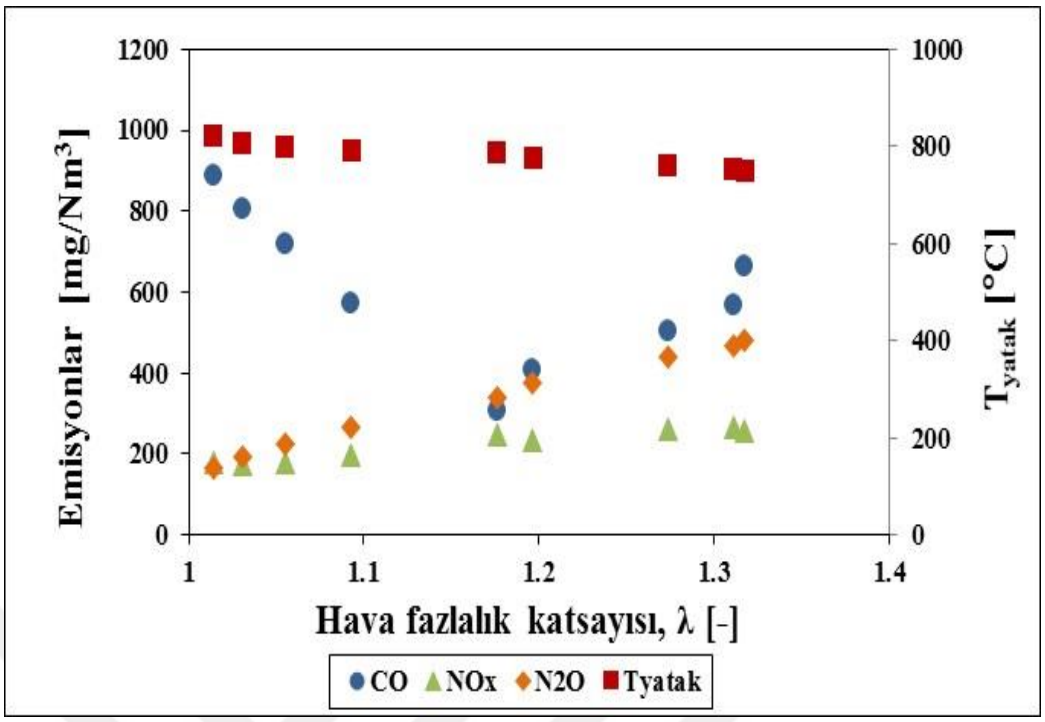


a) CO, NOx ve N_2O.

