

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE LİNYİT KÖMÜRLERİ İÇİN YER ALTINDA KÖMÜR
GAZLAŞTIRMASININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Oguz BÜYÜKŞİRİN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

EKİM 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE LİNYİT KÖMÜRLERİ İÇİN YER ALTINDA KÖMÜR
GAZLAŞTIRMASININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Oguz BÜYÜKŞİRİN
(503142004)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mesut GÜR

EKİM 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF UNDERGROUND
COAL GASIFICATION FOR TURKISH LIGNITE**



Ph.D. THESIS

**Oguz BÜYÜKŞİRİN
(503142004)**

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Program

Thesis Advisor: Prof. Dr. Mesut GÜR

OCTOBER 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503142004 numaralı Doktora Öğrencisi Oguz BÜYÜKŞİRİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TÜRKİYE LİNYİT KÖMÜRLERİ İÇİN YER ALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMASININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mesut GÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nurdil ESKİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN
İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Yakup Erhan BÖKE
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 22 Mayıs 2023
Savunma Tarihi : 20 Ekim 2023





Eşime ve Aileme,



ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışması, TÜBİTAK tarafından desteklenen 113M0380 proje kodlu “Ülkemiz Kömürleri İçin Yeraltında Kömür Gazlaştırma Teknolojisinin Geliştirilmesi” başlıklı proje kapsamında yapılan deneysel ve matematiksel model çalışmaları ve edinilen tecrübeler üzerine gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle çalışmamın her aşamasında her türlü destek ve katkılarını sunan değerli tez danışmanım ve üniversite profesörüm Sayın Prof. Dr. Mesut GÜR’e en içten teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca proje ve tez çalışması süresince değerli görüş, öneri ve bilgilerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Nurdil ESKİN’e de teşekkürlerimi sunarım.

Tez hazırlıklarım süresince yanımda olan kıymetli ekip arkadaşlarım ve dostlarım Mak. Yük. Müh. Engin Deniz CANBAZ’a, Mak. Yük. Müh. Ünal ALTINTAŞ’a, Mak. Yük. Müh. Ahmet YILDIZ’a ve Mak. Yük. Müh. Olgu YILDIRIM’a çalışmalarına katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her zaman yanımda olup bana güç veren değerli eşim Tuğçe BÜYÜKŞİRİN’e ve eğitim hayatım boyunca her türlü fedakarlığı gösteren kıymetli aileme en derin duygularıyla teşekkür ederim. Destekleri ve fedakarlıkları sayesinde bu tezi tamamlamam mümkün oldu. Sizlere minnettarım.

Mayıs 2023

Oğuz BÜYÜKŞİRİN
(Makina Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxv
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1 Problem Tanımı ve Tezin Amacı	1
1.2 YKG için Yapılan Teorik ve Deneysel Çalışmalar (Literatür İncelenmesi)	2
1.2.1 Saha uygulama deneyleri	2
1.2.2 Laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar	4
1.2.3 Matematiksel modelleme çalışmaları (Teorik çalışmalar).....	8
1.2.4 Literatür araştırması özeti	12
1.3 Bu Çalışmada Uygulanacak Yöntem	13
2. YER ALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMA (YKG) TEKNİĞİ	15
2.1 YKG Reaktörü.....	15
2.1.1 YKG gazlaşma reaksiyonları	18
2.1.2 Kömür özelliklerinin YKG ‘ye etkisi.....	21
2.2 Türkiye’nin YKG Potansiyeline Sahip Linyit Yatakları	22
2.2.1 Malkara-Pirinççeşme linyit kömürü.....	25
2.2.1.1 Malkara - Pirinççeşme sahası 3 no’lu damar özellikleri	26
2.2.1.2 Malkara kömürü analizleri	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
3.1 Deney Düzenegi	29
3.1.1 Gaz besleme düzenegi.....	30
3.1.2 Gazlaştırma reaktörleri.....	30
3.1.3 Siklon	32
3.1.4 Soğutucu (hava soğutmalı ısı değiştirici).....	33
3.1.5 Gaz yıkama ünitesi.....	33
3.1.6 Vakum pompası	33
3.1.7 Yakıcı (flare)	33
3.2 Deney Düzeneginin Ölçme ve Kontrol Sistemi	33
3.2.1 MRU sentez gaz analizörü ile gaz kromatografi cihazı ölçme karşılaştırılması	36
3.3 Deney Programı.....	37
3.3.1 Gazlaştırma reaktörünün deney hazırlığı	38
3.3.2 Deneylerin yapılışı	40
4. DENEY SONUÇLARI VE LİTERATÜRLE KARŞILAŞTIRMA.....	41

4.1 Küçük Reaktör Deneyleri	41
4.1.1 Sadece hava ile yapılan deney sonuçları (KL100S1).....	41
4.1.2 Sadece oksijen ile yapılan deney sonuçları (KL010S2).....	43
4.1.3 Oksijen – hava karışımı (oksijenle zenginleştirilmiş hava) deney sonuçları (KL110Z4)	44
4.1.3.1 Saf oksijen fazı	46
4.1.3.2 Oksijen-hava karışımı gazlaşma fazı	46
4.1.4 Oksijen – hava / buhar karışımı deney (KL111Z5)	47
4.1.4.1 Saf oksijen fazı	48
4.1.4.2 Oksijen-hava karışımı gazlaşma fazı	48
4.1.4.3 Oksijen-buhar karışımı gazlaşma fazı	49
4.1.5 Oksijen – buhar karışımı deney (KL011Z6)	50
4.1.5.1 Saf oksijen besleme fazı	51
4.1.5.2 Oksijen-buhar karışımı gazlaşma	52
4.1.6 Oksijen – buhar karışımı deney (KL011Z7)	52
4.1.6.1 Saf oksijen besleme fazı	53
4.1.7 KL011Z6 ve KL011Z7 deneylerinin tekrarı yönünden karşılaştırılması..	54
4.2 Büyük Reaktör Deneyleri	57
4.2.1 Oksijen, hava ve su buharı karışımı gazlaştırıcı deney sonuçları (BL111Z1).....	57
4.2.1.1 Saf oksijen fazı	58
4.2.1.2 Hava- oksijen karışımı faz	59
4.2.1.3 Buhar-oksijen karışımı faz	59
4.2.2 Kademeli gazlaşma deney sonuçları (BL111K2).....	61
4.2.2.1 Saf oksijen kademesi	64
4.2.2.2 Hava kademesi	64
4.2.2.3 Su buharı kademesi	64
4.2.3 Büyük reaktörde yapılan deneylerin karşılaştırılması (BL111Z1 ve BL111K2).....	65
4.2.4 Büyük ve küçük reaktörde yapılan deneylerin karşılaştırılması (BL111Z1 ve KL011Z7)	66
4.3 DeneySEL Sonuçların Özeti	67
4.4 Literatürdeki DeneySEL Sonuçlarla Karşılaştırma.....	68
5. YKG HAD (HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ) MODELİ	71
5.1 Modelin Geliştirilmesi ve Yapılan Kabuller	71
5.2 Korunum Denklemleri (Kütle, Enerji, Momentum).....	73
5.2.1 Toplam kütle korunumu denklemi	73
5.2.2 Momentum korunumu denklemi	74
5.2.3 Enerji korunumu denklemi	75
5.3 Kimyasal Reaksiyonlar.....	76
5.4 Çözüm Metodu	79
5.4.1 Genel skaler korunum denklemi, ayrıklaştırma ve çözüm	81
5.5 Sayısal Model Sonuçları ve Deneylerle Karşılaştırılması	83
5.5.1 Sayısal analiz planı.....	83
5.5.2 DeneySEL sonuçlar ile model analizlerinin karşılaştırılması	84
5.5.3 Analizde seçilen porozite ve geçirgenlik etkisi	85
5.6 Gazlaşma Oyuğu (Kavite) Oluşumu ve Gazlaşma Reaksiyon Bölgeleri	87
5.6.1 Karbon tüketilmesi ile gazlaşma oyuğu oluşumu	87
5.6.2 Kömür sıcaklıkları.....	88
5.6.3 Gazlaşma reaksiyon bölgeleri	89

5.6.3.1 Heterojen gazlaşma reaksiyon bölgeleri	90
5.6.3.2 Homojen yanma reaksiyon bölgeleri	91
6. YKG REAKTÖR TASARIMI VE PROSES PARAMETRELERİ İÇİN MAKİNA ÖĞRENMESİ MODELİ	95
6.1 Sayısal Model Sonuçları ve Deneylerle Karşılaştırılması.....	96
6.2 Modelin Geliştirilmesi ve Yapılan Kabuller	98
6.2.1 Tahmin modeli denkleminin hassasiyetinin ölçülmesi	100
6.2.2 Tahmin modeli denklemleri	101
6.3 Kömür Geometrisi ve Oksijen Besleme Debisine Bağlı Tahmin Modeli	102
6.4 Kömür Geometrisine, Oksijen Besleme Debisine ve Kömür Fiziksel Özelliklerine Bağlı Tahmin Modeli	104
6.5 DeneySEL Sonuçlarla Karşılaştırma	107
6.6 Tahmin Modeli Kullanılarak Reaktör Geometrisinin Optimizasyonu	108
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ.....	123



KISALTMALAR

CRIP	: Kontrollü Tepkime Besleme Noktası
GC	: Gaz Kromatografi
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IGCC	: Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrimi
LLNL	: Lawrence Livermore National Laboratory
LVW	: Bağlantılı Düşey Kuyular
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
SDS	: Yüksek Eğimli Kömür Damarı
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
YKG	: Yer Altında Kömür Gazlaştırma



SEMBOLLER

α	: Gerçirgenlik
γ	: Gözeneklilik
ε	: Türbülans enerji dissipasyonu
μ	: Dinamik viskozite
ν	: Kinematik viskozite
ρ	: Yoğunluk
A	: Arrhenius ifadesi sabiti
D	: Difüzyon katsayısı
E	: Toplam enerji, Aktivasyon enerjisi
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Entalpi
H	: Reaksiyon enerjisi
J	: Bileşen difüzyon akısı
k	: Türbülans kinetik enerjisi, Isı iletim katsayısı, Reaksiyon hız katsayısı
K	: Reaksiyon denge sabiti
M	: Kimyasal bileşenin mol kütlesi
p	: Basınç
R	: Reaksiyon hızı
S	: Korunum denklemi kaynak terimi
T	: Sıcaklık
u	: Gaz fazı hız bileşeni
v	: Stokiyometrik katsayı
Y	: Kimyasal bileşenin kütleli oranı
x	: Piroliz reaksiyon katsayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Literatürde yapılan modelleme çalışmaları [37].	11
Çizelge 2.1 : Alt ısı değerlerine ve uçucu madde miktarlarına göre Türkiye’deki linyit sahalarının sınıflandırılması [65].....	24
Çizelge 2.2 : Malkara - Pirinççesme kömür numunesi kısa Analizlerin Sonuçları (Almanya Dresden Teknik Üniversitesi).	27
Çizelge 2.3 : Malkara - Pirinççesme kömür numunesi kuru kütle elemental analiz sonuçları (Dresden Teknik Üniversitesi).	27
Çizelge 3.1 : Gaz besleme düzeneği cihazları.	30
Çizelge 3.2 : Deney hattında konumlandırılan sıcaklık ölçerler.....	34
Çizelge 3.3 : Deney düzeneğindeki basınç ölçerlerin konumları, ölçüm aralıkları ile hassasiyet oranları.	35
Çizelge 3.4 : Orifislerin yerleşim yerleri, ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri.	35
Çizelge 3.5 : Yüksek debi ölçer orifislerinin yerleşim yerleri, ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri.	35
Çizelge 3.6 : Kullanılan referans gazının mol oranları.	37
Çizelge 3.7 : Deney planı.....	38
Çizelge 3.8 : Deneylerin kodlanması.	38
Çizelge 4.1 : Karşılaştırılan deneylerde kullanılan kömürler.	69
Çizelge 4.2 : Deney sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması.	69
Çizelge 5.1 : HAD modelinde kullanılan reaksiyonlar ve bunların ısı değerleri.	76
Çizelge 5.2 : HAD modelinde kullanılan reaksiyon sabitleri ve aktivasyon enerji değerleri.	77
Çizelge 5.3 : Analiz sınır şartları.	83
Çizelge 5.4 : Analiz başlangıç şartları.	83
Çizelge 5.5 : BL111Z2 kodlu deneyi ile analiz sonuçlarının ortalama değerleriyle karşılaştırılması.	84
Çizelge 5.6 : BL111Z2 kodlu deneyi ile analiz sonuçlarının ortalama değerleriyle karşılaştırılması.	85
Çizelge 5.7 : Porozite değişimine bağlı olarak elde edilen çıkış gazı yüzde bileşenleri.	86
Çizelge 6.1 : Modelde kullanılan deneysel veriler.	99
Çizelge 6.2 : Denklemlerin R^2 ve standart hatası.	102
Çizelge 6.3 : Modellerin R^2 ve standart hata kıyaslaması.	105
Çizelge 6.4 : İTÜ deneysel verilerinin özeti.	107
Çizelge 6.5 : Deneysel sonuçlar ve model sonuçlarının kıyaslanması.	108



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Liu v.d tarafından yürütülen çalışmada yanıcı gaz oluşumuna su buharı-oksijen oranının etkisi [26].	5
Şekil 1.2 : 2010 yılında gerçekleştirilen araştırmalar ışığında öngörülen gazlaşma oyuk geometrisi [27].	5
Şekil 1.3 : Tasarlanan deneysel reaktörün kesit görünümü [28].	6
Şekil 1.4 : İki kademeli gazlaştırma sürecinde, kademeler arası sürenin oksijen derişimine bağılı değışim grafiğı [30].	8
Şekil 2.1 : YKG prensip şeması [5].	15
Şekil 2.2 : Kömür yataklarının gazlaştırma reaktörlerine bölünmesi.	16
Şekil 2.3 : LVW yönteminin prensip şeması, a) Geri yönlü gazlaştırma b) İleri yönlü gazlaştırma [51].	16
Şekil 2.4 : Kontrollü Geri Besleme Noktası (CRIP) tekniğinin prensip şeması [53].	17
Şekil 2.5 : Gazlaştırma sıcaklığı ve basıncının sentez gazı bileşimine etkisi [55].	20
Şekil 2.6 : YKG kimyasal reaksiyon bölgeleri [51].	21
Şekil 2.7 : Uysal Madencilik şirketine ait Malkara - Pirinççeşme linyit yatağı haritası.	25
Şekil 2.8 : Malkara – Pirinççeşme açık kömür sahası ve analiz edilen kömür örneğı.	26
Şekil 2.9 : Malkara – Pirinççeşme 3 no’lu damarın katmanlarının dağılımı.	26
Şekil 3.1 : Deney düzeneğı şeması.	29
Şekil 3.2 : Deney Gazlaştırıcı cihazları: Kompresör, su buharı üretici, oksijen tüpü ve azot tüpü.	30
Şekil 3.3 : Küçük ve büyük reaktör.	31
Şekil 3.4 : Küçük gazlaşma reaktörü ve termoeleman yerleşim noktaları.	32
Şekil 3.5 : Büyük gazlaşma reaktörü ve termoeleman yerleşim noktaları.	32
Şekil 3.6 : Siklon ve soğutucu (ısı değıştirici).	32
Şekil 3.7 : Yakıcı (flare).	33
Şekil 3.8 : Deney düzeneğı ölçme ve kontrol şeması.	34
Şekil 3.9 : a) Gaz kromatografi b) MRU sentez gaz ölçüm cihazı.	35
Şekil 3.10 : Örnek bir gaz kromatografi sonucu.	36
Şekil 3.11 : (KL011Z7) kodlu deneyde Agilent 7890B marka gaz kromatografi cihazı ve hem de MRU marka Syngas Varioplus model cihazıyla ölçülen sentez gazı sonuçlarının karşılaştırılması.	37
Şekil 3.12 : a) Küçük reaktör deneyinden kömür bloğı örneğı. b) Reaktördeki boşlukların kömürle doldurulması.	39
Şekil 3.13 : a) Büyük reaktör deneyinden kömür bloğı örneğı. b) Reaktördeki boşlukların kömürle doldurulması.	39
Şekil 4.1 : Reaktördeki termoelemanların konumları.	41
Şekil 4.2 : Deney sonrası kömür bloğı.	42
Şekil 4.3 : (KL100S1) deneyinde ölçülen sıcaklıklar.	42

Şekil 4.4 : Deneyde oluşan gazlaşma oyuğu.....	43
Şekil 4.5 : Deneyde ölçülen kömür sıcaklıkları ve sentez gazı bileşimleri.	44
Şekil 4.6 : Hava ve oksijen gaz debisi.	45
Şekil 4.7 : a) Deney sonrası kömür bloğu, b) Gazlaşma oyuğu c) Tr30 Termo elemanı d) Tr12 ve Tr16 Termo elemanı.	45
Şekil 4.8 : Deneyde ölçülen sıcaklıklar ve sentez gazı bileşimleri.	46
Şekil 4.9 : Karışımli gazlaştırıcı besleme debileri.	47
Şekil 4.10 : Karışımli gazlaştırıcı besleme debileri.	47
Şekil 4.11 : Kömür sıcaklıkları.	49
Şekil 4.12 : Gazlaştırıcı (oksijen ve su buharı) debileri.	50
Şekil 4.13 : Deneyde ölçülen kömür sıcaklıkları.	51
Şekil 4.14 : Sentez gaz ölçümleri.....	51
Şekil 4.15 : Gazlaştırıcı debileri.	52
Şekil 4.16 : Sentez gaz analiz sonuçları.	53
Şekil 4.17 : Ölçülen sıcaklıklar.	53
Şekil 4.18 : Oksijen besleme debisi karşılaştırılması.	54
Şekil 4.19 : Su buharı besleme debisi karşılaştırması.	54
Şekil 4.20 : Sıcaklık dağılımı karşılaştırması.	55
Şekil 4.21 : Sentez gazı CO oranlarının karşılaştırılması.	55
Şekil 4.22 : Sentez gazı H ₂ oranlarının karşılaştırılması.	56
Şekil 4.23 : CO ₂ oranının karşılaştırılması.	56
Şekil 4.24 : KL011Z7 kodlu deney sonrası kömür içinde oluşan gazlaşma oyuğu...	57
Şekil 4.25 : Gazlaştırıcı debileri.	58
Şekil 4.26 : Sentez gazı analizleri.	58
Şekil 4.27 : Reaktörden alınan ölçüm noktalarının gösterimi.	59
Şekil 4.28 : Reaktör içerisinde sıcaklık dağılımı.	60
Şekil 4.29 : Deney sonrası kömür bloğu görünümü.	60
Şekil 4.30 : Deney boyunca gazlaştırıcı ve sentez gazı debileri.	62
Şekil 4.31 : Reaktör üzerinde sıcaklık ölçümü yapılan yerler (kırmızı ile gösterilen).	62
Şekil 4.32 : Deney sonrası kömür bloğu.....	63
Şekil 4.33 : Kömür bloğu sıcaklıkları.	63
Şekil 4.34 : Gazlaştırma sonucunda oluşan sentez gazı bileşimleri.	64
Şekil 4.35 : Sentez gazı bileşimleri kıyaslanması.	65
Şekil 4.36 : BL111Z1 ve KL011Z7 sentez gazı bileşimleri kıyaslanması.	66
Şekil 5.1 : Kömür bloğu ve gazlaştırma kanalının iki boyutlu görünümü.....	71
Şekil 5.2 : YKG HAD model akış şeması [66].....	72
Şekil 5.3 : Kömür bölgesi modellemesi olarak sünger benzeşimi.	72
Şekil 5.4 : Basınca dayalı (pressure-based) ayrık algoritma çözüm adımları [71]. ...	80
Şekil 5.5 : BL111K2 kodlu deneyi ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.	84
Şekil 5.6 : BL111K2 kodlu deneyin ölçülen kömür içindeki sıcaklıkları.	85
Şekil 5.7 : BL111K2 kodlu deneyin model ile hesaplanan kömür sıcaklıkları.	85
Şekil 5.8 : Porozite değişimine bağlı analiz sonuçları.	86
Şekil 5.9 : Geçirgenlik değişimine bağlı analiz sonuçları.	87
Şekil 5.10 : Kömür tüketim profili: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.....	88
Şekil 5.11 : Reaktör içi sıcaklığın (K) zamana bağlı değişimi: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.	89
Şekil 5.12 : Boudard reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.....	90
Şekil 5.13 : Su buharı gazlaşma reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.....	91

Şekil 5.14 : Kömür uçucu yanması reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik	92
Şekil 5.15 : CO yanması reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.	92
Şekil 5.16 : H ₂ yanması reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.	93
Şekil 6.1 : Yapay Zeka uygulama alanları [78].	96
Şekil 6.2 : Makine Öğrenmesi uygulama alanları [79].	97
Şekil 6.3 : Bağımsız değişkenlerin gösterimi.	102
Şekil 6.4 : 62x25x41 cm kömür bloğu için oksijen besleme debisi ve sentez gazı bileşimi.	103
Şekil 6.5 : 170x40x70 cm kömür bloğu için oksijen besleme debisi ve sentez gazı bileşimi.	103
Şekil 6.6 : 500x80x100 cm kömür bloğu için oksijen besleme debisi ve sentez gazı bileşimi.	104
Şekil 6.7 : %CO ₂ için 1. ve 2. Tahmin modelinin regresyon eğrisine göre kıyası. .	106
Şekil 6.8 : %CO için 1. ve 2. Tahmin modelinin regresyon eğrisine göre kıyası. ..	106
Şekil 6.9 : %H ₂ için 1. ve 2. Tahmin modelinin regresyon eğrisine göre kıyası.	107
Şekil 6.10 : % CO+H ₂ 'ye Genişlik/Yükseklik oranının etkisi.	109
Şekil 6.11 : % CO+H ₂ 'ye Uzunluk/Genişlik oranının etkisi.	109



TÜRKİYE LİNYİT KÖMÜRLERİ İÇİN YER ALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMASININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Son yıllarda ülkelerin gelişmişliği ile birlikte ortaya çıkan enerji ihtiyacı, fosil yakıtlardan (petrol, doğal gaz, kömür vb.) ve yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjiden (rüzgâr, güneş enerjisi, jeotermal ve hidro enerji vb.) karşılanmaya çalışılmaktadır. Ekonomide dışa bağıllık, enerji üretiminin ekonomiye olumlu yönde katkısı gibi faktörler düşünüldüğünde, herhangi bir yakıtın enerji üretiminde kaynak olarak kullanılabilmesi önemlidir. Ülkemiz linyit kömür rezervleri açısından oldukça zengindir. Ancak bu rezervin sadece %15'i geleneksel madencilik yöntemiyle çıkarılması halinde ekonomik olabilmektedir. Diğer husus ise son yıllarda yaşanan kömür maden kazalarıdır. Ayrıca son yıllarda fosil yakıtların geleneksel yanma teknikleriyle yakılması çevreyi önemli şekilde kirletmektedir.

Bu noktada, Yeraltında Kömür Gazlaştırma (YKG) tekniği, kömürün yer altında çıkarılmasına gerek kalmadan orada temiz yanıcı gazlara dönüştürülmesini sağlayan ekonomik ve çevreci yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

Yeraltında kömür gazlaştırma (YKG) işlemi için, yer altında bulunan kömür yatağına sondajlar ile kuyular açılarak, burada oluşturulan kömür bloklarına (gazlaştırma reaktörlerine) kontrollü şekilde hava ve oksijen gibi gazlaştırıcılar beslenmesiyle gazlaştırma reaksiyonları tetiklenerek kömürden sentez/yanıcı gaz (sentez gaz) elde edilmesi sağlanır. Gazlaştırma işlemi sonucunda sentez gazı olarak anılan yanıcı CO, H₂ ve CH₄ gibi gazları üretilir.

Yeraltı kömür gazlaştırma (YKG) için son yıllarda uluslararası yoğun çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışmalar, sentez gazının kalitesini ve ısı değerini artırılması için YKG uygulamasının geliştirilmesine yönelik olduğu görülmektedir.

Yeraltında kömür gazlaştırması (YKG) işleminde, gazlaştırma reaktör (kömür bloğu) boyutları, kömürün termofiziksel özellikleri, gazlaştırıcı gaz cinsi/karışım oranları (hava, oksijen ve su buharı) belirleyici parametrelerdir. Bu nedenle bu parametrelerin yerli kömürler için incelenmesine ihtiyaç vardır.

YKG teknolojisini başta ülkemiz kömürleri için geliştirmek amacıyla sunulan 1003-113M038 sayılı projesi TUBİTAK - ARDEB tarafından desteklenmiş olup İTÜ bünyesinde oluşturan araştırma grubuyla çalışmalar yürülmüştür. Bu kapsamda deneysel çalışmalar için, laboratuvar ölçekli YKG deney düzeneği İTÜ Makine Fakültesinde kurulmuştur. Deneylerde Pirinççesme - Malkara - Tekirdağ linyit kömür yataklarından alınan örnekler kullanılmıştır. Kömür tedariki ve kömür yatağı (damarı) çalışmalarında Uysal Madencilik şirketi ile yoğun iş birliği içinde bulunulmuştur.

YKG'nin saha uygulaması için yeraltında olan kömür yatağı içinde kömür bloklarına bölünerek gazlaştırma reaktörlerinin oluşturulması gerekir. Ancak gazlaştırma reaktörlerinin geometrisi, büyüklüğü ve işletme proses parametreleri kömürün gazlaştırma verimliliği ve kalitesi için çok önemlidir. Özellikle yerli kömürler için

uygun gazlaştırma reaktörü gelişmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla laboratuvar ortamında YKG simülasyonları için aynı geometride, fakat iki ayrı ölçekte kullanılacak gazlaştırma reaktörü kurulmuştur. Tasarlanan reaktörlerden birincisi, küçük reaktör, 67cm x 65,5cm x 81,5cm (genişlik x yükseklik x uzunluk) büyüklüğündedir. Tasarlanan reaktörlerin ikincisi, büyük reaktör 101 cm x 65,5 cm x 200 cm büyüklüğündedir. Reaktörde Pirinççeşme – Malkara - Tekirdağ linyit kömür yataklarından alınan örneklerden yararlanılmıştır.

Yapılan bu çalışma süresince sekiz adet başarılı deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların altısı küçük ölçekli kurulan gazlaştırma reaktöründe, diğer ikisi ise büyük ölçekli kurulan gazlaştırma reaktöründe gerçekleştirilmiştir. Optimum gazlaştırma sıcaklıklarını reaktör içinde elde etmek için deneylerde gazlaştırıcı olarak hava, saf oksijen (O_2), hava/oksijen karışımı ve su buharı (H_2O) kademeli olarak sisteme beslenmiştir. Laboratuvar ölçekli deneyler sırasında üretilen sentez gazının içinde % 40-50 oranlarında CO ve H_2 elde edilmesi mümkün olmuştur.

Gazlaştırıcı gaz olarak, hava, saf oksijen (O_2), hava-oksijen karışımı ve oksijen-su buharı karışımı kullanılmıştır. Yalnızca hava kullanımıyla gazlaştırma mümkün olmamıştır. Saf oksijenle yapılan gazlaşmada yüksek oranda CO ve H_2 içerikli sentez gazı üretilmiştir. Oksijenle zenginleştirilmiş hava (hava-oksijen karışımı) kullanıldığında gazlaştırma başarılı olmuştur. Oksijen-su buharı karışımı ve kademeli (art arda) olarak yürütülen gazlaştırmalar ile genel olarak sentez gazında yüksek oranda saf hidrojen gazı elde edilmiştir. Oksijen-su buharı kademeli gazlaşmada özellikle saf oksijen besleme fazı su buharı beslemesi esnasında soğuyan kömür kütlesinin tekrar ısıtılması için gerekli ve yeterli olmuştur. Kademeli gazlaştırma için gazlaştırıcı gaz besleme süreleri ve debileri burada incelenen noktalar olmuştur.

Gazlaştırıcı gaz (oksijen, hava ve su buharı) debisinin gazlaştırma prosesi için çok önemli bir parametre olduğu deneylerde görülmüş olup debi değerinin kömür yatağının boyutları ve kütlesine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ortaya çıkmıştır. YKG uygulamasında uygun gazlaştırıcı gazı debi değerinin teorik hesaplanması mümkün değildir. Bu nedenle deneysel verilere ihtiyaç olmuştur. Diğer taraftan gazlaşma esnasında üretilen gaz bileşimi kontrolü ile gazlaştırıcı gaz besleme ayarı rekli olmuştur.

Ayrıca YKG prosesi için sayısal bir model geliştirilmiştir. Böylece, YKG'nin hem deney reaktörü ve hem de gerçek uygulaması için gazlaşma simülasyonları yapılmıştır. Sayısal model, ANSYS-FLUENT programı ile kömür içinde gazlaştırma reaksiyonları ve gaz akışlarını 2 boyutlu, zamana bağlı olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tekniği ile modellenmiştir.

Deneysel çalışmaların HAD analizleri ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. HAD modeli ile hesaplanan ve deneylerden üretilen sentez gazları (CO ve H_2) değerleri arasında uyumluluk görülmüştür. HAD modelinde kömür özellikleri, kömür boyutları, gazlaştırıcı cinsi ve debileri parametre olarak kullanılmıştır.

HAD analizlerinde, kömür içinde gazlaşmasının gerçekleştiği bölgede sıcaklık dağılımları yanında kimyasal reaksiyon bölgeleri ve gaz bileşenlerin dağılımları zamana bağlı değişimleri gösterilmiştir. Bu sonuçlardan gazlaşmanın kömür içinde yerel ve zamana göre nasıl gerçekleştiği izlenmiş ve kontrolü mümkün olmuştur.

YKG gazlaştırma reaktörlerinin boyutlandırılması ve gazlaşma proses ayarları için son yıllarda yaygın olarak kullanılan Makine Öğrenmesi modelinden yararlanılmıştır. Burada deneysel veriler ve literatürde benzer çalışmaların sonuçları kullanılmıştır.

Makine öğrenmesinde çok değişkenli bir regresyon (tahmin) modeli, MİNİTAB programı yardımı ile geliştirilmiştir. Bu model, sentez gaz (CO ve H₂) ile gazlaştırma reaktör boyutları, kömür özellikleri ve gazlaştırıcı gaz (oksijen) debisi arasındaki matematiksel ilişkiyi tanımlamıştır. Bu tahmin modeli ile hesaplanan sonuçların gerek İTÜ bünyesinde yapılan ve gereksede literatürdeki deneylerle oldukça kabul edilebilir yakınlıkta bir tolerans aralığında olduğu görölmüştür.





EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF UNDERGROUND COAL GASIFICATION FOR TURKISH LIGNITE

SUMMARY

Today, the energy demand that emerges in proportion to the development of countries is attempted to be met by using fossil fuels such as oil, natural gas, and coal, as well as renewable energy sources (such as solar, wind, etc.). All sources of energy that can be utilized are significant, taking into account their contribution to the economy's energy needs and the reliance on foreign sources for their acquisition. Our country is quite rich in lignite coal reserves. However, only 15% of this reserve can be economically extracted by traditional mining methods. Another issue is the coal mine accidents that have occurred in recent years. In addition, the consumption of fossil fuels with traditional combustion techniques in recent years significantly pollutes the environment.

At this point, the Underground Coal Gasification (UCG) technique emerges as an economic and environmentally friendly method that allows coal to be transformed into clean combustible gases in the underground without the need for coal to be physically extracted. For the UCG process, injection wells are drilled into the underground coal bed and gasification agents such as air and oxygen are fed into the coal blocks (gasification reactors) in a controlled manner. Gasification agents triggers gasification reactions and synthesis/combustible gases are obtained from coal. As a result of the gasification process, combustible gases such as CO, H₂ and CH₄, known as synthesis gas, are produced.

Intensive international studies have been initiated for UCG in recent years. These studies aimed at developing the UCG application to increase the quality and calorific value of the synthesis gas.

In the UCG process, the gasification reactor (coal block) dimensions, thermophysical properties of coal, and gasification agent type/mixture ratios (air, oxygen, and water vapor) are determining parameters. Therefore, there is a need to examine these parameters for indigenous coals.

This research is funded by TUBITAK-ARDEB 1003-113M038 in order to develop UCG technology for Turkish lignite. Investigations were carried out with the research group formed within Istanbul Technical University (ITU). In this context, a laboratory-scale UCG experimental reactor was established at the ITU Faculty of Mechanical Engineering for experimental studies. Coal samples used in the experiments obtained from Pirinççesme-Malkara-Tekirdağ lignite coal beds with collobaration of UYSAL mining. To understand lignite coal properties, elemental and short proximate analyzes of Malkara lignite were conducted in Dresden Technical University. Malkara lignite coal contains 25.17% moisture, 17.95% ash, 28.8% volatile matter, and 28.14% fixed carbon in the original sample based on the short proximate analysis results. In addition to short proximate analysis, elemental analysis results showed that in the original sample, 57.02% C, 3.99% H, 1.44% N, 8.15% O₂ and 5.41 S were present.

For the field application of Underground Coal Gasification (UCG), it is necessary to create gasification reactors by dividing coal blocks in the underground coal bed. However, the geometry, size and operating process parameters of the gasification reactors are crucial for the gasification efficiency and quality of the synthesis gas. In particular, the development of a suitable gasification reactor is needed for indigenous coals. Therefore, two different-scale reactors were designed in the laboratory environment for UCG simulations. First, the small-scale reactor (67 cm x 65.5 cm x 81.5 cm) allows working with coal blocks up to 45×35×65 cm, while the large-scale reactor (101 cm x 65.5 cm x 200 cm) allows working with coal blocks of 70×50×180 cm. Samples from the Pirinççesme-Malkara-Tekirdağ lignite coal fields were used in the reactor.

Eight successful laboratory-scale experiments conducted in content of this study. Out of the eight laboratory scale experiments, six of these were carried out in the small-scale gasification reactor, and the last two were carried out in the large-scale gasification reactor. In the experiments, air, pure oxygen, air/oxygen mixture, and steam supply were gradually applied as the gasification agent to obtain the optimum gasification temperatures inside the reactor. CO and H₂ composition rates of 40-50% were obtained in the synthesis gas produced in the experiments.

The gasification experiments were conducted with different gasification agents, including air, pure oxygen, air-oxygen mixture, and oxygen-steam mixture. Air alone was not sufficient for gasification. When pure oxygen was used as the gasification agent, high amounts of synthesis gas with CO and H₂ were produced. Successful gasification was also achieved using an oxygen-enriched air (air-oxygen mixture). Generally, using oxygen-steam mixture and performing gasification in a staged (sequential) manner resulted in high amounts of pure hydrogen gas in the synthesis gas. In the staged gasification process, the oxygen supply phase was especially necessary and sufficient to reheat the cooled coal mass during the steam gasification phase. The feeding times and rates of the gasification agents were investigated as critical parameters for the staged gasification.

It was observed from the experiments that the gasification agent flow rate (oxygen, air, and steam) is a crucial parameter for the gasification process and varies depending on the size and mass of the coal seam. The theoretical calculation of the appropriate gasification agent flow rate for UCG application is not possible. Therefore, experimental data were required. On the other hand, the gasification agent supply adjustments were essential for controlling the gas composition produced during the gasification process.

To better understand the physical and chemical behaviour of UCG, mathematical models are created alongside experimental studies. Mathematical models are useful to provide detailed information about UCG that may be difficult or impossible to obtain from experiments alone. Additionally, process parameters can be investigated with mathematical models. Therefore, a two-dimensional, time-dependent mathematical model based on gasification physics is developed in this study. Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to solve governing differential equations for UCG.

Coal block is modelled as porous medium and drying, homogeneous and heterogeneous reactions which occur in the coal block and gasification channel, are included. Consequently, cavity formation inside the coal block is simulated according to the coal consumption due to the chemical reactions. Simultaneous momentum, heat and mass transfer inside the coal block and gasification channel are modelled using

two-dimensional conservation equations. Turbulent flow in gasification channel is modelled with k- ϵ turbulence model.

In order to solve the differential conservation equations, CFD based ANSYS Fluent software is used. CFD simulations needs the numerical grid (mesh) to be defined. For comparison purposes, two-dimensional geometry and mesh is defined based on a large-scale UCG reactor which is representative of the conducted UCG experimental setup. Numerical results acquired through the mathematical model are compared and verified against the outcomes of an experimental investigation performed on the identical UCG reactor. In this CFD analysis, lignite coal sample from Pirinççesme/Tekirdağ is used and gasification simulation had been performed with the supply of oxygen. The simulations of the experimental studies were carried out using computational fluid dynamics analysis. Compatibility was observed between the values of syngas (CO and H₂) calculated using the CFD model and those produced in the experiments. Coal properties, coal sizes, gasifier types, and flow rates were used as parameters in the CFD model. After the numerical results are verified, time dependent contour plots that are visually showing the predicted cavity formation, temperature field and chemical reaction zones inside the reactor are given.

The Machine Learning model, which has been widely used in many other scientific fields in recent years, has been utilized for sizing and process adjustment of gasification reactors for the UCG process. Experimental data and results from similar studies from the literature were utilized as input. A multivariable regression (prediction) model was developed using the MINITAB software. This model describes the mathematical relationship between the dimensions of gasification reactor with synthesis gas (CO and H₂), coal properties and gasification agent (oxygen) flow rate. It was observed that the results calculated with this predictive model had a tolerance range that was quite acceptable, both in experiments conducted at ITU and in experiments found in the literature.

Experimental and mathematical modeling studies conducted within the scope of our project are of great importance in terms of simulating and understanding underground coal gasification physics. The main goal to be achieved in these studies with experiments and mathematical modelling, determination of optimum gasification reactor size, temperature, and optimum syngas components.



1. GİRİŞ

1.1 Problem Tanımı ve Tezin Amacı

Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesinin verilerine göre, dünyanın en önemli sorunu temiz ve ucuz enerji ihtiyacını karşılayamamasıdır [1]. Türkiye enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü dışarıdan sağlayarak dışa bağımlı durumdadır. Enerjide dışa bağımlılığın azaltılması ve bu sayede ülkemizde artan enerji ihtiyacının yerli kaynaklardan karşılanması önemli bir konudur.

Ülkemiz, dünya linyit rezervlerinin %8,7'sine denk gelen yaklaşık 19,32 milyar ton linyit rezerviyle birlikte düşük kaliteli alt bitümlü ve linyit rezervlerinin %3,6'sını barındırmaktadır [2, 3]. Bunun yanında, ülkemizde bulunan kömür rezervlerinin 1,6 milyar tonu bitümlü kömür rezervi olarak raporlanmıştır [2]. TEİAŞ'ın 2019 yılında yayınladığı rapordan alınan verilere göre, elektrik üretiminin %35'e yakınının kömür kaynaklı olduğu ve kurulu toplam elektrik gücünün %21,4'e yakınının kömürden elde edildiği belirtilmektedir. Buna ek olarak, ithal kömürler; taş kömürü, yerli linyit ve asfaltit gibi kaynakların katkısını geride bırakarak elektrik üretiminde %19'luk bir paya sahip olmuştur [4].

Linyitlerin genel olarak düşük kalorili, yüksek nem, kül ve kükürt içerikli olduğu göz önüne alınırsa, geleneksel maden çıkarma ve yakma yöntemleri ile verimli, ekonomik ve çevreci kullanımları mümkün değildir. Bu nedenle şu an ülkemizde yerli linyit kömürlerden yeterli şekilde yararlanılamamaktadır.

Bundan yaklaşık 140 yıl önce ilk defa Siemens tarafından geliştirilmiş olan Yer altı kömür gazlaştırma (YKG) teknolojisi bu noktada özellikle linyit kömürlerinden yararlanmak için çevreci ve ekonomik bir alternatif teknoloji sunmaktadır [5]. YKG, yeraltında kömürün bulunduğu yerde, gazlaştırılarak yanıcı sentez gaz üretme prensibine dayanmaktadır. Bu teknoloji ile kömürün yer altındaki yatağından çıkarılmasına gerek olmadığı için kömür çıkarma maliyetleri de olmamaktadır. Bunun yanında gazlaştırma işlemi esnasında ortaya çıkan kül gibi çevreyi kirletici maddeler yeraltında kalmaktadır. Bu da YKG teknolojisinin klasik yöntemle göre daha ekonomik

ve çevreci olmasını sağlamaktadır. YKG tekniğinin şu ana kadar yaygın olarak kullanılmamasının nedeni özellikle petrol ürünlerinin çok daha ekonomik olmasından kaynaklanmıştır. Son zamanlarda, petrol ürünlerinin pahalılaşması ile tüm dünyada YKG teknolojisine büyük ilgi duyulmasına neden olmuştur.

Ülkemiz için YKG teknolojisi şu an önemli bir fırsat olarak görülmektedir. Literatürde kömür yatakları ve kömür cinslerine göre farklı YKG yöntemleri uygulanmaktadır [6]. Bu nedenle öncelikle ülkemizdeki kömür yataklarına ve özelliklerine uygun YKG yöntemin belirlenmesi ve uyarlanması ve testleri gerekmektedir. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı ülkemiz linyit kömürlerine uygun bir YKG teknolojisini geliştirilmesine yönelik olacaktır.

1.2 YKG için Yapılan Teorik ve Deneysel Çalışmalar (Literatür İncelenmesi)

YKG ile ilgili literatürdeki bilimsel araştırmalar incelendiğinde, araştırmalar deneysel ve teorik çalışmalar olarak gruplanmaktadır. Deneysel çalışmaların bir bölümü pilot ölçekli olup yeraltında kömür damarı üzerinde gerçekleştirilmiş saha uygulamalarıdır. Diğer deneysel çalışmalar ise laboratuvar ölçeklidir. Teorik çalışmalarda ise YKG'nin sayısal modellenmesi çalışmaları yürütülmektedir.

1.2.1 Saha uygulama deneyleri

Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) ilk yeraltı kömür gazlaştırma (UCG) uygulamaları Hanna, Hoe Creek, Centralia ve Rocky Mountain'da gerçekleştirilmiştir. Pilot ölçekli çalışmalar 1972-1977 yılları arasında Wyoming'deki Hanna'da Laramie Enerji Teknoloji Merkezi (LETC) tarafından gerçekleştirilmiştir. Üç deneyde de bağlantılı düşey kuyular (LVW) tekniği kullanılmıştır ve üretilen sentez gazının ısı değeri ortalama $6,7 \text{ MJ/m}^3$ olmuştur. Hanna I deneyleri 1973-1974 yılları arasında gerçekleştirilmiş ve $5,0 \text{ MJ/m}^3$ ısı değeri sentez gazı üretilmiştir. Hanna II deneyi ise Hanna I'deki sentez gazı kalitesini iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Hanna II deneyi üç faz olarak gerçekleştirilmiştir ve Faz I, Faz II ve Faz III olarak adlandırılmıştır. Aralarından en uzun olan Faz I, dört ay sürmüş ve neticesinde $6,0 \text{ MJ/m}^3$ ısı değeri sentez gazı üretilmiştir. Üç ay süren Faz II ve Faz III deneylerinde ise sırasıyla $6,7 \text{ MJ/m}^3$ ve $5,4 \text{ MJ/m}^3$ ısı değeri sentez gazı üretilmiştir. Hanna III deneyi ise bir ay sürmüştür ve ortaya çıkan sentez gazının ısı değerinin $5,4 \text{ MJ/m}^3$ olarak ölçüldüğü belirtilmiştir. [7,8,9,10,11].

Yine 1970'lerde Hoe Creek'te üç adet YKG saha uygulaması yapılmıştır [12,13,14]. Hoe Creek I, II ve III olarak adlandırılan bu saha deneylerinde, her üç deneyde de bağlantı kuyuları arasındaki geçirgenliği iyileştirmek amaçlı birbirinden farklı yöntemler uygulanmıştır. Hidrolik kırılma tekniği Hoe Creek I deneyinde kullanılarak $3,80 \text{ MJ/m}^3$ ısı değeri sahip sentez gazı üretilmiştir. Hoe Creek II deneyi içinse "kontrol edilebilir geri besleme tekniği" (CRIP) kullanılmış, sentez gazının ısı değeri $4,03 \text{ MJ/m}^3$ oranına yükseltilmiştir. Hoe Creek III deney çalışmasındaysa yatay sondaj tekniğiyle geri gaz besleme tekniği bir arada kullanılmıştır ve $8,09 \text{ MJ/m}^3$ ısı değeri sentez gazı üretilmiştir. Ancak yapılan testlerde YKG'nin yer altı sularında önemli derecede kirlenmeye neden olduğu gözlenmiştir [15,16].

1981-1982 yılları arasında Centralia'da kontrollü geri gaz besleme tekniği CRIP (controlled retracting injection point) uygulanmıştır. Bu saha uygulamasında, farklı sondaj teknikleri ve birbirinden farklı oksijen/buhar oranları kullanılarak sentez gaz kalitesine etkisi araştırılmıştır. Ancak yapılan testler, sentez gazının kalitesinin çok fazla değişmediğini göstermiştir. Bunlara ek olarak kömür içindeki gazlaşmanın meydana gelidği oyuk (kavite) büyümesi de araştırılmıştır [5, 17].

1987 yılında Rocky Mountain I'de saha çalışmaları başlatılmıştır. Rocky Mountain IA testlerinde gazlaştırıcı gaz besleme için CRIP tekniği uygulanmıştır. Rocky Mountain IB testinde ise gazlaştırıcı gaz beslemesi için bu kez LVW (Linked vertical well) tekniği uygulanmıştır. Yapılan testler neticesinde yüksek kalitede sentez gaz üretilmiştir. Yapılan bu testler Amerika'daki en başarılı testler olmasına rağmen, ticari boyutlu çalışma için gereken yatırımı bulamadığından iptal edilmiştir [18,19].

Alberta, Kanada'da hayata geçirilmiş olan en kayda değer YKG projesi, Swan Hills YKG projesidir ve Kanada hükümetince destek görmüştür. Kurulan bu tesis "Karbondioksit Yakalama ve Saklama" (CCS) ile donatılmış olup 300 MW'a yakın elektrik üretimi hedeflenmiştir. 2008'de hayata geçen bu deneylerde, CRIP tekniği kullanılarak 1.400 m derinliğindeki kömür yatağına YKG tekniği uygulanmış ve kaliteli sentez gazı üretilmiştir. Bu proje, dünyadaki en derinde yapılan YKG uygulamasıdır ve test çalışmalarından başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ticari ölçekli uygulamaya geçilmesi kararı alınmıştır. Bu testlerde, gazlaşma oyuk basıncının rezervuar basıncından daha düşük, 0-4 MPa arasında olması gerektiği önerilmiştir. Kaliteli sentez gazı eldesi için gazlaşma gazı olarak kullanılan oksijen beslemesinin su

buharıyla birlikte yapılması gerektiğini belirtmiştir ve deneylerde su buharı/oksijen kütle oranı 2-3/1 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. [20, 21]

Avustralya'da Linc Energy firmasının Ergo Exergy teknolojilerinden yararlanarak yürütülen Chinchilla testleri, yaklaşık 140m derinliğindeki ve 10m kalınlığındaki kömürün yer altında gazlaştırılması için dokuz besleme/ürün kuyusu ve on dokuz izleme kuyusu içermiştir. Sentez gazı üretimine ilk olarak Aralık 1999'da başlanmış ve daha sonra tesis sentez gaz üretimini düzenli hale sokarak kapasitenin 80.000 Nm³/h'a kadar çıkması sağlanmıştır [18,22]. Deneyler sonucunda 35.000 ton kömür yer altında gazlaştırılmıştır. Gazlaşma neticesince düşük ısı değere sahip (4,5 ila 5,7 MJ/m³), 300°C ve 10 bar basınçta sentez gaz elde edilmiştir [23].

