

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI ÇEKİŞLİ AKIŞKAN YATAKLARDA
DÜŞÜK KALİTELİ LİNYİTLERİN
YANMASININ MODELLENMESİ

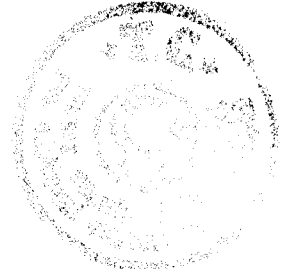
Mak. Yük. Müh. Ebru MANÇUHAN

F. B. E. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

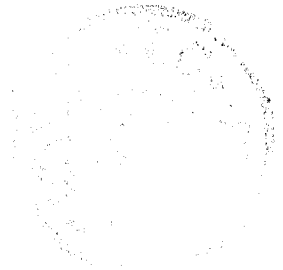
Tez Savunma Tarihi : 19.06.1997
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Eralp ÖZİL
Juri Üyeleri : Prof. Dr. Ekrem EKİNCİ
Prof. Dr. İsmail TEKE

İSTANBUL, 1997



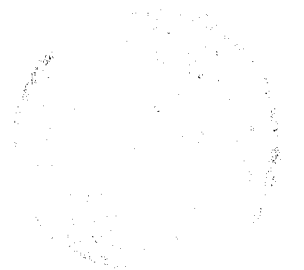
İçindekiler

İÇİNDEKİLER	i
SEMBOL LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
TEŞEKKÜR	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. GENEL BİLGİLER	6
2.1 Akışkan Yataklı Yakma Sistemleri	6
2.2 Akışkan Yatakta İşlevsel Bölgeler	8
2.3 Serbest Bölgenin Önemi	10
2.4 Akışkan Yataklı Yakma Sistemlerinin Sınıflandırılması	13
2.5 Akışkan Yatağın Avantaj ve Dezavantajları	15
2.6 Akışkan Yatağın Hidrodinamiği	18
2.6.1 Akışkanlaştırmayı Etkileyen Taneciklerin Sınıflandırılması	18
2.6.2 Akışkanlaştırma	19
2.6.3 Kabarcık ve Yoğun Faz Oluşumu	21
2.6.4 Kabarcık Büyüklüğü ve Yükselme Hızı	24
2.7 Akışkan Yataklarda Tanecik Hareketleri.....	24
2.7.1 Aktif Yatakta Tanecik Hareketleri.....	24
2.7.2 Serbest Bölgedeki Tanecik Hareketleri.....	25
2.7.2.1 Serbest Bölgeye Atılan Taneciklerin Kaynağı	27



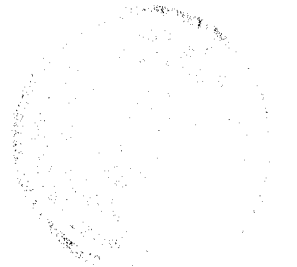
2.7.2.2 Taneciklerin Yatak Yüzeyinden Serbest Bölgeye Taşınması	28
2.7.2.3 Serbest Bölgeden Taneciklerin Taşınması	31
2.7.2.4 Serbest Bölgede Mevcut Taneciklerin Konsantrasyonları	32
2.7.2.5 Tek Boyutlu Tanecik Fırlatma Modeli.....	36
2.8 Yatakta Gerçekleşen Reaksiyonların Modelleri	39
2.8.1 Gaz-Katı Reaksiyonlarının Modellenmesi	39
2.8.2 Gaz-Gaz Reaksiyonlarının Modellenmesi	44
2.9 Akışkan Yataklarda Isı Geçişi Bağlılıları	45
2.9.1 Tanecik - Gaz Arasında Isı Transferi	46
2.9.2 Yatak - Yüzey Arasında Isı Transferi	48
2.9.3 Isı Transfer Katsayıları - Dizayn Arasındaki İlişkiler	49
BÖLÜM 3. LİTERATÜRDEKİ MODEL ÇALIŞMALARININ	
TANITILMASI	52
3.1 Genel model kabulleri	52
3.2 Literatürdeki model Çalışmaları.....	54
BÖLÜM 4. GERÇEKLEŞTİRİLEN MODEL.....	63
4.1 Giriş	63
4.2 Kütle ve Enerji Dengeleri	64
4.2.1 Katı Tanecikler İçin Yapılan Kütle Dengesi	65
4.2.1.1 Aktif Yatak Tanecik Modeli	72
4.2.1.2. Serbest Bölge Tanecik Modeli	74
4.2.2 Gaz Fazının Kütle Dengesi	79
4.2.2.1 Aktif Yatakta Faz Dengesi	80
4.2.2.2 Serbest Bölgede Faz Dengesi	88
4.2.3 Enerji Dengesi	90
4.2.3.1 Aktif Yatak İçin Enerji Dengesi	91
4.2.3.2 Serbest Bölge İçin Enerji Dengesi	97
4.3 Yanma Verimi.....	99
BÖLÜM 5.BİLGİSAYAR PROGRAMININ TANITILMASI	102
BÖLÜM 6. MODEL SONUÇLARININ TARTIŞILMASI	115