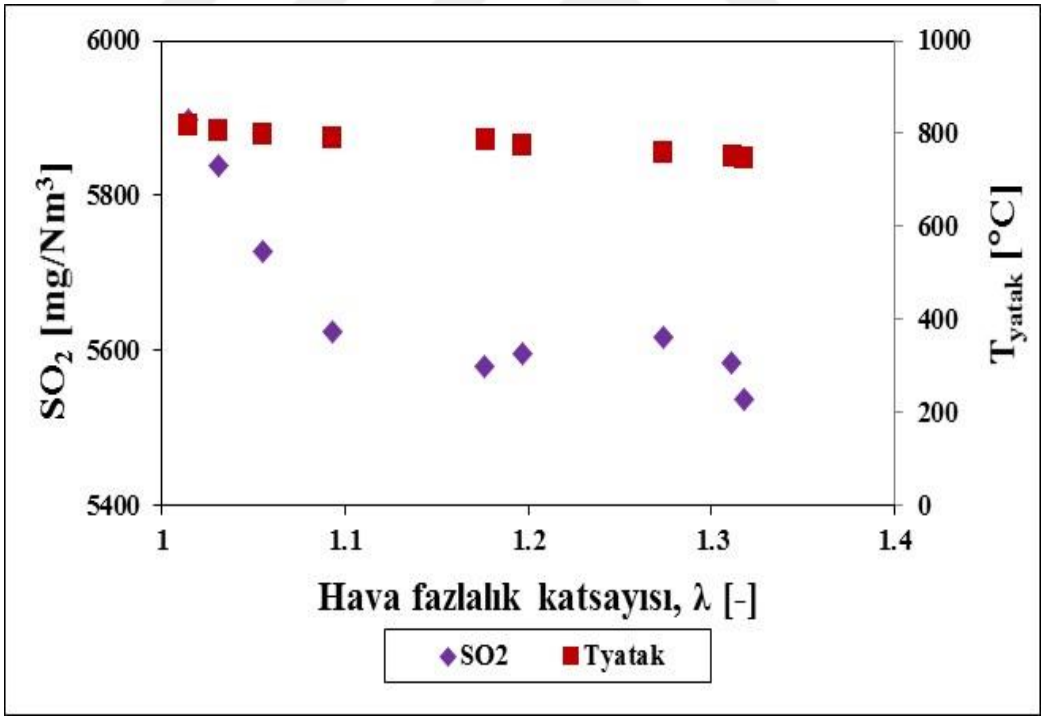


b) SO_2.

Şekil C.12: L15 (Bursa-Orhaneli) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

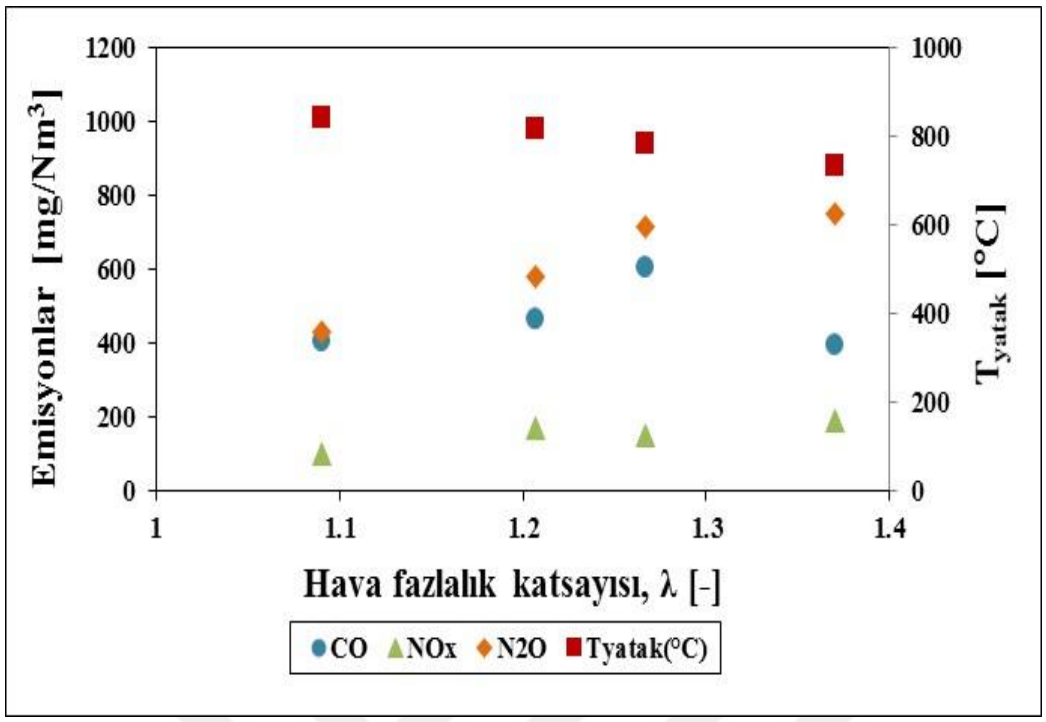


a) CO, NOx ve N_2O.