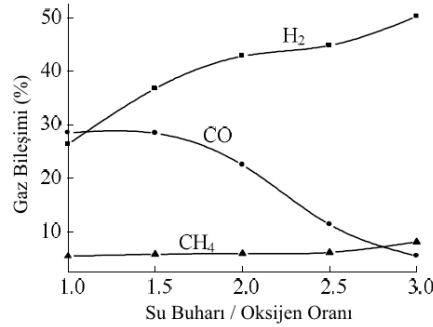
Çin'de, 1991'den beri 16 pilot proje uygulanmıştır. Bu projelerde sentez gazı, ticari gübre ve kimyasalların üretimi için kullanılmıştır. Shanxi Eyaleti'nde, YKG'den elde edilen sentez gazı amonyak (NH₃) ve hidrojen (H₂) üretiminde değerlendirilmiştir. Hebei Xin'ao Group ve Çin Üniversitesi ortaklığıyla kurulan YKG tesisinde sıvı yakıt üretilmesi hedeflenmiş ve yılda ortalama 100.000 ton metanol ile ortalama 32,4 milyon kWh enerji üretilmiştir [24].

1.2.2 Laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar

Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, Glaser ve Johnson (1985), gazlaştırma gazı olarak sadece havayı tercih etmiş ve gaz basıncının sentez gazı üretimine etkisi incelenmiştir. Deneylerde gaz basıncı 7, 21 ve 35 atm basınç değerleri test edilmiştir. Deneylerde özellikle metan gazı oluşumunu basıncın etkili olmadığı görülmüştür [25]. Yüksek basınçlarda ise H₂ ve CO oluşumu azaldığı ve bunun nedeninde kimyasal denge koşullarının sebep olduğu açıklanmıştır. Ayrıca üç farklı basınç değeri altında yapılan deneylerde farklı kömür gazlaşma oyuk (kavite) oluşumu gözlemlenmiştir. 21 atm basınç altında gerçekleştirilen deneylerde cüruf birikiminin gazlaştırma esnasında akışı bozduğu görülmüştür. Deney sonuçlarında, kömür gazlaştırma oyuğu şeklinde akıştaki bozulmalara bağlı olarak değişiklikler gözlemlenmiştir. Buna ek olarak yüksek basınç değerinde üretilen sentez gazının ısı değeri oldukça azalmıştır [25].

Liu ve diğ. (2009) ise hidrojen (H₂) eldesi için laboratuvar düzeneği tasarlamışlardır. Laboratuvar ölçekli yapılan deneylerde linyit kömürü kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda linyitin gazlaştırma için uygun olduğu tespit edilmiştir [26].

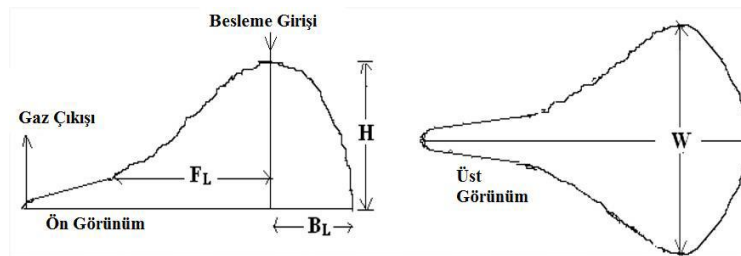
Gazlaştırma gazı olarak kullanılacak su buharı ile oksijen oranının etkisi de bu çalışma kapsamında incelenmiştir (Şekil 1.1). Linyit kömürü su buharı /oksijen oranı 2/1 ile beslendiğinde üretilen sentez gazının H_2 gazı oranı artarak % 40 - %50 oranlarına ulaşmıştır.



Şekil 1.1 : Liu v.d tarafından yürütülen çalışmada yanıcı gaz oluşumuna su buharı-oksijen oranının etkisi [26].

Böylece yer altı suyunun YKG için kullanabileceği potansiyelinden bahsedilmiştir. Ayrıca oksijen ile yapılan gazlaşmada Yüksek oranda H_2 gazı elde edilmek istendiğinde, kömür nem oranının %40 olması bir avantaj olarak ortaya çıkmıştır [26].

Daggupati v.d. (2010), kömür gazlaşma oyuğu (Kavite) oluşumunu ve ilerlemesini deneysel olarak incelemiştir. Deneylerde, oksijen beslemesi için besleme noktasının kontrollü geri çekilmesi (CRİP) tekniği (geri besleme) uygulanmış ve önce gazlaşma oyuğu (kavite) oluşturmak için o bölge yakılmıştır. Gazlaşma sürecinde ise gazlaşma oyuğunun (kavite) kömür bloğu içerisinde davranışı (ilerilemesi) izlenmiştir. Gazlaşma oyuğu ilerlemesine, gazlaşma reaktörü geometrik boyutlarının, oksijen gazı besleme debisinin etkisi analiz edilmiştir [27].

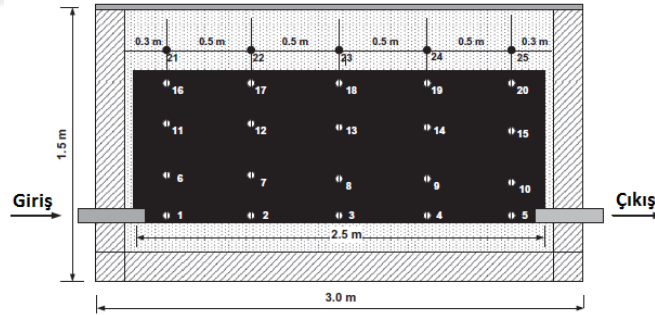


Şekil 1.2 : 2010 yılında gerçekleştirilen araştırmalar ışığında öngörülen gazlaşma oyuk geometrisi [27].

Deneyler, gazlaşma oyuğunun (kavite) yüksekliğinin genişliğinden daha küçük olduğunu göstermiştir (Şekil 1.2). Ayrıca gazlaşma oyuğu uzunluğu zaman içerisinde artmıştır. Farklı deneylerde yapılan araştırmalar, dikey oyuk büyümesinin hızının 1,6-

5 cm/saat arasında olduğunu göstermektedir. Ancak yapılan çalışmalar, ileri ve enine oyuk büyümesinin dikey büyümeden daha önemli olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Düzenli oyuk büyümesini arttıran etkenlerden birinin de oksijen gazı besleme debisindeki artış olduğu belirtilmiştir. Farklı kömür türleri ve gazlaştırma gazı kullanımının, gelecekte yapılacak çalışmalarda planlandığı belirtilmiştir [27].

Stanczyk ve diğ. (2010) linyit kömüründen YKG ile hidrojen zengin sentez gaz elde edilmesini amaçlayan deneysel çalışmalar yapmıştır (Şekil 1.3). 54 saat süren deneylerde linyitin gazlaştırması için oksijen (O_2) ve su buharı (H_2O) kullanılmıştır. Deneyler tutuşturma, oksijen (O_2) beslemesi ile su buharı (H_2O) beslemesi kademesi olarak 3 adet art arda gelen bölüme ayrılmıştır. Linyitin su buharı ile gazlaştırılması kademesinde üretilen sentez gazın ısı değeri $7,8 \text{ MJ/m}^3$ ve Hidrojen (H_2) oranı %46,3 olmuş, ancak kısa sürede hızlı şekilde sıcaklıkların düştüğü ve gazlaşmanın kötüleştiği gözlenmiştir. Özellikle deneyde kullanılan linyitin hacimce %53 nem içeriğine sahip olması nedeniyle ilave su buharı eklenmesinin uygun olmadığı anlaşılmıştır. Oksijenle yapılan gazlaşma kademesinde sentez gazının ısı değeri $5,2 \text{ MJ/m}^3$ olmuştur. Sentez gazın içerisinde %26 oranında Hidrojen (H_2) bulunmuş ve üretilen sentez gazının debisi $16 \text{ m}^3/\text{saat}$ olarak ölçülmüştür [28].



Şekil 1.3 : Tasarlanan deneysel reaktörün kesit görünümü [28].

Stanczyk ve diğ.(2010) tarafından elde edilen deney sonuçları, gazlaştırılan kömürün nem içeriğinin sentez gazın kalitesini önemli ölçüde etkilediğini ve önemli bir etken olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, ileride kömür sahalarında yapılacak yer altında kömür gazlaştırma çalışmaları için iki çok önemli tespitte bulunmuştur. Bu iki tespitten biri, nem kontrolü ve linyit yatakları ile onu çevreleyen katmanlar arası su akışının düzenlenmesi gerektiğidir. Diğer ise, daha büyük linyit yataklarında çalışmanın tepkime yüzey alınına arttırarak daha iyi sonuçlar vereceği yönündedir [28].

Stanczyk ve diğ. (2011) tarafından yapılan YKG deneysel çalışmasında linyit ve taş kömürü incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Deney süreleri 30 ve 50 saat olup gazlaştırıcı gaz olarak oksijen (O_2), hava ve oksijenle zenginleştirilmiş hava karışımı beslenmiştir. Sadece havanın gazlaştırıcı gaz olarak kullanılması durumunda reaktör sıcaklıklarında hızlı düşmeler gözlemlenmiştir. Sıcaklık düşüşüne bağlı olarak gazlaştırma reaksiyonlarda durma meydana geldiği ve sentez gazı kalitesinin düştüğü belirtilmiştir. Hava besleme debisinin artırılması da sıcaklıklardaki düşüşü engelleyememiştir. Linyitin %53 oranındaki yüksek nem değerine sahip olması hava ile gazlaşma için uygun olmamıştır. Ancak havanın oksijen ile zenginleştirilmesiyle gazlaşma iyileşmiştir. Bunun için oksijen hava karışımının en az belirli hacimsel oranda olması gerekmektedir. Linyit kullanılan deneylerde oksijen ile hava karışım oranının 2'ye 1 olduğu (2:1) durumlarda bu reaksiyon sonucu elde edilen sentez gazındaki içeriğin %23,1'i Hidrojen (H_2), %6,3'ü ise Karbonmonoksit (CO) hacimsel oranlarına sahip olduğu ve ısı değeri de $4,18 \text{ MJ/m}^3$ olduğu ölçülmüştür [29].

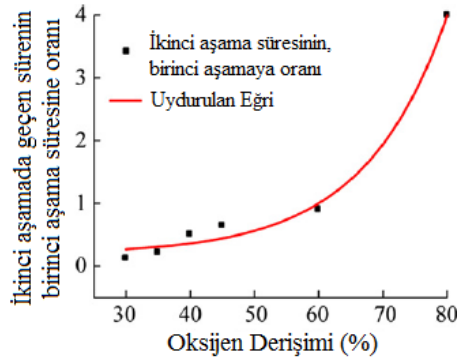
Taş kömürü kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise oksijen ile havanın karışımının oranının 2'ye 3 (2:3) olduğu, bu reaksiyon sonucu ortaya çıkan sentez gazındaki içeriğin %18,7'i Hidrojen (H_2), %17,3'ü Karbonmonoksit (CO) ve yanıcı gazın ısı değeri ise $5,74 \text{ MJ/m}^3$ olduğu ölçümlenmiştir [29].

Yüksek nem içerikli linyitlerin gazlaştırması esnasında gazlaşma sıcaklıklarının sabit tutulmasında sorunlar yaşanmıştır. Oksijenle zenginleştirilen hava kullanılarak gerçekleşen gazlaştırma reaksiyonunda, reaktörün geometrisi ile optimum oksijen ile hava karışım oranı arasında önemli bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmalarda bu faktörün önemine değinilmiştir [29].

Bir başka çalışmada ise, Hongtao ve diğ. (2011), gazlaştırma ile elde edilen sentez gazın üretim süresini ve elde edilen ısı değerini artırmak için oksijen ile zenginleştirilen hava ve su buharı olmak üzere art arda gelen iki kademeli gazlaştırma uygulamıştır. Bu proses için oksijen ile zenginleştirilen havanın kömür kütlesinin sıcaklığını attıran bir etken olarak ve su buharı beslemesinin ise sentez gazının yüksek ısı değeri olması için sadece H_2 üretimi için kullanılmıştır. Deneylerde elde edilen sentez gaz içeriğinin, gazlaştırma süresine bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında, hava veya su buharının oksijen ile zenginleştirilmesinin, çift kademeli gazlaştırma prosesinin ilk kademesinin süresini kısalttığı; buna karşılık aynı prosesin ikinci kademesini ise uzattığı gözlemlenmiştir [30].

Çalışmadaki oksijence zenginleştirilmiş havadaki oksijen oranı %30, %35, %40, %45, %60, %80 oranlarında olmuştur. Böylece prosesin birinci ve ikinci aşamalarının birbirine oranları Şekil 1.4'te verilmiş ve deney sonuçları aşağıdaki denklem 1.1 ile ifade edilmiştir:

$$y = 0.00788e^{\frac{x}{0.12946}} + 0.18814 \quad (1.1)$$



Şekil 1.4 : İki kademeli gazlaştırma sürecinde, kademeler arası sürenin oksijen derişimine bağılı değışim grafiğı [30].

Su buharı beslemesinde sıcaklık düşüşleri hızlarının 19,1°C/dk ile 27,4°C/dk ve 2,3°C/dk ile 6,8°C/dk mertebelerde hesaplanmıştır. Oksijence %80 oranında zenginleştirilmiş hava ile yapılan gazlaştırmada en yüksek ısıl değerlere sahip sentez gazı üretildiğı (5,31 MJ/Nm³ ile 10,54 MJ/Nm³) ve üretimin oldukça uzun süre devam etmiştir [30].

Kacur ve diğ. (2014), laboratuvar ortamındaki yaptığı deneylerde sentez gaz içeriğinin ve ısıl değerinin, gazlaştırıcı gaz türlerine bağılı olarak değışimi incelenmiştir. Yapılan deneylerde, gazlaştırıcı gaz olarak ilk aşamada hava, bunun ardından oksijen ile zenginleştirilmiş hava ile beslenmiştir. Hava ile yapılan gazlaştırmada üretilen sentez gazının ısıl değerinin ortalama 2,9MJ/m³ ölçüldüğü, oksijen-hava karışımıyla beslenen deneyler sonucunda ise ısıl değerinin 8,18MJ/m³ ölçüldüğü kaydedilmiştir. Sonuç olarak belirli oksijen hava karışım oranının gerekli olduğı ve bunda gazlaştırma işleminin verimini ve sentez gazın kalitesinin artmasındaki en önemli faktör olduğı işaret edilmiştir [31].

1.2.3 Matematiksel modelleme çalışmaları (Teorik çalışmalar)

YKG'nin matematiksel modellenmesinde kullanılan farklı yöntemleri özetlemek için Zogala, A. tarafından 2014 yılında gerçekleştirilen çalışmada; her bir yöntemin

avantajları, dezavantajları ve eksikleri ortaya konmuştur. Termodinamik denge modelleri ilk bölümde ele alınmış ve yeraltı kömür gazlaştırma için hem stokiyometrik hem de stokiyometrik olmayan modeller incelenmiştir. İkinci bölümde, YKG süreci için kimyasal kinetik bağıntılar ve Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (HAD) modelleri tanıtılmıştır. Çalışmada, her iki metodun da yaklaşık olarak benzer çıktı ve sonuçları elde ettiği belirtilmiştir [32].

Aynı çalışmanın ikinci bölümünde, termodinamik denge modelinin yanı sıra, “Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği” (HAD) modeli ve kimyasal kinetik modeli de incelenmiştir. Piroliz, homojen ve heterojen reaksiyonlar için kimyasal reaksiyon kinetiği denklemleri ayrı ayrı sunulmuştur. Kömürün tüketim hızını saptamak için kullanılabilecek reaksiyon modelleri arasında; rastgele gözenek, azalan çekirdek, ve düzeltilmiş kimyasal reaksiyon modelleri gibi modellerin kullanılabileceği belirtilmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelleri için termodinamik korunum denklemleri yanı sıra türbülans modellemesi konusuna da değinmiştir. Matematiksel modelden beklenen çıktıya göre yukarıda bahsedilen modellerden hangisinin daha pratik bir çözüm olacağı yapılan çalışmada tartışılmıştır. Yapılan değerlendirmeler neticesinde YKG prosesinin zamana bağlı olarak modellenmesi ve bu proseslerde geometriye bağlı kavite oluşumunun incelenebilmesi için kimyasal kinetik denklemlerini kapsayan, daha kapsamlı HAD modellemesinin gerekliliği işaret edilmiştir [33].

2003 yılında Yang v.d. tarafından geliştirilen HAD modeli ile silindirik geometriye sahip bir reaktörde korunum denklemleri belli başlangıç şartları ve belli sınır şartlarıyla değerlendirilmiştir [34]. Bu çalışma gerçekleştirilirken;

- Yerçekiminin etkilerinin ihmal edildiği,
- Temel fiziksel ve termodinamik parametrelerin, ısı iletim katsayısının, ısı kapasitenin ve ısı değişim katsayısının zamana bağlı olarak değişmediği,
- Isıl direnç etkisinin ve kohezyon kuvveti etkisinin ihmal edildiği,
- Basınç ve ısı difüzyonlarının ihmal edildiği,
- Kömür bloğunun yerel hata ve çatlaklar barındırmadığı,

- Hava akımının debisinin yanma bölgesindeki tepkimelerle değişim göstermediği,
- Açısal değişimlerin olmadığı varsayılmıştır.

Yukarıda bahsedilen kabuller çerçevesinde modellenen kömür bloğu iki boyutlu koordinatlarda seçilmiştir. Gazlaştırma kanalı silindirik koordinatlarda bir boyutlu olarak kabul edilmiştir. Geliştirilen modelde bileşenlerin kütle korunum denklemleri molar şekilde ifade edilmiştir. Işınmla olan ısı geçişinin de modele dahil edildiği belirtilmiştir. Sayısal yöntemlerden olan sonlu hacimler yöntemi, denklem takımlarının çözümü için kullanılmıştır. Geliştirilen matematiksel modelin sonuçlarının doğrulanması için bir deney düzeneği kurulmuştur. Yapılan deneylerde gazlaştırıcı gaz olarak 20 m³/h hava kullanılmıştır. Deneylerde, kurulan modele benzeşimi için silindirik bir kömür bloğu kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ve model sonuçlarının karşılaştırılması yapıldığında, geliştirilen modelin deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu belirtilmiştir [34].

Shirazi (2012) tarafından yapılan çalışmada, yer altı kömür gazlaştırma prosesi için geliştirilen HAD modeli hakkında detaylı bilgilendirmeler ve uygun sayısal çözüm yöntem önerisi yapılmıştır. Bu çalışmada, kömür bloğu ve gazlaştırma kanalı ayrı olarak modellenmiştir. Kömür bloğu bir gözenekli ortam olarak modellenmiştir ve kömürün içerisindeki gözenekliliğin kimyasal reaksiyonlara (kuruma, yanma, piroliz, gazlaşma vb.) bağlı olarak değişkenlik gösterdiği kabul edilmiştir. Geliştirilen modeldeki diferansiyel korunum denklemlerinin, sayısal çözüm olarak iki farklı yöntem kullanan iki farklı paket program ile çözülmesi denenmiştir. Bu programlardan birincisi, “sonlu elemanlar” yöntemi ile çözüm sağlayan COMSOL isimli paket programıdır. COMSOL ile gerçekleştirilen ilk çalışmada, çözüm geometrisi iki boyutlu kartezyen koordinatlarda oluşturulmuştur [35]. Çalışmanın devamında aynı paket programı kullanılarak çözüm geometrisi üç boyutlu olarak ele alındığında çözümde sorunlar yaşandığı belirtilmiştir [36]. Bu sebeple, ANSYS FLUENT programı üç boyutlu kartezyen koordinatlarda çözüm için kullanılmış ve daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir [36]. Üç boyutlu modelleme ile gazlaştırma esnasında oluşan oyuk büyümesinin daha iyi tahmin edilebildiği görülmüş ve model sonuçları literatürdeki Daggupati v.d.’nin 2010 tarihli çalışmalarıyla kıyaslanmıştır.

Literatürde yapılan matematiksel model çalışmaları Çizelge 1.1’de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Literatürde yapılan modelleme çalışmaları [37].

Ref. No.	Yazarlar	Tarih	Oyuk Modeli	Çözüm Uzağı	Sayısal Yöntem	İncelenen Parametreler
[38]	Biezen v.d.	1995	Azalan Çekirdek	Kartezyen 3 Boyutlu	Sonlu Hacimler Multigrid	Oyuk Gelişimi
[39]	Biezen, E.N.J.	1996	Azalan Çekirdek	Kartezyen 3 Boyutlu	Sonlu Hacimler Multigrid	Oyuk Gelişimi
[40]	Daggupati v.d.	2011	Yok	Kartezyen 3 Boyutlu	Sonlu Hacimler Multigrid	Akış özellikleri, Giriş şartlarındaki değişime sistemin cevap hızı
[41]	Janoszek v.d.	2013	Yok	Kartezyen 3 Boyutlu	ANSYS FLUENT	Jeolojik faktörlerin gazlaştırma işlemine etkisi
[42]	Park v.d.	1987	Azalan Çekirdek	1 Boyutlu	Özel Yazım Kod	Kuruma, Piroliz ve Gazlaşma bölgelerinin sürecin erken döneminde gelişim hızları
[43]	Perkins v.d.	2007	Gözenekli Ortam - Boşluk Oranı	Aksisimetrik (Silindirik) 2 Boyutlu	FLUENT v6.1.18	Sentez gazı özelliklerinin tahmini ve kül tabakasının etkisi
[44]	Seifi v.d.	2011	Gözenekli Ortam - Boşluk Oranı	Kartezyen 3 Boyutlu	CMG - STARS	Oluşan sentez gaz bileşiminin ve kavitenin (oyuğun) zamana göre değişimi
[45]	Seifi v.d.	2014	-	-	CMG - STARS	Gözenekli ortam için gazlaştırma reaksiyon değişkenlerinin ortaya konması
[35]	Shirazi v.d..	2011	Gözenekli Ortam - Boşluk Oranı	Kartezyen, 2 Boyutlu,	COMSOL, MATLAB,	Kavite Gelişimi
[36]	Shirazi, A.S.	2012	Gözenekli Ortam - Boşluk Oranı	Kartezyen, 3 Boyutlu,	ANSYS, FLUENT,	Oluşan sentez gaz bileşiminin ve kavitenin (oyuğun) zamana göre değişimi
[46]	Shirsat, V.A.	1989	Azalan Çekirdek (shrinking core)	Kartezyen / Aksisimetrik 2 Boyutlu	Sonlu Elemanlar (finite elements)	Oluşan sentez gaz bileşiminin ve kavitenin (oyuğun) zamana göre değişimi
[34]	Yang v.d.	2003	-	Aksisimetrik 2 Boyutlu*	Sonlu Hacimler (finite volume)	Zamana bağlılık sıcaklık ve gaz bileşimi değişimi
[47]	Yang, L.	2004	Gözenekli Ortam - Boşluk Oranı	Aksisimetrik 2 Boyutlu*	Sonlu Hacimler (finite volume)	Zamana bağlılık sıcaklık ve gaz bileşimi değişimi
[48]	Yang, L.	2005	Gözenekli Ortam - Boşluk Oranı	Aksisimetrik 2 Boyutlu*	Sonlu Hacimler (finite volume)	Zamana bağlılık sıcaklık ve gaz bileşimi değişimi
[32]	Žogała, A.	2014	Yer altında kömür gazlaştırma prosesinde kullanılan matematiksel model çalışmalarını özetlemiştir.			
[33]						

*İşaretli çalışmalar, modellerinde gazlaştırma kanalındaki korunum denklemlerini 1 (bir) boyutlu olarak kabul etmiştir.

1.2.4 Literatür araştırması özeti

Yer altı kömür gazlaştırma (YKG) ile ilgili gerçekleştirilen çeşitli deneysel çalışmalar incelendiğinde, üretilen sentez gazının (yanıcı gazın) ısı değeri ve yanıcı gaz bileşimini arttırmaya yönelik yapılan çalışmalar olduğu görülmektedir. Bunların başında, özellikle gazlaştırıcı hava, oksijen ve su buharı gazlarının etkisi ele alınmış ve kömürün fiziksel özellikleri ile ilişkili olarak gazlaştırma proses parametrelerinin belirlenmesi gerektiği gösterilmiştir.

Sadece hava ile yapılan gazlaştırmanın mümkün olmadığı ve oksijenle gazlaştırmanın en ideal şartları her zaman sağlandığı gösterilmiştir. Öte yandan oksijenle zenginleştirilmiş hava ile gazlaştırmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Bir diğer incelenen husus ise yüksek ısı değere sahip sentez gazı üretimi için kademeli gazlaştırma uygulaması başarılı olmasıdır. Önce sadece oksijen veya Oksijenle zenginleştirilmiş hava ile yapılan gazlaştırma, kömür bloğu istenilen ideal gazlaştırma sıcaklığına ulaştığında su buharı beslemesi yapılmasıdır.

Su buharı ile yapılan gazlaştırma ile ısı değeri yüksek H_2 üretilmektedir. Ancak su buharı ile yapılan gazlaştırma endotermik reaksiyon (ısı alan) olduğundan belirli süre sonra kömür bloğu soğuyacağından tekrar oksijen besleme fazına geçilmesi gerekir. Böyle bir işletim tekralı bir şekilde ısıtma gazlaştırma olarak kademeli yapılmalıdır. Bununla birlikte kademeli sürecin zaman dilimleri kömürün özellikleri alakalı olduğundan bu proses şartları kömür cinsine göre belirlenmesini gerektirir.

Ayrıca gazlaştırma sıcaklıklarının sağlanması için uygun gazlaştırma gazı debisi ile beslenmelidir. Fazla miktarda oksijen verildiğinde kömür yanmasına dönüşecektir. Dolayısıyla Yer altında kömürün kontrollü gazlaştırması, üretilen sentez gaz içeriğinin sürekli ölçümleri mümkün olabilmektedir.

Teorik modellerden Termodinamik Denge modelleri zamandan bağımsız olarak reaksiyonların denge halindeki sonuçlarını vermektedir. Böylece gazlaştırma ile elde edilecek sonuçların hızlı şekilde görülmesi mümkün olmaktadır. Diğer teorik model olan HAD modelleri ise gazlaştırma ortamındaki akış, kütle ve ısı transferi ve kimyasal reaksiyonları dikkate alarak zamana bağlı hesaplama yaptığından anlık gazlaştırma sonuçlarını görülmesini sağlamaktadır.

Literatürde incelenen matematiksel model çalışmaları temel olarak çıkışta elde edilecek sentez gaz içeriğini ve kömür bloğu içerisindeki gazlaşma oyuğu gelişimini

araştırmıştır. Yer altında kömür gazlaştırma ile ilgili literatür incelendiğinde, HAD analizleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu analizlerde, kömür bloğu, gazlaştırma kanalı ve oluşan gazlaştırma kavitesini fiziksel olarak modellemiştir. Bu bölgelerde korunum (kütle, momentum, enerji) denklemleri zamana bağlı olarak çözülmüştür. Bu modeller, gazlaştırma reaktörü içinde hız, sıcaklık ve bileşenlerin dağılımını incelemek için kullanılmıştır. İncelenen çalışmalarda reaktör olarak anılan kömür bloğu içerisinde meydana gelen kimyasal reaksiyon bölgeleri zamana bağlı olarak incelenmemiştir.

HAD analizlerinin karmaşık yapısı ve zaman alıcı olması nedeniyle termodinamik-kimyasal denge modelleri ve gaz bileşenleri arasındaki değişimin zamana bağlı hesaplanmasına yönelik reaksiyon modelleri de geliştirilmiştir. Fakat bu modeller sadece elde edilecek sentez gaz içeriğini tahmin etmeye yönelik olup kömür geometrisinden bağımsız modelleridir.

1.3 Bu Çalışmada Uygulanacak Yöntem

Bu çalışmada yerli linyit kömürlerimize uygun YKG teknolojisi için hem deneysel ve hem de torik çalışmaların yapılması hedeflenmiştir.

Bu amaçla sunduğumuz “Ülkemiz Kömürleri için Yeraltı Kömür Gazlaştırma Teknolojisinin Geliştirilmesi” başlıklı projede Tübitak 1003 - Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı dahilinde, EN103 kömür gazlaştırma teknolojileri için yapılan çağrı için 15.12.2013 - 15.12.2016 tarihleri arasında kabul görerek desteklenmiştir (113M038 proje numaralı). Bu çalışmalar için, laboratuvar ölçekli bir yer altı kömür gazlaştırma sistemi (YKG reaktörü) tasarımı yapılarak imal edilmiş ve İTÜ Makine Fakültesi’nde kurulmuştur. Deneylerde kullanılacak linyit kömürü için Uysal Madencilik şirketi ile yakın iş birliği içinde bulunularak işletmeciliğini yaptığı MALKARA - TEKİRDAĞ LİNYİT kömürleri ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Deneysel çalışmalarda, öncelikli olarak yerli linyitlerden üretilen sentez gazı kalitesini ve ısı değerini arttırmak birincil hedef olmuştur. Bunun için yerli kömür özelliklerine uygun gazlaştırma proses parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Bu gazlaşma parametreleri olarak gazlaştırma reaktör (kömür bloğu) boyutları, kömürün termofiziksel özellikleri (nem, uçucu oranı, karbon miktarı, vb.), gazlaştırıcı gaz cinsi ve karışım oranları (hava, oksijen ve su buharı) incelenmiştir.

YKG uygulanması için yeraltında kömür damarı küçük bloklara bölünerek gazlaştırma kömür reaktörlerinin (bloklarının) oluşturulması gerekir (Şekil 2.2). Böylece her bir reaktör içindeki gazlaştırma prosesinin kontrolü sağlanmış olunur. Oluşturulan reaktör boyutları, kömür gazlaşma prosesinin gelişmesi için oldukça önemlidir. Kömür içinde gazlaşmanın gerçekleştiği gazlaşma oyuğu 3 boyutlu olarak enine, yüksekliğe ve boyuna doğru ilerlemektedir. Dolayısıyla bu çalışmada uygun reaktör boyutları üzerinde deneysel incelemelerde bulunulmuştur. Ayrıca buradaki deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların laboratuvar ölçekten gerçek uygulamaya uyarlanması önemlidir. Proses tekniğinde gerçek uygulamaya geçiş için benzeşim katsayılarının belirlenmesi gerekir. Bu nedenle bu çalışmada iki farklı büyüklükte ama benzer geometride gazlaştırma reaktörleri üzerinde deneysel çalışmanın yapılması öngörülmüştür.

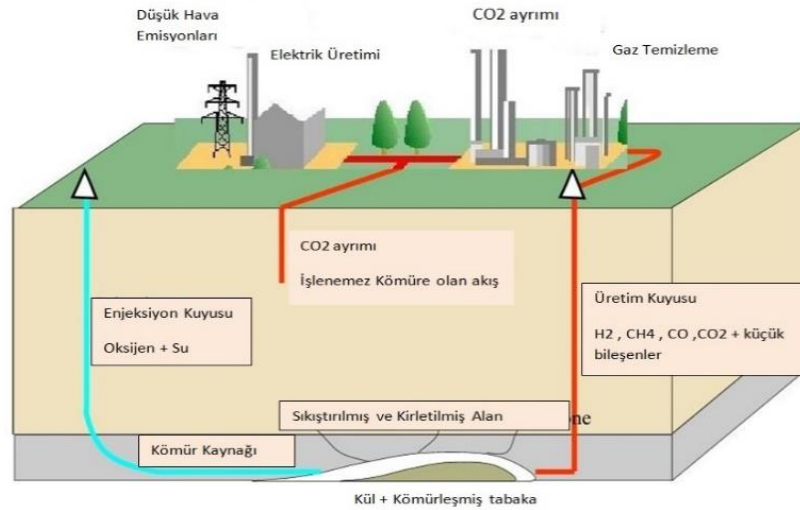
Ayrıca deneysel sonuçların matematiksel model simülasyonları için 2 boyutlu, zamana bağlı bir sayısal model ANSYS - FLUENT paket programı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir.

YKG gazlaştırma reaktörlerinin boyutlandırılması ve uygun proses parametrelerin seçimi için kendi deneysel sonuçlarımız ve literatürdeki deney verileri kullanılarak son zamanlarda güncel olan bir makine öğrenmesi modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. YER ALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMA (YKG) TEKİNİĞİ

“Yeraltında Kömür Gazlaştırma” (YKG) prosesi, kömürün yer altından çıkarılmaksızın, bulunduğu yerde hava, oksijen (O_2), su buharı (H_2O) gibi gazlaştırıcı gazların kullanılması ile sentez gazı üretilmesi yöntemidir [5]. Bu yöntem sayesinde ekonomik olarak faydalanılmasını güç olan ve geleneksel yer altı madencilik yöntemleriyle ile çıkarılması zorlu olan kömür yataklarının kullanımı mümkün hale gelmiştir. Sir William Siemens, ilk olarak 1868 yılında kömürün yeraltında gazlaştırılması fikrini ileri sürmüştür [5].

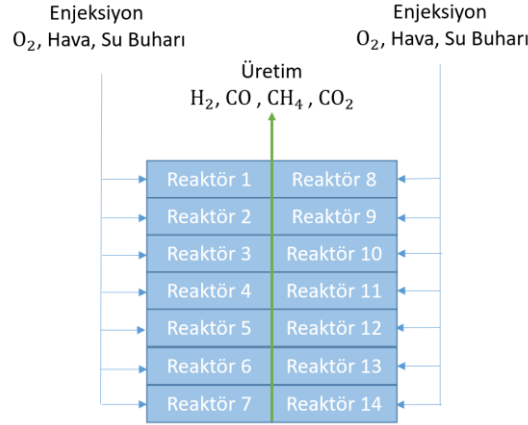
Yeraltında kömür gazlaştırması (YKG) prensip şeması Şekil 2.1’de görülmektedir. Yer altında bulunan kömür yatağına gazlaştırıcı gaz beslemesi için enjeksiyon kuyusu ve üretilen sentez gazının çekilmesi için üretim kuyusu açılır. Enjeksiyon kuyusu ile beslenen hava ve oksijen gibi gazlaştırıcılar etkisiyle kömürden sentez gazı üretilir. Sentez gazı CO , H_2 ve CH_4 yanıcı gazları içeririr.



Şekil 2.1 : YKG prensip şeması [5].

2.1 YKG Reaktörü

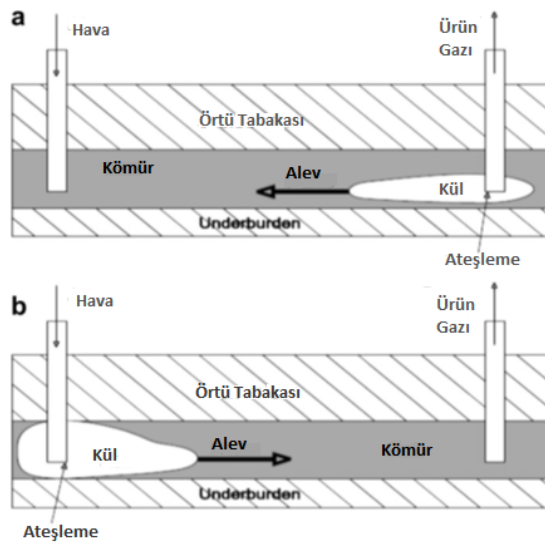
YKG için kömür yatağı bloklar halinde gazlaştırma reaktörlerine bölünür (Şekil 2.2). Böylece her bir reaktörde kömürün kontrollü gazlaştırılması mümkün hale gelir.



Şekil 2.2 : Kömür yataklarının gazlaştırma reaktörlerine bölünmesi.

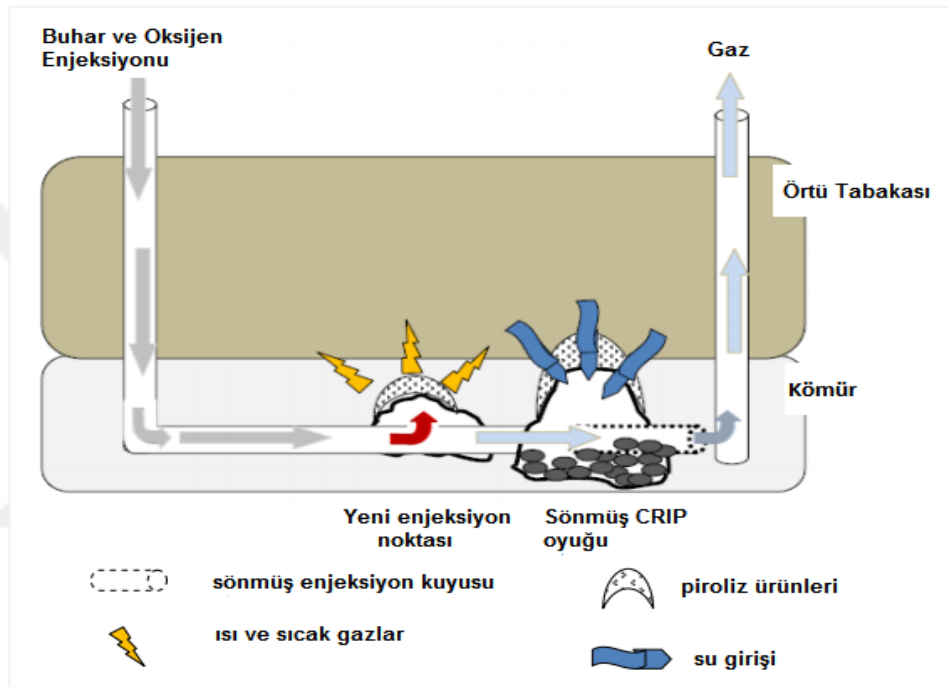
YKG işleminde, enjeksiyon kuyusu ve üretim kuyusu arasında bağlantı kurmak (linking) gerekmektedir. Bu bağlantı işlemi, temelde dört farklı teknik kullanılarak gerçekleştirilir. Bu teknikler; yönlü delme tekniği, elektriksel bağlantı tekniği, hidrolik parçalama tekniği ve “Düşey Bağlantılı Kuyular” (LVW) tekniğidir [49,50].

Bahsedilen teknikler arasında en yaygın olarak kullanılan Düşey Bağlantılı Kuyular (Linked Vertical Wells) tekniğidir. Düşey Bağlantılı Kuyular prosesinde geri yanma ve ileri yanma teknikleri bir arada, sırayla kullanılır. Geri yanma tekniğinde, ürün kuyusundan eklenen yanıcı gaz ile kömürün tutuşturulmasını takiben enjeksiyon kuyusuna doğru alev ilerletilir. Bunun yapılmasındaki temel amaç, ileri yanma işleminden önce kanalın geçirgenliğini arttırmaktır. Şekil 2.3'te LVW yönteminin prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : LVW yönteminin prensip şeması, a) Geri yönlü gazlaştırma b) İleri yönlü gazlaştırma [51].

1970’lerde LLNL araştırmacıları tarafından LVW tekniğinin geri yönlü gazlaşması için Kontrollü Geri Besleme Noktası (CRIP) tekniği geliştirilmiştir. CRIP yöntemi, Şekil 2.4’te görüldüğü gibi kontrollü bir şekilde gazlaştırma sağlamaktadır. Gazlaştırma işlemi ürün kuyusunun yakınında başatılır. Ardından, belirli bir süre sonra oluşan kavitedeki (oyuk) kömür tükendikten sonra, kontrollü bir şekilde besleme noktası geriye çekilerek besleme kuyusundaki diğer gazlaştırma reaktörü içine sokulur ve yeni bir gazlaşma oyuğu oluşturulur. Bu işlem kömür damarındaki tüm reaktörlerin tamamlanmasına kadar devam ettirilir [52].



Şekil 2.4 : Kontrollü Geri Besleme Noktası (CRIP) tekniğinin prensip şeması [53].

Ateşleme noktası kontrol edilerek özellikle geniş hacimli kömür damarlarında istenilen bölgede gazlaştırma işlemine olanak veriyor oluşu CRIP yöntemini avantajlı kılmaktadır. Ayrıca ateşleme noktası kontrol edilebildiği için kömür bölgesindeki geçirgenlikde farklı bölgeler için artırılabilir. Gazlaştırma sırasında meydana gelen oyuğun geometriside aynı şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu durum gazlaştırma sırasında kullanılmayan kömür bloklarının da kullanılmasına olanak vermektedir ve daha verimli sentez gaz üretilmesini sağlamaktadır.

2.1.1 YKG gazlaşma reaksiyonları

Yeraltında kömür gazlaştırma (YKG) işleminde olan tüm kimyasal reaksiyonlar aslında genel olarak yer üstündeki gazlaştırmanın benzeridir. Dolayısıyla kömür gazlaştırmanın temel prensipleri burada da geçerlidir.

Kömür gazlaşması, prensip olarak 700°C - 1000°C sıcaklıkları arasında etkin olan gazlaşma reaksiyonları ile kömürden sentez gazı üretimidir. Bu sıcaklıklar aşıldığında yanma reaksiyonları etkin olur. Ancak gazlaşma reaksiyonları genel olarak endotermik yani ısı tüketen reaksiyonlardır. Bu nedenle gazlaşma reaksiyonları için ihtiyaç duyulan ısı, ısı üreten (eksotermik) yanma reaksiyonları ile karşılanmak zorundadır. Gazlaşma ortamında, gazlaşma ve yanma reaksiyonları arasında bir ısı denge sağlanmış olmalıdır. Böylece hem kömür yüzeyinde 700°C - 1000°C sıcaklıkları ve hem de sentez gazı üretimini gerçekleştiren gazlaşma reaksiyonlarının ısı gereksinimi tedarik edilmiş olur.

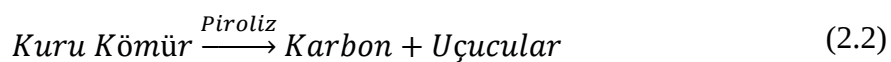
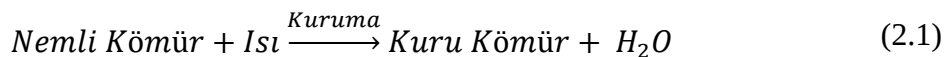
Öyleyse gazlaşma ve yanma reaksiyonlarının gazlaştırıcı oksijen/hava/su buharı beslemesi ile kontrolü ve yönetimi gerekli olmaktadır.

Kömür genel olarak, yanıcı olamayan kil içeriği yanında, karbon, uçucular ve nemden meydana gelmektedir. Kömür sıcaklığına bağlı olarak sırasıyla 100°C sıcaklığı kadar önce nemi buharlaşır, 100°C - 700°C sıcaklıklar arasında uçucu gaz çıkışı ve piroliz reaksiyonları ve en sonunda 700°C - 1000°C arasında karbon gazlaştırması reaksiyonları (heterojen reaksiyonlar) meydana gelir.

Gaz fazında ise homojen reaksiyonları aynı zamanda gerçekleşir. Homojen reaksiyonlar kömür yüzeyinde olan heterojen reaksiyonların bileşenlerini (CO₂ ve H₂O) ve ısı üretimini sağlar.

Kömür gazlaşması esnasında oluşan tüm reaksiyonlar aşağıda özetlenmiştir.

A) Kuruma ve Piroliz Reaksiyonları



B) Heterojen Reaksiyonlar (Kömür yüzeyinde olan reaksiyonlar)

B-1) Yanma Reaksiyonları (eksotermik reaksiyonlar)

Karbon Tam Yanma Reaksiyonu:



Karbon Eksik Yanma Reaksiyonu:



B-2) Gazlaşma Reaksiyonları (endotermik reaksiyonlar)

Boudard Reaksiyonu:



Su Buharı Gazlaşma Reaksiyonu:



Metan Oluşum Reaksiyonu:



C) Homojen Reaksiyonlar (Gaz fazında olan reaksiyonlar)

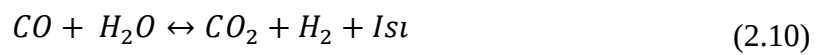
Karbonmoksit Yanma Reaksiyonu:



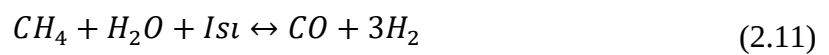
Hidrojen Yanma Reaksiyonu:



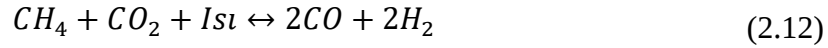
Su-Gaz Değişimi Reaksiyonu:



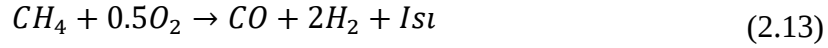
Metan Reaksiyonu:



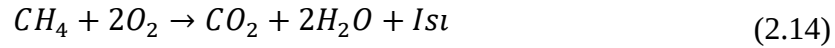
Metanın Karbon Dioksit ile Çözünüm Reaksiyonu:



Metan Eksik Yanma Reaksiyonu:

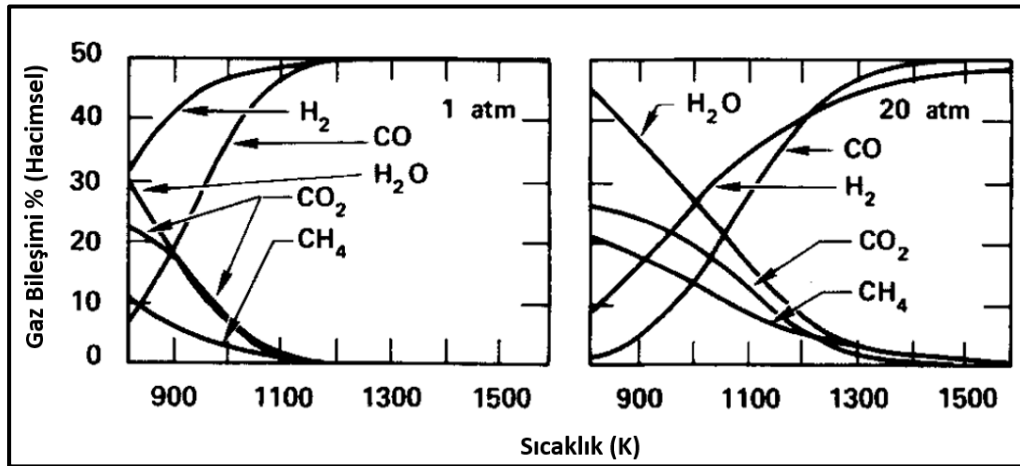


Metan Yanma Reaksiyonu:



YKG prosesinde gerçekleşen reaksiyonlara bakıldığında zaman, gazlaşma reaksiyonları endotermik, yani ısı gereksinimi duyan reaksiyonlardır. Bu ısı enerjisi ise yanma reaksiyonları sonucu ortaya çıkan enerji ile karşılanır. Yanma reaksiyonları ile serbest kalan ısı enerjisinin bir bölümü ayrıca kömür bloğunun ısıtılmasında kullanılır. Dolayısıyla gazlaşma ve yanma reaksiyonları arasında ısı dengesi oluşması zorundadır. Aksi takdirde kömür hızla soğuyacak ve gazlaştırma sona erecektir.