6.1 Pilot Ölçekli Yakıcının Özellikleri ve Deneysel Çalışma	115
6.2 Modelin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması	117
6.2.1 Yatağa Beslenen, KHYM ve Sürüklenen Yarı kok Taneciklerinin Boyut Dağılımı ve Ağırlık Kesri	117
6.2.2 Serbest Bölgeye Fırlatılan Taneciklerin Konsantrasyonu	119
6.2.3 Konsantrasyon Dağılımları	121
6.2.4 Yanma Verimi	125
6.2.5 Serbest Bölge Reaksiyonları.....	126
6.3 İşletme Parametrelerinin Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkileri	127
6.3.1 Kömür Özelliklerinin Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi	128
6.3.2 Besleme Havası Sıcaklığının Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi	129
6.3.3 Isı Değiştirici Yüzey Konumlarının Sıcaklık Dağılımına Etkisi	130
6.3.4 Aktif Yataktan Çekilen Isının Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi	130
6.3.5 Aktif Yatakta Yanan Uçucu Maddelerin Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi	131
BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	133
7.1 Sonuçlar.....	133
7.2 Öneriler.....	139
EK 1. Kararlı Rejimde Yatakta Mevcut Tanecik Boyut Dağılımının Modellenmesi...	140
EK 2. Yanma Havasının Modellenmesi	144
E2.1 Yanma İçin Gerekli Hava Miktarının Hesaplanması.....	145
E2.2 Yanma Havasının Yatak İçerisinde Modellenmesi.....	146
EK 3. Termodinamik Özellikler	149
KAYNAKLAR	155
ÖZGEÇMİŞ	162

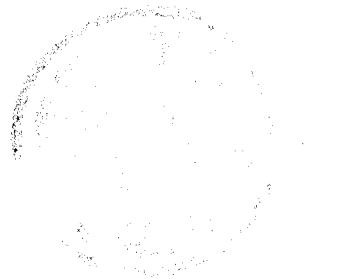


Sembol Listesi

Sembol	Tanımı
A	Tanecik reaksiyon yüzeyi (m^2)
A_y	Yatağın kesit alanı (m^2)
Ar	Archimedes sayısı (boyutsuz)
$A_{yüz}$	Isı değiştirici boru yüzey alanı (m^2)
C_D	Direnç katsayısı (boyutsuz)
C	Molar konsantrasyon ($kmol/m^3$)
C_o	Oksijenin başlangıç konsantrasyonu ($kmol/m^3$)
$\dot{C}_{O_2}$	Tüketilen O_2 konsantrasyonu ($kmol/m^3$)
C_{pg}	Yanma ürünlerindeki i. gazın özgül ısısı ($kJ/kmol-K$)
C_{pi}	i. maddenin özgül ısısı ($kJ/kmol-K$)
D_G	Oksijenin gaz-faz difüzyon katsayısı (m^2/s)
D_y	Yatak çapı (m)
d_{bo}	Başlangıçtaki kabarcık çapı (m)
d_{ic}	Uçucusu ayrılmış i boyutunda yarı kok tanecik çapı (m)
d_{ip}	Yatağa beslenen i boyutunda kömür taneciklerinin çapı (m)
d_{ish}	Büzülmüş i boyutunda yarı kok tanecik çapı (m)
$d_{yüz}$	Boru çapı (m)
E	Aktivasyon enerjisi ($kJ/kmol$)
E_{io}	i boyutundaki tanecikler için sürüklenme sabiti (kg/m^2s)
F_o	Aktif yataktan SB'ye fırlatılan taneciklerin toplam debisi (kg/m^2s)
F_{io}	Aktif yataktan SB'ye i boyutunda fırlatılan taneciklerin debisi (kg/m^2s)
F_{okok}	Yataktan SB'ye fırlatılan toplam yarı kok debisi (kg/m^2s)