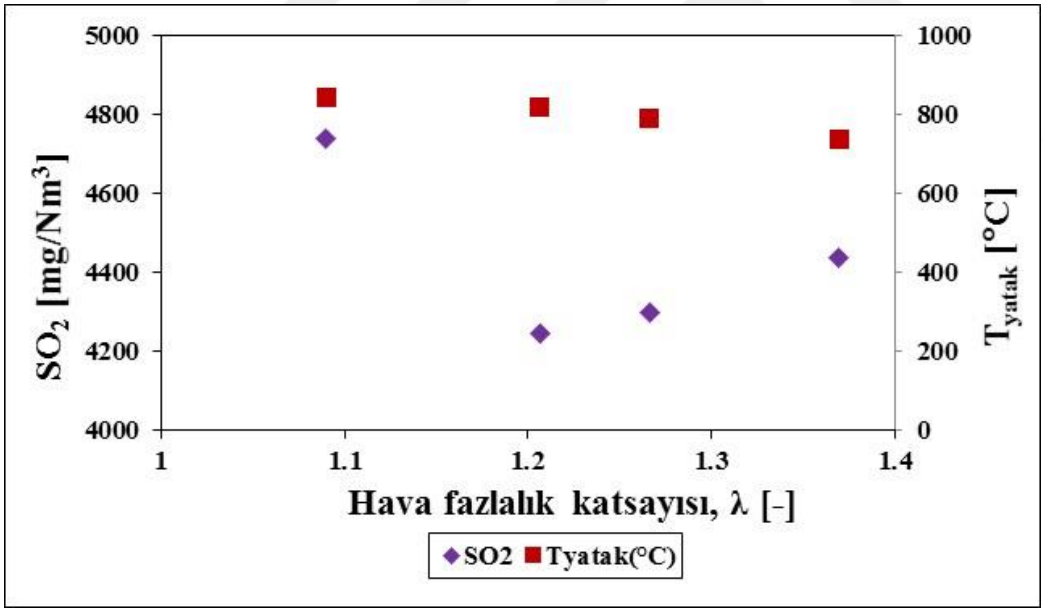


b) SO_2.

Şekil C.13: L16 (Bursa-Keles) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