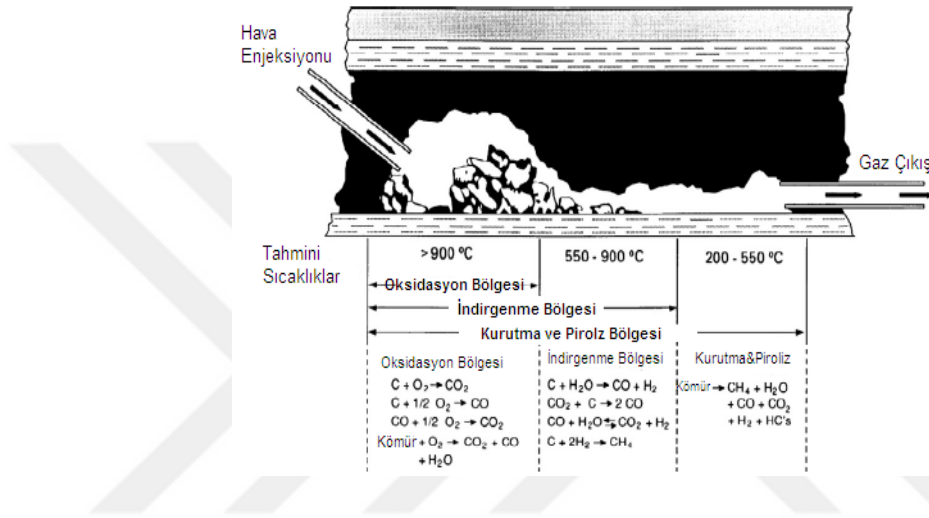
Elde edilen sentez gazının ısı değeri ve bileşimine etki eden diğer önemli bir faktör basınçtır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde yüksek basınçlarda sentez gaz bileşimindeki metan oranının yükseldiği bildirilmiştir [54]. Sıcaklık ve basıncın, deney sonucu oluşan sentez gazı kompozisyonuna etkisi Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5 : Gazlaştırma sıcaklığı ve basıncının sentez gazı bileşimine etkisi [55].

Yukarıda listelenen 14 adet gazlaşma reaksiyonunun YKG reaktörü içinde gerçekleştiği kömür bloğundaki bölgeleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu reaksiyonların her birinin

etkin olduğu bölgeler kömür sıcaklıkları ile sınırlanmıştır. Kimyasal reaksiyon bölgeleri sırasıyla yanma, gazlaşma ve piroliz bölgeleridir. Kömür bloğu içinde oluşan gazlaşma oyuğunda tüm gazlaşma gerçekleşir. Zamanla gazlaşma oyuğu, kömür tükenmesiyle büyüyerek blok kömür içerisinde ilerler. Gazlaşma oyuğunda, homojen reaksiyonlar, gazlaşma oyuğunun kömür yüzeyinde heterojen gazlaşma reaksiyonları ve kömür bloğunun arka kısımlarında ise kuruma ve piroliz reaksiyonları meydana gelir. En yüksek sıcaklık gazlaşma oyuğu içindedir. Kömür iç yüzeyinde gazlaşma sıcaklıkları hâkim olurken arkaya doğru sıcaklıklar düşmektedir.



Şekil 2.6 : YKG kimyasal reaksiyon bölgeleri [51].

2.1.2 Kömür özelliklerinin YKG 'ye etkisi

Linyit ve alt bitümlü kömürler yüksek nem ve uçucu miktarına sahiptir. Aynı zamanda kimyasal reaksiyonlara girme eğilimleri de fazladır. Bu özellikleri, linyit ve alt bitümlü kömürleri gazlaştırma için uygun hale getirmektedir. Fakat kömürün ihtiva ettiği nem seviyesi %40'ın üzerinde olması durumunda, gazlaştırma veriminin düştüğü bilinmektedir [56, 57]. Kömür damarının kalınlığı ve geçirgenliği de YKG işlemine uygunluk açısından önemlidir. Kömür damarı kalınlığının 1.5 ile 2m arasında ve geçirgenliğinin 50 mD ila 150 mD arasında olmasının, YKG işlemi açısından uygunluğu belirtilmiştir [57]. Kömür damar kalınlığı ve geçirgenliği arttıkça sentez gazının ısı değeri artmaktadır. Böylece süreç ekonomik açıdan uygun hale gelmektedir [58, 59]. Aynı çalışmada, damar boyunca kalınlık farkının %25 seviyesini geçmemesinin önemi vurgulanmıştır. Kömür damar derinliği de YKG açısından önemlidir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, YKG çalışmalarında kullanılan damar derinlikleri 50m ila 1200m aralığında değişmektedir [59]. Damar derinliğinin artması

kömürün geçirgenliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum gazlaştırma açısından elverişli değildir. Ek olarak derin damarlarda, kuyuların delme maliyeti artacağından, ekonomik olarak uygun olmayacaktır. 460m'den daha derin damarlarda litostatik basıncın gaz akışı üzerinde olumsuz etkileri olabileceği düşünüldüğünden, bu derinlikten fazla damarlarda çalışılması önerilmemektedir [57].

Kömür damarının eğimi de literatürde yapılan çalışmalarda tartışılmıştır. Ortak kanı, kömür damarının eğiminin 0-20°'de olmasının en uygun olduğudur fakat bundan daha dik damarlarda da başarılı YKG uygulamaları gerçekleştirilmiştir [60]. Damar eğimindeki dikkat edilmesi gereken en önemli konu ise eğime en uygun kuyular arası bağlantı metodunun seçimidir [59].

Yeraltı kömür gazlaştırma tesisinin kurulacağı bölgenin özellikleri, birçok açıdan önemlidir. Bölgenin özellikle kolay erişilebilir olması, donanım ve malzemelerin taşınması ve kurulumu açısından önemlidir. Ayrıca, tesisin güç kaynağına yakın olması arzu edilir, çünkü uzakta olması durumunda üretilen gazın taşınma maliyeti, elde edilecek düşük ısı değerli gazın getirisinden daha yüksek olabilir. Ayrıca, bölgenin özellikleri, süreç verimliliği ve çevre kirliliği gibi diğer faktörler de YKG tesisinin kurulacağı bölgeye karar verme aşamalarında etkilidir.

Yeraltı kömür gazlaştırma tesisinin kurulacağı bölgenin yeraltı suyu açısından zengin olmaması çevre açısından önemlidir. YKG işlemi sırasında oluşan kül ve diğer zararlı atıkların yer altı sularını kirletmemesi oldukça önemlidir [61].

2.2 Türkiye'nin YKG Potansiyeline Sahip Linyit Yatakları

Ülkemiz, dünya linyit rezervlerinin %8,7'sine denk gelen yaklaşık 19,32 milyar ton linyit rezerviyle birlikte düşük kaliteli alt bitümlü ve linyit rezervlerinin %3,6'sını barındırmaktadır [2, 3]. Bunun yanında, ülkemizde bulunan kömür rezervlerinin 1,6 milyar tonu bitümlü kömür rezervi olarak raporlanmıştır [2]. TEİAŞ'ın 2019 yılında yayınladığı rapordan alınan verilere göre, elektrik üretiminin %35'e yakınının kömür kaynaklı olduğu ve kurulu toplam elektrik gücünün %21,4'e yakınının kömürden elde edildiği belirtilmektedir. Buna ek olarak, ithal kömürler; taş kömürü, yerli linyit ve asfaltit gibi kaynakların katkısını geride bırakarak elektrik üretiminde %19'luk bir paya sahip olmuştur [4].

Ülkemizin sahip olduğu bu linyitlerin büyük bir kısmının kül, nem ve kükürt oranları yüksek, ısı değerleri ise düşüktür. Bu linyitlerin %60'a yakını 1500 kcal/kg seviyesinden düşük ve %7'sine yakını ise 3000 kcal/kg seviyesinin üstünde ısı değerlere sahiptir [63]. Ülkemizde üretilmekte olan linyitler, büyük oranda düşük verimlerle, eski elektrik santrallerinde kullanılmakta ve bu durum çevre kirliliğini artırmaktadır [62].

Linyitlerin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken bir diğer önemli faktör uçucu madde miktarıdır. Ülkemizdeki linyitlerin büyük bir kısmı genç kömürlerdir ve bu kömürlerin uçucu madde içeriği oldukça yüksektir. Bu yüzden, içeriğinde yüksek oranda uçucu maddeye sahip kömürler, kimyasal reaksiyona girme eğilimleri yüksek olduğundan YKG'ye uygun kaynaklardır. Türkiye'deki bazı linyit örneklerinde yapılan TGA analizleri de bu tür kömürlerin gazlaştırma potansiyelinin yüksek olduğunu göstermiştir. [64].

Öte yandan MTA Genel Müdürlüğü'nün önceki yıllarda yapmış olduğu çalışmalar doğrultusunda ülkemiz linyit sahalarının alt ısı değerleri ve uçucu madde miktarlarına göre gruplandırılması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [65]. Bu tabloda numuneler uçucu madde miktarı (%20-25, %25-30, %30-35, %35-40) ve alt ısı değeri (<1500, 1500-2500, 2500-3500, >3500 kcal/kg) göz önüne alınarak gruplara ayrılmıştır. Buna göre uçucu madde miktarı %20-25 arasında olması koşuluyla alt ısı değeri <1500 kcal/kg olan örnekler A1, alt ısı değeri 1500-2500 kcal/kg olan örnekler A2, alt ısı değeri 2500-3500 kcal/kg olan örnekler A3, alt ısı değeri >3500 kcal/kg olan örnekler A4 grubu, uçucu madde miktarı %25-30 arasında olması koşuluyla alt ısı değerleri yukarıda belirlenen sıraya göre B1, B2, B3, B4 grubu, uçucu madde miktarı %30-35 arasında olması koşuluyla alt ısı değerleri yukarıda belirlenen sıraya göre C1, C2, C3, C4 grubu, uçucu madde miktarı %35-40 arasında olması koşuluyla alt ısı değerleri yukarıda belirlenen sıraya göre D1, D2, D3, D4 grubu olmak üzere ayrılmışlardır.

Çizelge 2.1'deki veriler ülkemizin çeşitli bölgelerinde yer alan gazlaştırma potansiyeli yüksek linyit sahalarımızın çok sayıda olduğunu göstermektedir.

Ülkemiz linyitlerinin ticari ölçekte gazlaştırılması ile ilgili ilk tesis Kütahya Azot Sanayi A.Ş. tarafından 1961 yılında Kütahya'da devreye alınmış ve 2000 yılına kadar işletilmiştir. Kütahya bölgesindeki Seyitömer ve Tunçbilek kömürlerinin

gazlaştırıldığı tesisde üretilen sentez gazından amonyak ve gübre üretimi gerçekleştirilmiştir.

Proje çalışmaları boyunca, Çizelge 2.1’de B3 sınıfında bulunan, uçucu madde içeriğiyle gazlaşma potansiyeli yüksek linyit sahaları arasında yer alan, UYSAL Madencilik şirketi tarafından işletilen, Malkara - Pirinççeşme linyit sahası tercih edilmiştir.

Çizelge 2.1 : Alt ısııl değerlerine ve uçucu madde miktarlarına göre Türkiye’deki linyit sahalarının sınıflandırılması [65].

Alt Isıl Değer (kcal/kg)	1500’den düşük	1500 – 2500 arası	2500 – 3500 arası	3500’den büyük
Sınıf	A1	A2	A3	A4
Uçucu madde oranı %20 ile %25 arası olan	K.Maraş-Elbistan (Kışlaköy) B	Kırklareli-Pınarhisar Tekirdağ-Saray-Edirköy K.Maraş-Elbistan (Kışlaköy)A	Manisa-Kırkağaç Gelenbe Tekirdağ-Malkara-Hasköy Tekirdağ-Malkara-Hasköy Tekirdağ-Malkara-Kürtüllü Edime-Keşan-Beğendik	Tekirdağ – Malkara – Ahmetpaşa
Sınıf	B1	B2	B3	B4
Uçucu madde oranı %25 ile %30 arası olan		Muğla – Göktepe - Berdik, Muğla – Milas – Sekköy, Muğla – Yatağan – Bayır, Muğla – Yatağan – Tınaz, Tekirdağ – Topçular, Muğla – Yatağan - Bağyaka	Aydın – Bozdoğan – Körteke, Denizli – Kale – Demirciler, Muğla – Milas – Hüsamilar, Muğla – Yatağan – Eskihisar, İstanbul-Ağaçlı İstanbul – Ağaçlı, Tekirdağ – Malkara – Sarıyar, Tekirdağ – Malkara – Kürtüllü, Tekirdağ – Malkara - Pirinççeşme, Kırklareli – Pınarhisar - Tozaklı	Manisa – Akhisar – Kavakalan, Manisa - Gördes – Kalemoğlu, Manisa – Gördes – Çıtak, Balıkesir - Dursunbey – Çakırca, Tekirdağ – Malkara - Çifreköprüler
Sınıf	C1	C2	C3	C4
Uçucu madde oranı %30 ile %35 arası olan			Manisa – Soma - Elmalı Manisa - Soma - Darkale İstanbul - Ağaçlı	Manisa-Soma-Eynez Manisa-Soma-Işıklar Muğla-Milas-Alatepe Muğla-Yerkesik-Kultak Manisa-Soma-Kısrakdere Manisa-Soma-Sarıkaya Manisa-Soma-Tarhala(Özel) Manisa-Soma-Deniş-1 Balıkesir-Dursunbey-Odaköy Balıkesir-Dursunbey-Hamzacık Tekirdağ-Malkara-Davuteli Edime-Keşan-Beğendik
Sınıf	D1	D2	D3	D4
Uçucu madde oranı %35 ile %40 arası olan			Muğla – Milas - Ekizköy	

Uzun yıllardır ticarî boyutlarda uygulama bulan kömür gazlaştırma, temiz kömür teknolojileri tanımında öne çıkarak tüm dünyada son on senedir yükselen bir teknoloji olmuştur. Bu doğrultuda Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulunun almış olduğu kararlar çerçevesinde T.C. Enerji Bakanlığı Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu ve TÜBİTAK - MAM Enerji Enstitüsünce aşağıda belirtilen projeler kapsamında Tunçbilek ve Soma bölgelerine ait linyitlerimizin gazlaştırılması üzerine çalışmalar devam etmektedir (Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu, 2015).

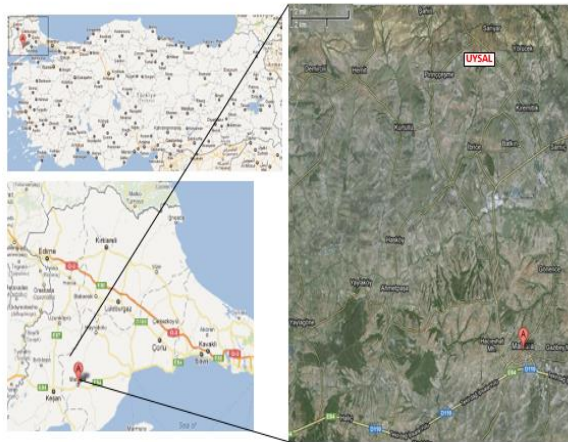
- Tunçbilek Pilot Ölçek Gazlaştırma Projesi (250kg/saat kapasiteli)
- Soma Kömür Gazlaştırma Projesi
- Biokütle ve Kömür Karışımlarından Sıvı Yakıt Üretimi (TRİJEN) Projesi
- Plasma Teknolojisi ile Kömür Gazlaştırma

Diğer bir gazlaştırma çalışması OPTIMASH projesi çerçevesinde Trakya Saray linyitlerinin gazlaştırılması konusunda yapılmıştır (Gökalp ve Ersoy, 2012).

2.2.1 Malkara-Pirinççeşme linyit kömürü

Yukarıda bahsedilen TÜBİTAK projemiz kapsamında, Malkara-Pirinççeşme linyitleri YKG testleri için seçilmiş olduğundan, kömür numunelerinin analizleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (İstanbul) ve Almanya Dresden Teknik Üniversitesi bünyesinde yaptırılmıştır.

Deneylerde kullanılan kömür örnekleri Uysal Madencilik firmasına ait 3 no'lu damardan alınmış olup Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 : Uysal Madencilik şirketine ait Malkara - Pirinççeşme linyit yatağı haritası.

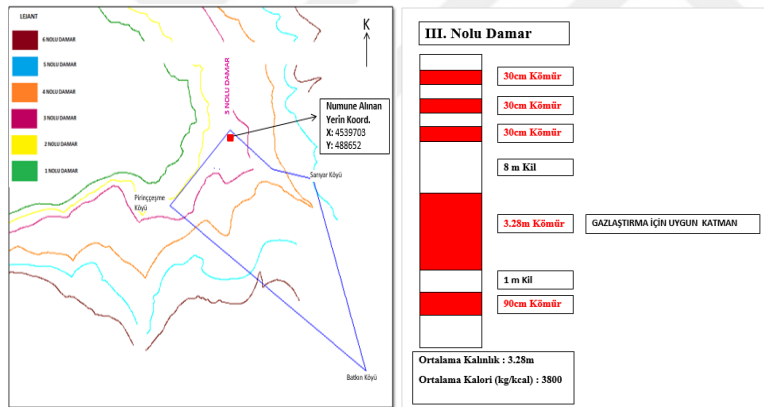
Kömür analizi için alınan örnekler ve ilgili kömür yatağının alan görünümü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Malkara – Pirinççesme açık kömür sahası ve analiz edilen kömür örneği.

2.2.1.1 Malkara - Pirinççesme sahası 3 no'lu damar özellikleri

Numune alınan bölge Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Malkara – Pirinççesme 3 no'lu damarın katmanlarının dağılımı.

Malkara-Pirinççesme 3 Nolu kömür yatağı ortalama olarak 53m derinliğe sahiptir ve damar kalınlıkları ortalama 328 cm olmaktadır. Kömür damarı katmanları dağılımı Şekil 2.9'da yer almaktadır.

2.2.1.2 Malkara kömürü analizleri

Malkara'nın Pirinççesme köyündeki Uysal Madencilik şirketinden temin edilen kömürler kullanılarak bu deneysel çalışmalar yapıldığından, kömürün elementer analizi yaptırılmıştır. TÜBİTAK'ın 113M038 no'lu projesi bünyesinde, Almanya Dresden Teknik Üniversitesi'nce yapılan kısa analiz sonuçları aşağıdaki çizelgede (Çizelge 2.2) ve elemental analizlerin sonuçları ise Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Malkara - Pirinççeşme kömür numunesi Kısa Analizlerin Sonuçları
(Almanya Dresden Teknik Üniversitesi).

	Analiz Tipleri	Orijinal Numunede	Havada Kuru Numunede	Kuru Numunede	Yöntem
Kısa Analiz	Nem	25,17	15,27	-	ASTM D 7582 - 2012
(% kütle)	Kül	17,95	20,33	23,99	ASTM D 7582 - 2012
	Uçucu Madde	28,74	32,55	38,41	ASTM D 7582 - 2012
	Sabit Karbon	28,14	31,86	37,60	ASTM D 7582 - 2012
Isıl Değer (kcal/kg)	Alt Isıl Değer	3602	4151	4998	ASTM D - 5865
	Üst Isıl Değer	3894	4409	5203	ASTM D - 5865

Çizelge 2.3 : Malkara - Pirinççeşme kömür numunesi kuru kütle elemental analiz sonuçları (Dresden Teknik Üniversitesi).

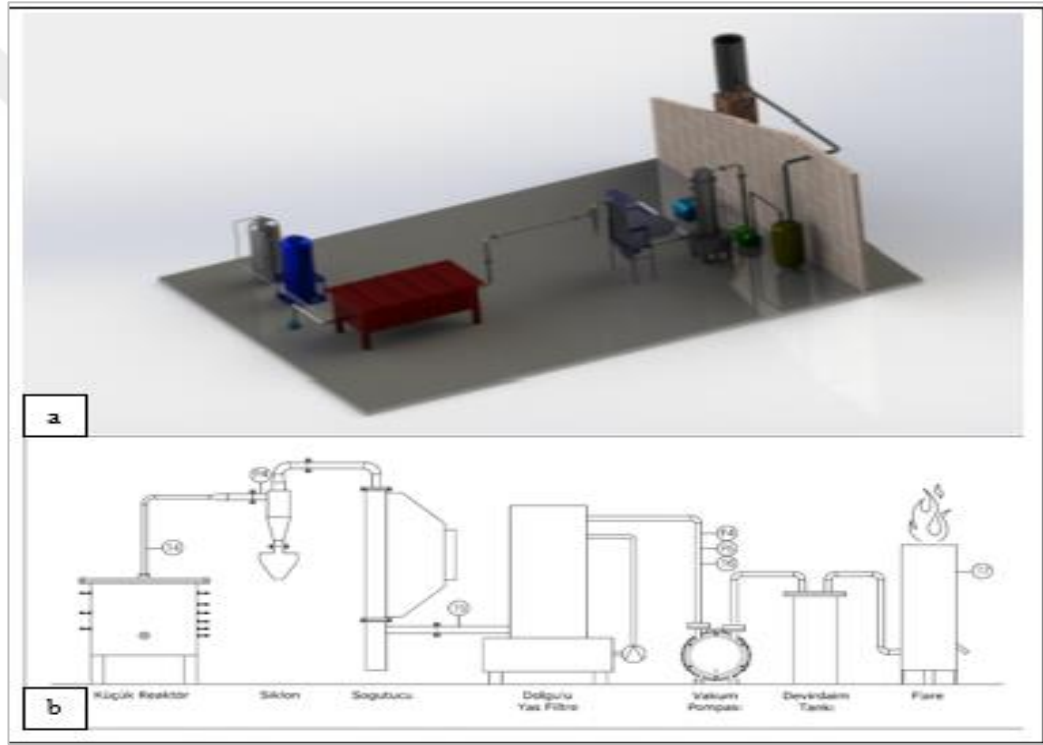
	Birimi	Kuru Numunede	Yöntem
Karbon (C)	% kütle	57,02	ASTM D 5373 - 14
Hidrojen (H)	% kütle	3,99	ASTM D 5373 - 14
Azot (N)	% kütle	1,44	ASTM D 5373 - 14
Kükürt (S)	% kütle	5,41	ASTM D 4239 - 14
Kül	% kütle	23,99	ASTM D 7582 - 12
Oksijen (O ₂)	% kütle	8,15	ASTM D 3176 - 09



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deney Düzeneği

Laboratuvar ölçekli bir yeraltı kömür gazlaştırma deney düzeneği tasarlanmış ve imalatı sonrası İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Yanma Laboratuvarında kurulmuştur. Şekil 3.1, YKG deney düzeneğini göstermektedir.



Şekil 3.1 : Deney düzeneği şeması.

YKG Deney düzeneğinin sekiz temel bölümü bulunmaktadır. Bu bölümler;

- 1) Gaz besleme düzeneği,
- 2) Gazlaştırma reaktörleri
- 3) Siklon (döngülü toz tutucu)
- 4) Soğutucu (ısı değiştirici)
- 5) Gaz yıkama ünitesi
- 6) Vakum pompası
- 7) Yakıcı (flare)

3.1.1 Gaz besleme düzeneği

Deney düzeneğinde gazlaştırma gazı olarak kullanılan hava, oksijen (O_2) ve su buharı (H_2O) hem ayrı ayrı, hem de karıştırılarak besleme yapılabilir.

Besleme düzeneğinde hava kompresörü, su buharı üreticisi ve oksijen tüpleri ve ayrıca reaksiyonların durmasını sağlamak amacıyla azot tüpü de mevcut bulundurulmaktadır. Bu cihazlara ait teknik özellikleri Çizelge 3.1’de ve fotoğrafları Şekil 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Gaz besleme düzeneği cihazları.

Cihaz	Kapasitesi
Kompresör	20 m ³ /saat
Su buharı üretici	5 kg/saat
Oksijen tüpü	20 m ³ /saat
Azot tüpü	20 m ³ /saat



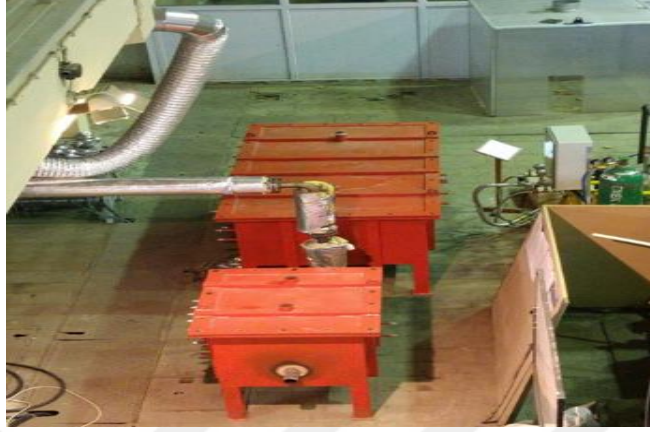
Şekil 3.2 : Deney Gazlaştırıcı cihazları: Kompresör, su buharı üretici, oksijen tüpü ve azot tüpü.

Gazlaştırıcı gazı sıcaklığı ve debisinin ölçülebilmesi için deney hattı üzerinde; sıcaklık ölçer ve basınç ölçer bulunmaktadır. Gaz debisi vanalar ile ayarlanmaktadır. Özellikle oksijen beslemesinin debi kontrolünün hassas ayarı için iğne vana yerleştirilmiştir. Dört ayrı hattan gelen farklı gazlaştırıcı gazlar istenildiğinde tek bir hatta üzerinde birleştirilerek karıştırılmış halde reaktöre verilmektedir.

3.1.2 Gazlaştırma reaktörleri

Gazlaştırma reaktörleri, boyutları itibarıyla kömür sahasında kurulacak gerçek gazlaştırma reaktörünün belirli ölçekteki küçük boyuttaki (laboratuvar ölçekteki) modelidir.

Gazlaştırma reaktörleri, içerisine gazlaştırılacak kömür bloklarının yerleştirileceği çelik malzemeden ısıya dayanıklı beton duvarla örülmüş dikdörtgen geometrili yapıya sahiptir. Burada iki farklı büyüklükte ama belirli ölçekte küçültülmüş benzer gazlaşma reaktörleri tasarlanmıştır: Küçük ve büyük reaktör (Şekil 3.3)



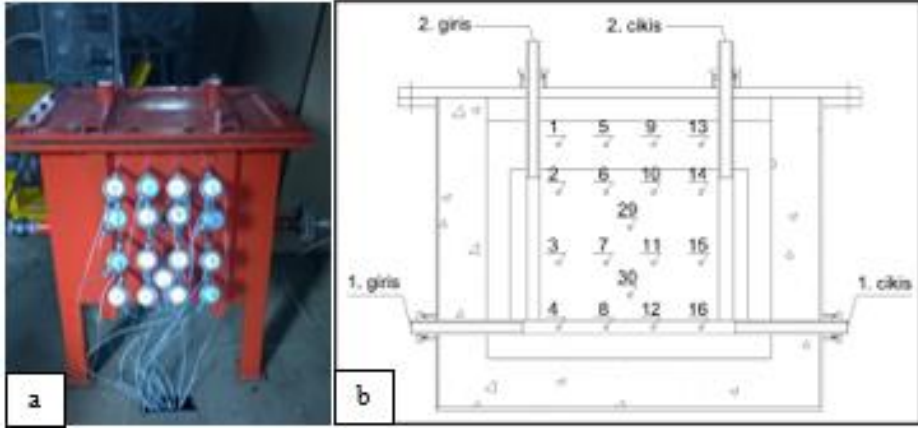
Şekil 3.3 : Küçük ve büyük reaktör.

Düşey bağlantılı kuyular (LVW) yöntemine uygun olarak gazlatırıcı gaz beslemesi ileri yönlü tasarlanmıştır. Reaktör giriş ve çıkışı arasında reaktör boyunca geçen ve gaz besleme ve sentez gazı emme hattını birbirine bağlamak için kömürün alt bölümünden geçen bir kanal açılmıştır.

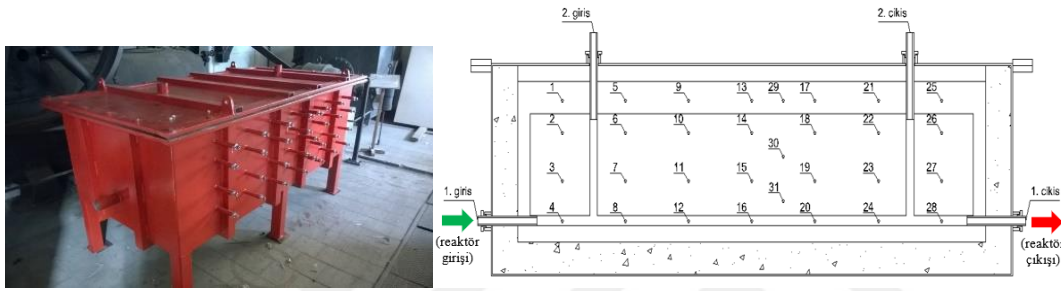
Gazlaştırma reaktörünün iç yüzeylerine ısıya dayanıklı betondan yapılmış 10 cm kalınlığında bir yalıtım uygulanmıştır. Ayrıca kömür bloğunun en üst kısmında taş yünü olmak üzere, üst kısımlarında kil ve kum ısı yalıtım amacıyla kullanılmıştır.

Küçük reaktör, 67×65.5×81.5 cm boyutlarında, büyük reaktör 101×65.5×200 cm büyüklüğündedir. Küçük ve büyük reaktörler arasındaki geometrik ölçeklerin birbirleriyle olan oranları böylece şu şekilde olmuştur: büyük reaktör uzunluk / küçük reaktör uzunluk: 2.5, büyük reaktör genişlik / küçük reaktör genişlik: 1.5, iki reaktör arasında yükseklik sabit tutulmuştur.

Küçük reaktöre (Şekil 3.4) 20 noktadan, büyük reaktöre ise (Şekil 3.5) 38 noktadan termo elemanlar yerleştirilmiştir. Böylece kömür bloğu içerisinde zamana bağlı sıcaklık değişimlerinin ölçümü ve incelenmesi mümkün olmuştur.



Şekil 3.4 : Küçük gazlaşma reaktörü ve termoeleman yerleşim noktaları.



Şekil 3.5 : Büyük gazlaşma reaktörü ve termoeleman yerleşim noktaları.

3.1.3 Siklon

Şekil 3.6’da gösterilen Siklon arıtıcı cihazında, üretilen sentez gazından kül, kurum ve kömür parçacıkları temizlenir.



Şekil 3.6 : Siklon ve soğutucu (ısı değişirici)

3.1.4 Soğutucu (hava soğutmalı ısı değıştirici)

Sentez gazında olan su buharı ve tar (katran) yoğunlaştırılarak ayrıştırılması için sentez gazının soğutulduğu ısı değıştiricidir (Şekil 3.6). Yoğuşan tar soğutucunun aşağısında bulunan toplama kabında birikmektedirler.

3.1.5 Gaz yıkama ünitesi

Üretilen sentez gazında bulunan H_2S 'in (hidrojen sülfür) temizlenmesi için gaz yıkama ünitesi kullanılmıştır. Gaz yıkama ünitesi, sürekli olarak bazik bir çözelti ((NaOH)) ile yıkama yapmak için bir su pompası yardımıyla beslenmektedir. Bu sayede sentez gazı yıkama halkalarından geçirilerek yüzey alanı artırılmakta ve H_2S giderilmektedir.

3.1.6 Vakum pompası

Deney düzeneği hattındaki sentez gazında yüksek oranda CO olduğundan ve dış ortama sızma tehlikesine karşı hat içerisinde vakum oluşturulması gerekir ve bu amaçlar sistemde bir tane de vakum pompası kullanılmıştır.

3.1.7 Yakıcı (flare)

Üretilen sentez gazı tamamen temizlendikten sonra yakıcıya (flare) gönderilir ve burada yakılır. Buraki yanma sıcaklığı ölçülerek üretilen sentez gazın kalitesi/yanıcılığı kontrol edilmiş olunur (Şekil 3.7).

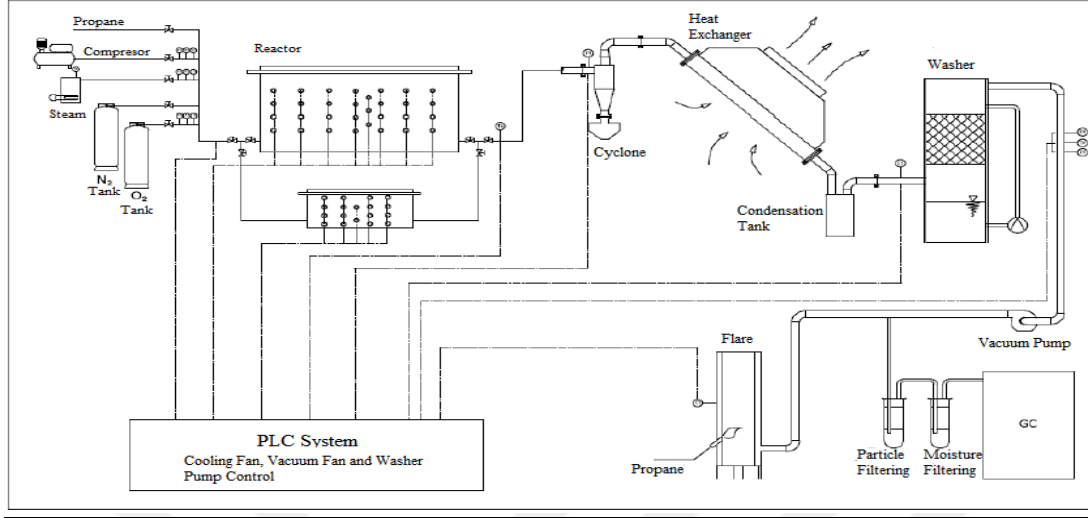


Şekil 3.7 : Yakıcı (Flare)

3.2 Deney Düzeneğinin Ölçme ve Kontrol Sistemi

Deney düzeneğinin ölçme ve kontrol Sistemi Şekil 3.8'de şematik olarak gösterilmiştir. Ölçme ve kontrol sistemi, genel olarak deneyde kullanılan gazlaştırmacı gazların ve üretilen sentez gazının çeşitli noktalarda sıcaklıklarını, basınçlarını ve

debilerini ölçerek bir SCADA sistemiyle hem kontrol etmekte ve hem de kayıt altına almaktadır.



Şekil 3.8 : Deney düzeneği ölçme ve kontrol şeması

Deney düzeneğinde kullanılan termoelemanların konumları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Deney hattında konumlandırılan sıcaklık ölçerler

Ölçüm Aleti Kodu	Konum	Ölçüm Aleti Tipi
T1	Hava Girişi	PT-100
T2	Buhar Girişi	PT-100
T3	Oksijen Girişi	PT-100
T4	Reaktör Çıkışı	K Tipi
T5	Soğutucu Çıkışı	PT-100
T6	Vakum Pompası Çıkışı	PT-100
T7	Yakıcı İçerisi	K Tipi

Reaktör içerisindeki kömür sıcaklıkları 1200°C mertebelerine ulaşmaktadır. Bu nedenle “İnkonel” adlı alaşım kaplı K tipi termo-eleman kullanılmıştır. Böylece reaktör içerisinde sıcaklık ölçümleri ile gazlaşma oyuğunun (Kavite) gelişimi ve ilerlemesi takip edilmektedir. Reaktör içerisindeki kömürde oluşan kavitenin ilerlemesini, deney boyunca gözlemlemek için küçük reaktörde 20 ayrı noktadan, büyük reaktörde 38 ayrı noktadan termo elemanlar ile sıcak ölçümü yapılabilir. Çizelge 3.3’te deney düzeneğine yerleştirilen basınç ölçerlerin konumları, ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 : Deney düzeneğindeki basınç ölçerlerin konumları, ölçüm aralıkları ile hassasiyet oranları.

No:	Konum	Ölçüm Aralıkları	Hassasiyet oranı
P1	Oksijen besleme hattı	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P2	Su buharı besleme hattı	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P3	Hava besleme hattı	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P4	Siklon girişi	-1 - 3 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P5	Yıkama kolonu çıkışı	-1 - 3 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
BB	Buharlaştırıcı içi	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]

Akış debileri, orifislerle ölçülmüştür. Orifislerin yerleşim yerleri, ölçüm aralığı ve hassasiyeti aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5).

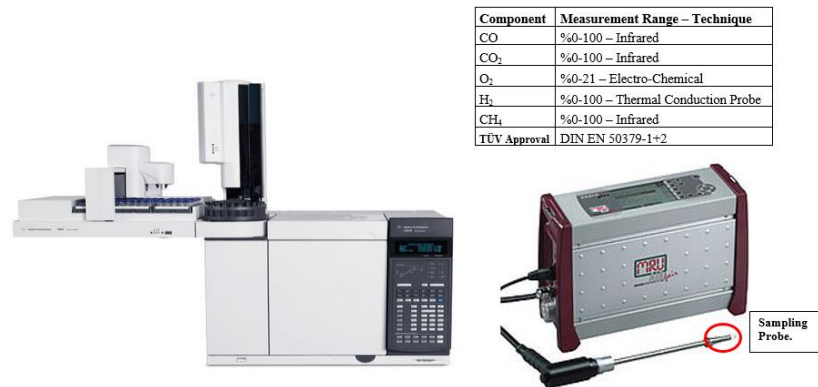
Çizelge 3.4 : Orifislerin yerleşim yerleri, ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri.

No:	Konum	Ölçüm Aralıkları	Hassasiyet
F1-1	Oksijen besleme hattı	0-5 [m ³ /h]	$\pm 0,05$ [m ³ /h]
F2-1	Su buharı besleme hattı	0-4 [kg/h]	$\pm 0,04$ [kg/h]
F3-1	Hava besleme hattı	1-12 [m ³ /h]	$\pm 0,12$ [m ³ /h]
F4-1	Toplama kabı çıkışı	5-20 [m ³ /h]	$\pm 0,20$ [m ³ /h]

Çizelge 3.5 : Yüksek debi ölçer orifislerinin yerleşim yerleri, ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri.

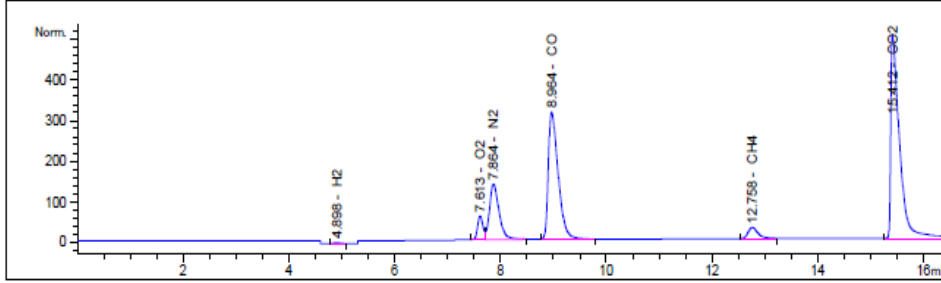
No:	Konum	Ölçüm Aralıkları	Hassasiyet
F1-2	Oksijen Beslemesi	0-10 [m ³ /h]	$\pm 0,1$ [m ³ /h]
F2-2	Su Buharı Beslemesi	0-10 [kg/h]	$\pm 0,1$ [kg/h]
F3-2	Hava Beslemesi	1-20 [m ³ /h]	$\pm 0,2$ [m ³ /h]
F4-2	Toplama Kabı Çıkışı	5-40 [m ³ /h]	$\pm 0,4$ [m ³ /h]

Sentez gazı bileşimini ölçmede kullanılan Agilent 7890B marka Gaz Kromatografi cihazı Şekil 3.9a'da ve MRU marka Gaz Analiz Cihazı Şekil 3.9b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : a) Gaz kromatografi b) MRU sentez gaz ölçüm cihazı.

Gaz kromatografi cihazının ölçüm/analiz süresi yaklaşık 20 dakikadır. Anlık analiz verisi alınması mümkün değildir (Şekil 3.10). Bu da özellikle proses kontrolü açısından gecikmelere sebep olmaktadır.

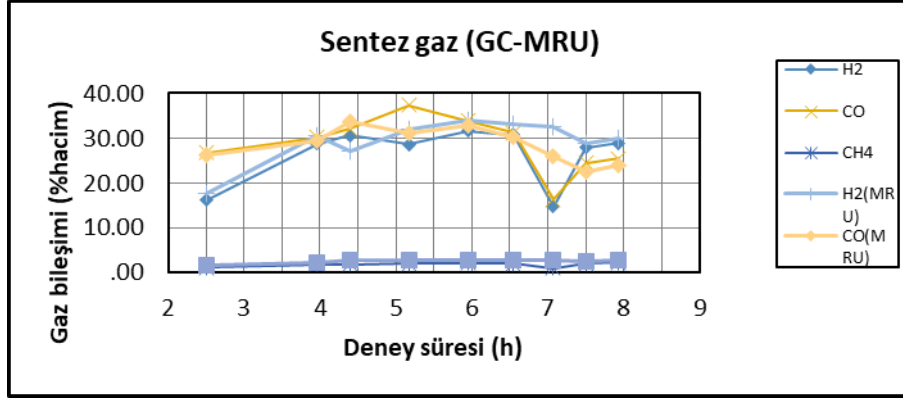


Şekil 3.10 : Örnek bir gaz kromatografi sonucu.

3.2.1 MRU sentez gaz analizörü ile gaz kromatografi cihazı ölçme karşılaştırılması

Agilent 7890B gaz kromatografi yaklaşık 20 dakikalık aralıklarla ölçüm yaparken, MRU Syngas Varioplus cihazı sürekli ölçüm yapabilmektedir. Sürekli ölçüm anlık proses kontrolü için oldukça önemli ve gereklidir.

Her iki cihazın aynı ölçüm yapıp yapmadıklarının testi gerekli olmuştur. Bunun için burada gerçekleştirilen KL011Z7 kodlu deneyinin sentez gaz bileşenleri hem MRU Varioplus Syngas cihazı ve hem de Agilent 7890B gaz kromatografi cihazı ile aynı anda ölçülmüş ve birleriyle karşılaştırılmıştır. Bunun için sentez gaz örnekleme hattına monte edilen MRU cihazının pompası sayesinde çıkışı gaz kromatografi cihazına bağlanarak her iki cihazdan ölçümler alınmıştır. Proses boyunca 12 adet ölçüm alınmıştır. Şekil 3.11’de her iki cihaz ile yapılan analizlerin sonuçları verilmiştir. Buradan görülebileceği gibi prosesin 7. saatinde yapılan analiz dışında MRU ve GC cihazları birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir. 7. saatte yapılan analizde gaz kromatografi cihazına hava kaçıışı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.11 : (KL011Z7) kodlu deneyde Agilent 7890B marka gaz kromatografi cihazı ve hem de MRU marka Syngas Varioplus model cihazıyla ölçülen sentez gazı sonuçlarının karşılaştırılması

MRU cihazı ise anlık sentez gaz analizi yapabilmektedir. Ancak her iki cihaz arasındaki ölçüm hassasiyetinin belirlenmesi gerekli olmuştur. Çizelge 3.6’da referans gaz bileşimleri, gaz kromatografi cihazı ile ölçülmüş ve sonuçlar doğrulanmıştır. MRU cihazı ile gaz kromatografi cihazı ölçümleri karşılaştırılmış ve Şekil 3.11’de görüldüğü üzere ölçüm sonuçlarının tutarlılığı tespit edilmiştir. Böylece, gazlaşma deneylerinde sürekli ölçüm yapan MRU Varioplus Syngas cihazının uygun olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 : Kullanılan referans gazının mol oranları

	Hidrojen (H ₂)	Azot (N ₂)	Oksijen (O ₂)	Karbonmonoksit (CO)	Karbondiyoksit (CO ₂)	Metan (CH ₄)
Teorik	20,0%	35,0%	2,0%	15,0%	20,0%	8,0%
Ölçülen	19,01%	33,74%	2,05%	16,4%	20,18%	8,62%
Doğruluk	± 2%	± 0,2%	± 2%	± 2%	± 2%	± 2%

3.3 Deney Programı

Deneyler hem küçük ve hem de büyük reaktörde planlanmıştır. Deney programı Çizelge 3.7’de gösterilmiştir. Burada yapılan her test için bir test kodu verilmiştir (Çizelge 3.8).

Deneylerde, gazlaştırıcı gazlar olarak hava, oksijen ve su buharı önce ayrı ayrı daha sonra karışımli ve kademeli olarak kullanılmıştır. Malkara linyit yataklarından alınan kömür, çeşitli blok boyutlarına hazırlanarak hem küçük ve hem de büyük reaktörde test edilmiştir (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7 : Deney planı

Deney Kodu	Reaktör Boyutu		Gazlaştırma Gazı			Kömür Bloğu		Proses Tanımı
	Küçük Reaktör	Büyük Reaktör	Hava	Oksijen	Su Buharı	Boyut (cm)	Ağırlık (kg)	
KL100S1	✓		✓	-	-	55x40x23	70	Sadece Hava
KL010S2	✓		-	✓	-	62x41x30	85	Sadece Oksijen
KL110Z4	✓		✓	✓	-	62x41x20	50	Zenginleştirilmiş Hava
KL111Z5			✓	✓	✓	52x38x22	45	Karışım
KL011Z6	✓		-	✓	✓	52x34x25	45	Karışım
KL011Z7	✓		-	✓	✓	60x40x40	93	Karışım
BL111Z1		✓	✓	✓	✓	105x50x35	169	Karışım
BL111K2		✓	✓	✓	✓	170x40x70	522	Kademeli

Yapılan her bir deney için bir kod verilmiştir. Deney kodlarının sistematik bir biçimde ifade edilebilmesi için Çizelge 3.8’deki adlandırma yöntemi kullanılmıştır.

Çizelge 3.8 : Deneylerin kodlanması

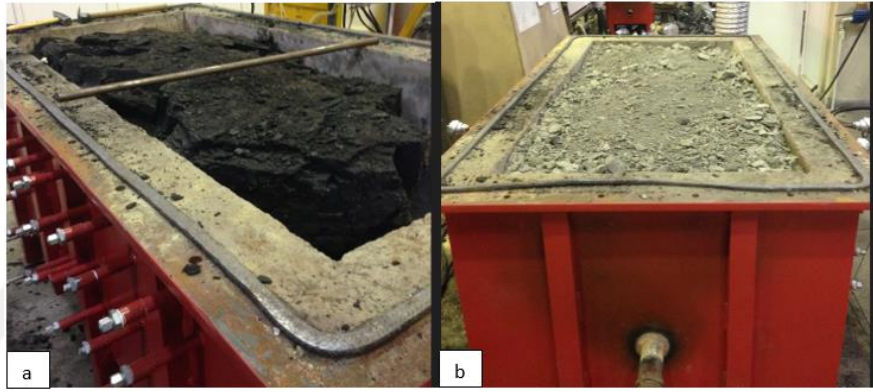
Reaktör Tipi	Kömür Tipi	Hava	Oksijen	Su buharı	Gazlaştırma tarzı	Deney no
Küçük	Linyit	Evet / Hayır	Evet / Hayır	Evet / Hayır	S: Sadece bir çeşit gaz beslemesi Z: Karışım gazlaştırıcı beslemesi K: Kademeli gaz beslemesi	
K	L	1/0	1/0	1/0	S, Z, K	1

3.3.1 Gazlaştırma reaktörünün deney hazırlığı

Gazlaştırma reaktörlerine, Malkara -Pirinççeşme kömür yataklarından alınan örnekler, dikdörtgen prizma şeklinde işlenerek, reaktör tabanına 2-3 cm kalınlığında serilmiş kum tabakasının üzerine yerleştirilmektedir (Şekil 3.12 ve 3.13). Kömür bloğu ile reaktör duvarları arasındaki boşluk, ince kömür taneleri ile doldurulmakta ve sıkıştırılmaktadır, böylece kömür ve reaktör duvarları arasındaki boşluk tamamen doldurulmaktadır. Kömür bloğu tabanında yatay yönde giden reaktörün gazlaştırıcı giriş ve üretilen sentez gazı çıkış bağlantısını sağlayan gazlaştırma kanalı açılmıştır.



Şekil 3.12 : a) Küçük reaktör deneyinden kömür bloğu örneği. b) Reaktördeki boşlukların kömürle doldurulması.



Şekil 3.13 : a) Büyük reaktör deneyinden kömür bloğu örneği. b) Reaktördeki boşlukların kömürle doldurulması.

Gazlaştırma kanalı, reaktörün içine yerleştirilen kömür bloğunun tabanına matkap kullanılarak yatay yönde açılmıştır. Sıcaklık ölçümü için kullanılan termo-elemanların kömür içine yerleştirilmesi için, kömür bloğunun yan taraflarından ince uçlu matkapla kömürün orta noktasına kadar delinmesi gerekmektedir. Bu amaçla bu işlem gerçekleştirilmiştir.

Kömür bloğu gaz kaçaklarını önlemek amacıyla ve deney alanının güvenliği için ısıya dayanıklı tuğlalar kullanılarak kapatılmaktadır. Son olarak, reaktör içerisindeki ısı kayıplarını önlemek amacıyla ısıya dayanıklı tuğlalara ek olarak seramik yünü de örtülmektedir.

3.3.2 Deneylerin yapılışı

Gazlaştırma reaktör içindeki kömürün tutuşturulmasıyla deneyler başlatılır. Bunun için propan gazlı pürmüz alevi kullanılır. Böylece reaktör ön bölgesinde olan kömürün tutuşması ve orada bir gazlaşma oyuğu (kavite) oluşturması sağlanır. Bir süre sonra kömür yanması kendiliğinden devam ettiğinde ateşleme kesilir ve gazlaştırıcı gaz beslemesine geçilir. Tutuşma süreci genelde 1,5 ile 2 saat arasında devam eder.

Kömür sıcaklığı belirli değere ulaştığında, gazlaştırmaya geçilir. Önce gaz besleme düzeneği takılır ve gazlaştırıcı gaz beslenmesi başlatılır. SCADA sistemi üzerinden ölçülen kömür sıcaklıkları, gazlaştırıcı gaz debisi, sentez gazı hem GC cihazı ile hem de MRU cihazı ile ölçülerek takip edilir. Bundan sonra sistemdeki uygun gazlaşma proses parametrelerinin sağlanması (kömür sıcaklığı ve sentez gazı içeriği) sadece gazlaştırıcı gazın debisine ve diğer gazlaştırıcı gazların karıştırılmasıyla müdahale ile ayarlanır.

Üretilen sentez gazı, reaktör çıkışından sonra gaz arıtma bölümlerinde (siklon ve yıkama üniteleri) temizlenmeye gönderilir.

Deney esnasında üretilen sentez gazının kalitesi, yakıcıda (Flayer) yakılarak burada yerleşik T7 termo elemanı ile ölçülen değerler ile kontrol edilir.

Deneyler sonlandırıldığında, reaktör önce soğumaya bırakılır. Daha sonra reaktör kapağı açılarak kömür bloğundaki yapısal değişiklikler fotoğraflanarak, reaktörde gazlaştırılan bölümlerden kömür ve kül örnekleri alındıktan sonra reaktörün temizlenmesi süreci başlatılır.

4. DENEY SONUÇLARI VE LİTERATÜRLE KARŞILAŞTIRMA

Deney sonuçları küçük ve büyük reaktörlerde ayrı başlıklarda gösterilecektir.

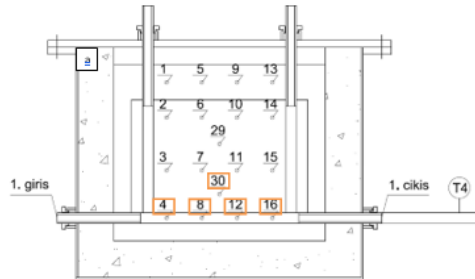
4.1 Küçük Reaktör Deneyleri

Küçük reaktörlerde toplamda altı adet farklı gazlaşma deneyi yapılmıştır. Deney parametreleri Çizelge 3.7’de gösterilmiştir. Gazlaştırıcı gaz olarak hava, oksijen ve hava-oksijen karışımı (oksijenle zenginleştirilmiş hava) kullanılmıştır. Daha sonra kademeli gazlaştırma tasti yapılmıştır. Kademeli gazlaştırma için önce saf oksijen daha sonra su buharı verilmiştir.

4.1.1 Sadece hava ile yapılan deney sonuçları (KL100S1)

KL100S1 kodlu deneyi, sadece hava ile yapılan ilk gazlaştırma deneyidir. Tekirdağ/Malkara’dan alınan linyit kömürü, boyutları 55x40x23 cm ve kütlesi 70 kg olacak şekilde diktörtgen prizma blok haline kesilerek işlenmiş ve reaktör içine yerleştirilmiştir.

Bu deneyde Gazlaştırma Reaktöründe sıcaklık ölçümü için termo elemanlar kömür bloğu içerisine Tr30 ve reaktör kanalında ise Tr4, Tr8, Tr12 ve Tr16 pozisyonlarına yerleştirilmiştir. (Şekil 4.1). Gaz hattında ise T4, T5, T6 ve T7 noktalarında sıcaklıklar ölçülmüştür. Bunlardan T4 reaktörün hemen çıkış noktasında olup T7 ise sentez gazının yakıldığı yakıcı (Flayer)’daki sıcaklıklardır.



Şekil 4.1 : Reaktördeki termoelemanların konumları.

Kömürün tutuşması için, propan gazı ile çalışan pürmüz ile 2 saat süreyle ateşleme yapılmıştır. Kömür kendiliğinden yanmaya devam ettiğinde, ateşleme kesilerek 3 m³/h

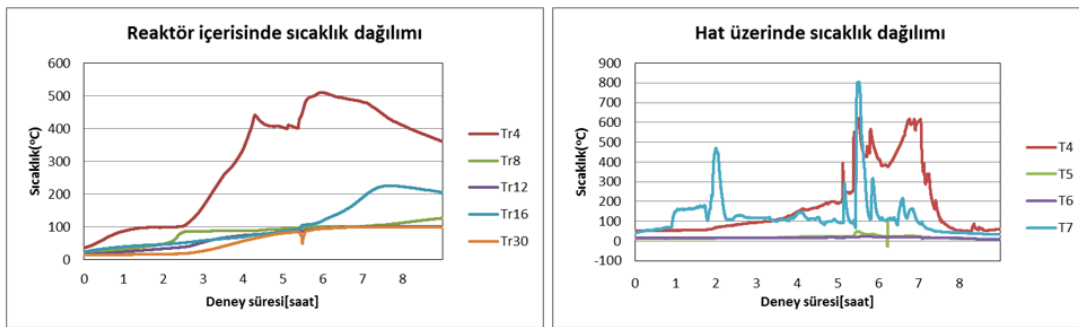
hava verilmeye başlanmıştır. Daha sonra kömür sıcaklıklarının değişimine bağlı olarak hava debi ayarı yapılmıştır. Ancak tüm müdahallere rağmen kararlı bir gazlaşma sağlanamamış ve deney 6 saat sonra sonlandırılmıştır.

Gazlaştırma deneyi sonrası, reaktör kapağı açılarak kömür bloğu incelenmiştir (Şekil 4.2). Kömür bloğunun sadece küçük bir bölümünde kül oluştuğu görülmüştür. Böylece sade hava ile gazlaşmanın mümkün olamayacağı anlaşılmıştır. Dolayısıyla bundan sonraki deneylerde saf oksijen ve oksijen ile zenginleştirilmiş hava kullanılması gerekli hale gelmiştir.



Şekil 4.2 : Deney sonrası kömür bloğu.

Şekil 4.3'te reaktör içerisinde çeşitli noktalarda ölçülen sıcaklıklar gösterilmiştir. Kömür blok içerisindeki Tr30 konumundaki sıcaklık sadece 100°C mertebelerinde kalmıştır. Reaktör kanal girişindeki Tr4'deki sıcaklık, deney başlangıcından yaklaşık 4 saat sonra ancak 500°C'ye yükselmiştir. Bu sıcaklıklarda gazlaşma reaksiyonlarının çalışması mümkün değildir.



Şekil 4.3 : (KL100S1) deneyinde ölçülen sıcaklıklar.

Kömürden üretilen sentez gazı yakıcıda kontrol amaçlı yakılmaktadır. Şekil 4.2'de yakıcıda (flayerin) ölçülen T7 sıcaklığı sadece kısa bir süre 800°C'ye çıkabilmiş bunun dışında tüm deney boyunca 100°C gibi çok düşük sıcaklıklarda kalmıştır. Bu da sentez

gazının yanıcı gaz içeriğinde olmadığını yani gazlaşmanın kötü olduğuna işaret etmiştir.

4.1.2 Sadece oksijen ile yapılan deney sonuçları (KL010S2)

KL010S2 kodlu deneyde, gazlaştırıcı gaz olarak saf oksijen kullanılmıştır. KL010S2 deneyinde kullanılan kömür bloğu 85kg ağırlığında ve 62cm × 41cm × 30cm boyutlarında ölçülmüştür.

Reaktör içerisinde 6 noktadan sıcaklık ölçümü alınmıştır: Tr3, Tr 7, Tr 11, Tr 15 (Şekil 4.3) Ayrıca gazlaştırma kanalının içerisinde Tr4 ve Tr12 numaralı termo elemanlar yerleştirilmişlerdir.

Deney toplamda 14 saat sürmüştür. Yaklaşık 2 saat süre boyunca ateşleme yapılmıştır. Oksijen beslemesine 1,5 m³/h debi ile başlanmış ancak zaman içerisinde iyi gazlaşma için oksijen debisi 0-3,5 m³/h debi aralığında değiştirilmiştir.

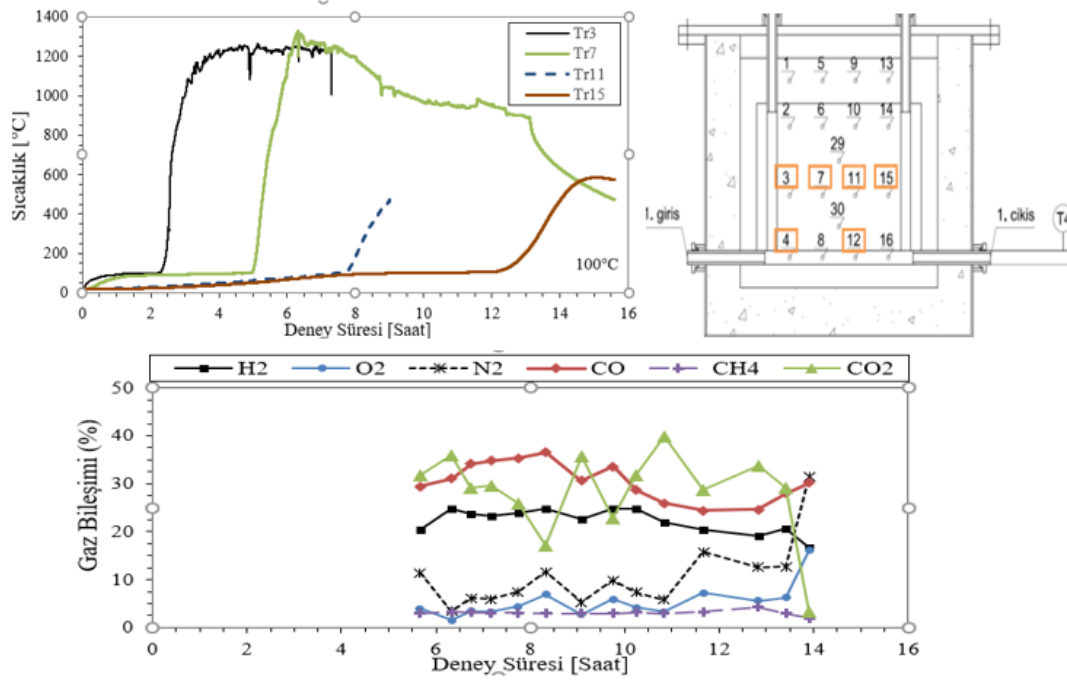
Deneye son verildiğinde, kömürün soğuması için 12 saat boyunca azot gazı verilmiştir. Reaktör açıldığında, kömür içinde tipik gazlaşma oyugu (kavite) görülmüştür (Şekil 4.4). Gazlaşan kömür bölgeleri genel olarak külün gri rengine dönüşmüştür. Bu da gazlaşmanın oldukça başarılı gerçekleştiğinin göstergesi olmuştur.



Şekil 4.4 : Deneyde oluşan gazlaşma oyugu.

Bu deneyde seçilen sıcaklık ölçüm noktaları Tr3, Tr7, Tr11 ve Tr15 reaktörün başından sonuna doğru sıralanmıştır (Şekil 4.5). Gazlaşmanın başlangıç noktasındaki Tr3 sıcaklığı kısa sürede yükselerek 1200°C'ye ulaşmış ve bu seviyelerde yaklaşık 4 saat boyunca kalmıştır. Tr3 noktasının arkasındaki Tr7 sıcaklıkları yaklaşık 5 saat sonra ve Tr15 noktasında ise sıcaklıklar yaklaşık 14 saat sonra yükselmiştir.

Sıcaklıkların sırasıyla yükselmesinden gazlaşma oyuğunun ilerlediği ve gazlaşmanın başarılı gerçekleştiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.5 : Deneyde ölçülen kömür sıcaklıkları ve sentez gazı bileşimleri.

Deney esnasında gaz kromatografisi (GC) cihazı ile toplamda 14 kez sentez gazı örneği alınmıştır. Şekil 4.5'te sentez gazı ölçüm sonuçları verilmiştir. Sentez gazı içeriğinin %20 - %25 aralığında hidrojen, %25 - %35 aralığında karbonmonoksit ve ortalama %3 oranında metan gazı olduğu ölçülmüştür. Bir başka deyişle sentez gazı bileşiminin yarısından fazlası yanıcı gazlardan oluşmaktadır.

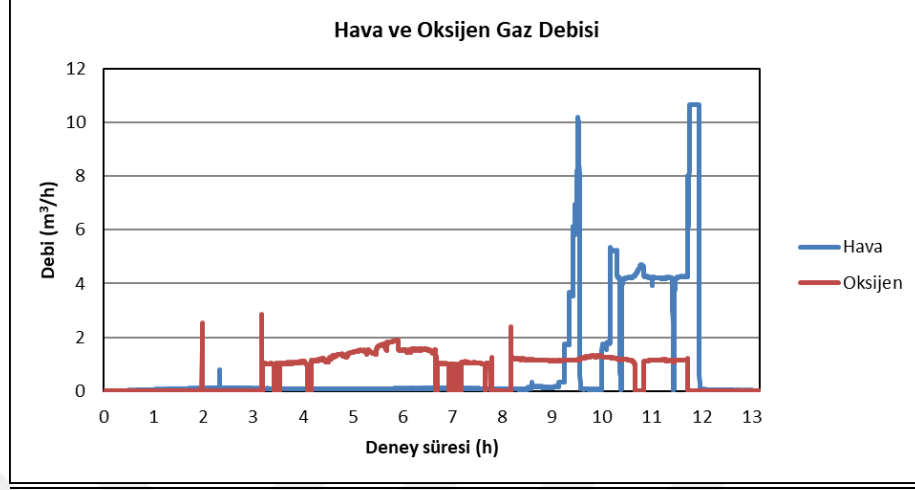
Burada seçilen oksijen besleme debileri ile kömür sıcaklıklarının ve gazlaşma reaksiyonları için uygun şartlar sağlanmıştır.

4.1.3 Oksijen – hava karışımı (oksijenle zenginleştirilmiş hava) deney sonuçları (KL110Z4)

Oksijen ile gazlaşmanın oldukça başarılı geçmesi üzerine, bu kez havanın oksijenle zenginleştirilerek gazlaştırılması planlanmıştır.

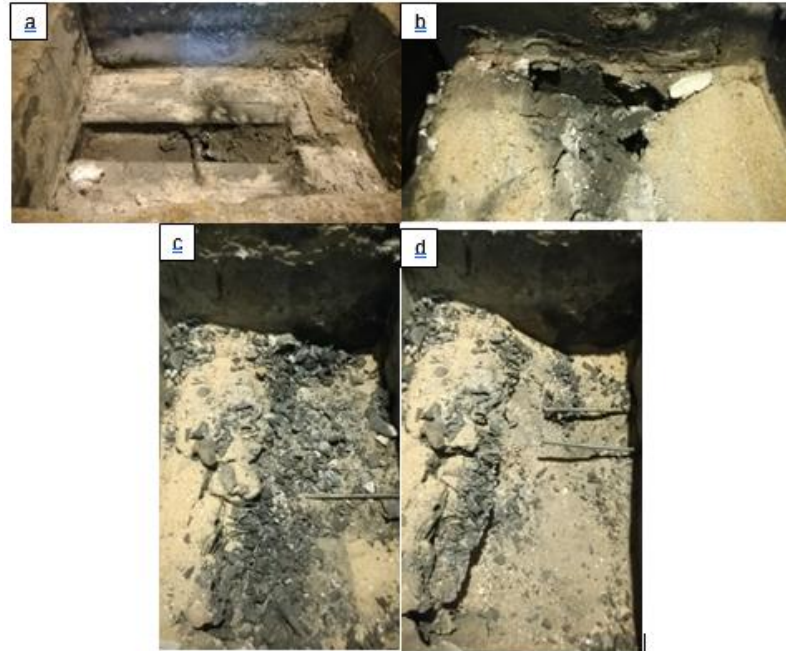
Bu deneylerde kömür blok boyutları 62x41x20 cm ve kütlesi 50 kg olmuştur. Kömürün ateşleme süresi yaklaşık 2 saat sonra kesilmiş ve 0,5 m³/h saf oksijen vermeye başlanmıştır. Prosesin ilk 7 saati sadece saf oksijen kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oksijen besleme debisi gaz analizleri ve sıcaklıklara bağlı olarak

0,5 - 2 m³/h aralığında değiştirilmiştir (şekil 4.6). Deneyin 7. saatinden sonra 2 saat boyunca oksijence zenginleştirilmiş hava ile gazlaştırmaya devam edilmiştir. Bu esnada O₂/Hava oranı, 1:4 olarak ayarlanmıştır.



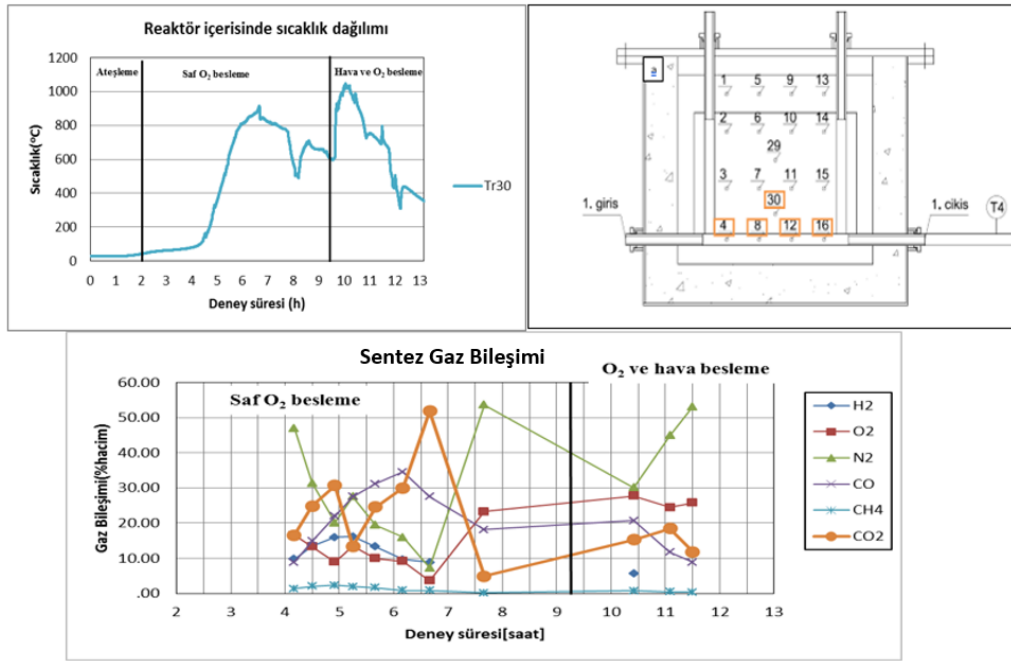
şekil 4.6 : Hava ve oksijen gaz debisi.

Deney sonrası, kömür bloğunun çekilen fotoğrafları şekil 4.7’de gösterilmiştir. Kömür bloğunun ortasında tipik bir gazlaşma oyuğu görölmektedir. Bu da gazlaşmada istenen bir gelişmedir.



şekil 4.7 : a) Deney sonrası kömür bloğu, b) Gazlaşma oyuğu c) Tr30 Termo elemanı d) Tr12 ve Tr16 Termo elemanı.

Şekil 4.8’de kömür bloğunun orta kısımlarında konumlanmış olan Tr30 noktasındaki sıcaklığı deney boyunca ölçülmüştür. Deney başlangıcından yaklaşık 4 saat sonra sıcaklık 800°C’ye yükselmiş ve daha sonra muhtemelen gazlaşma oyuğunun yer değiştirmesiyle biraz düşmüştür. Oksijence zenginleştirilmiş hava (Hava-oksijen karışımı) gazlaşmaya geçildiğinde bu bölgede sıcaklıklar tekrar yükselmiş ve yaklaşık 1,5 saat bu seviyelerde kalmıştır. Deneyin sonlarına doğru sıcaklıklar düşmeye başlamıştır.



Şekil 4.8 : Deneyde ölçülen sıcaklıklar ve sentez gazı bileşenleri.

Sentez gazı üretimi aşağıda gazlaştırma fazları ile irdelenmiştir.

4.1.3.1 Saf oksijen fazı

Saf oksijen ile yapılan deneyde gaz kromatografi cihazı (GC) ile ölçülen sentez gazı analiz sonuçları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Sentez gazı bileşiminde H₂ gazı içeriği %10-%20, CO gazı ise %10-%35 aralığında olmuştur. Bu sentez gazındaki içerik değişimi oksijen besleme debisi ayarının dengesiz olması ve hava kaçakları sebebiyle alakalı olduğu tespiti yapılmıştır.

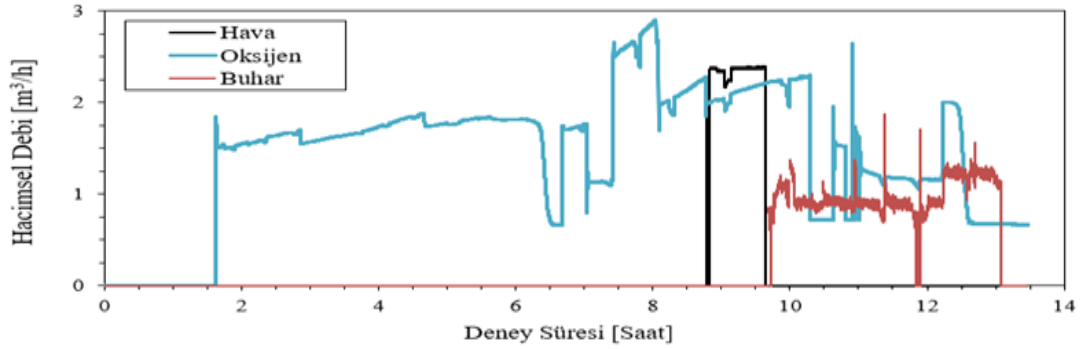
4.1.3.2 Oksijen-hava karışımı gazlaşma fazı

Oksijenle zenginleştirilmiş hava ile bir başka deyişle oksijen-hava karışımı gazlaşma deneyinde beklenen sentez gazı iyileşmesi sağlanamıştır. Burada %5 H₂ ve CO %10

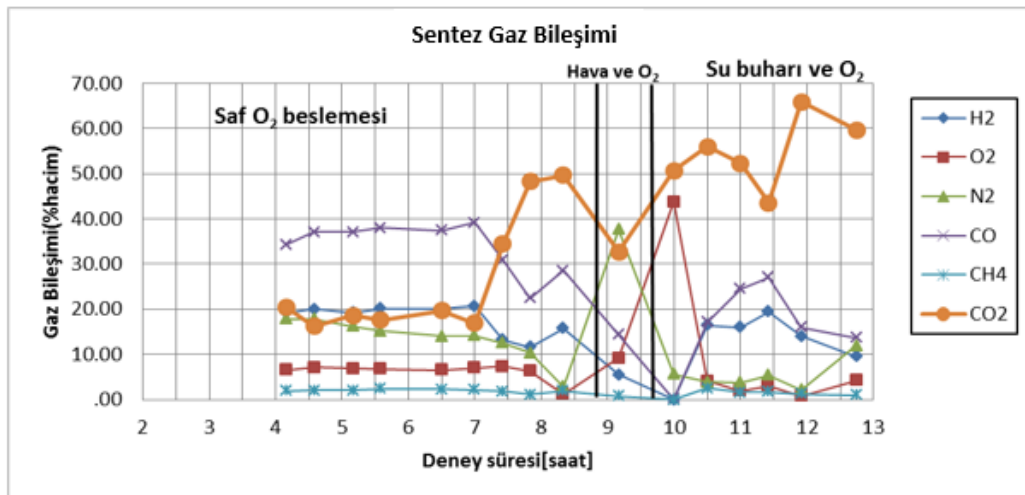
- %20 CO oranları görülmektedir. Sentez gazında N_2 (Azot) gazı, % 30-50 ve CO_2 ise %10-20 içeriğindedir. Şekil 4.8’de kömür sıcaklıklarının gazlaşma sıcaklarında olmadığı görülmektedir. Bu deneydeki seçilen 1:4 olan O_2 /Hava oranı yüksek gazlaşma için yeterli olmamıştır. Bu nedenle oksijen-hava karışım oranının yükseltilmesi gerekmiştir.

4.1.4 Oksijen – hava / buhar karışımı deney (KL111Z5)

Bu deneye önce 7 saat boyunca saf oksijen beslenmesiyle başlanmıştır. Bu saatten itibaren bir saat boyunca oksijene hava katılarak oksijen - hava karışımı (daha yüksek oranlı O_2 /Hava = 1) gazlaşma yapılmıştır. Daha sonra hava kesilerek yerine buhar vermek suretiyle (O_2 /Buhar = 2,2) yaklaşık 2 saat boyunca su buharı- oksijen karışımı gazlaşma testi gerçekleştirilmiştir. (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : Karışımli gazlaştırmacı besleme debileri.



Şekil 4.10 : Karışımli gazlaştırmacı besleme debileri.

Sentez gazını üretimi Şekil 4.10’da gösterilmiş ve aşağıdaki üç fazda olan bileşim değerleri karşılaştırılmıştır.

4.1.4.1 Saf oksijen fazı

Deneyin dördüncü ile yedinci saatleri arasında üretilen sentez gaz bileşimi %20 H₂, %35 CO ve %3 CH₄ seviyelerinde kararlı şekilde seyretmiştir. Sentez gazının bir diğer bileşeni olan CO₂ oranı %20 mertebelerinde ölçülmüştür. İyi bir gazlaşmada CO₂ oranı düşmesi beklenmektedir. Bu nedenle gazlaşmanın kontrolü için CO₂ bir parametre olarak kullanılması uygundur (Şekil 4.10).

Deneyin 7. saatinde itibaren oksijen debisi artırıldığında (1,5'tan 2,5m³/h), sentez gazı bileşimi %10 H₂, %20 CO değerlerine düştüğü görülmektedir. Diğer yandan CO₂ oranının %20 mertebelerinden %50'lere yükselmiştir (Şekil 4.10). Yüksek CO₂ oranı ancak kömür yanmasında ortaya çıkar. Burada ölçülen yüksek CO₂ oranı gazlaşmanın yanmaya yöneldiğini göstermektedir. Burada fazla oksijen beslemesi yanma reaksiyonları için uygun gelmiştir.

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi oksijen debisi arttığında, kömür sıcaklıkları da (Tr30) 1000°C den 1200°C 'ye yükselmiştir. Bu sıcaklık seviyeleri kömür yanması için oldukça uygundur. Böylece kömürün gazlaşması yanmaya dönüşmüştür.

Sonuç olarak deneyden, gazlaşmanın ancak belirli bir oksijen debisi ile sağlandığı, bunun üzerinde oksijen debisi beslendiğinde kömür yanmasına dönüşeceği görülmüştür.

4.1.4.2 Oksijen-hava karışımli gazlaşma fazı

Sentez gazı üretimini tekrar iyileştirmek için bu kez hem oksijen debisi düşürülmüş ve hem de oksijene hava karıştırılmıştır. Böylece Oksijen-Hava Karışımli Gazlaşma gerçekleştirilmiştir. Böyle bir gazlaştırıcı besleme şekli ile kömür sıcaklığını biraz düşürmek ve oksijen sarfiyatını azaltmak amaçlanmıştır. Bir önceki KL110Z4 kodlu deneyde olan 1:4= O₂/Hava oranı, burada 1:1 =O₂/Hava oranı olarak değiştirilmiştir. Bir başka deyişle hava içinde oksijen zenginleştirmesi artırılmıştır.

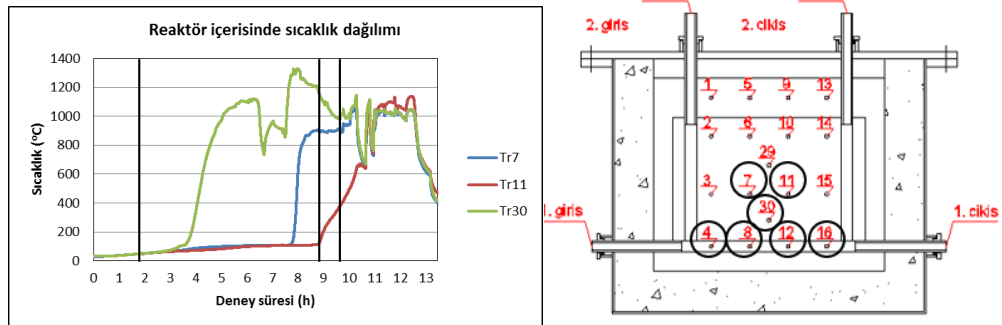
Ancak Şekil 4.10'da görüldüğü gibi düşük oranlarda % 5 H₂ ve % 15 CO içeriğinde sentez gazı üretilmiştir. Dolayısıyla O₂/Hava oranı 1:1 ile uygun bir karışım olmadığı saptanmıştır.

4.1.4.3 Oksijen-buhar karışımli gazlaşma fazı

Oksijen-buhar karışımli gazlaşma deneyi için 2,2 m³/h debide olan oksijen beslemesine 1 m³/h debide su buharı karıştırılmıştır. Böylece oksijen-buhar karışım oranı O₂/Buhar = 2,2 olmuştur.

Sentez gazında %20 oranına H₂ ve %20 oranında CO ölçülmüştür (Şekil 4.10). Bu esnada kömür sıcaklıkları da 1000°C seviyelerindedir (Şekil 4.11). Böylece gazlaşmanın tekrar iyilişmesi sağlanmıştır.

Oksijen-buhar karışımli gazlaşma sentez gazı üretimini iyileşmiştir. Su buharı ile olan gazlaşma reaksiyonu, kömür yüzeyinde gerçekleşen 2 heterojen gazlaşma reaksiyonundan birisidir. Su buharı kömürün neminden sağlanır. Dolayısıyla kömür nemi yeterli olduğunda dışarıdan ilave su buharı beslemesine ihtiyaç yoktur. Ancak deneyin ilerleyen zamanlarında kömür bloğunun tamamen ısınması sebebiyle kömür neminin buharlaşarak eksildiği bilinmektedir. Bu nedenle bu esnada su buharı (nem) ile gerçekleşen gazlaşma reaksiyonları duracağından, sentez gazı üretiminin de kötüleşmesi beklenen bir durumdur. Bu deneyde oksijen-buhar karışımli gazlaşma, deneyin 10. saatinden sonra deney sonlarına doğru uygulanmıştır. Böylece sentez gazı kalitesi tekrar yükseltilmiştir. Gazlaşmanın son fazlarında Oksijen-buhar karışımli gazlaşmanın yararlı olacağı tespiti yapılmıştır.



Şekil 4.11 : Kömür sıcaklıkları.

Şekil 4.11'de genel olarak deney boyunca kömür sıcaklıkları 1000°C civarında ölçülmüştür. Bu sıcaklıklarda sentez gazı üretimi kaliteli olmuştur. Ancak oksijen debisi arttırıldığında sıcaklıklar (Tr30) 1000°C'den 1200°C'ye sıçradığı görülmektedir. Yüksek debide oksijen beslemesi belirli değeri aştığında ekzotermik yanma reaksiyonları tetiklenmektedir. Ancak bu da kömürün aşırı ısınmasına yani

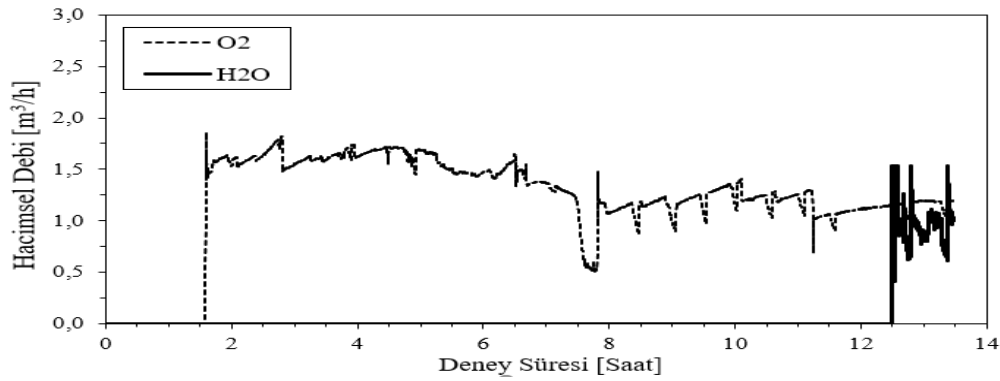
kömürün gazlaşması yerine yanmasına yol açmıştır. Bir başka deyişle gazlaşma için daha düşük sıcaklık seviyeleri gereklidir.

Kömür sıcaklıklarının reaktörün ön kısımlarından arkaya doğru zamanla ilerlediği Tr30, Tr7 ve Tr11 termoelemanlarından ölçülen sıcaklıklardan görülmektedir. Bu aynı zamanda gazlaşma oyuğunun (kavite) geliştiğini ve ilerlediğini göstermektedir.

4.1.5 Oksijen – buhar karışımli deney (KL011Z6)

KL011Z6 ve KL011Z7 deneyleri oksijen ve su buharı karışımli gazlaştırma testleri olup karışım oranının optimize edilmesine yöneliktir.

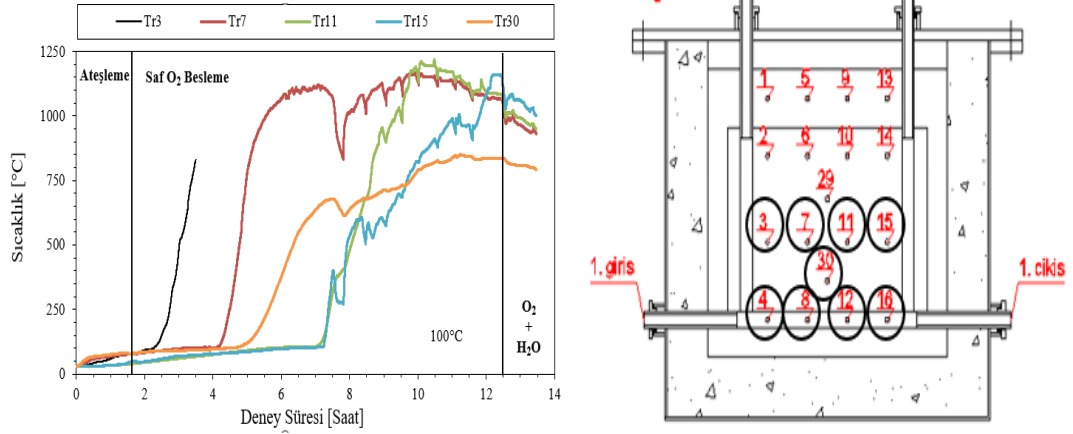
KL011Z6 kodlu deneyin gazlaştırıcı gaz besleme fazları Şekil 4.12’de görülmektedir. Oksijen-subuharı karışımli gazlaşma, deneyin 12’nci saat sonrası uygulanmıştır. Su buharı debisi yaklaşık 1 m³/h, oksijen ise 1,5 m³/h debide olmuştur (O₂/Buhar oranı 1,5:1). Gazlaşma 1,5 saat devam etmiştir.



Şekil 4.12 : Gazlaştırıcı (oksijen ve su buharı) debileri.

Şekil 4.13’te görüldüğü gibi, kömür sıcaklıkları 950°C - 1050°C aralığında seyretmiştir.

Sentez gazını üretimi Şekil 4.14’te gösterilmiş aşağıdaki fazlarda ele alınmıştır.

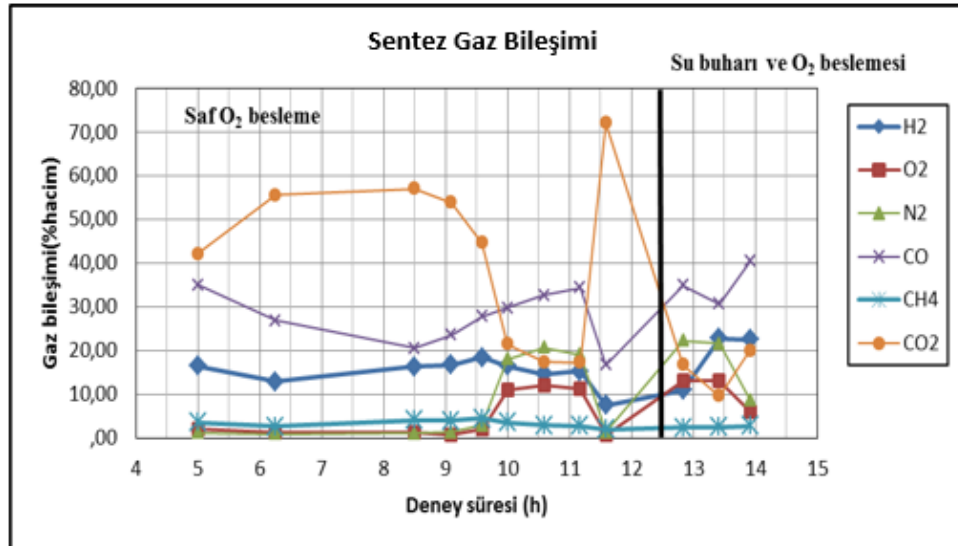


Şekil 4.13 : Deneyde ölçülen kömür sıcaklıkları.

4.1.5.1 Saf oksijen besleme fazı

Şekil 4.14’te görüldüğü gibi Saf oksijen besleme fazında, üretilen sentez gazı bileşimi %20 - %35 CO ve %15 - 20 H₂ aralığında olmuştur. Metan gazı ise ortalama %3 oranlarında ölçülmüştür.

Ancak ilerleyen zamanlarda deneyin 11. saatinde, sentez gazı kalitesi aniden kötüleşmeye başlamış, CO ve H₂ oranları sırasıyla % 20 ve %10’ların altına inmiş, CO₂ oranı ise %70 seviyesine çıkmıştır.



Şekil 4.14 : Sentez gaz ölçümleri.

Kömür sıcaklıklarına Şekil 4.13’e bakıldığında, gazlaşma sıcaklarının muhafaza edildiği görülmektedir.

Öyleyse sentez gazı kötüleşmesi ancak kömür neminin azalması ile alakalı olabilecektir. Bu nedenle oksijene su buharı eklemesi tam bu anda yapılmıştır.

4.1.5.2 Oksijen-buhar karışımı gazlaşma

Oksijen-buhar karışımı gazlaşma deneyinde, oksijen su buharı debileri sırasıyla 1,5-1 m³/h mertebelerinde O₂/Buhar oranı 1,5:1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Sentez gazında oldukça yüksek oranlarda %25 H₂, %35 CO ve düşük oranda %10 – %20 CO₂ ölçülmüştür.

Bir önceki KL111Z5 kodlu deneyin oksijen-su buharı karışımı deneyine göre, sentez gazı içeriği çok daha kaliteli çıkmıştır. KL011Z6 kodlu bu deneyde oksijen debisi (1,5 m³/h) bir önceki deneye göre daha yüksek olmuştur (1,0 m³/h). Bu oranlarda olan karışım gazlaşmaya daha uygun şartları oluşturmuştur.

Böylece su buharı karışımı gazlaşmanın özellikle gazlaşmanın ileri safhalarında gerekli bir önlem olduğu ve oksijen-su buhar oranı ve ayrıca oksijen debisinin önemli bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır.

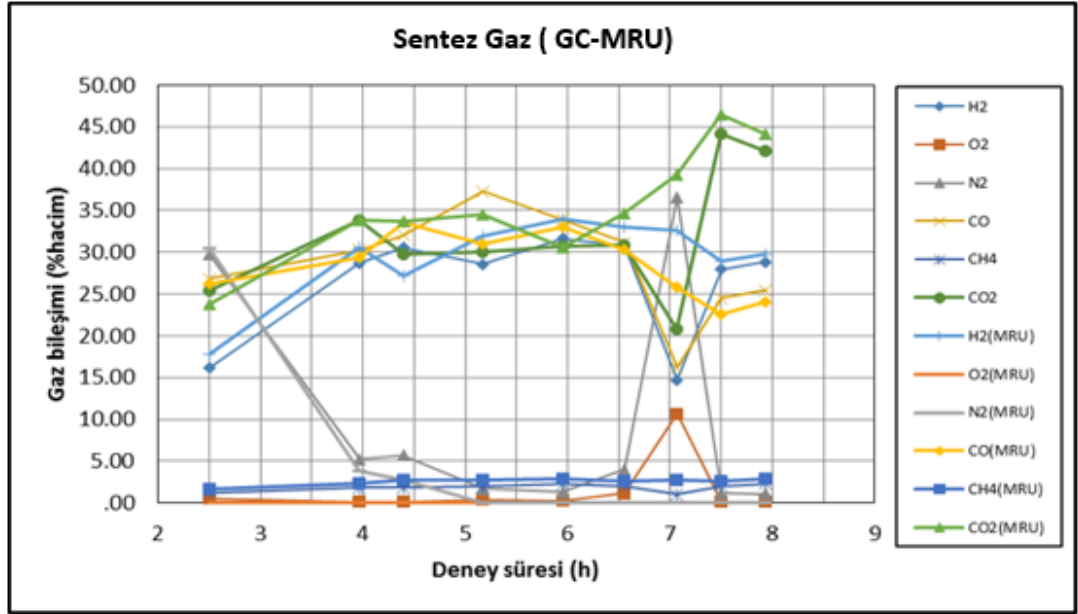
Şekil 4.13'te görüldüğü gibi, kömür sıcaklıklarının genel olarak kararlı şekilde 1000°C seviyelerinde bulunmuştur. Kömür bloğunda farklı pozisyonlarda olan Tr3, Tr7, Tr11, Tr15 ve Tr30 ile ölçülen sıcaklıklarından, gazlaşma oyuğunun zamanla reaktör sonuna doğru ilerlediği anlaşılmaktadır.

4.1.6 Oksijen – buhar karışımı deney (KL011Z7)

KL011Z7 kodlu deney, aslında bir önceki deneyin (KL011Z6) bir tekrarıdır. Bu deneyde ateşleme işlemi sona erdikten sonraki 8 saat 30 dakika boyunca gazlaştırıcı gaz olarak saf oksijen ile besleme yapılmış, ardından 2 saat 10 dakika süresince ise oksijen ve su buharı (Oksijen-Buhar Karışımı) beslemesi devam etmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Gazlaştırıcı debileri.



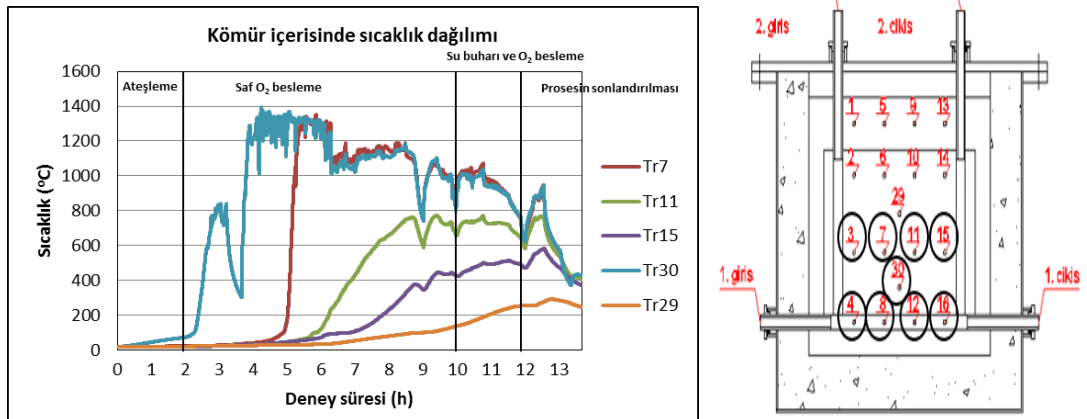
Şekil 4.16 : Sentez gaz analiz sonuçları.

Deney sonuçları gazlaştırma fazları ile aşağıda ele alınmıştır.

4.1.6.1 Saf oksijen besleme fazı

Saf oksijenle yapılan gazlaşma fazında kömür sıcaklıklarının kararlı şekilde tutulması mümkün olmuştur (Şekil 4.17). Bir önceki deneylerde olduğu gibi burada oksijen debisi $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak seçilmiştir. Bu da kömür bloğu sıcaklıklarını istenen düzeyde kalmasını sağlamıştır.