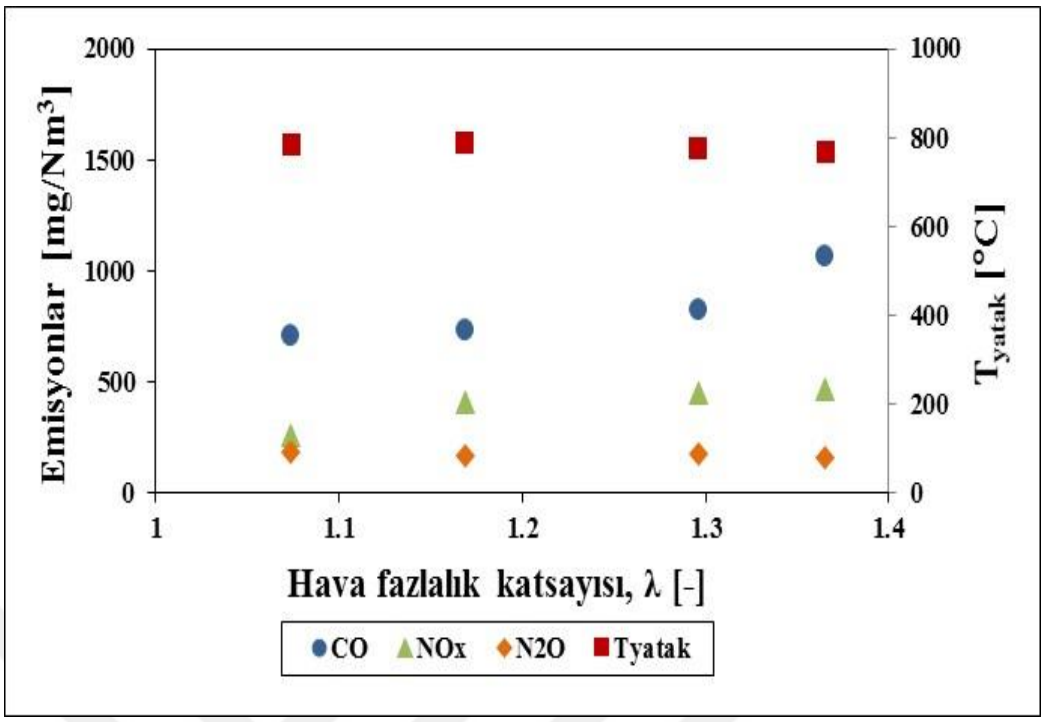


a) CO, NOx ve N_2O.

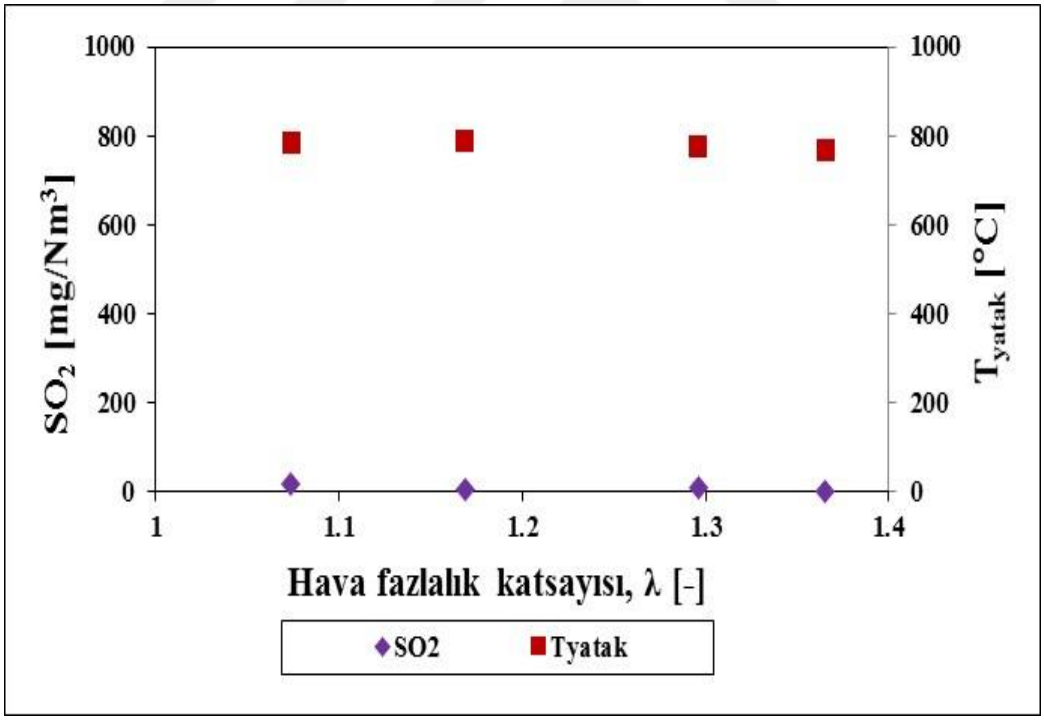


b) SO_2.

Şekil C.14: L17 (Çanakkale-Çan) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.



a) CO, NOx ve N_2O.



b) SO_2.