Deneyde sentez gazının CO ve H_2 oranları eşit değerlerde kalarak %30 mertebelerine kadar yükselmiştir. (Şekil 4.16) Bu da oldukça zengin bir sentez gazı bileşimidir.

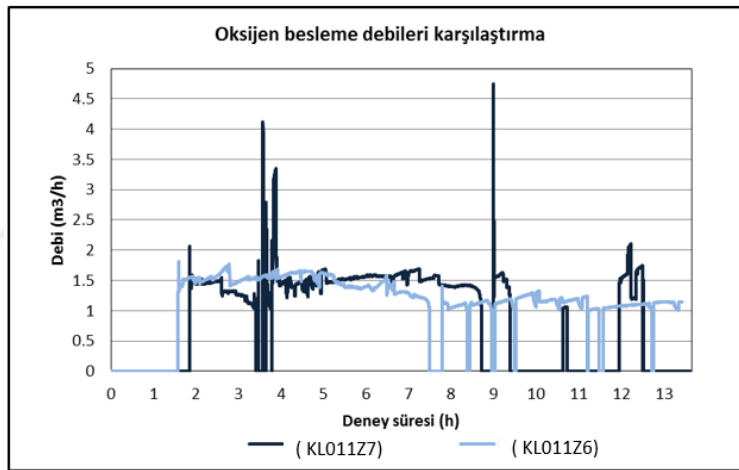


Şekil 4.17 : Ölçülen sıcaklıklar.

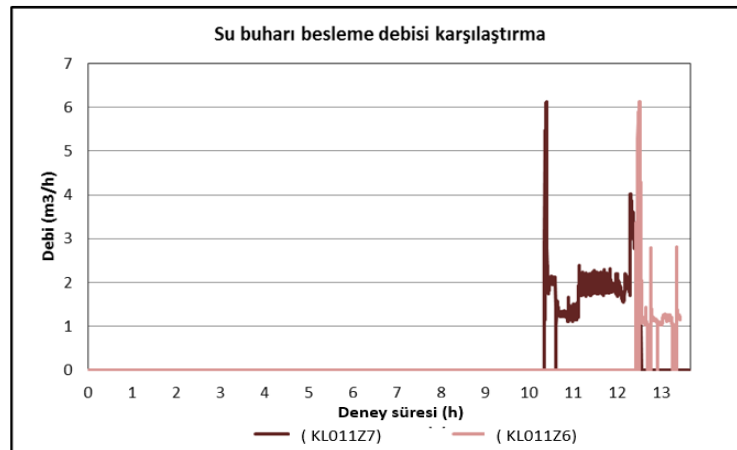
Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, kömür sıcaklıkları genel olarak kararlı şekilde 1000°C’lerde kalmıştır. Kömür bloğunda farklı pozisyonlarda olan Tr7, Tr11, Tr15 ve Tr30 ile ölçülen sıcaklıklarının zamanla sırasıyla yükseldiği görülmektedir. Buda gazlaşma oyuğunun kömür içinde ilerlediğini göstermiştir. Benzer sıcaklık davranışları bir önceki KL011Z6 kodlu deneyde de görülmüştür.

4.1.7 KL011Z6 ve KL011Z7 deneylerinin tekrarı yönünden karşılaştırılması

KL011Z6 ve KL011Z7 kodlu deneyler, aslında benzer gazlaşma şartlarında tekrarlanmıştır. Şekil 4.18 ve 4.19’da her iki deneyin oksijen ve su buharı besleme debileri ve süreleri gösterilmiştir. Bu ikisi arasında en önemli farkı, KL011Z6 kodlu deneyde diğerine göre yaklaşık 2 saat sonra önce buhar beslemenin başlamış olmasıdır. Su buharının ne zaman verilmesi kararına, flayerdeki kendiliğinden tutuşma/yanma durumu ve anlık ölçülen sentez gaz bileşimi etkili olmuştur.

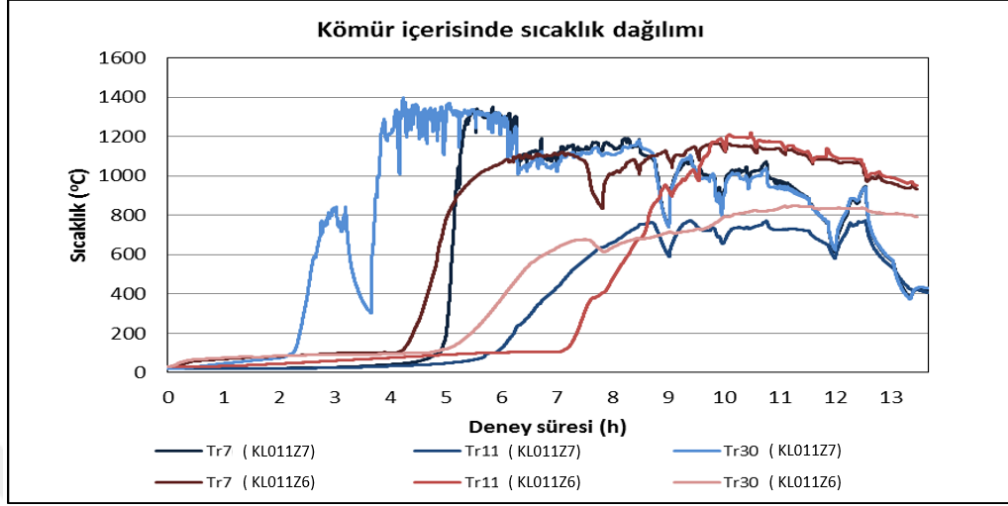


Şekil 4.18 : Oksijen besleme debisi karşılaştırılması.



Şekil 4.19 : Su buharı besleme debisi karşılaştırılması.

Şekil 4.20’de kömür içerisinde konumlanan Tr7, Tr11 ve Tr30 noktalarında her iki deneyde ölçülen sıcaklıklar gösterilmiştir. Aynı noktalarda hemen hemen benzer sıcaklık davranışı ve seviyeleri görülmektedir.

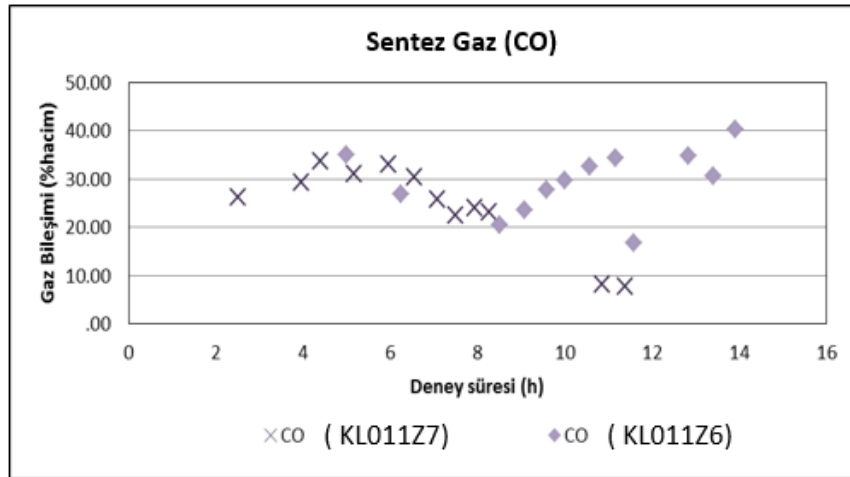


Şekil 4.20 : Sıcaklık dağılımı karşılaştırması.

KL011Z6 ve KL011Z7 kodlu deneylerde üretilen CO, H₂ ve CO₂ bileşen oranları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

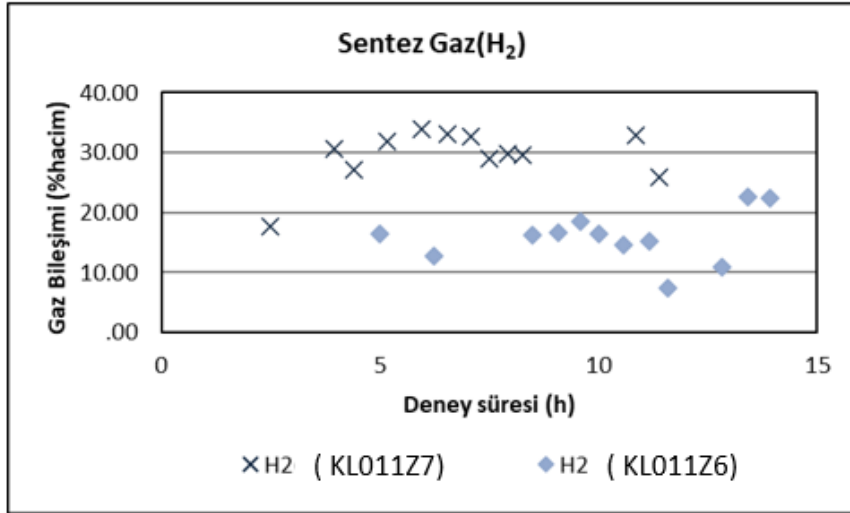
Her iki deney de 2-8 saatleri arası, üretilen CO gazı Şekil 4.21’de görüldüğü üzere, benzer şekilde seyrederek %20 - %35 aralığında olmuştur.

Her iki deneye de oldukça zengin bir sentez gazı bileşimi elde edilmiştir.



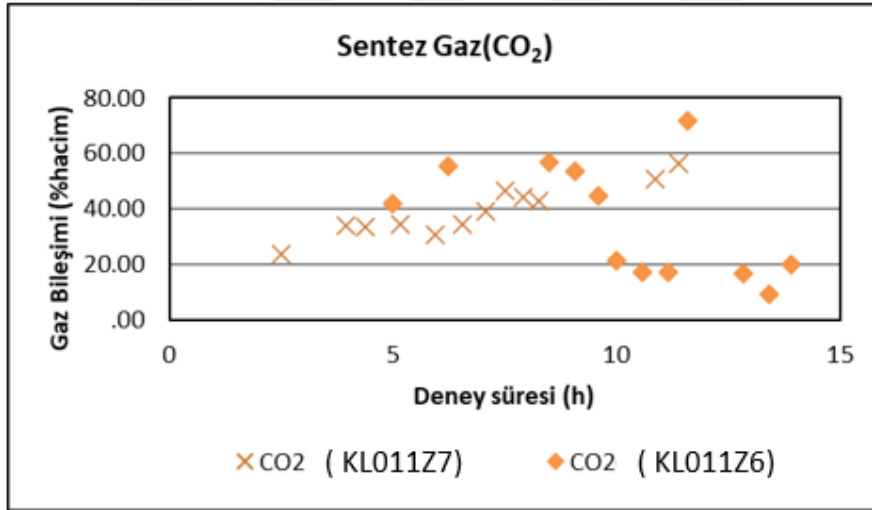
Şekil 4.21 : Sentez gazı CO oranlarının karşılaştırılması.

Buna karşın H₂ ise KL011Z7 deneyinde KL011Z6 deneyine göre yaklaşık %10 daha fazla %30 oranlarında üretilmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 : Sentez gazı H₂ oranlarının karşılaştırılması.

Deneyde sentez gazının CO₂ oranları yine her iki deneyde benzer şekilde değişerek yaklaşık aynı değerlerde %20-%60 aralığında seyretmiştir. (Şekil 4.23)

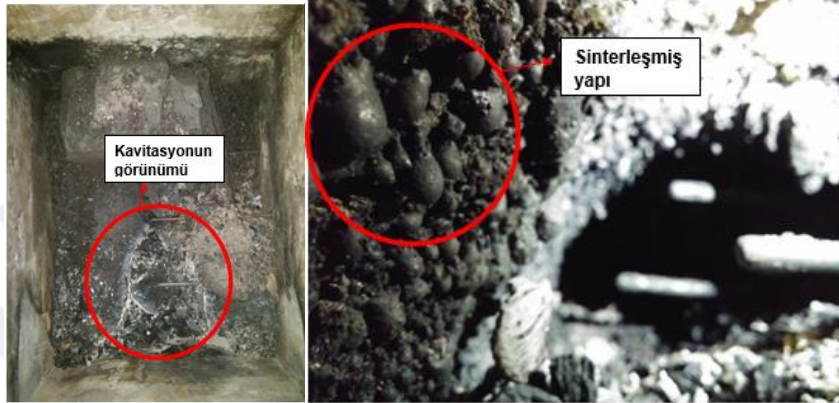


Şekil 4.23 : CO₂ oranının karşılaştırılması.

KL011Z7 kodlu deney sonrasında reaktör içinde gazlaşma oyuğu net bir şekilde görülmüştür (Şekil 4.24). Ancak gazlaşma oyuğu KL011Z6 kodlu deneyde görülmemiştir. Bu iki deneyde kullanılan kömür blok büyüklükleri farklıdır. KL011Z7 kodlu deneyde kullanılan kömür kütlesi KL011Z6 kodlu deneyine göre iki kat daha fazladır. Böylece artan kömür kütlesi ile daha iyi gazlaşma oyuğu oluşturulmuştur.

KL011Z7 kodlu deneyinde kömürün belirli bölgelerinde sinterleşme görülmektedir (Şekil 4.24). Kömür sinterleşmesi camsı bir yapı oluşturduğundan burada kömürün

gazlaşması mümkün değildir. Sinterleşme oldukça yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Muhtemelen bu bölgede kömürün yanmasıyla sıcaklıklar aşırı yükselmiştir. Buda bu bölgeye fazla oksijen geldiğini göstermektedir. Oksijen beslemesi gazlaşma bölgesinde homojen şekilde dağıtılmadığında, her bölgede eşit gazlaşma olmayacağı gibi bazı bölgelerde kömür yanması olacaktır. Bu nedenle başlangıçta kömür içinde ideal bir gazlaşma oyğununun oluşturulmasının ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.24 : KL011Z7 kodlu deney sonrası kömür içinde oluşan gazlaşma oyugu.

4.2 Büyük Reaktör Deneyleri

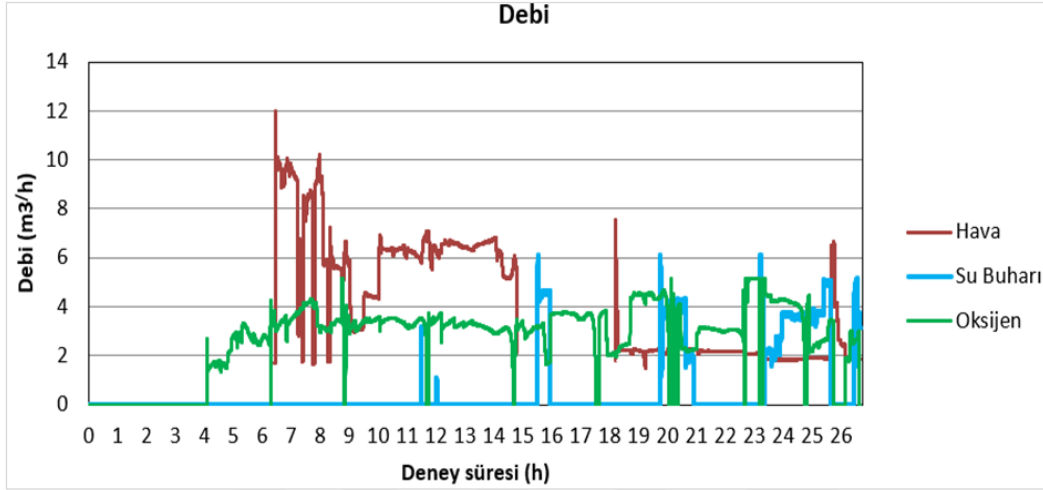
Büyük reaktörde 2 farklı deney yapılmıştır (BL111Z1 ve BL111K2 kodlu deneyler). Reaktörde BL111Z1 kodlu deneyde kullanılan kömür bloğu 169 kg ağırlığında ve 105cm x 50cm x 35cm boyutlarındadır. Diğer kömür bloğu ise 195 kg ağırlığa ve 89cm x 62cm x 28cm ölçülerine sahiptir.

4.2.1 Oksijen, hava ve su buharı karışımli gazlaştırıcı deney sonuçları (BL111Z1)

Büyük reaktörde yapılan ilk deneyin kodu BL111Z1'dir. Büyük reaktörde gerçekleştirilen ilk deneyde, dört saatlik bir ateşleme işlemi ardından reaktöre gazlaştıma gazı olarak saf oksijen (O_2), oksijen - hava karışımı, oksijen - su buharı karışımı, oksijen - hava - su buharı karışımı olmak üzere reaktöre beslenmiştir. Bu deneyde 22 saat 45 dakika boyunca gazlaştırma gerçekleştirilmiştir.

Gazlaşma, ilk olarak 2 saat 25 dakika boyunca saf oksijen besleme debisi 2-3 m^3/h aralığında olacak şekilde devam etmiştir. Oksijen fazından sonra hava - oksijen karışımı kullanılmış ve Hava / Oksijen oranı sırasıyla 3:1, 1,5:1 ve 2:1 olacak şekilde

proses 8 saat 25 dakika devam edilmiştir. Deneyin bir sonraki aşamasında hava besleme işlemi durdurularak 40 dakika boyunca, 2,5m³/h - 3m³/h debiler arasında saf O₂ beslenmiştir. Saf O₂ beslemesinin ardından, bu kez de oksijen - su buharı karışımı, su buharı / O₂ oranı (1,5:1) olacak şekilde yaklaşık 30 dakika reaktöre besleme yapılmıştır (Şekil 4.25).

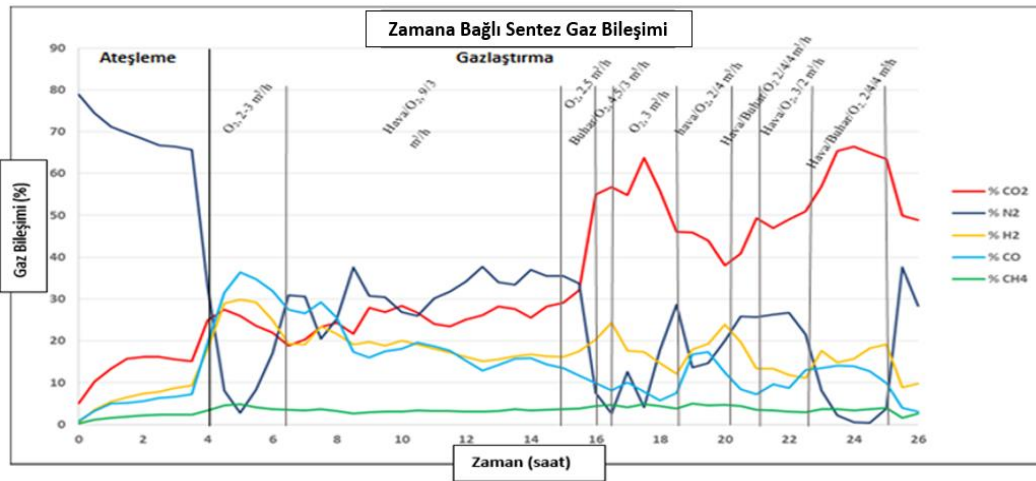


Şekil 4.25 : Gazlaştırıcı debileri.

Deneylerde üretilen sentez gazı içeriği aşağıdaki fazlarda incelenmiştir.

4.2.1.1 Saf oksijen fazı

Şekil 4.26'da görüldüğü gibi, deneyin ateşleme sonrası 4. – 7. saatleri arasında yapılan saf oksijenle gazlaşmada, sentez gazı bileşimi %25-30 hidrojen (H₂) ve % 30-35 karbon monoksit (CO) olmuştur.



Şekil 4.26 : Sentez gazı analizleri.

4.2.1.2 Hava- oksijen karışımli faz

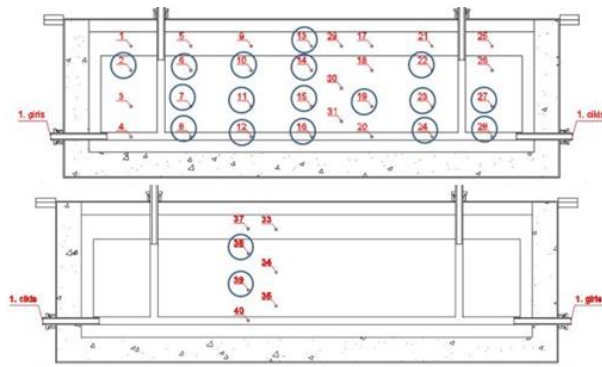
Deneyin 6-15 saatleri arasında Hava/Oksijen oranı 3:1, 1,5:1 ve 2:1 ile test edilmiştir. Üretilen sentez gazında ortalama %15 CO ve %15 H₂ ölçülmüştür. Ancak ilerleyen zamanda kömür sıcaklıkları düşme eğilimine geçmesiyle gazlaşma kötüleşmiştir. Bunun üzerine hava karışımı kesilerek saf oksijen beslemesine geçilmiştir.

4.2.1.3 Buhar-oksijen karışımli faz

Buhar- oksijen karışımli deneyler 3 farklı kademede yani 16, 20 ve 23. saatlerinde aralıklı olarak yapılmıştır. Su buharı eklenmesiyle sentez gazında özellikle H₂ üretimi iyileşmiştir. Genel olarak %15 CO ve %20 H₂ gazı üretilmiştir. Ancak belirli süre sonra aynı kalitede gazlaşma sağlanamıştır. Bu esnada kömür sıcakları hızla gazlaşma seviyelerinin altına düşmüştür. Bunun sebebi su buharı ile olan gazlaşma reaksiyonlarını endotermik reaksiyon olmaları yani ısı tüketen reaksiyonlar olmasıdır. Bu nedenle kömür sıcaklıklar düşmüştür.

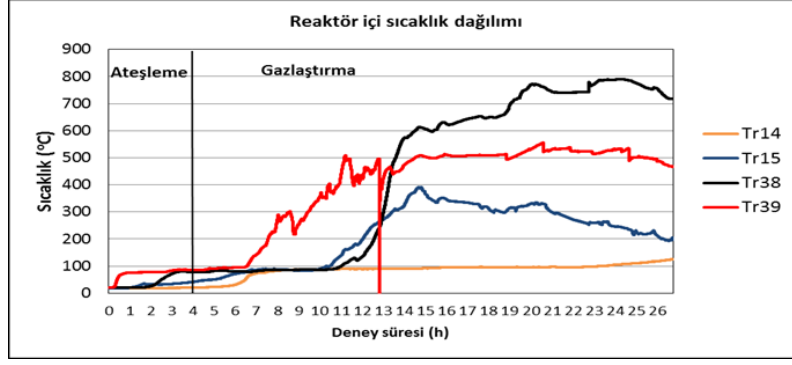
Kömür bloğunun tekrar ısıtılması için saf oksijen besleme fazına geçilmiştir. Daha sonra tekrar oksijen-su buharı karışımli gazlaşma fazı gelmiştir. Aslında burada kademeli gazlaşma uygulanmıştır.

BL111Z1 deneyi için reaktör üzerinde termo-elemanların yerleşim konumları Şekil 4.27'de yuvarlak içine alınmış noktalarla gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : Reaktörden alınan ölçüm noktalarının gösterimi.

Şekil 4.28'de ise kömür bloğunun orta bölümünde birbirlerine karşılıklı olarak duran ve kenar bölgelere 20'şer cm uzaklıktaki Tr14, Tr15 ve Tr38, Tr39 noktalarında ölçülen sıcaklıklar gösterilmiştir. Sıcaklıkların zamanla olan değişiminden gibi gazlaşma oyuğunun (kavitenin) zamanla sol bölgeye (Tr38 ve Tr39) ilerlediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.28 : Reaktör içerisinde sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.29’da gazlaştırma deneyi sonrasında reaktörün içindeki kömürün durumunu gösteren fotoğraflarda, gazlaşmanın oldukça verimli geçtiği ve gazlaşma oyukları oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.29 : Deney sonrası kömür bloğu görünümü.

4.2.2 Kademeli gazlaşma deney sonuçları (BL111K2)

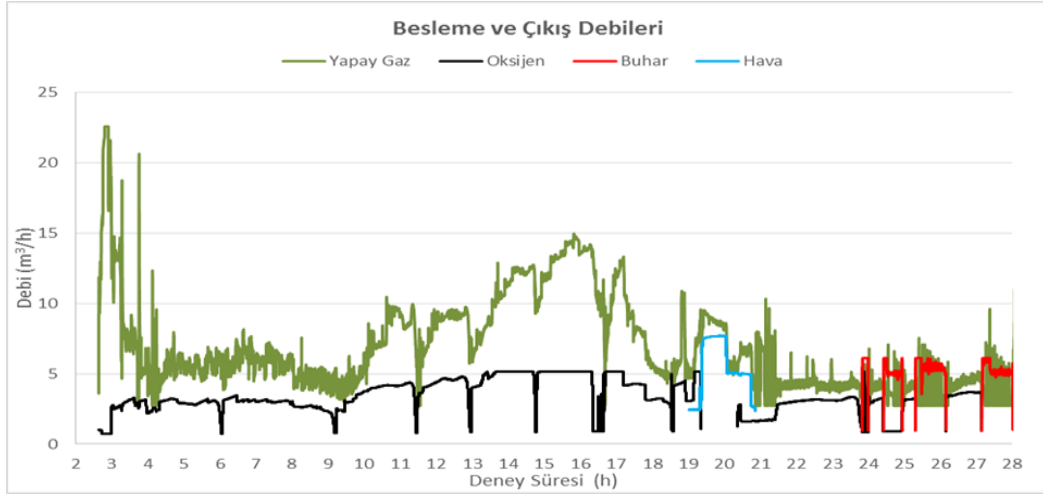
Büyük reaktörde yapılan ikinci deneydir. Bu deneyde oksijen, hava ve su buharı gazlaştırıcı kademeli olarak kullanılmıştır (BL111K2). Kademeli gazlaştırma, gazlaştırıcı gazların art arda verilmesi şeklindedir. Böylece gazlaştırma reaksiyonlarından bazılarının ağırlıklı olarak çalışmasına yöneliktir. Sadece su buharı beslendiğinde, su gazlaşma reaksiyonları çalıştığından sentez gazın bileşimi Hidrojen gazı açısından oldukça yüksek değerlere ulaşacaktır.

Şekil 4.30'da deney boyunca gazlaştırıcı kademeleri ve debileri gösterilmiştir. Sadece gazlaştırma süresi göz önünde bulundurulduğunda deney, 26 saat 30 dakika sürmüştür. Bu süreye ateşleme de dahil edildiğinde, deney süresi 29 saatlik bir zaman dilimini kapsamıştır. Gazlaştırma işlemini sonlandırmak için, azot verilmek suretiyle reaktör soğutulmuştur.

Deneye propan yakıtlı pürmüz ile ateşleme işlemi yaparak başlanmıştır ve bu süreç 2,5 saat boyunca devam etmiştir. Reaktör içerisindeki sıcaklıkların 80°C mertebesine gelmesini takiben ateşleme durdurulmuş ve yaklaşık 2m³/h debi ile saf oksijen beslemesi yapılmaya başlanmış, bunun ardından gazlaştırma sıcaklıklarını kararlı tutabilmek için oksijen debisi 4-5 m³/h seviyelerine yükseltilmiştir.

Deneyin 19. saatinde 2 saat boyunca sürecek sadece hava ile gazlaşma kademesine geçilmiştir. Bu kademede, sentez gazı üretimi önce iyileşirken sonlara doğru azalmış ve bunun üzerine hava kademesine son verilerek tekrar saf oksijen beslemesi kademesine geçilmiştir. Böylece tekrar kömür bloğunun ısınması sağlanmıştır.

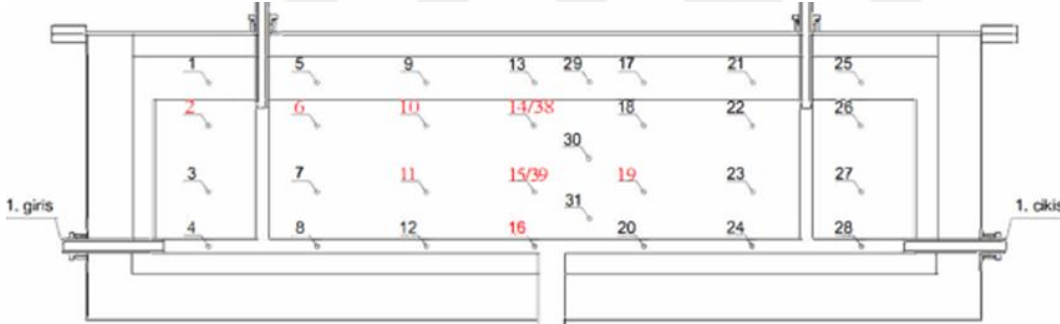
Deneyin 23. saatinde kömür gazlaşma sıcaklığı kararlı hale geldikten sonra, bu kez buhar kademesi testine başlanmıştır. Deneyin ilk 15 dakikası boyunca sadece buhar beslemesi yapılmış, bu besleme sonucu sıcaklıkların düşmeye başladığı gözlemlenmiş ve saf oksijen kademesine tekrar geçilmiştir. Buna müteakip tekrar saf buhar kademesi bir saat boyunca uygulanmıştır. Benzer önce saf oksijen sonra buhar kademesi toplamda 3 kez tekrarlanmıştır. Saf oksijen kademesinde kömür bloğunu ısıtmak için uygulanırken saf buhar beslemesinde yüksek hidrojen hazı içerikli sentez gazı üretimi sağlanmıştır.



Şekil 4.30 : Deney boyunca gazlaştırıcı ve sentez gazı debileri.

Kömür bloğu 40cm x 70cm x 170cm boyutlarında ve 522 kg kütesindedir.

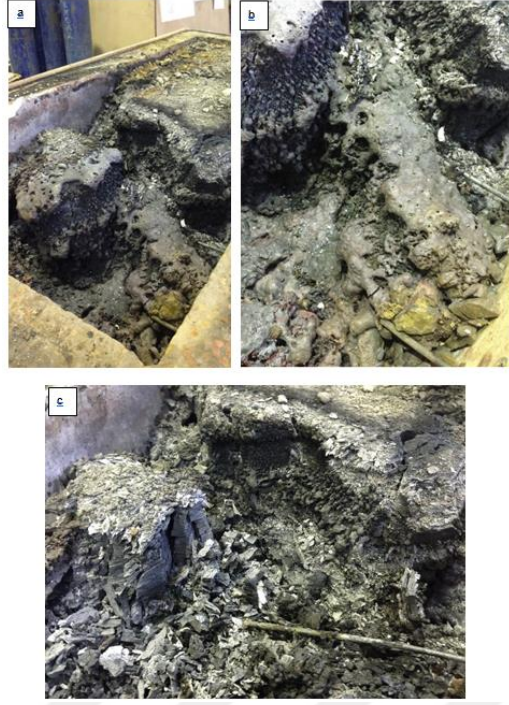
Şekil 4.31'de reaktör üzerinde sıcaklık ölçümü alınan termo-eleman numaraları kırmızı ile gösterilmiştir. Bu termo-elemanlar sırasıyla Tr2, Tr6, Tr10, Tr11, Tr14, Tr15, Tr16, Tr38 ve Tr39'dur. Tr16 ölçüm noktası, gazlaştırma kanalındadır.



Şekil 4.31 : Reaktör üzerinde sıcaklık ölçümü yapılan yerler (kırmızı ile gösterilen).

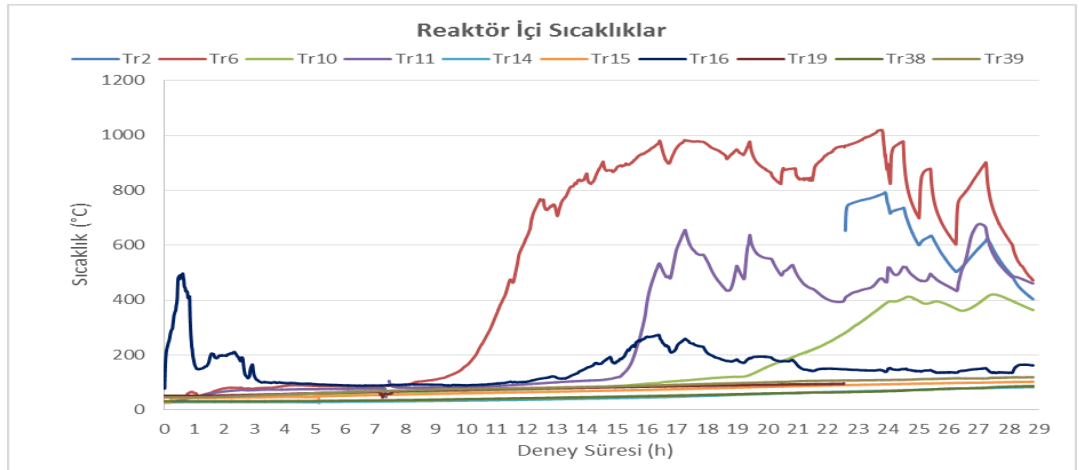
Kömür bloğunun orta ekseninde bulunan Tr38 ve Tr39 kodlu ölçüm noktalarının paralel eksenlerinde bulunan Tr14 ve Tr 15 sıcaklık ölçüm noktaları reaktörün ön tarafındadır.

Deney bittiğinde açılan reaktörün kömür bloğunda oluşan gazlaşma oyuğu net şeklide görülmektedir (Şekil 4.32).



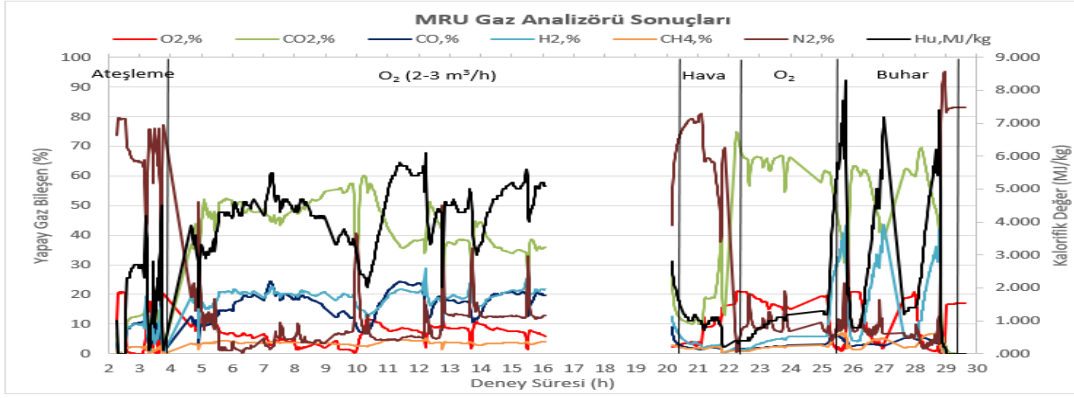
Şekil 4.32 : Deney sonrası kömür bloğu.

Şekil 4.33'te kömür bloğu içerisinde farklı konulanmış termo-elemanların zaman içerisinde sırasıyla gazlaşma sıcaklığına yükselmiş olduğu görülmektedir. Bu da kömür bloğu içinde oluşan gazlaşma oyununun ilelediğini göstermektedir.



Şekil 4.33 : Kömür bloğu sıcaklıkları.

Aşağıda, gazlaştırma işlemi sonucunda oluşan sentez gazı bileşenleri deneyin farklı aşamaları için gösterilmiştir (Şekil 4.34).



Şekil 4.34 : Gazlaştırma sonucunda oluşan sentez gazı bileşenleri.

4.2.2.1 Saf oksijen kademesi

Bu kademe de üretilen sentez gazının CO ve H₂ içeriği %20 mertebelerinde kalmıştır (Şekil 4.34). Oksijen debisi artırıldığında, CH₄ üretimi yükselmiştir. Bu da sentez gazı ısı değeri de yükselmesine sağlamıştır.

Şekil 4.34'te görüldüğü gibi sentez gazı ısı değeri 3-6 MJ/kg aralığında değişmiştir. Özellikle yüksek oksijen debisi verildiğinde, ısı değeri iyileşmesi yanında üretilen sentez gazı debisi de artmıştır. Saf oksijen kademesinde sentez gazı debisi başlangıçta 5m³/h seviyelerinde seyrederken 15 m³/h mertebelerine yükselmiştir. Böylece diğer deneylerde olan benzer verimli gazlaşma burada gözlemlenmiştir.

4.2.2.2 Hava kademesi

Sadece hava beslemesi kademesine geçildiğinde üretilen sentez gazı CO ve H₂ içeriği sert bir şekilde düştüğü Şekil 4.34'te görülmektedir: %5 CO ve %5 H₂. Hava ile ideal gazlaşma sıcaklıkları tutulamamış ve düşmüştür. Bunun için tekrar oksijen kademesine geçilmiştir,

Şekil 4.34'te görüldüğü gibi sentez gazı ısı değerinin de benzer şekilde kötüleştiği 1 MJ/kg seviyelerine kadar azalmıştır. Bunun yanında sentez gazı debisi de 5 m³/h seviyelerine inmiştir.

4.2.2.3 Su buharı kademesi

Burada toplamda dört kez su buharı ve ardından gelen saf oksijen kademesi tekrarlı şekilde uygulanmıştır. Her biri yaklaşık 1 saat süren su buharı kademesi sonrası yine bir saat boyunca saf oksijen kademesine geçilmiştir. Böylece soğuyan kömür bloğu

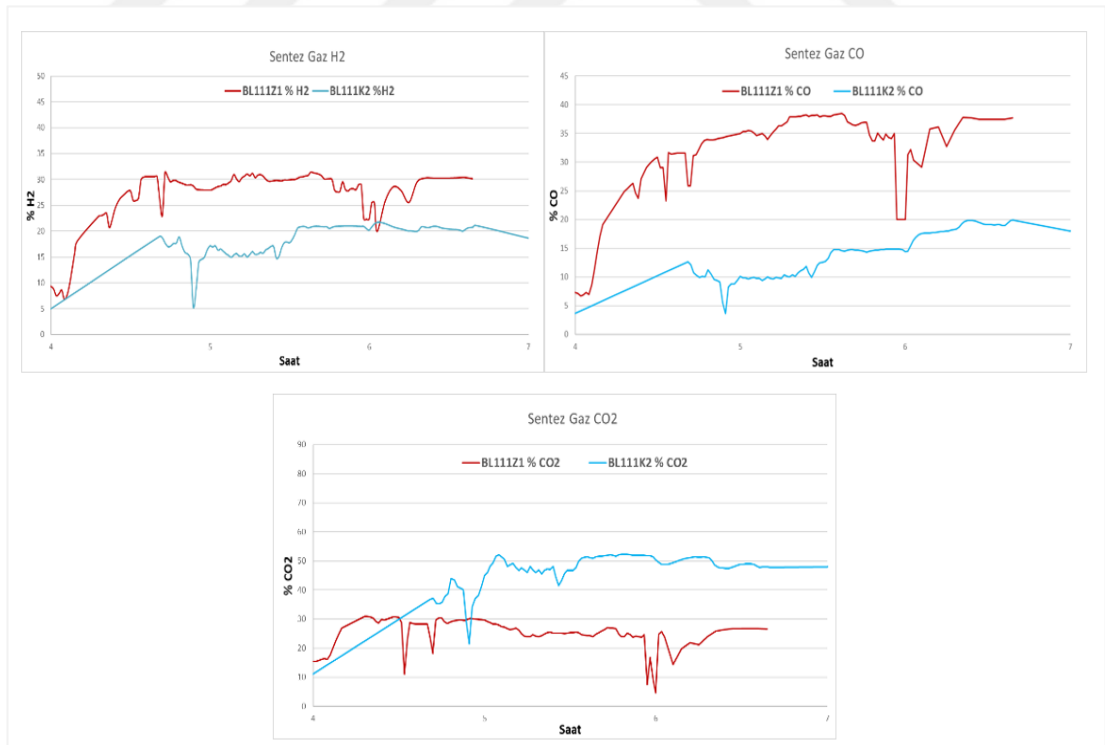
tekrar ısıtılmıştır. Su buharı ile yapılan gazlaşmada gazlaşma reaksiyonları endotermik reaksiyon olduğundan ısı tüketiminin faala olması nedeniyle kömür bloğu soğumuştur.

Şekil 4.34'te görüldüğü gibi su buharı fazına geçildiğinde, H_2 üretimi %30-%40 mertebelerine ulaşmış ve bu esnada beklendiği gibi CO içeriği %5 seviyelerinde kalmıştır.

Şekil 4.34'te görüldüğü gibi sentez gazının ısı değeri 7 MJ/kg mertebelerine kadar yükselmesinde görülmüştür. Bu kademede sentez gazı debisi 5-6 m^3/h aralığında seyretmiştir.

4.2.3 Büyük reaktörde yapılan deneylerin karşılaştırılması (BL111Z1 ve BL111K2)

Büyük reaktörde gerçekleştirilen BL111Z1 ve BL111K2 kodlu iki deneyin, oksijen fazları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu iki deneyin oksijen besleme debilerinin benzer olduğu 4.-7. saatleri arasındaki sentez gazı üretimi mukayese edilmiştir. Oksijen besleme debisi BL111Z1 kodlu deneyde 2,5 m^3/h iken BL111K2 deneyinde ortalama 3 m^3/h 'dir. Şekil 4.35'te sentez gazı bileşimleri karşılaştırılmıştır.



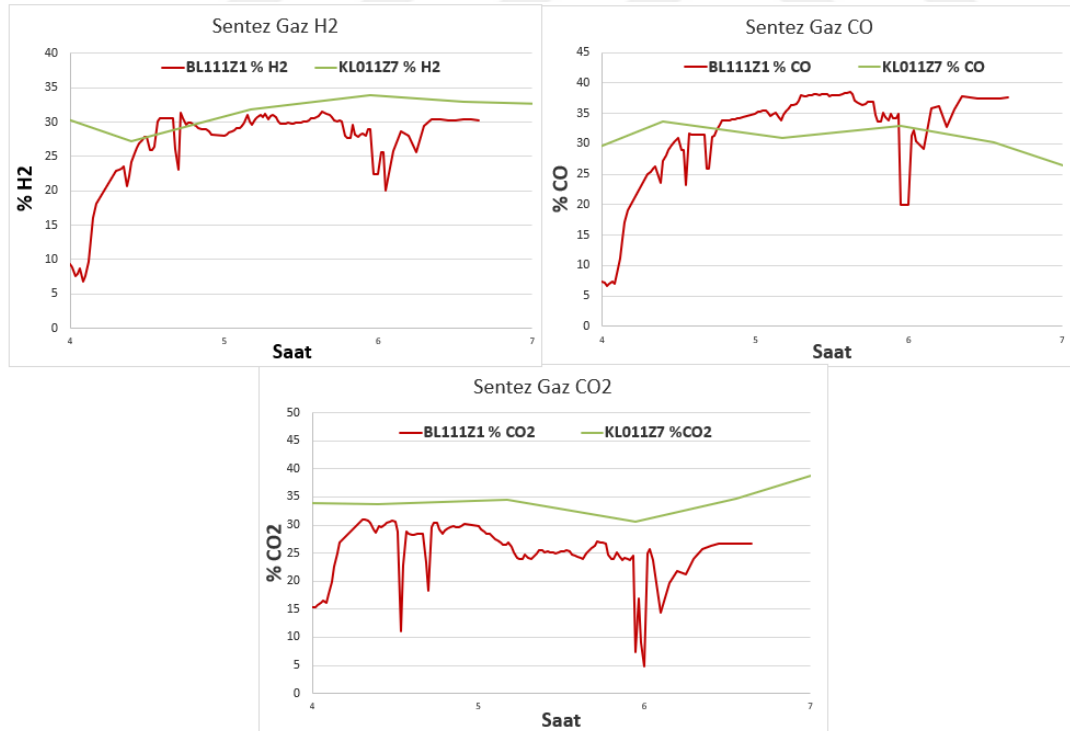
Şekil 4.35 : Sentez gazı bileşimleri kıyaslanması.

BL111Z1 deneyinde sentez gazı içeriği BL111K2'ye göre çok daha zengindir. Sentez gazının kötüleştigi CO₂'nin artışından görülmektedir. BL111Z1 deneyinde CO ve H₂ oranının yüksek, CO₂ oranının düşük oluşu beslenen oksijen debisinin BL111K2 deneyine göre daha uygun olduğunun göstergesidir. BL111K2 deneyinde yaklaşık iki kat daha fazla oksijen kullanılması ideal gazlaşma için fazla olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla gazlaşmada uygun oksijen debisi beslemesinin verimli gazlaşma için önemli olduğunu göstermiştir.

4.2.4 Büyük ve küçük reaktörde yapılan deneylerin karşılaştırılması (BL111Z1 ve KL011Z7)

Büyük ve küçük reaktörlerde yapılan benzer deneylerin saf oksijenle yapılan gazlaştırma fazında olan aynı oksijen debisine sahip BL111Z1 ve KL011Z7 deneyleri karşılaştırılmıştır. BL111K1 deneyinde kullanılan kömür bloğu 105x50x35 cm (uzunluk x genişlik x yükseklik) boyutlarına sahipken, KL011Z6 deneyinde kullanılan kömür bloğu 60x40x40 boyutlarındadır.

Aşağıdaki Şekil 4.36'da üretilen H₂, CO ve CO₂ değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.36 : BL111Z1 ve KL011Z7 sentez gazı bileşenleri kıyaslanması.

Oksijen besleme debisi BL111Z1 kodlu deneyde 2,5m³/h iken KL011Z7 deneyinde ortalama 1,5m³/h'dir.

Şekil 4.36’da sonuçlar karşılaştırıldığında genel olarak küçük reaktörde yapılan deneylerde büyük reaktöre kıyasla aynı mertebelerde CO ve H₂ ve CO₂ üretilmiştir.

Dolayısıyla iki farklı geometride ve büyüklükte olan kömür bloğuna farklı ama uygun oksijen beslendiğinde aynı sentez gaz içeriği elde edilmiştir. Bu nedenle gazlaştırıcı oksijen debisinin reaktörün büyüklüğüne ve geometresine uygun olarak belirlenmesi gerekir.

4.3 Deneysel Sonuçların Özeti

Deneylerde,

- Hava beslemesi ile kömür gazlaşması mümkün olmamıştır. Ancak oksijenle zenginleştirilmiş hava kullanıldığında gazlaşma sağlanmıştır. Bununla birlikte belirli oksijen karışım oranının gerekli olduğu görülmüştür.
- Saf oksijen beslemesi ile her zaman gazlaşma başarılı olmuştur. Ancak kömür kütlesinin geometresine ve kütlesine uygun besleme debisi seçilmelidir. Aksi takdirde yüksek oksijen debisinde gazlaşma yanmaya dönüşürken, düşük debilerde sentez gazı kalitesi ve ısı değeri azalmaktadır.
- Büyük reaktör için oksijen beslemesi 3.0-3.5 m³/h ve küçük reaktör için 1-1,5 m³/saat aralığında olmasuygun olmuştur.
- Sentez gaz üretimi 800-1000°C kömür sıcaklıklarında en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu sıcaklık aralığı uygun gazlaşma sıcaklıklarıdır.
- Linyit kömürlerinin nemli olması gazlaşma için bir avantaj olarak ortaya çıkmıştır. Bu deneylerde kullanılan %27-30 nem içerikli yerli linyitler gazlaşma için çok uygundur.
- Genel olarak, gazlaşmanın saf oksijen besleme fazında, sentez gazı içeriğinin %25-30 H₂, % 30-35 CO aralığında bulunduğu, ortalama ısı değerin 5,14 MJ/m³ olduğu ve üretilen sentez gazı debisinin 5m³/h - 15 m³/h aralığında değiştiği,
- Hava ve oksijen karışımı (zenginleştirilmiş hava) gazlaşmada, hava/oksijen oranları olarak 3:1, 2:1, 1.5:1, 1:2, ve 1:1 denenmiş olup, 2:1 oranının en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Bu esnada ortalama %18 H₂, %19 CO üretilmiş olup ısı değeri 4.6 MJ/m³ olmuştur.

- Saf oksijen ile yapılan deneylerin sonlarına doğru kömürdeki nem buharlaşarak azaldığından, gazlaşma genelde kötüleşmektedir. Bu nedenle gazlaşmanın ileri safhalarında mutlaka su buharı dışarıdan takviye edilmelidir. Bunun için gazlaşmanın son evrelerinde mutlaka su buharı karıştırılmalı veya kademeli gazlaşma yapılmalıdır.
- Subuharı kademeli gazlaşma zengin hidrojen gazı üretimi için uygun bir yöntem olduğu deneylerde görülmüştür. Su buharı gazlaşma reaksiyonların endotermik olması nedeniyle kömmür bloğu sıcaklıklarını düşürmektedir. Bir süre sonra tekrar saf oksijen beslemesine geçilerek kömür kütlesinin tekrar ısıtılması sağlanmıştır. Anlaşıldığı gibi burada saf oksijen ve su buharı beslemesi kademeli olarak yapılmalıdır. Burada kademe süreleri önemli bir proses parametreleri olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek hidrojen içeriği elde etmek için bu tarz gazlaştırma şeklinin uygulanması gerekli olmaktadır.
- Verimli bir gazlaşma için başlangıçta kömür bloğu içinde düzgün bir gazlaşma oyuğu oluşturulmalıdır. Gazlaşma bu bölgede ilerlemektedir. Böylece gazlaştırıcı beslemesi homojen şekilde yapılacaktır. Gazlaşma oyuğu gelişimi gazlaşma sürecinin hızını belirleyen önemli etken olduğu görülmüştür.

4.4 Literatürdeki Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırma

Literatürde buradaki deneylere benzer çalışmalar Stanczyk v.d [28] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde, hem saf oksijenle ve hemde oksijen/hava/subuharı karıştırılmalı ve kademeli olarak gazlaşma uygulanmıştır. Burdan elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır.

Karşılaştırma yapılan deneylerde kullanılan kömürlerin özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Karşılaştırılan deneylerde kullanılan kömürler.

Analiz Tipi	İTÜ'de Gerçekleştirilen Deneyler	Stanczyk v.d [28]
Nem oranı	%25,17	%53,0
Kül oranı	%17,95	%4,7
Uçucu madde oranı	%28,74	%23,6
Sabit karbon oranı	%28,14	%17,7

Çizelge 4.2’de her iki deneysel çalışmanın çeşitli aşamalarında elde edilen ortalama sentez gaz bileşimleri sunulmuştur.

Çizelge 4.2 : Deneysel sonuçların literatür ile karşılaştırılması.

Çalışma Bilgileri	Deney Numarası	Deney Aşaması	Sentez Gaz Bileşenleri (%)						Isıl Değer [MJ/Nm ³]		
			CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂			
Stanczyk v.d	2010 [28]	O ₂ - 1	7,0	16,1	1,3	64,9	3,6	7,0	3,09		
		Buhar	4,8	46,3	4,4	39,5	0,6	2,4	7,18		
		O ₂ - 2	9,9	26,4	2,7	54,0	1,8	4,7	5,07		
	2011 [29]	O ₂	6,2	19,2	1,7	63,6	2,0	7,0	3,49		
		Hava	1,3	2,5	0,2	12,1	5,7	78,2	0,49		
		O ₂ /Hava	6,3	23,1	2,3	49,4	1,5	16,4	4,18		
		O ₂	33,2	31,5	3,2	27,9	0,7	3,2	8,58		
		Hava	10,3	11,8	2,8	14,7	0,7	59,6	3,63		
		O ₂ /Hava	17,3	18,7	4,2	23,0	0,6	35,9	5,74		
Bu Çalışma	2015	KL010S2	O ₂	30,6	22,7	3,2	30,1	4,5	8,8	7,46	
		KL111Z5	O ₂ -1	37,1	19,9	2,1	18,2	6,8	15,8	7,59	
			O ₂ -2	27,3	13,5	1,6	44,1	5,0	8,6	5,48	
			O ₂ /Hava	14,3	5,4	0,8	32,7	9,1	37,6	2,68	
			O ₂ /H ₂ O	21,2	16,5	1,7	54,4	2,5	3,8	5,07	
			O ₂ - 1	26,7	16,1	3,7	50,6	1,4	1,4	6,44	
		KL011Z6	O ₂ - 2	32,2	15,4	3,0	18,6	11,5	19,3	6,80	
			O ₂ /H ₂ O	35,3	18,6	2,5	15,4	10,7	17,5	7,36	
			O ₂	18.3	20.9	5.1	42.9	1.6	11.1	5.14	
		2015	BL011K2	Hava/O ₂	14.8	15.7	3.3	30.6	3.6	32	3.87
				Buhar/O ₂	7.6	21.3	4.4	60.2	3.5	3	3.6
				Hava/Buhar/O ₂	9	14.2	3.2	48.3	2.3	23.1	2.82

Stanczyk v.d tarafından yapılan oksijen/hava/subaharı karışımı ve kademeli olarak gazlaşmadan elde edilen CO ve H₂ mertebeleri ve sentez gazı ısı değerleri buradaki deneylere benzer seviyelerde olmuştur. Su buharı kademeli olarak gazlaşma yapıldığında % 46,3 H₂ olarak elde edilmiştir. Bu durum, kömür bloğu sıcaklıklarının oldukça düşmesine ve deneyin sonlanabilme riskinin artmasına sebebiyet vermiştir.

Bu sebepten, yüksek hidrojen içerikli sentez gazın sürdürülebilir olarak, sürekli buhar beslemesi ile elde edilemeyeceği sonucuna varılmıştır. Stanczyk v.d tarafından kullanılan kömürün çok nemli olması dikkat çekicidir.

Stanczyk v.d'nin yapmış oldukları çalışmalarda elde edilen sonuçlar, sentez gazının içindeki H₂ oranının genellikle CO oranından daha yüksek olduğunu işaret etmektedir. Ancak, bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde ise durumun tam tersi gözlemlenmiştir.

Yapılan deneylerde kullanılan kömür özellikleri incelendiğinde (Çizelge4.1), Stanczyk v.d tarafından kullanılan kömürün neminin oldukça yüksek (%53) olduğu görülmektedir. Bu durum hidrojen gazı üretimi için avantajlı olmaktadır. Sabit karbon miktarı incelendiğinde ise nem oranına göre oldukça düşüktür.

Sonuç olarak buradaki deneylerden, literatürdekiler ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Böylece verimli kömür gazlaştırma için gazlaştırıcı cinsleri, besleme debileri ve kömür sıcaklığı gibi parametrelerin önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, verimli gazlaşma için oksijen/hava/subaharı karıştırmalı ve kademeli gazlaşmanın uygulanmasının mümkün ve gerekli olduğu testlerde görülmüştür.

5. YKG HAD (HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ) MODELİ

YKG gazlaştırma deneyleri için bir sayısal matematiksel model geliştirilmiştir. Bunun için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tekniği kullanılmıştır. Kömür bloğundaki gazlaştırma esnasında olan gaz akışı, ısı – kütle geçişleri ile kimyasal reaksiyonları modellenmiştir. HAD modeli için ANSYS Fluent programı kullanılmıştır. ANSYS Fluent modeli iki boyutlu olup reaktör içindeki kömür bloğu modellemiştir.

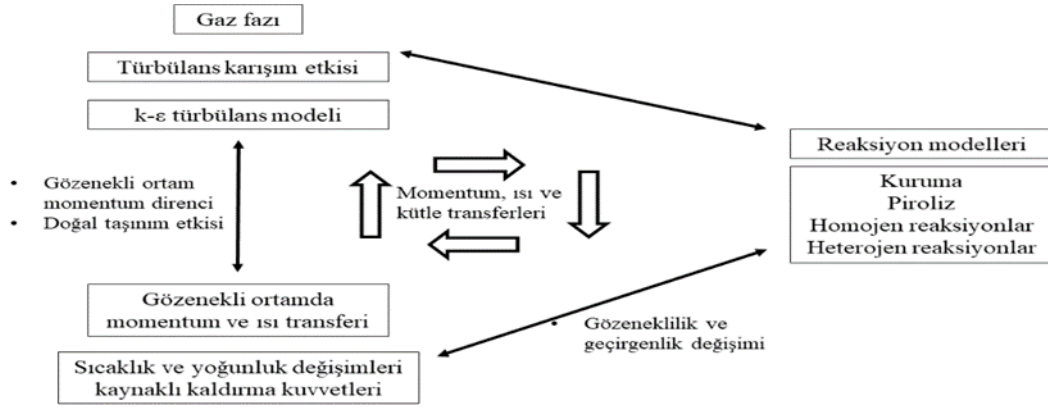
5.1 Modelin Geliştirilmesi ve Yapılan Kabuller

Kömür bloğu Şekil 5.1’de görüldüğü gibi 2 bölgeye ayrılmıştır. Birinci bölge kömür bloğunun altında açılan kanal olup burada gazlaştırıcı ve sentez gazı geçmektedir. İkinci bölge ise kömür bloğunun bulunduğu ve kömür gazlaşmasının gerçekleştiği kısımdır. Her iki bölgenin ayrı ayrı kontrol hacmi için kütle, enerji ve momentum korunum denklemleri yazılmıştır. Kanal ile kömür bloğu arasında ise kütle ve ısı geçişi bağlantısı vardır.



Şekil 5.1 : Kömür bloğu ve gazlaştırma kanalının iki boyutlu görünümü.

YKG için HAD modelinin şematik yapısı Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2 : YKG HAD model akış şeması [66].

YKG HAD modelinin kabulleri aşağıda sıralanmıştır:

1. Kömür bloğunun gözenekli bir yapıda (süngere benzer yapı) olduğu (Şekil 5.3),
2. Gözenekli yapının gaz fazı ve katı fazı arasında ısı dengede (sıcaklıklar eşit) olduğu,
3. Gözenekli ortamın gözeneklilik ve geçirgenlik katsayısının kimyasal reaksiyonların etkisiyle değişmediği,
4. Gazlaştırma kanalındaki akışın türbülanslı olduğu,
5. Gaz-gaz reaksiyonların akış kontrollü olduğu,
6. Gazlaşma reaksiyon bileşenlerin, Oksijen (O_2), karbondioksit (CO_2), karbonmonoksit (CO), su buharı (H_2O), hidrojen (H_2) ve azot (N) olduğu,
7. Gözeneklerde akışın olmadığı, difüzyon kontrollü olduğu,
8. Kömür neminin buharlaşmasının Arrhenius tipi reaksiyon ile hesaplandığı kabul edilmiştir.



Şekil 5.3 : Kömür bölgesi modellemesi olarak sünger benzeşimi.

5.2 Korunum Denklemleri (Kütle, Enerji, Momentum)

5.2.1 Toplam kütle korunumu denklemi

Genel korunum denklemlerinin birincisi, toplam kütle korunumu denklemidir (denklem 5.1). Denklem 5.1, gözenekli ortam için yazılmıştır. Eşitliğin her iki tarafındaki γ ifadesi ise gözenekli yapının boşluk oranı ifade edilmektedir. Gözenekli kömür için belirli bir değer alırken gazlaştırma kanalı için 1'e eşittir. Gözeneklilik kütle korunum denklemlerinde kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_g \rho_g) + \nabla \cdot (\gamma_g \rho_g \vec{u}_g) = \gamma_g \Sigma \dot{S}_g \quad (5.1)$$

Yukarıda kütle korunum denkleminde ayrıca denklemin sağında gösterilen kaynak (üretim) terimleridir. Bu kaynak terim, kimyasal reaksiyonlar (kuruma, homojen reaksiyonlar ve heterojen reaksiyonlar) neticesinde kontrol hacminde değişen kütleyi ifade etmektedir. Üretim terimin açık hali aşağıda (denklem 5.2-5.5) verilmiştir.

$$\Sigma \dot{S}_g = \dot{S}_{kuruma} + \dot{S}_{homojen\ reaksiyonlar} + \dot{S}_{heterojen\ reaksiyonlar} \quad (5.2)$$

$$\dot{S}_{homojen\ reaksiyonlar} = \dot{S}_{CO\ yanma} + \dot{S}_{H_2\ yanma} + \dot{S}_{Su-Gaz\ değişimi} \quad (5.3)$$

$$\dot{S}_{heterojen\ reaksiyonlar} = \dot{S}_C\ yanma + \dot{S}_{CO_2\ gazlaşma} + \dot{S}_{H_2O\ gazlaşma} \quad (5.4)$$

$$\dot{S}_{kuruma} = R_{H_2O, kuruma} \quad (5.5)$$

Üç adet homojen reaksiyon (gaz fazı reaksiyonları) ve üç adet de heterojen reaksiyonunu (kömür yanması ve kömür gazlaşması) model içerisinde tanımlanmıştır. Bu reaksiyonların kaynak terimleri denklem 5.6-5.11 ile verilmiştir.

$$\dot{S}_{CO\ yanma} = R_{CO, CO\ yanma} + R_{O_2, CO\ yanma} + R_{CO_2, CO\ yanma} \quad (5.6)$$

$$\dot{S}_{H_2\ yanma} = R_{H_2, H_2\ yanma} + R_{O_2, H_2\ yanma} + R_{H_2O, H_2\ yanma} \quad (5.7)$$

$$\dot{S}_{Su-Gaz\ değişimi} = R_{CO, S-G} + R_{H_2O, S-G} + R_{CO_2, S-G} + R_{H_2, S-G} \quad (5.8)$$

$$\dot{S}_C\ yanma = R_{O_2, C\ yanma} + R_{CO_2, C\ yanma} \quad (5.9)$$

$$\dot{S}_{CO_2\ gazlaşma} = R_{CO_2, CO_2\ gazlaşma} + R_{CO, CO_2\ gazlaşma} \quad (5.10)$$

$$\dot{S}_{H_2O\ gazlaşma} = R_{H_2O, H_2O\ gazlaşma} + R_{CO_2, H_2O\ gazlaşma} + R_{H_2, H_2O\ gazlaşma} \quad (5.11)$$

Yukarıdaki ifadelerde kullanılan alt indislerden birincisi bileşeni ikincisi meydana gelen reaksiyonu ifade eder. Örneğin CO yanma reaksiyonu neticesinde oluşan CO₂ ilk alt indis olarak, CO yanma ise ikinci alt indis olarak gösterilmiştir.

5.2.2 Momentum korunumu denklemi

Momentum korunumu denklemi, gözenekli kömür için denklem 5.12’de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_g \rho_g \vec{u}_g) + \nabla \cdot (\gamma_g \rho_g \vec{u}_g \vec{u}_g) = -\nabla P_g + \nabla^2 \vec{u}_g + \rho_g \vec{g} - \frac{\mu}{\alpha} \vec{u}_g \quad (5.12)$$

Gözenekli ortamın yarattığı momentum direncini, eşitliğin sağ tarafındaki son terim (denklem 5.13) temsil eder. Bu eşitlik Darcy yasası olarak bilinir ve bu yasaya göre gözenekli ortamdan ileri gelen basınç kaybı hız ile orantılıdır.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{u}_g \quad (5.13)$$

Denklem 5.12’in sol tarafında yer alan gözeneklilik ise, kömür bölgesi için önemlidir. Gazlaştırma kanalı gözenekli ortam olarak modellenmediği için bu değer bire eşittir.

Geçirgenlik katsayısı α simgesi ile belirtilmiştir ve basınç kayıpları hesabında kullanılmaktadır. Bir başka ifade ile akış direnci olarak tanımlanabilir. Modelde yapılan kabullerde belirtildiği üzere bu katsayı kimyasal reaksiyonlar neticesinde değişmemektedir. Bu direnç terimi gazlaştırma kanalında sıfır alınmıştır.

YKG işlemi esnasında, oluşan kavite ve gazlaştırma kanalı içerisinde türbülanslı bir akış yapısı beklenmektedir. Oluşan kavite içinde doğal taşınım ve zorlanmış taşınımın birlikte olduğu türbülanslı bir akış beklenmektedir. Bu durum momentum transferi açısından önemlidir. Gazlaştırma reaktörü boyunca görülen derişiklik ve sıcaklık farkları doğal taşınıma sebep olur ve içerideki gaz akışıyla beraber zorlanmış taşınımında gerçekleşir. Doğal taşınımın etkisini belirleyen boyutsuz sayılardan olan Grashof sayısı ile zorlanmış taşınımın etkisini belirleyen boyutsuz sayılardan olan Reynolds sayısı arasındaki ilişkinin incelenmesi gerekir. Gr/Re² oranı bire yakınsa her iki taşınımında etkili olduğu söylenebilir. Bu oran birden çok büyükse doğal taşınım etkisi daha baskındır [67,68].

Gazlaştırma kanalı ve oluşan kavite içindeki türbülanslı akışı çözebilmek için iki denklem takımı kullanan k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Türbülans kinetik enerjisi

(denklem 5.14) ve dissipasyon deklemlerin (denklem 5.15) birlikte çözümüyü tübülanslı akışın karakteri belirlenmektedir [69].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g k) + \nabla \cdot (\rho_g \vec{u}_g k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho_g \varepsilon \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_g \vec{u}_g \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho_g \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.15)$$

Denklem 5.14 ve 5.15'te kullanılan türbülanslı vizkozite değeri denklem 5.16'ya göre hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \frac{\rho_g C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (5.16)$$

Denklem 5.14'te yer alan G_k ve G_b ifadeleri sırasıyla ortalama hız gradyenlerinden ve kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan türbülans üretimini ifade etmektedir. Denklem 5.15'te yer alan $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ifadeleri ve denklem 5.16'da yer alan C_μ ifadeleri k-ε modeli için kullanılan ampirik sabitlerdir ve aşağıda (denklem 5.17-5.19) verilmiştir. Denklem 5.14'te yer alan σ_k ve denklem 5.15'te yer alan σ_ε , türbülanslı Prandtl sayılarıdır ve yine modelde kullanılan sabitlerdir (denklem 5.20 ve 5.21).

$$C_{1\varepsilon} = 1,44 \quad (5.17)$$

$$C_{2\varepsilon} = 1,92 \quad (5.18)$$

$$C_\mu = 0,09 \quad (5.19)$$

$$\sigma_k = 1,0 \quad (5.20)$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (5.21)$$

5.2.3 Enerji korunumu denklemi

Enerji korunumu denklem 5.22, gözenekli kömürün katı ve gaz fazları arasında ısı denge olduğu kabulü yapılmıştır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\gamma_g \rho_g E_g + (1 - \gamma_g) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{u}_g (\rho_g E_g + p)) \\ = \Sigma \nabla \cdot \left[k_e \nabla T - \left(\sum_i h_i J_i \right) \right] + \Sigma S_h \end{aligned} \quad (5.22)$$

Yukarıda denklem 5.22'de olan terimler aşağıda denklemlerle hesaplanır:

$$E_g = h_g - \frac{p}{\rho_g} + \frac{u^2}{2} \quad (5.23)$$

$$h_g = \sum_i Y_i h_i \quad (5.24)$$

$$E_s = h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5.25)$$

$$k_e = \gamma_g k_g + (1 - \gamma_g) k_s \quad (5.26)$$

Gaz bileşenlerinin difüzyonundan kaynaklı enerji transferi, denklemin 5.22’de yer alan $\sum_i h_i J_i$ terimi ile hesaplanır. Reaksiyonlar neticesinde meydana gelen ısı üretimi denklem 5.22’nin sağ tarafında yer alan ΣS_h terimi ile hesaplanmaktadır. Denklem 5.27’de verilmiştir

$$\Sigma S_h = - \sum_i \frac{h_i^0}{M_i} R_i ; i \in \{O_2, CO_2, CO, H_2O, H_2\} \quad (5.27)$$

5.3 Kimyasal Reaksiyonlar

Geliştirilen modelde dikkate alınan gazlaşma prosesi esnasında gerçekleşen reaksiyonlarına Çizelge 5.1’de yer verilmiştir.

Çizelge 5.1 : HAD modelinde kullanılan reaksiyonlar ve bunların ısı değerleri.

			ΔH (kJ / mol)
Reaksiyonlar			
Homojen Reaksiyonlar	Kuruma	$Kömür \rightarrow Nemsiz Kömür + H_2O (nem)$	+40
	Uçucu yanması	$Kömür Uçucu + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$	
	Karbonmonoksit Yanması	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	-111
	Hidrojen Yanması	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	-242
	Su-Gaz Değişim Reaksiyonu	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	-41
	Sabit Karbon Yanması	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-393
	Karbondioksit Gazlaştırma	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	+172
Heterojen Reaksiyonlar	Su Buharı Gazlaştırma	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	+131

Homojen reaksiyonlardan ilk ikisi yanma reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonların ekzotermik yani ısı veren reaksiyonlar olduğundan endotermik olan gazlaştırma reaksiyonların enerjini sağlarlar. Üçüncü reaksiyon su-gaz değişim reaksiyonu olup kimyasal denge reaksiyonudur. Bu reaksiyon üretilen sentez gazındaki karbonmonoksit ve hidrojen miktarının belirlenmesi için oldukça önemlidir.

Heterojen reaksiyonlarına bakıldığında sabit karbonun yanması ilk reaksiyondur ve gazlaştırmadan önce kömürün tutuşturulması aşamasında gerçekleşir. Bu reaksiyonda ekzotermiktir ve gazlaşma reaksiyonları için enerji sağlar. Heterojen gazlaşma reaksiyonları olarak adlandırılan karbondioksit ve su buharı gazlaştırma reaksiyonları oksijensiz ortamda gerçekleşir. Bu reaksiyonlar endotermiktir ve üretilen sentez gazındaki karbonmonoksit ve hidrojen oranı için çok önemlidir.

Kuruma ve heterojen reaksiyon hızları hesaplanmasında gerekli reaksiyon sabiti k_r , Arrhenius denklemi (denklem 5.28) kullanılmıştır. Bu denklemde A_r reaksiyon katsayısı, n basınç üsteli ve E_r reaksiyon aktivasyon enerjisidir. Bu sabitlerin değerleri Çizelge 5.2’de bu sabitler verilmiştir.

Çizelge 5.2 : HAD modelinde kullanılan reaksiyon sabitleri ve aktivasyon enerji değerleri.

	Reaksiyonlar	A (1/atm ⁿ s)	E (kJ/kmol)	n	Ref.
Homojen Reaksiyonlar	Kuruma	$5,10 \times 10^4$	78240	-	[70]
	Karbonmonoksit Yanması	$2,24 \times 10^{12}$	107000	-	[71]
	Hidrojen Yanması	$9,87 \times 10^8$	31000	-	[71]
	Su-Gaz Değişim Reaksiyonu	$2,78 \times 10^6$	12500	-	[72]
	Sabit Karbon Yanması	$3,07 \times 10^5$	100400	1	[73]
Heterojen Reaksiyonlar	Karbondioksit Gazlaştırma	22,11	91000	0	[74]
	Su Buharı Gazlaştırma	$4,35 \times 10^3$	131000	0	[74]

Reaksiyon hızı denklem 5.29 ile hesaplanmıştır.

$$k_r = A_r P_r^n \exp\left(-\frac{E_r}{RT}\right) \quad (5.28)$$

$$R_{kimyasal} = (v_i'' - v_i') \left(k_r \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r} + \eta''_{j,r}} \right) \quad (5.29)$$

Homojen reaksiyon hızları, kütle akış kontrollü (türbülans model) olarak Eddy dissipasyon modeli ile hesaplanmıştır.

Eddy dissipasyon modeline göre reaksiyon hızları türbülans kaynaklı karışıma bağlıdır. Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, sıcaklık ve bileşen dağılımının, türbülans kontrollü reaksiyon modelleri ile daha isabetli çözüldüğü belirtilmiştir [75,76]. Reaksiyonların başlaması için kinetik modele ihtiyaç duyulduğundan bu iki model bir arada kullanılmıştır [77].

Reaksiyon hızları, türbülans kinetik enerjisi (k) ve eddy dissipasyonuna (ε) bağlı olarak hesaplanmaktadır. Reaksiyon hızını hesaplamak için denklem 5.30 ve 5.31 beraber çözülmekte ve hesaplanan sonuçlardan küçük olanı reaksiyon hızı olarak baz alınmaktadır (denklem 5.30-5.33).

$$R_{i,r,türbülans} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho_g \frac{\varepsilon}{k} \min \mathcal{R} \left(\frac{Y_{\mathcal{R}}}{v'_{\mathcal{R},r} M_{w,\mathcal{R}}} \right) \quad (5.30)$$

$$R_{i,r,t} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho_g \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v'_{j,r} M_{w,j}} \quad (5.31)$$

$$A = 4,0 ; \text{ ampirik sabit} \quad (5.32)$$

$$B = 0,5 ; \text{ ampirik sabit} \quad (5.33)$$

Denklem 5.30 ve 5.31 de belirtilen alt indislerden $\mathcal{R}$ reaksiyona giren kimyasal bileşenleri, P ise reaksiyonlar neticesindeki ürün bileşeneni gösterir.

Eddy dissipasyon modelinde yer alan ve modele tanımlanan homojen reaksiyonlara ait türbülans reaksiyon hızları aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir (denklem 5.34-37).

Karbonmonoksit yanma reaksiyonu için:

$$R_t = A\rho_g \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_{CO}}{M_{CO}}, \frac{Y_{O_2}}{\frac{1}{2}M_{O_2}}, B \frac{Y_{CO_2}}{M_{CO_2}} \right) \quad (5.34)$$

Hidrojen yanma reaksiyonu için:

$$R_t = A\rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_{H_2}}{M_{H_2}}, \frac{Y_{O_2}}{\frac{1}{2}M_{O_2}}, B \frac{Y_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right) \quad (5.35)$$

İleri yönlü su-gaz değişim reaksiyonu için:

$$R_t = A\rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_{CO}}{M_{CO}}, \frac{Y_{H_2O}}{M_{H_2O}}, B \frac{Y_{CO_2} + Y_{H_2}}{M_{CO_2} + M_{H_2}} \right) \quad (5.36)$$

Geri yöndeki su-gaz değişim reaksiyonu için:

$$R_t = A\rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_{CO_2}}{M_{CO_2}}, \frac{Y_{H_2}}{M_{H_2}}, B \frac{Y_{CO} + Y_{H_2O}}{M_{CO} + M_{H_2O}} \right) \quad (5.37)$$

Hesaplanan türbülans reaksiyon hızları denklem 5.29'da hesaplanan reaksiyon hızları ile karşılaştırılır ve bu değerlerden küçük olanı reaksiyon hızı olarak kullanılır (denklem 5.38).

$$R_{genel} = \min(R_{türbülans}, R_{kimyasal}) \quad (5.38)$$

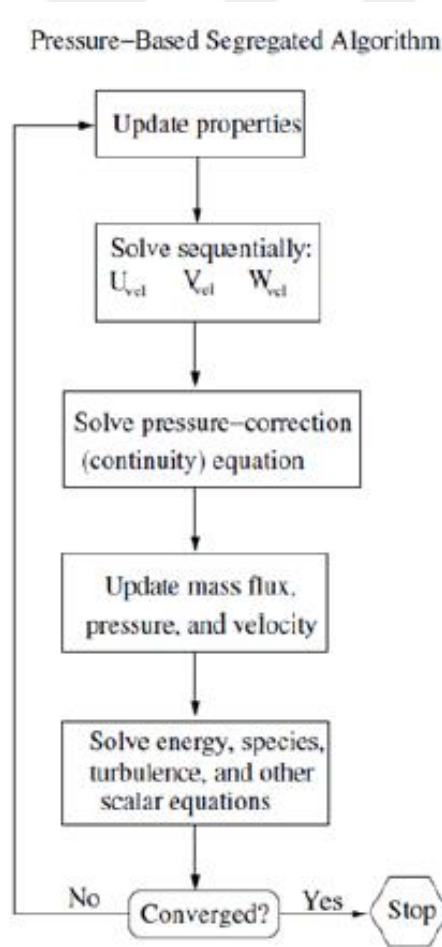
5.4 Çözüm Metodu

ANSYS Fluent'de iki tip çözüm tekniği bulunmaktadır. Bunlar pressure based ve density based çözüm teknikleridir.

Geleneksel olarak basınca dayalı (pressure-based) çözüm tekniği sıkıştırılamaz veya kısmen sıkıştırılabilir akışlar için kullanılırken, (yoğunluğa dayalı) density-based çözüm tekniği yüksek hızlı ve sıkıştırılabilir akışlar için kullanılmaktadır. ANSYS Fluent'teki basınca dayalı (pressure-based) çözücü altında iki algoritma mevcuttur: Ayırık bir algoritma (segregated) ve birleşik (coupled) bir algoritmasıdır. Ayırık (segregated) algoritmada, korunum denklemleri (governing equations) sırayla çözülür, birleşik (coupled) algoritmada ise momentum denklemleri ve basınca dayalı süreklilik

denklemleri birbirine bağı olarak çözölür. Genel olarak, birleşik algoritma (coupled) önemli ölçüde ayrı algoritmaya (segregated) kıyaslama yakınsama hızını geliştirir, ancak bellek gereksinimi birleşik (coupled) algortmada ayrı (segregated) algoritma ya kıyasla daha fazladır. Modelimizde basınca dayalı (pressure-based) çözölücü seçilmiştir ve bellek gereksinimi açısından daha avantajlı olduğu için ayrı algoritma (segregated) kullanılmıştır.

Basınca dayalı (pressure-based) çözölücü, korunum denklemlerinin sıralı olarak çözölüdüğü bir çözüm algoritması kullanır. Korunum denklemleri doğrusal (lineer) olmadığından, çözüm döngüsü, yakınsamış bir sayı elde etmek için tekrar tekrar gerçekleştirilir. Ayrı (segregated) algortmada, çözüm değışkenleri ($u, v, w, T, p, k, \epsilon$) için tek tek korunum denklemleri birbiri arkasına çözölür. Basınca dayalı (pressure-based) ayrı (segregated) algortma aşğıdaki Şekil 5.4'te gösterilen adımlarla ilerler.



Şekil 5.4 : Basınca dayalı (pressure-based) ayrı algoritma çözüm adımları [71].

Şekil 5.4'te gösterilen adımları aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- Mevcut çözüme dayalı olarak; türbülanslı viskozite (difüzivite) de dahil olmak üzere akışkan özelliklerini güncelleyin (örneğin, yoğunluk, viskozite, özgül ısı)
- Yakın zamanda güncellenen basınç ve yüzey kütle akıları değerlerini kullanarak momentum denklemlerini birbiri ardına çözüm.
- Son zamanlarda elde edilen hız sahası ve kütle akısı kullanılarak basınç düzeltme denklemini çözün.
- Kütle akılarını, basıncı ve hız alanını, 3. Adımdan elde edilen basınç düzeltme denklemi ile düzeltin
- Çözüm değişkenlerinin güncel değerlerini kullanarak, varsa, türbülans, enerji, bileşenler ve radyasyon yoğunluğu gibi ek terimler için denklemleri çözün.
- Farklı safhalar arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan kaynak terimlerini güncelleyin
- Denklemlerin yakınsamasını kontrol edin.

5.4.1 Genel skaler korunum denklemi, ayrıklaştırma ve çözüm

ANSYS Fluent, genel bir korunum denklemini sayısal olarak çözülebilen cebirsel bir denklem haline getiren kontrol hacmi tekniğini (sonlu hacimler metodu) kullanır. Aşağıda integral formda korunum denklemi verilmiştir.

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (5.39)$$

ANSYS Fluent, korunum denklemlerini sonlu hacimler yöntemini kullanarak ayrıklaştırma yapmaktadır ve bunun neticesinde sonuçlar hesaplanmaktadır. Korunum denklemleri ayrıklaştırılır ve denklemler integral formuna (denklem 5.39) getirilir. Bu denklemler iteratif olarak sonlu hacimler metoduyla çözülmektedir. Denklem 5.40'ta herhangi bir korunum denkleminin genel hali verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (5.40)$$

Bu denklemde belirtilen, N hücrenin yüzey sayısı, ϕ_f değişkenin yüzeydeki değeri, A_f yüzey alanı, V eleman hacmi, $\Gamma\phi$ ise difüzyon katsayısıdır.

Denklem 5.40'ta verilen genel konurum denkleminin sol taradındaki $\sum_f^N \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f$ terimi taşınımı ifade eder. Taşınım teriminin hesaplanabilmesi için hacim yüzeyindeki değerin bilinmesi gerekir ve bu değer komşu hacimlerin merkez değerlerinden tahmin edilmektedir. ANSYS Fluent ikinci dereceden ayrıklaştırma (second order upwind) yaparak tahmin değerlerini sonlu hacim merkezi üzerinde çok boyutlu Taylor serisi açılımı yaparak bulur.

Sıkıştırılamaz akış formülasyonunda, süreklilik denklemi hız alanı üzerinde bir sınırlamadır ve dinamik bir denklem değildir. Diğer bir deyişle, dört bağımsız değişken için (u,v,w,p) dört adet denklem vardır fakat sadece basınç için bağımsız bir korunum denklemi yoktur (modelimiz 2 boyutlu olduğundan 2 adet hız bileşeni ve basınç olmak üzere 3 denklem ve 3 bilinmeyen şeklindedir). Basıncı dinamik olarak değiştirebilmek için farklı basınç-hız eşleme yöntemleri kullanılarak hız alanına dayalı basınç alanı oluşturulabilir. Oluşturulan basınç alanı süreklilik denklemini sağlamalıdır.

ANSYS Fluent beş çeşit basınç-hız eşleme yöntemi kullanır. Bunlar SIMPLE, SIMPLEC, PISO, Coupled ve Fractional Step (FSM) metodlarıdır. SIMPLE (Semi-Implicit for Pressure-Linkage Equations) bunların içinde basit uygulanabilirliği, birçok farklı durum için kullanılabilirliği ve etkili olduğu için en popüler ve en çok kullanılanıdır. Bu metod'ta basınç ve hızı eşlemek için iteratif bir prosedür uygulanır. Algoritma, sistemdeki değişkenler için ilk tahmin değeriyle başlar. Momentum denklemi çözülür ve basınç bir basınç düzeltme denklemiyle düzeltilir. Sonraki adımda, diğer korunum denklemleri çözülür ve yakınsama kontrol edilir. Eğer çözüm yakınsamamışsa bir önceki çözüme ait değerler tahmin değeri olarak kullanılır ve çözüme bir iterasyon daha devam edilir. Bu döngü sonuçlarda yakınsama elde edilene kadar devam eder.

Özet olarak, SIMPLE algoritması “basınca dayalı” (pressure-based) bir algoritmadır çünkü basınç alanını bulmak için süreklilik ve momentum denklemlerinden türetilen basınç denklemi çözülmektedir. Yoğunluk hesabı içinse ideal gaz denkleminin faydalanılmaktadır (basınç ve sıcaklık çözüldüğü için).

5.5 Sayısal Model Sonuçları ve Deneylerle Karşılaştırılması

Model analizleri deneylerin aynı parametreleri ile yapılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Modelde ayrıca kömür sabit geçirgenlik ve porozite değerleri incelenmiştir.

5.5.1 Sayısal analiz planı

Model analizleri ile, gazlaştırıcı cinsi ve debisine bağlı olarak reaktör çıkışındaki üretilen sentez gazı bileşimi ve kömür içinde tüm sıcaklık dağılımları, tüm reaksiyon bileşenlerinin konsantrasyon dağılımları, reaksiyon bölgelerinin ve ayrıca reaktör içinde oluşana gazlaşma oyuğu (kavite) gelişimi heaplanarak incelenmiştir.

Büyük reaktörde yapılan BL111K2 kodlu deneyinin geliştirilen model ile simülasyonu yapılmıştır. Çizelge 5.3'te analizde kullanılan sınır koşulları ve Çizelge 5.4 analiz başlangıç sınır şartları verilmiştir. Kömür ateşlemesi, kömür içinde küçük bir bölgede 1800K 'lık bir sıcaklık verilmesiyle sağlanmıştır. Zamana bağlı çözüm adımı 1 s olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.3 : Analiz sınır şartları.

Sınır Koşulları		
Giriş	Oksijen ile gazlaştırma	300K, 3 m ³ /saat, Saf Oksijen
Çıkış		1 atm
Duvar		Adyabatik

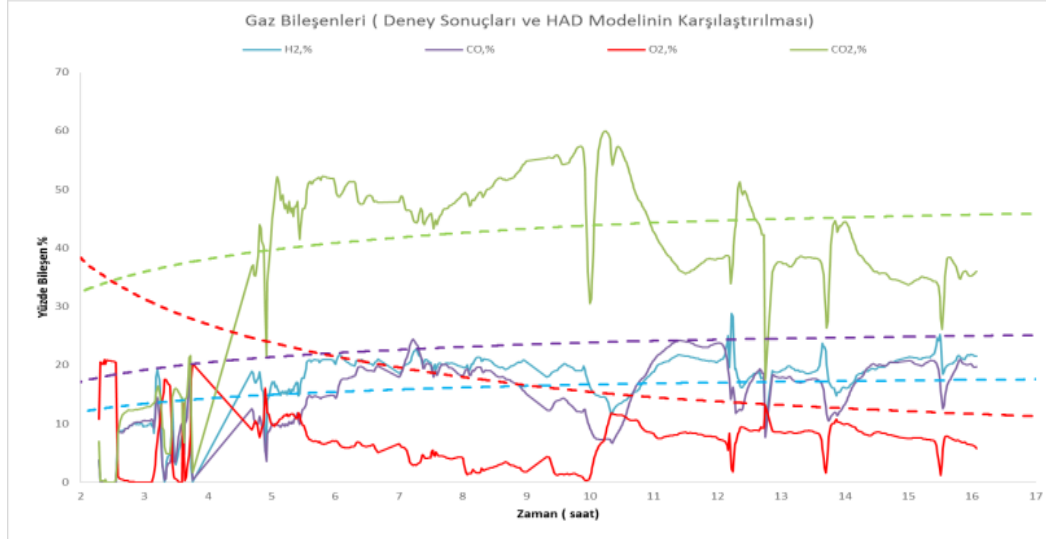
Analiz başlangıç koşulları ise Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Analiz başlangıç şartları.

Başlangıç Koşulları	
Sıcaklık-Kısmi Bölge (T)	1800 K
Gözeneklilik (γ)	0.03 (%3)
Geçirgenlik (α)	10 ⁻⁰⁸ m ²
Kömürün Nem İçeriği (kömür analizi)	%20
Kömürün Uçucu İçeriği (kömür analizi)	%30
Kömürün Sabit Karbon İçeriği (kömür analizi)	%50

5.5.2 Deneysel sonuçlar ile model analizlerinin karşılaştırılması

BL111K2 kodlu deney sonuçları ile geliştirilen HAD modeli ile hesaplanan sentez gaz içeriği Şekil 5.5'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.5 : BL111K2 kodlu deneyi ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

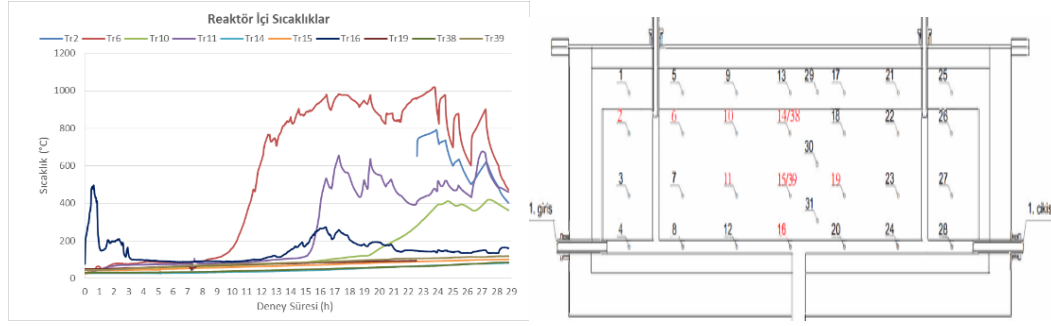
Çizelge 5.5'te sentez gazı bileşenlerin deneysel ölçülene ve sayısal hesaplanan ortalama değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.5 : BL111Z2 kodlu deneyi ile analiz sonuçlarının ortalama değerleriyle karşılaştırılması.

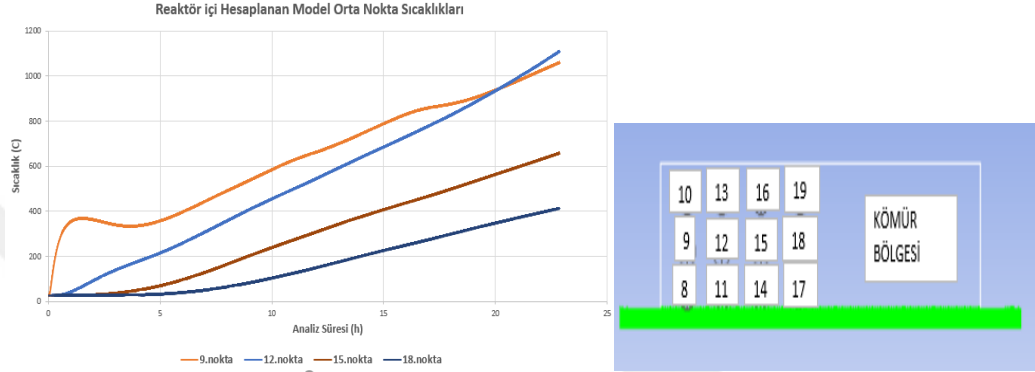
Çıkış % Bileşen	Deney %	Teorik %	% Hata
CO	21	24	9.09
H ₂	19	18	10.00
CO ₂	40	45	12.00
O ₂	10	11	4.76

Çizelge 5.5'te görüleceği üzere, analiz sonuçları en fazla %12 hata mertebesinde deneysel sonuçlarından farklı olmaktadır.

BL111K2 kodlu deneyde, kömür bloğu içerisinde Şekil 5.6'da kırmızı rekli işaretlenmiş noktalardada sıcaklık ölçümü yapılmıştır.



Şekil 5.6 : BL111K2 kodlu deneyin ölçülen kömür içindeki sıcaklıkları.



Şekil 5.7 : BL111K2 kodlu deneyin model ile hesaplanan kömür sıcaklıkları.

Şekil 5.7'deki analiz sonuçlarına bakıldığında, deneylerde 2 ve 6 noktalarında ölçülen sıcaklıklar ile analizlerde hesaplanan sıcaklıklar değerleri yakın çıkmıştır.

5.5.3 Analizde seçilen porozite ve geçirgenlik etkisi

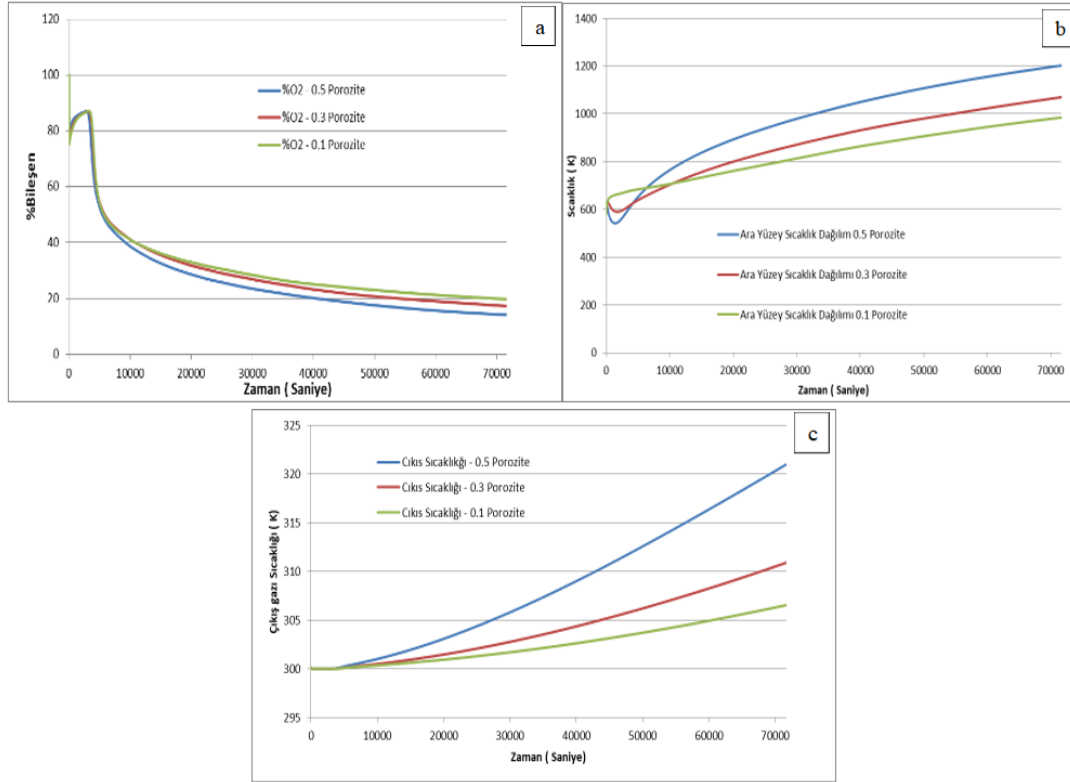
Geliştirilen modelde, kömür porozitesi ve geçirgenlik değerlerinin etkisi incelenmiştir. Porozite kömür içindeki boşluk hacimi /toplam hacime oranıdır. Geçirgenlik akış direncini ifade eder. Bir başka deyişle molekül difüzyon direncidir. Bu iki parametrenin gözenekli ortamda reaksiyonu etkilemesi söz konusudur.

Çizelge 5.6'de analizde seçilen porozite ve geçirgenlik değerleri listelenmiştir.

Çizelge 5.6 : BL111Z2 kodlu deneyi ile analiz sonuçlarının ortalama değerleriyle karşılaştırılması.