Şekil C.15: L19 (Manisa-Soma) linyitinin havayla yanma sürecinde açığa çıkan emisyonlar.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Berrin Engin

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 28.06.1980-İstanbul

E-posta **:** berrin.engin@tubitak.gov.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2003, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü.
- **Yükseklisans :** 2005, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı.
- **Yükseklisans:** 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2006 yılından bu yana TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü'nde araştırmacı olarak çalışmaktadır.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Engin, B.,** Atakül, H., 2018. Air and oxy-fuel combustion kinetics of low rank lignites, *Journal of the Energy Institute*, *91*, 311-322.
- **Engin B.,** Atakül H., Ünlü A., Olgun Z., 2019. CFB combustion of low-grade lignites: Operating stability and emissions, *Journal of the Energy Institute, 92,* 3, 542-553.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Engin B.,** Ateş M., Sarıoğlan A., Okur O., 2018. Developing Mediterranean Solid Biofuels Market in Turkey, *3rd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia,* 17-19 Eylül 2018, Nevşehir.
- **Engin B.,** Ateş M., Sarıoğlan A., Tahralı G., Okur O., 2018. Biomass Certification Studies in Turkey, *31. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi, 5-7 Eylül 2018,* Bursa.

- Olgun H., Keivani B., **Engin B.,** Kayahan U., 2017. Oxy-enriched Co-combustion of Biocoal with Lignite in a CFB Combustion System. *Uluslararası Enerji Hammaddeleri ve Enerji Zirvesi,* 27-30 Eylül 2017, İstanbul.
- Atımtay A.T., Kayahan U., Ünlü A., **Engin B.,** Varol M., Olgun H., 2017. Co-firing of pine chips with Turkish lignites in 750 kWth circulating fluidized bed combustion system, *Bioresource Technology,* 224, 601-610.
- Karataş H., Olgun H., **Engin B.,** Akgün F., 2013. Experimental results of gasification of waste tire with air in a bubbling fluidized bed gasifier, *Fuel,* 105, 566–571.
- Varol M., Çelebi M.C., Atımtay A.T., Olgun H., Atakul H., **Engin B,** Comlekcioglu, M., Kayahan U., 2012. Co-Combustion of Bolu Lignite And Pine Chips in a Laboratory Scale Circulating Fluidized Bed Combustor, *6th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-6),* 28-30 Haziran 2012*, İzmir*.
- Celebi M.C., Atimtay A.T., Varol M., Olgun H., Atakul H., **Bay-Engin B.,** Kayahan U., Unlu A., Bardakcioglu G., Ozcan M., 2011. Co-combustion of Various Agrowastes with a High-Sulfur Turkish Lignite in a Circulating Fluidized Bed Combustor: Effect of Air Staging on Pollutants along the Combustor, *5th International Conference on Clean Coal Technologies,* 8-12 Mayıs 2011, Zaragoza-İspanya,.
- Varol M., Atımtay A. T., **Bay-Engin B.,** Olgun H., 2010. Investigation of co-combustion of low quality lignite coals and biomass with thermogravimetric analysis, *Thermochimica Acta,* 510, 195-201.
- Olgun, H., Atimtay, A. T., Varol, M., Gul, S., **Bay-Engin, B.,** Kayahan, U., Atakul, H., Celebi, M.C., Cetinkaya, E., 2010. Combustion of Lignite Coal in a Circulating Fluidized Bed Combustor, *Proceedings of the Tenth International Conference on Combustion and Energy Utilization, 4-8 Mayıs 2010,* 36-41, Muğla Üniversitesi, Muğla.
- Varol M., Celebi M.C., Olgun H., Atimtay A.T., Atakul H., Unlu A., **Bay-Engin B.,** Kayahan U., 2010. Co-combustion of Various Biowastes with a High-Sulfur Turkish Lignite in a Circulating Fluidized Bed Combustor, *27th Annual International Pittsburgh Coal Conference,* 11-14 Ekim 2010, İstanbul.
- Kayahan, U., Gül, S., Olgun, H., **Bay-Engin, B.,** Çetin, Y., Çağlayan, E., Ünlü, A., Karataş, H., Yazar, A., Özdoğan, Z., 2009. Preliminary Results with A 450 kWth Bubbling Fluidized Bed Gasifier, *International Conference on Polygeneration Strategies,*, 1-3 Eylül 2009, Viyana-Avusturya.