Oksijen debisi	Porozite	Geçirgenlik
3m ³ /h	0.3	1 e+08 (1/m ²)
3m ³ /h	0.3	1e+06 (1/m ²)
3m ³ /h	0.3	1e+04 (1/m ²)
3m ³ /h	0.1	1e+08 (1/m ²)
3m ³ /h	0.3	1e+08 (1/m ²)
3m ³ /h	0.5	1e+08 (1/m ²)

Şekil 5.8a’da porozitenin etkisi çıkıştaki ölçülen O_2 ölçülmesi ile değerlendirilmiştir. Gazlaşma reaksiyonlarında O_2 kullanımı arttığında (gazlaşmanın iyileşmesiyle), çıkıştaki O_2 düşmesi beklenen sonuçtur. Bu eğilim yüksek porozite değerlerinde görülmektedir. Bunun nedenin gazlaşmanın gerçekleştiği kanal-kömür ara yüzey ve reaktör çıkışında gaz sıcaklıklarının buna bağlı olarak yükselmesinde görülmektedir (5.8b ve c).



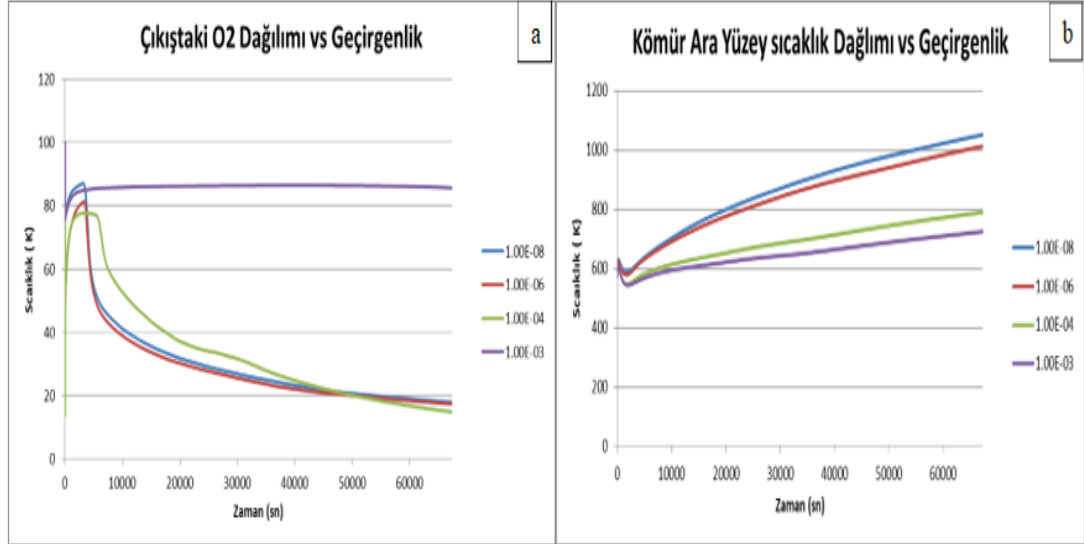
Şekil 5.8 : Porozite değişimine bağlı analiz sonuçları.

Analizde hesaplanan sentez gazı kalitesi porozite ile değişim göstermektedir (Çizelge 5.7). En yüksek oranlı sentez gazı 0,5 değerindeki porozitede elde edilmiştir.

Çizelge 5.7 : Porozite değişimine bağlı olarak elde edilen çıkış gazı yüzde bileşenleri.

Kömür Porozitesi			
	0.5	0.3	0.1
%O_2	9	11	12.5
%H_2	18.77	18	17.34
%CO	24.4	24	22.8
%CO_2	46.7	45	43.6

Kömür geçirgenliği momentum denkleminde akışa olan direncine etki eden parametredir. Analizlerde, geçirgenliğin gazlaşmada oksijen tükenimine (Şekil 5.9a) ve kömür-kanal ara yüzey sıcaklığına (Şekil 5.9b) etkisi incelenmiştir.



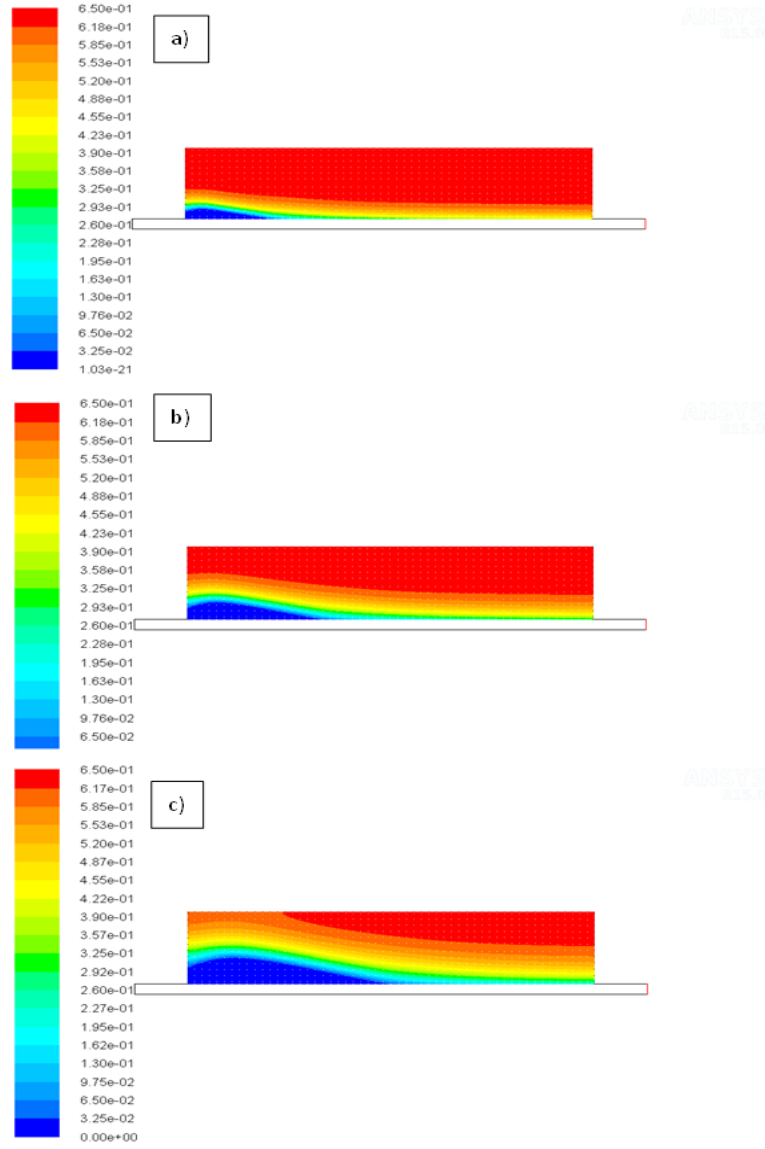
Şekil 5.9 : Geçirgenlik değişimine bağlı analiz sonuçları.

Şekil 5.9'da görüldüğü üzere kömür yapısının akışa olan direnç değeri yükseldikçe çıkıştaki O₂ miktarı artmaktadır, yani O₂ kömür cidarlarında gazlaşmaya katılmadan/tüketilmeden reaktörden ayrılmıştır. Gazlaşmanın kötüleştiği kanal-kömür ara yüzey sıcaklıklarının düşmesinde görülmektedir. Sıcaklık yükselmediği için de gazlaşma reaksiyonları iyileşmemiştir.

5.6 Gazlaşma Oyuğu (Kavite) Oluşumu ve Gazlaşma Reaksiyon Bölgeleri

5.6.1 Karbon tüketilmesi ile gazlaşma oyuğu oluşumu

Analizlerde, kömür bloğu içinde gazlaşma ile olan kömür tüketimi iki boyutlu olarak kesit profilinde zamana bağlı olarak Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Kömür tüketimi ile oluşan boşluk aslında gazlaşma oyuğudur. Burada gazlaşma meydana gelmektedir.

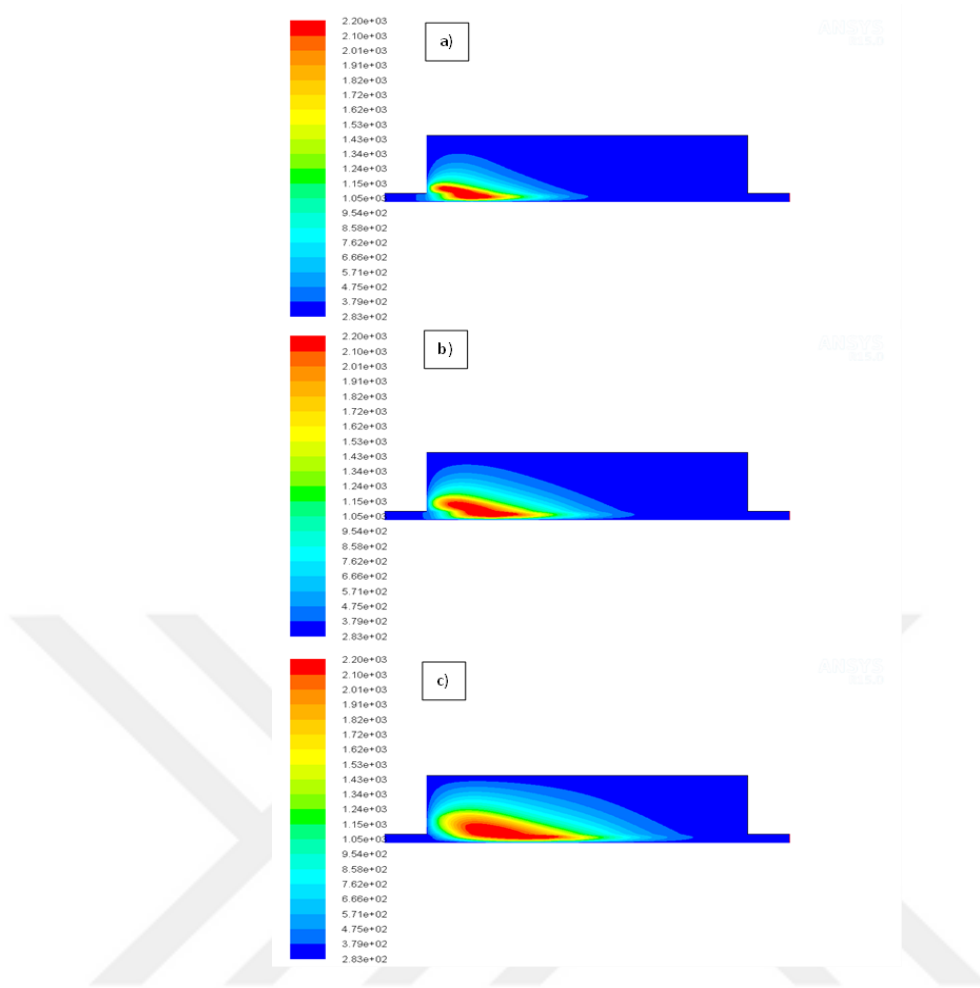


Şekil 5.10 : Kömür tüketim profili: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.

Şekil 5.10’da mavi olarak görünen bölge tamamen karbondan arınmış gazlaşma oyuğu olup zamanla büyümektedir.

5.6.2 Kömür sıcaklıkları

Kömür bloğunda gazlaşma esnasında ulan sıcaklık dağılımları 5, 10 ve 20 saatleri için Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 : Reaktör içi sıcaklığın (K) zamana bağlı değişimi: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.

Şekil 5.11’de kırmızı renkli bölgeler en yüksek sıcaklıkların olduğu gazlaşma oyuğu bölgesidir (yaklaşık 1800°C). Gazlaşma oyuğunun kömürle olan sınır bölgesinde yeşil renkli sıcaklıklar 800-1000°C olup gazlaşma için uygun sıcaklıklardır. Gazlaşma oyuğunda yüksek sıcaklıkların meydana gelmesine homojen yanma reaksiyonları neden olmaktadır. Homojen yanma reaksiyonları uçucu yanması, karbon monoksit yanması ve hidrojen yanması reaksiyonlarıdır. Yanma reaksiyonları ile serbest kalan ısı, kömürün ısıtılması ve heterojen reaksiyonların ihtiyaç duyduğu ısıyı temin eder. Kömür yüzeyinde heterojen gazlaşma reaksiyonlarının meydana geldiği bölgelerdir. Heterojen gazlaştırma reaksiyonları endotermik reaksiyonlar olduğundan kömür yüzeyini soğutur. Kömür tüketimi ile gazlaşma oyuğu büyümektedir.

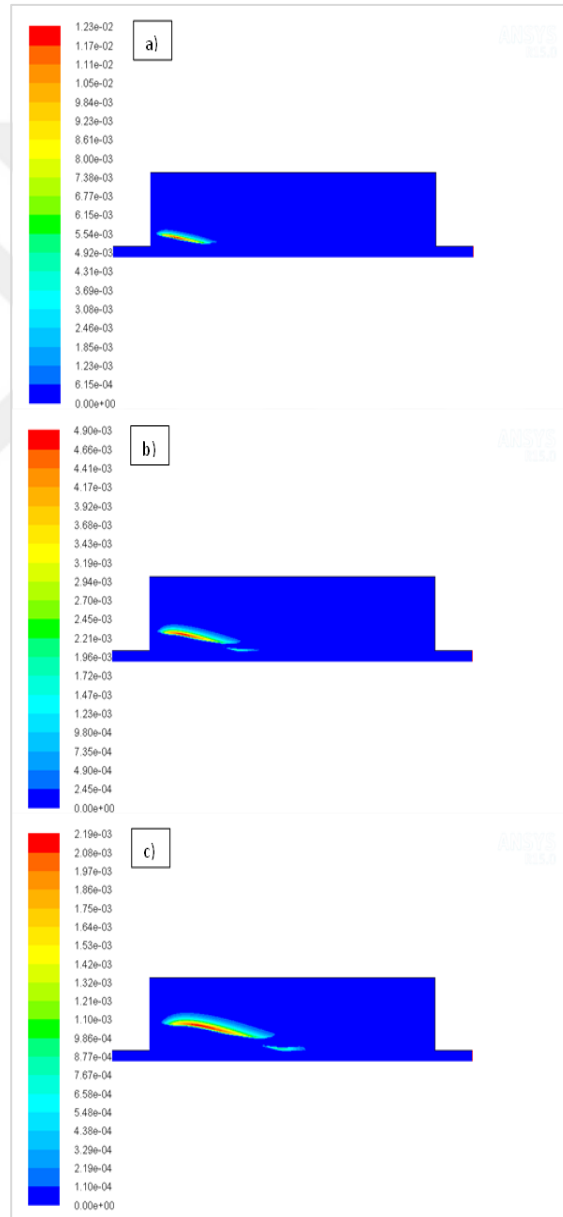
5.6.3 Gazlaşma reaksiyon bölgeleri

Gazlaşma reaksiyonlarının gerçekleştiği bölgelerin belirlenmesi sentez gazı kalitesi için önemlidir.

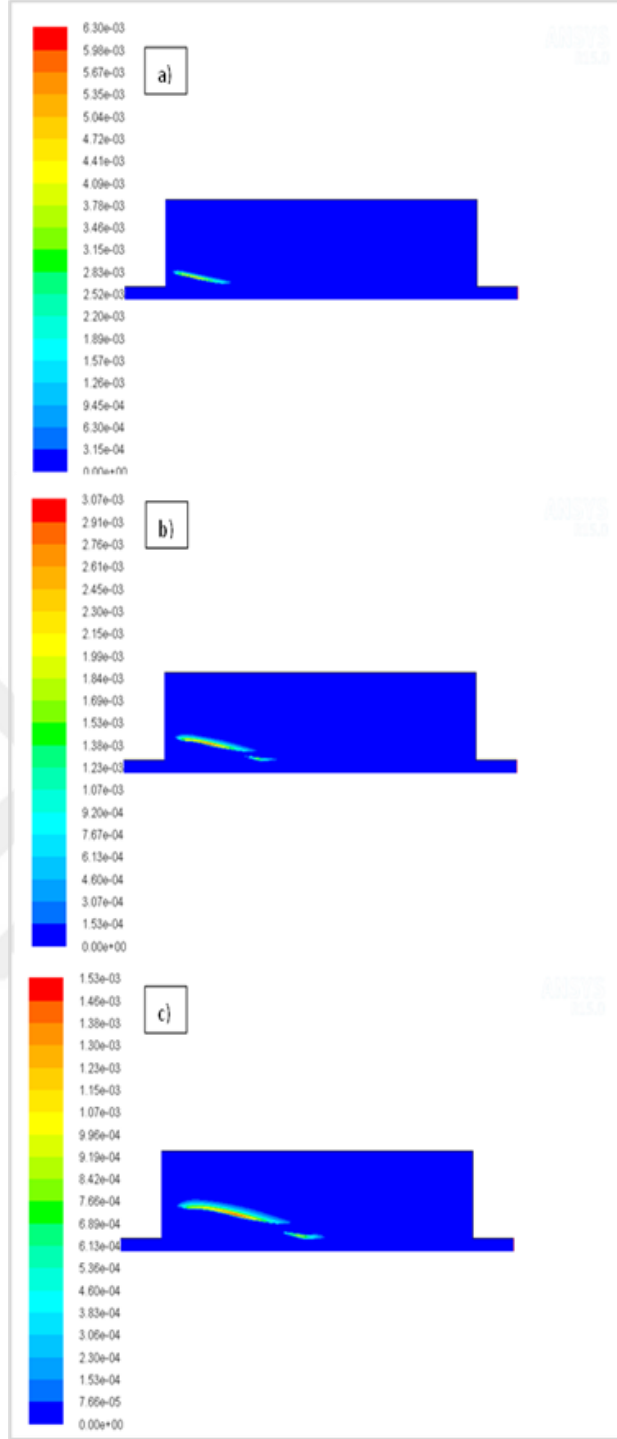
5.6.3.1 Heterojen gazlaşma reaksiyon bölgeleri

Gazlaşmada genel olarak heterojen reaksiyonlar, boudard reaksiyonu ve su buharı gazlaştırma reaksiyonlarıdır. Böylece bu iki reaksiyon üzerinden, reaksiyon bölgesi takip edilebilir (gazlaşma oyuğu gelişimi).

Heterojen gazlaştırma reaksiyonlarından olan boudard reaksiyonu (Şekil 5.12) ile su gazlaştırma reaksiyonlarının (Şekil 5.13) gazlaşma oyuğunun kömürle olan sınır yüzey bölgesinde yoğunlaştığı ve zaman içinde büyüdüğü Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te görülmektedir.



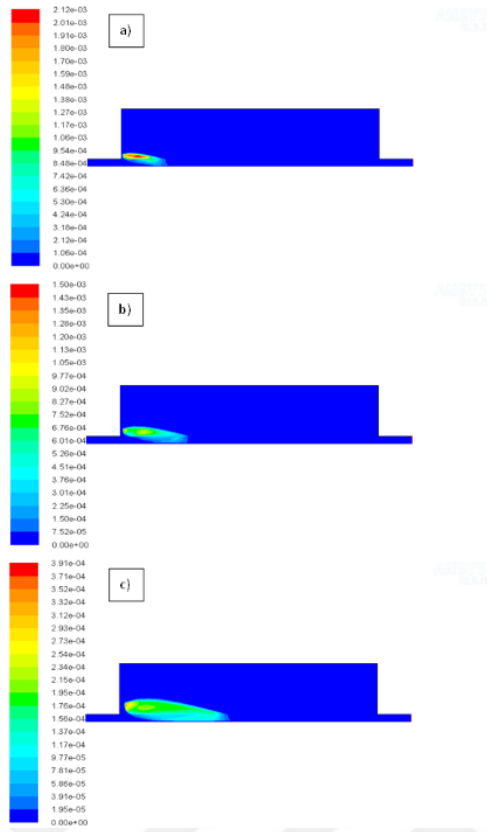
Şekil 5.12 : Boudard reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.



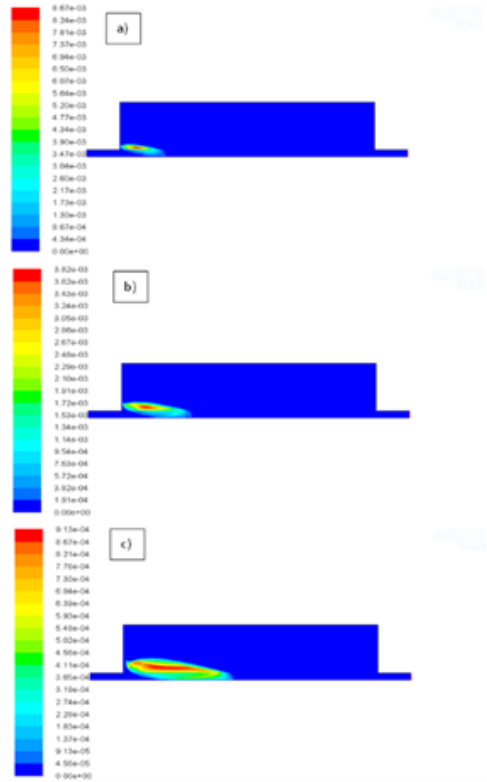
Şekil 5.13 : Su buharı gazlaşma reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.

5.6.3.2 Homojen yanma reaksiyon bölgeleri

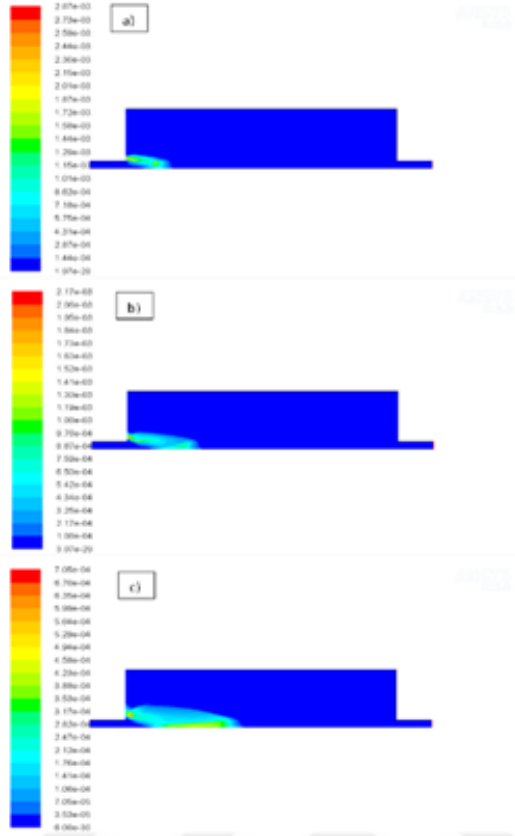
Homojen yanma reaksiyonlarından, kömür uçucu yanması (Şekil 5.14), CO yanması (Şekil 5.15) ve H₂ yanmasının (Şekil 5.16) gerçekleştiği bölgeler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Kömür uçucu yanması reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik



Şekil 5.15 : CO yanması reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.



Şekil 5.16 : H₂ yanması reaksiyon bölgeleri: a) 5 saatlik b) 10 saatlik c) 20 saatlik.



6. YKG REAKTÖR TASARIMI VE PROSES PARAMETRELERİ İÇİN MAKİNA ÖĞRENMESİ MODELİ

Deneylelerden ve matematiksel model analizlerinden, reaktör geometrisi ile gazlaşma proses parametreleri arasında bir ilişki olduğu ve buna bağılı olarak sentez gazı üretiminin iyileştiği görülmektedir. Dolayısıyla YKG reaktörünün tasarımında ve proses parametrelerinin tayininde etkin olan parametrelerinin belirlenmesi için hem burada gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ve hem de literatürde elde edilen sonuçların kullanılmasıyla bir matematiksel optimizasyon (tahmin) modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleriyle yer altında kömür gazlaştırma süreci incelenmiş ve sonuçların deneysel verilerle uygunluğu gösterilmiştir. Ancak HAD analizlerinin oldukça zaman alıcı olmasından dolayı, tüm parametrelerinin irdelenmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle böyle bir matematiksel optimizasyon modelinin geliştirilmesi oldukça yararlı olacaktır. Bununla birlikte matematiksel optimizasyon modeli hiçbir zaman HAD analizlerinin gazlaştırma bölgesinde gerçekleşen reaksiyon mekanizması hakkında sağladığı bilgiyi veremeyecektir. Bu tahmin metodu, HAD ve deneysel çalışmaların verilerini kullanarak geliştirilmektedir.

Son yıllarda Yapay Zekâ kullanılarak geçmişte yapılmış tüm verilerden yararlanılması mümkün hale gelmiştir. Böylece zaman alıcı gerek sayısal ve gerekse deneysel çalışmaların en aza indirilmesi sağlanırken bazende yeni sayısal ve deneysel çalışma yapmadan sonuçları tahmin etmek mümkün olmaktadır. Yapay Zekâ alt kollarından biri olan makine öğrenmesi başarılı şekilde regresyon modellerini geliştirmektedir. Bu regresyon modelleri yapılmış sayısal ve deneysel verileri kullanarak güvenilir tahmin sonuçlarını verebilmektedir.

Literatürde matematiksel tahmin modelleri içinde en çok kullanılan bir yöntem olan veri analizi ile MINITAB yazılımı kullanılarak çok değişkenli regresyon tahmin modeli geliştirilmiştir. Dolayısıyla aşağıda detaylı açıklanacak deneysel verilere dayalı matematiksel tahmin modelinin geliştirilmesi ve uygulanması buradaki YKG

reaktörünün geometrik optmizasyonunda oldukça yararlı ve hızlı bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır.

Böylece geliştirilen çok değişkenli regresyon tahmin modeli ile YKG reaktörünün tasarımını ve burada elde edilecek sentez gaz miktarı ve konsantrasyonu ve ayrıca gazlaştırıcı oksijen debisi belirlenmiş olacaktır

6.1 Sayısal Model Sonuçları ve Deneylerle Karşılaştırılması

Regresyon analizleri, günümüzde son derece yaygın olarak kullanılan yapay zekâ uygulamalarının alt kolu olan makine öğrenmesi yöntemlerinden biridir.

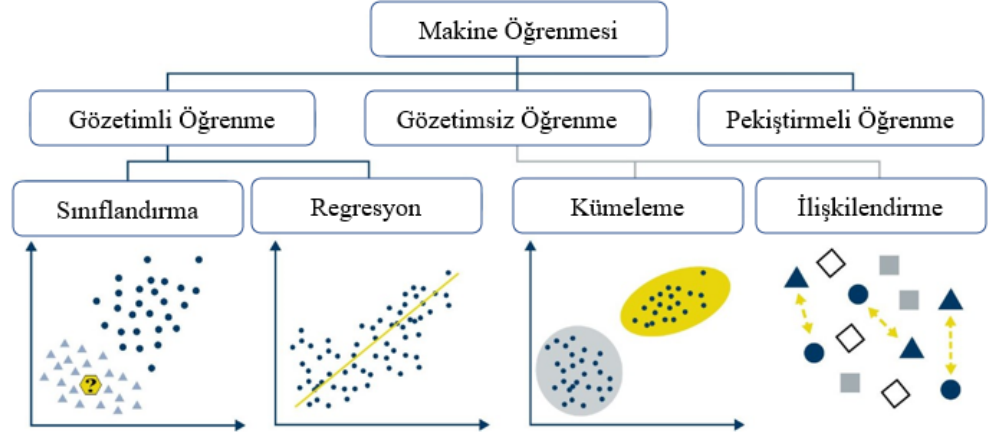


Şekil 6.1 : Yapay Zeka uygulama alanları [78].

Şekil 6.1’de Yapay Zekâ uygulama alanları gösterilmiştir.

Makine öğrenmesi, veri setlerinin incelenmesi ve bu verilerin kullanılması yoluyla, belirleme ve tahmin modellerinin oluşturulduğu bir yöntemdir. Makine öğrenmesi, geleneksel programlama yöntemlerinden farklı olarak, veri setleriyle eğitilir ve öğrenilen görevler yeni veriler üzerinde yerine getirilir. Bu şekilde, öğrenmeyi etkili bir şekilde gerçekleştirebilmek için öncelikle verilerin girdi olarak sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, yapılan fiziksel deneylerden elde edilen veriler girdi olarak kullanılacaktır.

Makine öğrenmesi metodları kendi içinde ayrılmaktadır. Şekil 6.2’de bu yöntemler gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : Makine Öğrenmesi uygulama alanları [79].

Makine öğrenmesi, üç ana kategori altında incelenir: gözetimli, gözetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme. Gözetimli öğrenmede, bir model girdi ve hedef çıktı verileri ile eğitilir. Bu şekilde, girdilere en yakın hedef çıktılar elde edilen model çıkarılır. Bu model, yeni veriler için de benzer sonuçlar üretebilir. Gözetimsiz öğrenme ise, etiketlenmemiş verileri keşfeden bir sistem olarak tanımlanır. Bu yöntemin en iyi görevlerinden biri kümelenmedir. Bu kümelenme yaklaşımına “güdümsüz öğrenme” de denilmektedir. Yöntem, benzer girdileri birbirinden ayıran ortak özellikleri tanımlar. Pekiştirmeli öğrenmede ise, en uygun çözüm sistem tarafından önceden bilinmez. Sistem, iterasyonlarla çözümlerini geliştirir. Yanlış adımlar cezalandırılır ve doğru adımlar ödüllendirilir. Böylece, sistemin karmaşık etkileri göz önünde bulundurularak tepki vermesi mümkündür. Sonuç olarak, sistem özerk bir şekilde kendi çözümlerini üretebilir [78].

Bu çalışmada seçilen yöntem problemimize uygunluğu açısından gözetimli öğrenme tekniğidir. Gözetimli öğrenme tekniklerinden olan regresyon metodu kullanılmıştır. Regresyon tahmin modelinin amacı, bağımsız (açıklayıcı) değişkenler ile bağımlı değişkendeki (cevap değişkeni) toplam değişimin açıklanmasını sağlamaktır.

Bu çalışma kapsamında, literatürde mevcut deney verileri kullanılarak çok değişkenli regresyon tahmin modeli oluşturulmuş ve İTÜ bünyesinde yapılan deneyler ile karşılaştırılmıştır. Aynı model, yeraltı kömür gazlaştırma prosesinde kömür geometrik özelliklerinin ve beslenmesi gereken oksijen miktarının araştırılmasında kullanılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

6.2 Modelin Geliştirilmesi ve Yapılan Kabuller

Regresyon modeli, bir bağımlı değişken (cevap değişkeni) ile bir veya daha fazla bağımsız değişken (açıklayıcı değişken) arasındaki ilişkiyi bulmak için yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir methodtur. Çizelge 6.1’de gösterilen tüm deneysel veri noktaları oksijen gazlaştırma aşamasından seçilmiş ve ürün gazlarını ($\%CO_2$, $\%CO$, $\%H_2$) tahmin etmek için kömür geometrik parametrelerine, kömürün fiziksel özelliklerine ve oksijen besleme debisine dayalı tahmin denklemi geliştirilmiştir. Modelin geliştirilmesinde kullanılan deneysel veriler, zamana bağlı etkiler ihmal edilmiş ve model girdisi olarak sadece kararlı (denge durumundaki) veri noktaları dikkate alınmıştır.

Modelin basitliği ve kolay kullanımı için çok değişkenli doğrusal regresyon metodu seçilmiştir. Denklem 6.1’de çok değişkenli doğrusal bir denklemin en genel hali verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Modelde kullanılan deneysel veriler.

Uzunluk (cm)	Yükseklik (cm)	Genişlik(cm)	Oksijen Debisi (m ³ /h)	Sabit Karbon %	Nem %	Uçucu %	Kül %	CO ₂ %	CO %	H ₂ %	Referans
45.00	24.00	20.00	0.03	47.00	4.00	42.00	4.00	68.50	8.90	9.10	[80]
45.00	24.00	20.00	0.01	47.00	4.00	42.00	4.00	63.20	7.40	7.80	[80]
45.00	24.00	20.00	0.01	47.00	4.00	42.00	4.00	73.70	8.60	6.80	[80]
45.00	24.00	20.00	0.03	38.00	1.00	19.00	42.00	65.00	9.00	10.80	[80]
45.00	24.00	20.00	0.03	38.00	1.00	19.00	42.00	61.00	11.70	10.80	[80]
45.00	24.00	20.00	0.03	38.00	1.00	19.00	42.00	57.00	10.50	9.45	[80]
350.00	40.00	40.00	5.00	19.72	45.64	25.78	8.86	88.10	2.40	5.70	[81]
350.00	40.00	40.00	4.60	19.72	45.64	25.78	8.86	75.50	4.10	13.90	[81]
350.00	40.00	40.00	3.75	19.72	45.64	25.78	8.86	91.70	2.60	3.80	[81]
350.00	40.00	40.00	4.20	20.42	31.62	43.67	4.29	94.90	1.50	1.00	[81]
350.00	40.00	40.00	5.50	20.42	31.62	43.67	4.29	75.30	2.40	10.50	[81]
350.00	40.00	40.00	4.50	20.42	31.62	43.67	4.29	94.30	1.40	2.90	[81]
43.50	22.00	19.50	0.01	51.75	3.00	42.00	3.25	34.71	35.45	20.13	[82]
43.50	22.00	19.50	0.02	51.75	3.00	42.00	3.25	54.87	20.43	14.39	[82]
43.50	22.00	19.50	0.04	51.75	3.00	42.00	3.25	70.50	6.97	11.30	[82]
43.50	22.00	19.50	0.05	51.75	3.00	42.00	3.25	77.32	5.19	8.11	[82]
43.50	22.00	19.50	0.06	51.75	3.00	42.00	3.25	76.47	6.25	9.17	[82]
570.00	80.00	80.00	5.00	24.30	46.52	26.00	3.18	45.00	16.00	32.00	[83]
250.00	70.00	70.00	4.50	18.64	53.00	23.39	4.70	64.90	7.00	16.10	[28]
250.00	70.00	70.00	4.55	18.64	53.00	23.39	4.70	54.00	9.90	26.40	[28]
24.00	10.50	17.50	0.06	46.43	0.00	32.14	21.43	46.87	23.50	8.51	[84]
24.00	10.50	17.50	0.08	46.43	0.00	32.14	21.43	37.28	30.91	8.84	[84]
24.00	10.50	17.50	0.09	46.43	0.00	32.14	21.43	38.48	29.47	9.66	[84]
24.00	10.50	17.50	0.03	52.75	0.00	36.26	10.99	44.92	22.08	6.18	[84]
24.00	10.50	17.50	0.05	52.75	0.00	36.26	10.99	46.06	26.47	8.48	[84]
24.00	10.50	17.50	0.06	52.75	0.00	36.26	10.99	27.92	30.23	10.95	[84]
24.00	10.50	17.50	0.08	52.75	0.00	36.26	10.99	31.94	32.29	10.26	[84]
24.00	10.50	17.50	0.06	42.55	0.00	51.08	6.38	24.50	20.44	4.99	[84]
24.00	10.50	17.50	0.06	42.55	0.00	51.08	6.38	31.09	20.73	4.99	[84]
350.00	40.00	40.00	1.50	53.54	3.88	27.79	14.79	33.90	28.40	26.30	[85]
350.00	40.00	40.00	3.00	53.54	3.88	27.79	14.79	36.60	27.00	32.10	[85]
250.00	70.00	70.00	4.50	18.64	53.00	23.39	4.70	63.60	6.20	19.20	[28]
250.00	45.00	45.00	2.50	63.9	1.6	32.4	2.2	27.90	33.20	31.50	[28]

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_{ij} \quad (6.1)$$

$i = 1, 2, \dots, n$ $j = 1, 2, \dots, k$

Y_i : Bağımlı değişkeninin gözlenen i 'inci değerini ifade eder.

X_{ij} : j 'inci bağımsız değişkenin i 'inci düzeyindeki değerini ifade eder.

β_j : j 'inci regresyon katsayısını ifade eder.

ε_{ij} : Hatayı ifade eder.

K : Bağımsız değişken sayısını ifade eder.

Yukarıda bahsedilen β katsayılarının belirlenmesi için literatürde cost function olarak anılan hatayı en aza indirmeyi sağlayan katsayıları bulmak için en küçük kareler metodu kullanılmaktadır. En küçük kareler metodu tahmin edilen değerle gerçek değer arasındaki farkı en aza indirmede yararlanır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak çoklu regresyon modelindeki regresyon katsayısının tahminleri yapılır.

Denklem 6.1 tahmin için kullanıldığında denklem 6.2 ile tahmin değeri hesaplanır.

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} ; i=1,2,\dots,n \quad (6.2)$$

Y_i değeri ile tahmin edilen $\hat{Y}_i$ değeri arasındaki mesafelerin karelerinin toplamının en düşük olduğu zamana kadar yukarıdaki iterasyon devam eder. Artık hata değerinin değişmediği durumdaki katsayılar ile regresyon doğrusu belirlenmiş olur.

Gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki farka hata denir. Hata sıfır olduğunda gerçek ile tahmin edilen değerler üst üste örtüşür. Bu durumda regresyon eğrisi üzerinde gerçek noktalar tamamen oturmuş olur. Ama gerçekte bu hiçbir zaman mümkün değildir.

6.2.1 Tahmin modeli denkleminin hassasiyetinin ölçülmesi

Elde edilen regresyon tahmin doğrusunun tahmin etme yeteneğini ölçmek için R^2 ve standart hata olarak anılan istatistiksel analiz metodu uygulanır. Bunun için gerçek ile tahmin değerler arasındaki hataların karesi (HKT) ile gerçek değerlerin ortalaması alınarak elde edilen doğrunun gerçek değerlerle arasındaki fark (FKT) birbirleri ile karşılaştırılır.

$$R^2 = 1 - (HKT/FKT) \quad (6.3)$$

Gerçek ile tahmin değerler arasındaki hataların karesi (HKT) aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\text{Hata Kareler Toplamı (HKT)} = \text{TOPLAM } (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6.4)$$

Gerçek değerlerin oluşturduğu ortalama değeri ile elde edilen doğruya olan farkı aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$\text{Fark Kareler Toplamı (FKT)} = \text{TOPLAM } (y_i - \bar{y})^2 \quad (6.5)$$

Regresyon katsayıları hesaplanıp regresyon tahmin modeli kurulduktan sonra belirlilik katsayısı olan R^2 yukarıdaki HKT ve FKT kullanılarak hesaplanır. Bu sayede katsayıların anlamlılığı, modelin uygunluğu gözlemlenecektir.

R^2 değerinin yüksek olması regresyon modelinin iyi uyum sağladığını gösterir. R^2 , 0 ile 1 arasında değer alabilir ve bu değer 1'e yakın olması denklemin tutarlı olduğunu gösterir. R^2 'nin 1 olması mümkün olmadığından, regresyon analizinde kullanılan bir diğer önemli gösterge ise standart hatadır. Standart hata aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{Standart Hata} = \sqrt{\frac{\text{HKT}}{N-M}} \quad (6.6)$$

N: Örnek veri sayısı

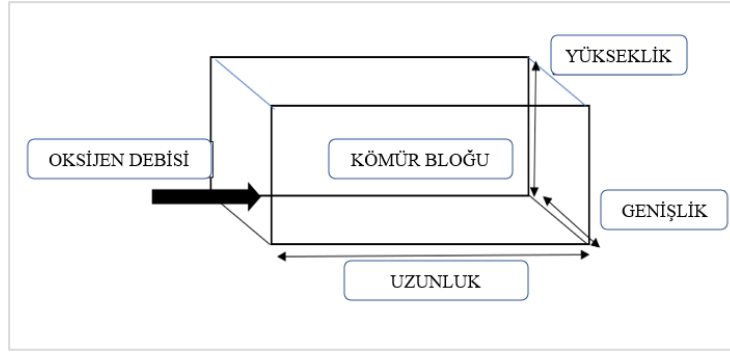
M: Bağımsız değişken sayısı

Yukarıda anlatılan denklemler çerçevesinde, literatürde var olan deneysel veriler kullanılarak çok değişkenli regresyon tahmin modeli geliştirilmiştir.

6.2.2 Tahmin modeli denklemleri

Çok değişkenli doğrusal regresyon metodunu Çizelge 6.1'de belirtilen literatürdeki deney verileri kullanılarak tahmin modeli denklemleri elde edilecektir.

Çok değişkenli doğrusal regresyon denkleminin bağımsız değişkenleri şunlardır: kömür fiziksel özellikleri (sabit karbon, nem, uçucu, kül), kömür bloğu geometrisi ve oksijen besleme debisidir. Burada regresyon denkleminin fonksiyonu sentez gaz içerikleri olacaktır. Böylece yukarıda açıklandığı gibi çok değişkenli regresyon tahmin modeli geliştirilmiş olacaktır. Buradan tahmin edilmesi istenen her bir sentez gaz içeriği için ayrı bir denklem bulunmuş olacaktır. Şekil 6.3'te ilk modelde ele alınan bağımsız değişkenler gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : Bağımsız değişkenlerin gösterimi.

6.3 Kömür Geometrisi ve Oksijen Besleme Debisine Bağlı Tahmin Modeli

Çizelge 6.1’de gösterilen veriler ışığında % CO₂, %CO ve %H₂’yi tahmin eden denklemler aşağıda verilmiştir. Denklemlerin formu denklem 6.7’deki gibidir.

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} ; i=1,2,\dots,n \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \%CO_2 = & 202.19 + 0.04 * \text{Uzunluk} + 1.3 * \text{Yükseklik} - 2.75 * \text{Genişlik} + 52.99 * \\ & (\text{Uzunluk/Yükseklik}) - 57.66 * (\text{Uzunluk/Genişlik}) - 105.26 * (\text{Genişlik /} \\ & \text{Yükseklik}) + 15.36 * \text{Oksijen Debisi} \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} \%H_2 = & -42.21 - 0.01 * \text{Uzunluk} - 0.95 * \text{Yükseklik} + 1.7 * \text{Genişlik} - 29.1 * \\ & (\text{Uzunluk/Yükseklik}) + 31.2 * (\text{Uzunluk/Genişlik}) + 33.01 * (\text{Genişlik/} \\ & \text{Yükseklik}) - 5.88 * \text{Oksijen Debisi} \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} \%CO = & -82.24 - 0.03 * \text{Uzunluk} - 1.27 * \text{Yükseklik} + 1.94 * \text{Genişlik} - 45.95 * \\ & (\text{Uzunluk/Yükseklik}) + 49.56 * (\text{Uzunluk/Genişlik}) + 75.97 * (\text{Genişlik/} \\ & \text{Yükseklik}) - 7.81 * \text{Oksijen Debisi} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Denklem 6.8, 6.9 ve 6.10’da YKG prosesi çıkışındaki %CO₂, %H₂ ve %CO oranını girdiler ışığında tahmin eden denklemler verilmiştir.

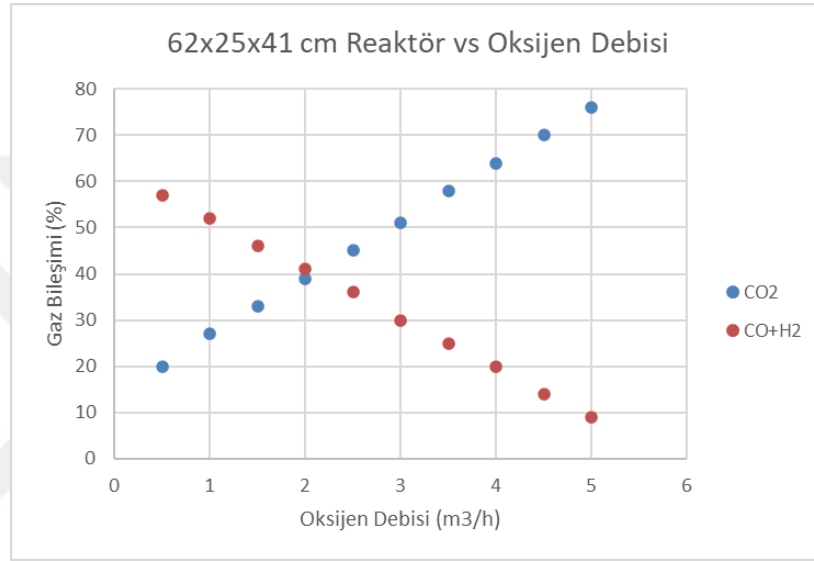
Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi, tahmin denklemleri kömür damarı uzunluğu (cm), yükseklik (cm), genişlik (cm), uzunluk/yükseklik, uzunluk/genişlik, genişlik/yükseklik ve oksijen besleme debisi (m³/h) olmak üzere yedi değişkene bağlıdır.

Verilen denklemlerin R² ve Standart hatası Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

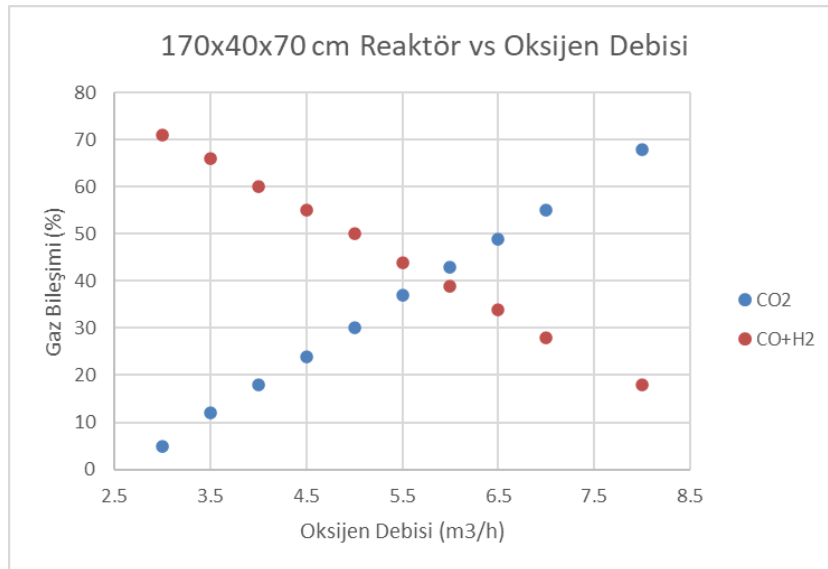
Çizelge 6.2 : Denklemlerin R² ve standart hatası.

Denklem	R ² %	Standard Hata %
%CO ₂	68.3	13.4
%H ₂	60	6
%CO	63	8

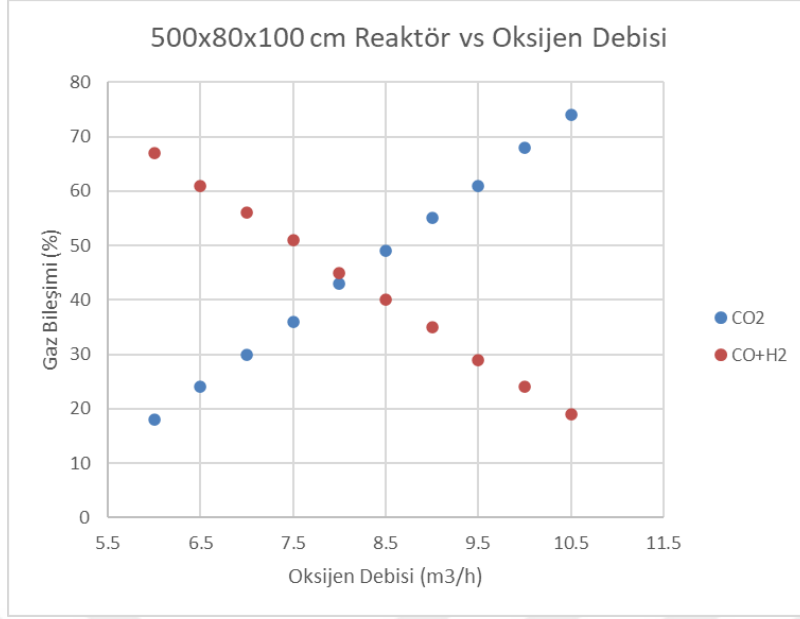
Bu tahmin denklemleri, sabit karbon, uçucu madde, nem ve kül içeriği gibi kömürün karakteristik özelliklerini ihmal etse de R^2 beklenenden yüksektir ve bu, kömürün geometrik özelliklerinin ortaya çıkan sentez gazı ve beslenmesi gereken oksijen miktarı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu denklemlerin bir başka yararı, belirli bir oksijen besleme debisi ve kömür geometrisi için gaz bileşimini tahmin edebilmesidir. Sonuçların tutarlılığını anlamak için farklı kömür blokları ile (uzunluk x yükseklik x genişlik) bazı duyarlılık çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6).



Şekil 6.4 : 62x25x41 cm kömür bloğu için oksijen besleme debisi ve sentez gazı bileşimi.



Şekil 6.5 : 170x40x70 cm kömür bloğu için oksijen besleme debisi ve sentez gazı bileşimi.



Şekil 6.6 : 500x80x100 cm kömür bloğu için oksijen besleme debisi ve sentez gazı bileşimi.

Sonuçlar beklenen eğilimi göstermiştir. Daha büyük kömür blokları, aynı oranda ürün gazı elde etmek için daha fazla oksijene ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, yanma reaksiyonlarının gazlaştırma reaksiyonlarına baskın olmasına yol açtığı için oksijen besleme debisinin artışı ile %CO₂'nin artması da mantıklıdır. Bu denklemi kullanmanın bir başka yolu, endotermik gazlaştırma reaksiyonlarını başlatmak için gerekli sıcaklıkları elde etmek için kömür gazlaştırma işleminin başlangıcında yanma reaksiyonlarını tetikleyen oksijen besleme debisinin belirlenmesi de olabilir. Gerçekleştirilen ilk analiz, denklemin formunun doğru eğilimde olduğunu göstermiştir.

6.4 Kömür Geometrisine, Oksijen Besleme Debisine ve Kömür Fiziksel Özelliklerine Bağlı Tahmin Modeli

Bölüm 6.3'te olan birinci tahmin modelinde sabit karbon, nem, uçucu ve kül gibi kömürün fiziksel özellikleri dahil edilmemişti. Bu özellikler dahil edilerek ikinci tahmin modeli geliştirilmiş ve birinci tahmin modeli ile karşılaştırılmıştır. YKG prosesi neticesinde ortaya çıkan % CO₂, %CO ve %H₂'yi tahmin eden denklemler bu model için aşağıda denklem 6.11'de gösterilen formatta verilmiştir.

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} ; i=1,2,\dots,n \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} \%CO_2 = & 515.77 + 0.05 * \text{Uzunluk} + 1.63 * \text{Yükseklik} - 3.14 * \text{Genişlik} + 79.01 * \\ & (\text{Uzunluk/Yükseklik}) - 82.19 * (\text{Uzunluk/Genişlik}) - 133.52 * (\text{Genişlik/} \\ & \text{Yükseklik}) + 7.54 * \text{Oksijen Debisi} - 3.05 * \text{Sabit karbon} - 2.71 * \text{Uçucu} - \\ & 2.26 * \text{Nem} - 2.79 * \text{Kül} \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} \%H_2 = & -196.2 + 0.001 * \text{Uzunluk} - 1.31 * \text{Yükseklik} + 1.86 * \text{Genişlik} - 41.47 * \\ & (\text{Uzunluk/Yükseklik}) + 41.87 * (\text{Uzunluk/Genişlik}) + 42.64 * (\text{Genişlik/} \\ & \text{Yükseklik}) - 0.47 * \text{Oksijen Debisi} + 1.82 * \text{Sabit karbon} + 1.20 * \text{Uçucu} + \\ & 1.30 * \text{Nem} + 1.37 * \text{Kül} \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \%CO = & -296.85 - 0.02 * \text{Uzunluk} - 1.71 * \text{Yükseklik} + 2.13 * \text{Genişlik} - 57.37 * \\ & (\text{Uzunluk/Yükseklik}) + 59.19 * (\text{Uzunluk/Genişlik}) + 82.62 * (\text{Genişlik/} \\ & \text{Yükseklik}) - 2.76 * \text{Oksijen Debisi} + 2.49 * \text{Sabit karbon} + 1.83 * \text{Uçucu} + \\ & 2.01 * \text{Nem} + 1.97 * \text{Kül} \end{aligned} \quad (6.14)$$

Denklem 6.12, 6.13 ve 6.14'te YKG prosesi çıkışındaki %CO₂, %H₂ ve %CO oranını girdiler ışığında tahmin eden denklemler verilmiştir.

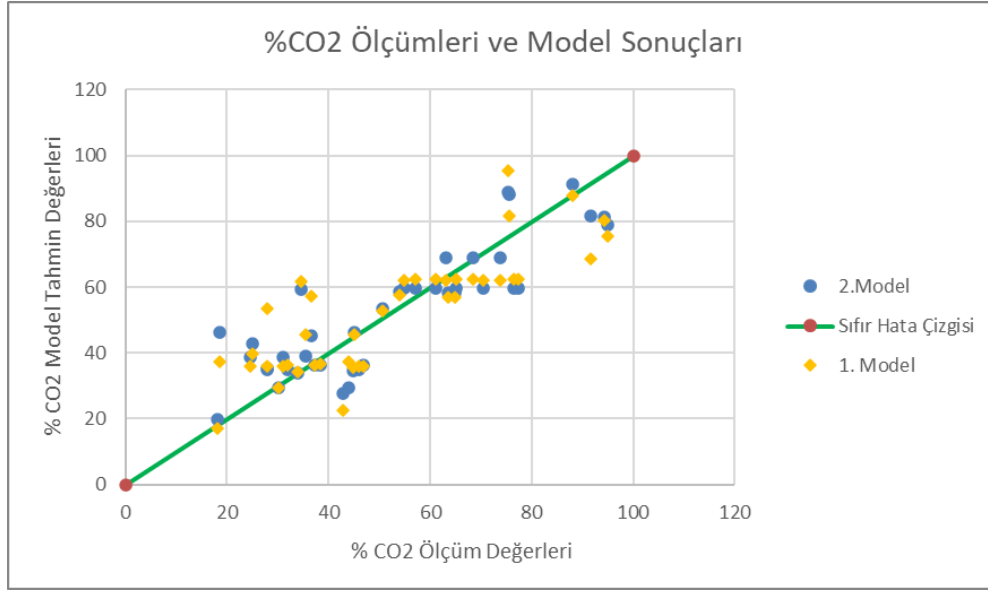
Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi, tahmin denklemleri kömür damarı uzunluğu (cm), yükseklik (cm), genişlik (cm), uzunluk/yükseklik, uzunluk/genişlik, genişlik/yükseklik, oksijen besleme debisi (m³/h), sabit karbon, nem, uçucu ve kül oranı(%), olmak üzere 11 değişkene bağlıdır.

Tekrardan belirtmek gerekirse, ikinci denklem takımından birinci denklem takımına olan tek değişim kömür fiziksel özelliklerinin eklenmiş olmasıdır. Modeller arasındaki R² ve standart hata kıyaslaması Çizelge 6.3'te verilmiştir.

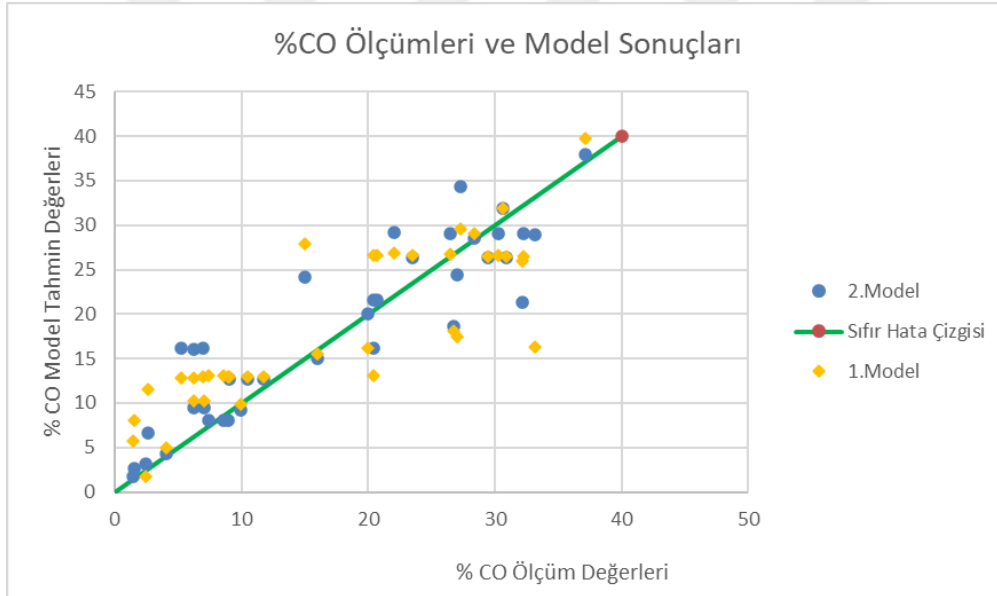
Çizelge 6.3 : Modellerin R² ve standart hata kıyaslaması.

Denklem	1. Model		2. Model	
	R ² %	Standard Hata %	R ² %	Standard Hata %
CO ₂	68.3	13.4	74	12.7
H ₂	60	6	77.5	4.6
CO	63	8	73.2	7

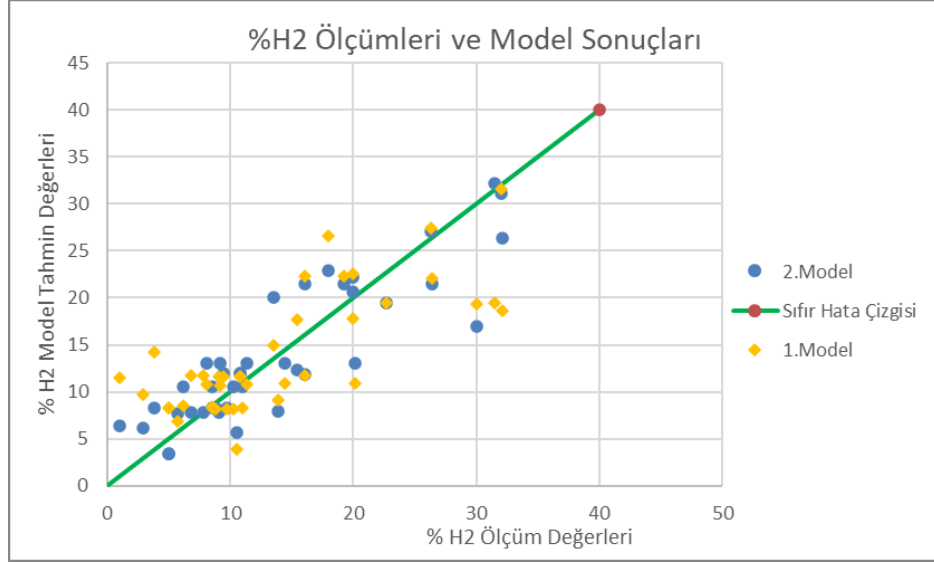
Tahmin modeline kömür karakteristik özelliklerinin eklenmiş olması, R² ve standart hatayı pozitif yönde geliştirmiştir. Aralarında en göze çarpan iyileştirme H₂ tahmin denkleminde olmuştur. Bunun en önemli sebebinin tahmin denklemine nemin eklenmiş olması düşünülmektedir. Nemin uygun sıcaklıklarda H₂ üretimine birinci derecede katkı yaptığı bilinmektedir. Şekil 6.7, 6.8 ve 6.9'da bu iki modelin regresyon eğrisine olan uzaklıkları karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.7 : %CO₂ için 1. ve 2. Tahmin modelinin regresyon eğrisine göre kıyası.



Şekil 6.8 : %CO için 1. ve 2. Tahmin modelinin regresyon eğrisine göre kıyası.



Şekil 6.9 : %H₂ için 1. ve 2. Tahmin modelinin regresyon eğrisine göre kıyası.

Şekil 6.7, 6.8 ve 6.9'daki sonuçlar incelendiğinde ikinci modelin birinci modele göre regresyon eğrisine daha yakın ve düzenli olarak dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, ikinci modelin birinci modele göre daha üstün olduğunu kanıtlamaktadır. İkinci modelde kömür fiziksel özelliklerinin de kullanılması denklemin fizikselliğini ve geçerliliğini daha iyi hale getirmiştir.

6.5 Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırma

Doğrulama çalışması için Malkara/Pirinççeşme linyiti ile gerçekleştirilen deneysel YKG çalışmasının sonuçları kullanılmıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Fakültesi'nde kurulan YKG deney düzeneğinden toplam beş deney kullanılmıştır. Bunlardan üç tanesi küçük reaktör (küçük kömür blokları) ve iki tanesi büyük reaktör (büyük kömür blokları) ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerin detayları ve kurulum bölüm dört'te verilmiştir. Çizelge 6.4'te kömür blok geometrisi, oksijen besleme debisi ve ortaya çıkan ürün gazları verilmiştir.

Çizelge 6.4 : İTÜ deneysel verilerinin özeti.

Deney No	Uzunluk(cm)	Genişlik(cm)	Yükseklik(cm)	O ₂ Debisi(m ³ /h)	%CO	%H ₂	%CO ₂
KL010S2	62	41	25	2.2	30.6	22.7	30.1
KL111Z5	52	38	22	1.6	37.1	20	18.2
KL111Z5	52	38	22	2.9	27.3	13.5	44
KL011Z6	52	34	25	2	26.7	16.1	50.6
KL011Z6	52	34	25	1	32.2	15.4	35
BL111Z1	105	50	35	2	35	30	25
BL111K2	170	70	40	5	20	20	40

Çizelge 6.4'te verilen deneysel sonuçlar saf oksijen ile gazlaştırma aşamasından elde edilmiştir. Tahmin denklemli, Çizelge 6.4'te sağlanan girdilere dayalı olarak gaz bileşimini tahmin etmek için kullanılmıştır. Karşılaştırılan sonuçlar Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Deneysel sonuçlar ve model sonuçlarının kıyaslanması.

Deney No	Deney Sonuçları			Tahmin Modeli Sonuçları		
	%CO	%H ₂	%CO ₂	%CO	%H ₂	%CO ₂
KL010S2	30.6	22.7	30.1	32	19	30
KL111Z5	37.1	20	18.2	40	23	17
KL111Z5	27.3	13.5	44	30	15	37
KL011Z6	26.7	16.1	50.6	18	12	53
KL011Z6	32.2	15.4	35	30	21	30
BL111Z1	35	30	25	26	22	32
BL111K2	20	20	40	16	18	46

Tahmin modeli, deneysel veriler ile karşılaştırılabilir sonuçlar üretmiştir. Model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki farklar, tahmin denkleminin hata bandı içindedir.

YKG'deki en büyük zorluklardan biri, belirli bir kömür bloğu için yüksek kalitede ürün gazı üretecek oksijen tedarik oranını belirlemektir. Tahmin modeli denklemleri, kömür geometrisini, kesit alanını (genişlik x yükseklik) ve oksijen besleme debisini optimize etmeye yardımcı olacaktır. Model, İTÜ deneysel verileriyle doğrulandıktan sonra, kömür geometrik oranlarının (Uzunluk/Yükseklik, Uzunluk/Genişlik veya Genişlik/Yükseklik) YKG performansını nasıl etkilediğini anlamak için bir dizi optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

6.6 Tahmin Modeli Kullanılarak Reaktör Geometrisinin Optimizasyonu

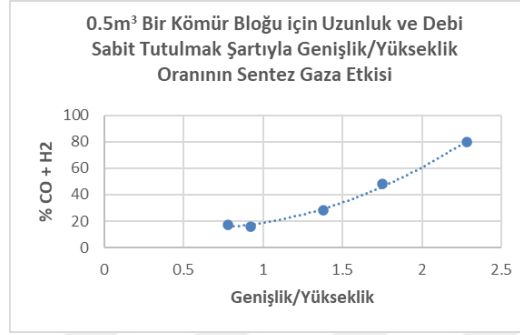
Geliştirilen regresyon modeli ile, %CO₂, %CO ve %H₂ için tahmin denklemleri ortaya konmuştur. Denklemler, İTÜ'de yapılan deneysel çalışmalarla test edilmiş ve sonuçların karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur.

Bu kısımda, % CO+H₂ hedef sentez gazı bileşimi için hangi kömür geometrik özelliğinin beslenen oksijen debisi üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu anlamak için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Geometrik oranların değişkenliğini anlamak için bazı kısıtlar uygulanarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon çalışmalarının tamamı 0,5 m³ kömür hacmi ve 4m³/h sabit oksijen besleme debisi altında gerçekleştirilmiştir. Bu

değerler rastgele seçilmiştir. Sırasıyla sabit uzunluk ve sabit yükseklik olmak koşuluyla genişlik/yükseklik oranı ile uzunluk/genişlik oranının ürün gazına etkisi araştırılmış ve sonuçları tartışılmıştır.

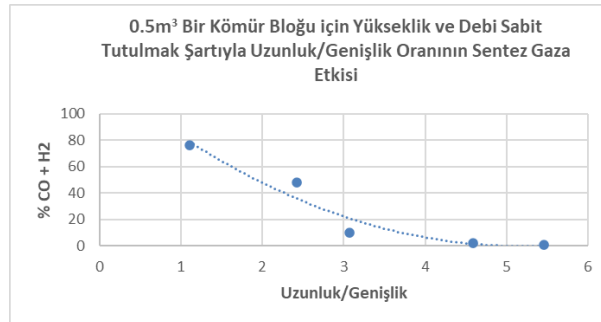
Birinci duyarlılık çalışması sabit uzunluk kısıtıyla gerçekleştirilmiştir. Kömür genişlik/yükseklik oranı değişken olarak seçilip aynı kömür hacmini verecek şekilde değiştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10 : % CO+H₂'ye Genişlik/Yükseklik oranının etkisi.

Şekil 6.10'da yukarıda belirtilen kabuller ile genişlik/yükseklik artışının sentez gazı üretimi için uygun olduğunu göstermiştir. Kömür damarındaki gazlaşma oyuğunun büyüme yönü ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yeraltı kömür gazlaştırma sırasında gazlaşma oyuğu oluşumu yüksekliğine doğrudur ve yerçekimi kuvvetleri nedeniyle sıcak hava aynı şekilde hareket etme eğilimindedir, bu da kömür damarının büyük bir kısmının yeterli gazlaştırma sıcaklıklarına ulaşmasını engeller, bu nedenle daha geniş bir kömür bloğu seçimi, daha düzenli bir gazlaşma oyuğu oluşumuna ve dolayısıyla gazlaşma için uygun sıcaklık dağılımına yardımcı olur.

İkinci optimizasyon çalışması sabit yükseklik kısıtıyla gerçekleştirilmiştir. Kömür uzunluk/genişlik oranı değişken olarak seçilip aynı kömür hacmini verecek şekilde değiştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11 : % CO+H₂'ye Uzunluk/Genişlik oranının etkisi.

Artan uzunluk/genişlik oranı ile sentez gazındaki O_2+H_2 oranının azalma eğiliminde olduğunu ve YKG performansını azalttığını göstermektedir. Bu durumun sıcaklık bölgeleri ile ilişkili olduğu düşünülmektedir, çünkü daha uzun kömür blokları, daha fazla maruz kalan nem içeriği nedeniyle daha kısa kömür bloklarına göre gerekli gazlaştırma sıcaklıklarına ulaşmayı zorlaştırır ve bu da sıcaklık alanını olumsuz etkiler. Bunun sonucunda endotermik olan gazlaştırma reaksiyonlarında azalma meydana gelmektedir. Endotermik olan gazlaştırma reaksiyonlarını tekrardan aktif hale getirmek için gerekli sıcaklık uzun kömür blokları için ancak beslenen oksijen debisini arttırmakla mümkün olacağı düşünülmektedir.

Kömür bloğu kesit alanının ve uzunluğunun gazlaştırma performansına etkisi olduğu düşünülmektedir. Dikdörtgen bir kesit alanının kare bir kesit alanına kıyasla, ürün gazı bileşimi ve genel gazlaştırma performansı açısından daha uygun olacağı belirlenmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yeraltında Kömür Gaşlaştırma (YKG) teknolojisinin yerli kömürlerimize uygulanması için deneysel ve teorik çalışmalar yürütölmüştür. Bu çalışma için sunulan 1003-113M038 sayılı projesi TUBİTAK-ARDEB tarafından desteklenmiştir.

Deneysel çalışmalar için, laboratuvar ölçekli bir YKG deney düzeneği tasarımı ve imalatı yapılarak İTÜ Makine Faköltesinde kurulmuştur. Deneylerde Pirinççesme-Malkara-Tekirdağ linyit kömür yataklarından alınan örnekler kullanılmıştır. Kömür tedariki ve kömür yatağı (damarı) çalışmalarında Uysal Madencilik şirketi ile yoğun bir iş birliği içinde bulunulmuştur.

Labaratuvar ortamında YKG simölasyonları için iki farklı ölçekte reaktör tasarlanmıştır. Bunlardan ilki, küçük reaktör, 67 cm x 65,5 cm x 81,5 cm (genişlik x yükseklik x uzunluk) büyüklüğündedir, büyük reaktör 101 cm x 65,5 cm x 200 cm büyüklüğündedir.

Deneysel çalışmalar boyunca dokuz adet başarılı laboratuvar ölçekli deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin yedi tanesi küçük ölçekli reaktörde son iki tanesi ise büyük ölçekli reaktörde gerçekleşmiştir. Deneylerde gazlaştırıcı gaz olarak, hava, saf oksijen, hava-oksijen ve oksijen - su buharı karışımı kullanılmıştır.

Deneylerde üretilen sentez gazının yanıcı gaz içeriği toplamda % 40 - %60 oranında CO, H₂ ve CH₄ gazlarından meydana gelmiştir.

Yerli kömürlerin yüksek oranda nemli olması ve uçucu içerikli olması gazlaşma için bir avantaj olduğu deneylerden ortaya çıkmıştır.

Yalnızca hava kullanımıyla gazlaştırma mümkün olmamıştır. Bu nedenle, uygulanan oksijenle zenginleştirilmiş hava (Hava ve oksijen karışımı) beslemesi testlerinde, hava/oksijen oranları olarak 3:1, 2:1, 1.5:1, 1:2, ve 1:1 denenmiş olup, 2:1 oranının en iyi sonuçları verdiği görölmüştür. Bu esnda ortalama %18 H₂, %19 CO üretilmiş olup ısı değeri 4.6 MJ/m³ olmuştur.

Saf oksijenle yapılan gazlaşmada ise genel olarak oldukça başarılı ve yüksek oranda sentez gazı üretilmiştir. Kömür içindeki nem içeriği %30 mertebelerine kadar olduğunda yüksek kaliteli sentez gazı elde edilmesi için avantajlı olduğu görülmüştür. Nemi düşük kömürlerin gazlaştırması için su buharı takviyesinin gerekli olmuştur. Deneylerimiz için uygun saf oksijen beslemesi debisi büyük reaktör için 3.0 - 3.5 m³/h ve küçük reaktör için 1 m³/saat olmuştur. Daha yüksek oksijen debileri kullanıldığında gazlaştırma yanmaya dönüşmektedir. Genel olarak, gazlaşmanın saf oksijen besleme fazında, sentez gazı içeriğinin %20 - %25 H₂, %30-35 CO aralığında bulunduğu, ortalama ısı değeri 5,14 MJ/m³ olmuştur. Sentez gazı debisi ortalama 5-15 m³/h aralığında ölçülmüştür.

Oksijen - su buharı karışımı ve kademeli (art arda) olarak gazlaştırma uygulandığında sentez gazında yüksek oranda saf hidrojen gazı üretilmiştir. Kademeli olarak yapılan gazlaşmanın oksijen fazında ortalama %15 CO ve %20 H₂ ve su buharı fazında ise H₂ içeriği %40 - %45 değerlere ulaştığı görülmüştür. Büyük reaktörde yapılan bu deneylerde oksijen fazında 3 m³/h ve su buharı fazında 5 m³/h debilerde besleme yapılmıştır. Sentez gazı üretimi ortalama 5 m³/h ve ısı değeri 6 MJ/m³ olmuştur. Oksijen - su buharı kademeli gazlaşmada özellikle saf oksijen besleme fazı su buharı beslemesi esnasında soğuyan kömür kütlesinin tekrar ısıtılması için gerekli olmuştur. Kademeli gazlaştırma için gazlaştırıcı gaz besleme süreleri ve debileri burada incelenen noktalar olmuştur.

Deneylerden, gazlaştırıcı gazların (oksijen, su buharı) besleme debilerinin gazlaştırma prosesi için çok önemli bir parametre olduğu, kömür yatağının boyutları ve kütlesine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Gazlaştırıcı besleme debilerinin teorik bir hesaplanması mümkün olmadığından, elde edilen deneysel veriler kullanılarak ve uygulama esnasında üretilen gaz bileşimi üzerinden sürekli olarak kontrolü gerekli olmuştur. Daha verimli gazlaştırma kavitesi kontrolü için ileriye dönük çalışmalarda CRIP metodu kullanılarak deneysel çalışmaların tekrarlanması önerilmektedir.

Yer altında kömür gazlaştırma (YKG) prosesi için sayısal bir model geliştirilmiştir. Sayısal model, ANSYS-FLUENT programı ile kömür içinde gazlaştırma reaksiyonları ve gaz akışlarını iki boyutlu, zamana bağlı olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tekniği ile modellenmiştir.

Deneyisel çalışmaların HAD simülasyonlarında, deneylerde üretilen sentez gazları (CO , CO_2 ve H_2) değerlerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

HAD analizlerinde, kömür sıcaklık dağılımları yanında kimyasal reaksiyon bölgeleri ve gaz bileşenlerin dağılımları zamana bağlı değişimleri gösterilmiştir. Bu sonuçlardan gazlaşmanın kömür içinde yerel olarak ve zamana göre nasıl gerçekleştiği izlenmiş ve kontrolü mümkün olmuştur.

YKG gazlaştırma reaktörlerinin boyutlandırılması ve gazlaşma proses ayarlarının belirlenmesi için Yapay Zekâ alt kollarından biri olan Makine Öğrenmesi ile çok değişkenli regresyon tahmin modeli geliştirilmiştir. MINITAB yazılımı kullanılarak geliştirilen bu model; CO_2 , CO ve H_2 'nin sentez gazı bileşimini kömür blok geometrisine, oksijen besleme debisine ve kömür karakteristik özelliklerine dayalı olarak çalışmaktadır. Burada geliştirilen Makine Öğrenmesi modelinde temel olarak buradaki deney verileri ve literatürde benzer çalışmaların sonuçları kullanılmıştır. Oluşturulan tahmin modeli ile kömürden hedeflenen sentez gazı bileşimi (CO , CO_2 ve H_2) için gazlaştırma reaktör boyutları, kömür özellikleri ve gazlaştırıcı gazın (oksijen) debisi ve cinsi belirlenmiştir. Bu model ile belirlenen reaktör tasarımları ve proses parametrelerinin başta İTÜ bünyesinde yapılan deneyler ve literatürdeki deneylerle karşılaştırılmış, sonuçların oldukça kabul edilebilir bir tolerans aralığında olduğu görülmüştür. Gelecekteki çalışmalarda daha fazla veri noktası kullanılarak çok değişkenli regresyon tahmin modelinin geliştirilmesi önerilmektedir.

İleriye dönük olarak bu çalışmadan elde edilen sonuçların saha uygulamasını görmek için özellikle Pirinççesme-Malkara-Tekirdağ linyit kömür yataklarından bir pilot YKG çalışması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Temiz Kömür Teknolojileri, s.30. (2010).
- [2] **Şahiner,M., Gençbay,B., Dinlen,İ.,** (2020), Madencilik Sektörüne Ait Temel Ekonomik Göstergeler, MTA Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, MTA, Ankara
- [3] **Aktan,M., Şimşek,O., Aydoğan,H., Tümöklü,İ., Uçar,N.,** (2020), Kömür (Linyit) Sektör Raporu, TKİ Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, TKİ, Ankara
- [4] Türkiye Elektrik İletim A.Ş., (2020), Faaliyet Raporu, TEİAŞ, Ankara
- [5] **Burton, E., Friedmann, S.J. ve Upadhye, R.** (2007). Best Practices in Underground Coal Gasification. Lawrence Livermore National Laboratory
- [6] **Friedmann, S. J., Burton, E. ve Upadhye, R.** (2006). LLNL Capabilities in Underground Coal Gasification, Lawrence Livermore National Laboratory, 1-11.
- [7] **Schrider, L.A., Pasini III, J.** (1973). Underground Gasification of Coal-Pilot Test, Hanna Wyoming, Fifth Synthetic Pipeline Gas Symp., Chicago
- [8] **Campbell, G.C., Brandenburg, C.F. Boyd, R.M.** (1974). Preliminary Evaluation of Underground Coal Gasification at Hanna Wyoming, U.S. Dep. Of Interior, Bureau of Mines Technical Progress Rept., TPR 82
- [9] **Fischer, D.D., Boysen, J.E., Gunn, R.D.** (1976). Energy Balance for the Second Underground Coal Gasification Experiment Hanna, Wyoming, Trans. SPE-AIME, Vol. 262.
- [10] **Bartke, T.C., Dockter, L., Sterner, T.E., Virgona, J.E., Wojdac, L.F.** (1978) Status Report on the Hanna III and Hanna IV UCG Experiments, Proc. of the Fourth Underground Coal Conversion Conference, Steaniboat.
- [11] **Bartke, T.C., Dockter, L., Sterner, T.E., Virgona, J.E.** (1978). Status of the Fourth UCG Experiment at Hanna Wyoming, SPE 7510, Presented at 53rd. Annual Fall Meeting of SPE-AIME, Houston.
- [12] **Moody, M.M.** (1978). Interpretations of Field Hydraulic Tests In Explosion-Fractured Coal: Hoe Creek, Site Characterization To Experiment No.1, Lawrence Livermore Laboratory, UCL-52438.

- [13] **Thorness, C.B., Cena, R.J. Aiman, W.R., Hill, R.W., Stephens, D.R.** (1978). Hoe Creek NO.2: UCG Experiment with Air and Oxygen /Steam Injection Periods, SPE 7512, presented at 53rd. Annual Fall Meeting of SPE-AIME, Houston.
- [14] **Hill, R.W., Thorness, C.B. Cena, R.J., Aiman, W.R., Stephens, D.R.** (1980), Results from the Third LLL UCG Experiment at Hoe Creek, Proc. of the Sixth Underground Coal Conversion Symp., Shangri-La.
- [15] **Thorness, C.B., Creighton, J.R.** (1983). Review of UCG Field Experiments at Hoe Creek, AIChE Symp. Series. 226, Vol.79.
- [16] **Burwell, E.L.** (1980). The Department of Energy Underground Coal Conversion Program, Accomplishments and Strategy, Proc. Sixth Underground Coal Conversion Symp., Afton.
- [17] **Hill, R.W., Thorness, C.B.** (1983). The Large Block Experiments in Underground Coal Gasification, AIChE Symp. Series, 226, Vol.79.
- [18] **Url-3** <<http://www.ucgassociation.org/index.php?option=comcontent&view=article&id=162&Itemid=413>> alındığı tarih, 10.04.2014.
- [19] **Moorhouse, J., Huot, M., McCulloch, M.** (2010). Underground Coal Gasification: Environmental Risks and Benefits, A Preliminary Review by the Pembina Institute, Canada.
- [20] **Url-4** <http://www.ai-ees.ca/media/6876/swan_hills.pdf>, alındığı tarih: 12.07.2014.
- [21] **Url-5** <<http://swanhills-synfuels.com/about-us/history/>>, alındığı tarih: 12.07.2014.
- [22] **Saliyeva, S.,** (2014), Economic Analysis of Underground Coal Gasification End Product Market: Australian Case Study. The 12th European Gasification Conference.
- [23] **Blinderman, M. S., Jones, R. M.** (2002). The Chinchilla IGCC Project to Date: Underground Coal Gasification and Environment, Gasification Technologies Conference, San Francisco, USA.
- [24] **Url-6** <<https://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/presentations/UCG-09-16-08.pdf>>, alındığı tarih: 13.08.2014.
- [25] **Glaser, R.R. ve Johnson, L.A.** (1986). Physical Simulation of Underground Coal Gasification in an Eastern Bituminous Coal. Proceedings of the Twelfth Annual Underground Coal Gasification Symposium. pp. 408-418.
- [26] **Liu, S., Wang, Y.Y., Zhao, K. ve Yang, N.** (2009). Enhanced-hydrogen gas production through underground gasification of lignite. *Mining Science and Technology*. Vol.19, pp 389-394.

- [27] **Daggupati, S., Mandapati, R.N., Mahajani, S.M., Ganesh, A., Mathur, D.K., Sharma, R.K. ve Aghalayam, P.** (2010). Laboratory Studies on Combustion Cavity Growth in Lignite Coal Blocks in the Context of Underground Coal Gasification, *Energy*. Vol.35, pp. 2374-2386.
- [28] **Stanczyk, K., Smolinski, A., Kapusta, K., Wiatowski, M., Swiadrowski, J., Kotyrba, A. ve Rogut, J.** (2010). Dynamic Experimental Simulation of Hydrogen Oriented Underground Gasification of Lignite. *Fuel*. Vol.89, pp.3307-3314.
- [29] **Stanczyk, K., Howaniec, N., Smolinski, A., Swiadrowski, J., Kapusta, K., Wiatowski, M., Grabowski, J. ve Rogut, J.** (2011). Gasification Of Lignite and Hard Coal With Air And Oxygen Enriched Air In A Pilot Scale Ex-Situ Reactor For Underground Gasification. *Fuel*. Vol.90, pp. 1953-1962.
- [30] **Hongtao, L., Feng, C., Xia, P., Kai, Y. ve Shuqin, L.** (2010). Method of Oxygen-Enriched Two-Stage Underground Coal Gasification. *Mining Size and Technology*. Vol.21, pp. 191-196.
- [31] **Kacur, J., Durdan, M., Laciak, M. ve Flegner, P.** (2014). Impact Analysis Of The Oxidant In The Process Of Underground Coal Gasification. *Measurement*. Vol.51, pp 147-155.
- [32] **Żogała, A.** (2014). Critical Analysis of Underground Coal Gasification Models. Part I: Equilibrium Models – Literary Studies, *Journal of Sustainable Mining*, 13(1), 22–28.
- [33] **Żogała, A.** (2014) Critical Analysis of Underground Coal Gasification Models, Part II: Kinetic and Computational Fluid Dynamics Models, *Journal of Sustainable Mining*, 13(1), 29–37.
- [34] **Yang, Y. ve Liu, S.** (2003). Numerical Simulation on Heat and Mass Transfer in the Process of Underground Coal Gasification, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, 44:5, 537-557.
- [35] **Shirazi, A.S., Mmbaga, J.P., Hayes, G. ve Hayes, R.E.** (2011). Modelling Cavity Growth during Underground Coal Gasification, Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Boston.
- [36] **Shirazi, A.S.** (2012). *CFD Simulation of Underground Coal Gasification*. University of Alberta, Department of Chemical and Materials Engineering, MSc Thesis.
- [37] **Yıldız, A.** (2015). *Yer Altı Kömür Gazlaştırma İçin Teorik Model Geliştirilmesi ve DeneySEL Çalışmalar İle Sonuçların Yorumlanması ve Karşılaştırılması*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [38] **Biezen, E.N.J., Bruining, J. & Molenaar, J.** (1995). An Integrated 3D Model for Underground Coal Gasification. SPS Annual Technical Conference & Exhibition held in Dallas. U.S.A., 22-25 Ekim

- [39] **Biezen, E.N.J.** (1996). *Modelling Underground Coal Gasification*. Delft University of Technology, Doktora Tezi
- [40] **Daggupati, S., Mandapati R.N., Mahajani, S.M., Ganesh, A., Pal, A.K., Sharma R.K., & Aghalayam, P.** (2011). Compartment Modeling for Flow Characterization of Underground Coal Gasification Cavity, *Ind. Eng. Chem. Res.* **50**, 277–290.
- [41] **Janoszek, T., Laczny, J.M., Stanczyk K., Smolinski A. & Wiatowski, M.** (2013). Modelling Of Gas Flow in The Underground Coal Gasification Process And Its Interactions With The Rock Environment, *Journal of Sustainable Mining*, ISSN 2300-3960, Vol. 12, No. 2, pp. 8–20, (2013).
- [42] **Park, K.Y. ve Edgar, T.F.** (1987). Modelling of Early Cavity Growth for Underground Coal Gasification. *Ind. Eng. Chem. Res.* **26**, 237–246.
- [43] **Perkins, G. ve Sahajwalla, V.** (2007). Modeling Of Heat and Mass Transport Phenomena And Chemical Reaction In Underground Coal Gasification. *Trans ChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, **85**(A3): 329–343.
- [44] **Seifi, M., Chen, Z. ve Abedi, J.** (2011). Numerical Simulation of Underground Coal Gasification Using the Crip Method, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* **89**, p1528-1535.
- [45] **Seifi, M., Chen, Z. ve Abedi, J.** (2014). Reaction Rate Constants in Simulation of Underground Coal Gasification Using Porous Medium Approach.
- [46] **Shirsat, V.A.** (1989) *Modelling of Cavity Growth in Underground Coal Gasification*. MSc Thesis.
- [47] **Yang, L.** (2004). Study on the Model Experiment and Numerical Simulation for Underground Coal Gasification, *Fuel*, **83**, 573–584.
- [48] **Yang, L.** (2005). Nonlinear Coupling Mathematical Models on Percolation-Patterned Underground Coal Gasification, *Int. J. Energy Res.* **29**:1331–1353.
- [49] **Krantz, W. B. ve Gunn, R.D.** (1983). Underground Coal Gasification: The state of the Art, AIChE Symposium Series 226, Vol. 79.
- [50] **Dossey, J. L.** (1976). Underground Coal Gasification Technology in the USSR, Sandia Laboratories, Albuquerque.
- [51] **Bhutto, W.A., Bazmi, A.A. ve Zahedi, G.** (2013). Underground Coal Gasification: From Fundamentals to Applications, *Progress in Energy and Combustion Science* **39** (2013) 189-214.
- [52] **Shirazi, A.S., Mmbaga, J.P., Hayes, G. ve Hayes, R.E.** (2011) Modelling Cavity Growth during Underground Coal Gasification. Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Boston.

- [53] **Zamzow, K.L.** (2010). Underground Coal Gasification. History, Environmental Issues, And the Proposed Project at Beluga, Alaska, Center for Science in Public Participation.
- [54] **Shafirovich, E. ve Varma, A.** (2009). Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, 7865-7875
- [55] **Bhutto, W. A., Bazmi, A. A. ve Zahedi, G.** (2013). Underground Coal Gasification: From Fundamentals to Applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 39 (2013) 189-214.
- [56] **U.S. Department of Energy,** (1978). Underground Coal Conversion Program, Volume III Resources, DOE/ET-0008/3, UC-90C, Washington, D.C.
- [57] **Mastalerz, M., Droloniak, A., Parke, M., Rupp, J.** (2011), Site Evaluation of Subsidence Risk, Hydrology and Characterization of Indiana Coals For UCG.
- [58] **Shackley, S., Mander, S. ve Reiche, A.** (2006). Public perceptions of underground coal gasification in the United Kingdom. *Energy Policy* 2006; 34(18), doi: 10.1016/j.enpol.2005.07.010
- [59] **Saliyeva, S.,** (2014), Economic Analysis of Underground Coal Gasification End Product Market: Australian Case Study. The 12th European Gasification Conference.
- [60] **Economic Commission for Europe Coal Committee,** (1976). Report of The Symposium on Gasification and Liquefaction of Coal, Düsseldorf.
- [61] **Shimada, S., Ohga, K., Tamari, A and Ishii, E.** (1995). Underground Coal Gasification-How Much Does It Cost? (Case Study in Japan) MinChem'95, The Fifth Symposium on Mining Chemistry İstanbul, Türkiye.
- [62] **Şengüler,İ.,** (2015), Kömür aramalarında prosesler ve sonuçlar: Türkiye’de linyit aramacılığının son on yılı, MTA 80.Yıl Sempozyumu, 01-03 Aralık 2015, MTA, Ankara
- [63] **Ünalın, G.,** (2010), Kömür Jeolojisi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi-41, Ankara.
- [64] **Lau, F., Miles, K.** (2011). Turkish Coal Characterization for EnerjiSA, Özel Rapor
- [65] **Tuncalı, E., Çiftçi, B., Yavuz, N., Toprak, S., Köker,A., Gencer, Z., Ayçık, H., Şahin, N.,** (2002). Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara
- [66] **Canbaz, E.Deniz.** (2018). *Laboratuvar Ölçekli Yer Altında Kömür Gazlaştırma Reaktörünün Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Yapay Gaz Üretiminin Analizi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.

- [67] **Kuyper, R. A., Van Der Meer, T. H., & Hoogendoorn, C. J.** (1994). Turbulent natural convection flow due to combined buoyancy forces during underground gasification of thin coal layers. *Chemical Engineering Science*, 49(6), 851–861. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(94\)80022-7](https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)80022-7)
- [68] **Khan, M., Mmbaga, J., Shirazi, A., Trivedi, J., Liu, Q., & Gupta, R.** (2015). Modelling Underground Coal Gasification—A Review. *Energies*, 8(11), 12603–12668. <https://doi.org/10.3390/en81112331>
- [69] **Launder, B. E., & Sharma, B. I.** (1974). Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1(2), 131–137. [https://doi.org/10.1016/0094-4548\(74\)90150-7](https://doi.org/10.1016/0094-4548(74)90150-7)
- [70] **Syamlal, M., & Bissett, L. A.** (1992). METC Gasifier Advanced Simulation (MGAS) model. Morgantown, WV. <https://doi.org/10.2172/10127635>
- [71] **ANSYS.** (2013). ANSYS FLUENT User's Guide. ANSYS FLUENT User's Guide (Vol. 15317). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [72] **Macak, J., & Malecha, J.** (1978). Mathematical Model for the Gasification of Coal under Pressure. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 17(1), 92–98. <https://doi.org/10.1021/i260065a017>
- [73] **Di Blasi, C., Buonanno, F., & Branca, C.** (1999). Reactivities of some biomass chars in air. *Carbon*, 37(8), 1227–1238. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00319-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00319-4)
- [74] **Ye, D. P., Agnew, J. B., & Zhang, D. K.** (1998). Gasification of a South Australian low-rank coal with carbon dioxide and steam: kinetics and reactivity studies. *Fuel*, 77(11), 1209–1219. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00014-3)
- [75] **Spalding, D. B.** (1971). Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. *Symposium (International) on Combustion*, 13(1), 649–657. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80067-X](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80067-X)
- [76] **Magnussen, B. F., & Hjertager, B. H.** (1977). On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 16(1), 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4)
- [77] **Incorporated, A.** (2013). ANSYS Fluent Theory Guide (Vol. 15317). [https://doi.org/10.1016/0140-3664\(87\)90311-2](https://doi.org/10.1016/0140-3664(87)90311-2)
- [78] **Aylak, Batin., Oral, Okan.,Yazıcı,Kubra.**(2020). Sentez Zekâ ve Makine Öğrenmesi Tekniklerinin Lojistik Sektöründe Kullanımı. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering* Vol: 8, No: 1, 2021 (74-93)

- [79] **Ölmez, H. Sait.** (2021). A Primer on Machine Learning (Sabancı University Executive Development Unit)
- [80] **Kumari, G., Vairakannu, P.,** (2018), CO₂-air based two stage gasification of low ash and high as Indian coals in the context of underground coal gasification, *Energy*, 143, 822-832
- [81] **Wiatowski, M., Kapusta, K., Stanczyk, K., Stanczyk, K.,** (2019), Efficiency assessment od underground gasification of orto-and meta-lignite: High-pressure ex situ experimental simulations, *Fuel*, 236, 221-227
- [82] **Kanta De, S., Prabu, V.,** (2017), Experimental studies on humidified/water influx O₂ gasification for enhanced hydrogen production in the context of underground coal gasification, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 14089-14102.
- [83] **Kapusta, K., Wiatowski, M., and Stańczyk, K.,** (2016), An experimental ex-situ study of the suitability of a high moisture ortho-lignite for underground coal gasification (UCG) process, *Fuel*, 179, 150–155
- [84] **Prabu, V., Jayanti, S.,** (2012), Laboratory scale studies on simulated underground coal gasification of high ash coals for carbon-neutral power generation, *Energy*, 46, 351-358
- [85] **Wiatowski, M., Kapusta, K., Ludwig-Pardala, M., Stanczyk, K.,** (2016), Ex-situ experimental simulation of hard coal underground gasification at elevated pressure, *Fuel*, 184, 401-408



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Oğuz BÜYÜKŞİRİN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2014, İTÜ, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı-Akışkan Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012-2015 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Gazlaştırma Laboratuvarları'nda çalıştı.
- 2015'ten itibaren General Electric Aerospace şirketinde çalışmaktadır.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Böke, Y.E., Okutan, H., Gür, M., Arısoy, A., Eskin, N., Dertli, H., Tunç İ., **Büyüksirin, O.**, Altıntaş, Ü., Yıldız, A. (2015) Design Of A Large Scale Laboratory Experimental Set Up For Underground Coal Gasification Of Turkish Lignites International Energy Raw Metarials and Energy Summit, 2015, İstanbul Türkiye
- Gur, M., Eskin, N., Okutan, H., Arısoy, A., Böke, E., Altıntaş, Ü., **Büyüksirin, O.**, Canbaz, E.D., Yıldırım, O. (2016) Experimental and Computational Studies on Underground Gasification of Turkish Lignite – 33rd Annual Inter. Pittsburg Coal Conference 8 Ağustos 2016, Güney Afrika

- Gür, M., Eskin, N., Okutan, H., Arısoy, A., Böke, Erhan., Altıntaş, Ü., Yıldız, A., **Büyüksirin, O.**, Yıldırım, O., Canbaz, E.D. (2016) Experimental Results of Underground Coal Gasification of Turkish Lignite in an Ex situ Reactor, 8. International Freiberg Conference Innovative Coal Value chains,12-16 Haziran 2016, Almanya
- Gur, M., Eskin, N., Okutan, H., Arısoy, A., Böke, E., Altıntaş, Ü., Yıldız, A., **Büyüksirin, O.**, Canbaz, E. D., Yıldırım, O. (2017) Experimental results of underground coal gasification of Turkish lignite in an ex-situ reactor, *FUEL*, Vol. 203, No. null, Ocak 2017, s. 997-1006, ISSN: 0016-2361
- **Büyüksirin, O.**, Gür, M. (2021) Investigation Of Coal Geometric Parameters In Underground Coal Gasification Reactor ULIBTK'21 Uluslararası Katılımlı 23. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 2021, Gaziantep