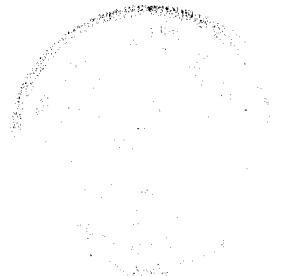


F_{iokok}	Yataktan SB'ye i boyutunda fırlatılan yarı kok tanecikleri debisi (kg/m^2s)
F_{∞}	Sürüklenen toplam tanecik debisi (kgm^2/s)
$F_{i, \infty}$	Sürüklenen i boyutundaki taneciklerin debisi (kgm^2/s)
$F_{i, Y}$	Yukarı doğru SB'de yükselen i boyutunda taneciklerin debisi (kg/m^2s)
$F_{i, A}$	Aşağı doğru SB'de inen i boyutunda taneciklerin debisi (kgm^2/s)
f_i	Kömür kısa analizinde i. bileşen kesri (%)
f_{kt}	Kireçtaşının dönüşüm faktörü
g	Yerçekim ivmesi (m/s^2)
H_0	Kömürün üst ısı değeri (kJ/kg)
H^0_r	Reaksiyon ısısı ($kJ/mol, kJ/kg$)
H_t	Serbest bölgede toplam tanecik konsantrasyonu (kg/m^3)
$H_{i,t}$	Serbest bölgede i boyutunda taneciklerin konsantrasyonu (kg/m^3)
H_{be}	Kabarcık ve yoğun faz arasında ısı transfer katsayısı (kJ/m^3sK)
h	Gaz-yüzey arasında ısı taşınım katsayısı ($kJ/m^2h^{\circ}C$)
h_{gt}	Gaz-tanecik arasında ısı taşınım katsayısı ($kJ/m^2h^{\circ}C$)
h_{tc}	Tanecik taşınımına ait komponent ($kJ/m^2h^{\circ}C$)
h_{gc}	Fazlar arası gaz taşınımına ait komponent ($kJ/m^2h^{\circ}C$)
h_r	Işınımaya ait komponent ($kJ/m^2h^{\circ}C$)
k_C	Toplam reaksiyon hız sabiti (m/s)
k_{CD}	Difüzyon hız sabiti (m/s)
k_{CR}	Kimyasal reaksiyon hız sabiti (m/s)
k_g	Gaz filmindeki ısı iletim katsayısı (kJ/m^2hK)
k_0	Pre-eksponansiyel faktör
k_{kt}	Kireçtaşı-SO ₂ reaksiyonunun toplam hacimsel reaksiyon hız sabiti ($1/s$)
$\dot{k}_{kt}$	Kireçtaşı-SO ₂ reaksiyonunun reaksiyon hız sabiti ($1/s$)
M_i	Yataktaki i. maddenin moleküler ağırlığı ($kg/kmol$)
m_{gh}	Birim miktarda yakıtın yanması için gerekli gerçek hava miktarı(kg_h/kg_y)
m_{ho}	Yatağa giren toplam hava miktarı(kg)



$m_{h,NET}$	Bir kompartmandan diğerine giren net hava miktarı (kg)
m_{th}	Birim miktarda yakıtın yanması için gerekli teorik hava miktarı(kg_h/kg_y)
m_{ic}	i boyutundaki yarı kok taneciğinin kütlesi (kg)
$m_{i,NET}$	Bir kompartmandan diğerine taşınan i boyutunda net yarı kok miktarı(kg)
m_{io}	Yatağa i boyutunda beslenen kömür miktarı (kg)
$\dot{m}_{io}$	Birim zamanda i boyutunda beslenen kömür miktarı(kg/s)
m_{ish}	i boyutunda büzülerek kaybolan kömür miktarı (kg)
m_{CaCO_3}	Yatağa beslenen kireçtaşı miktarı (kg)
$\dot{m}_{CaCO_3}$	Birim zamanda beslenen kireçtaşı miktarı(kg/s)
N_i	i boyutunda yarı kok tanecik sayısı
Nu	Nusselt sayısı (boyutsuz)
n	Kompartman sayısı
n_d	Dağıtıcı plakadaki delik sayısı
n_i	Yataktaki i. gazın mol oranı ($kg_{gaz}/kmol$)
p	Yarı kok tanecik yüzeyindeki CO/CO ₂ oranı
q	Gaz akış hızı (m^3/s)
q_{be}	Kabarcık - yoğun faz arası akış hızı (m^3/s)
q_{bc}	Kabarcık - örtü faz arası akış hızı (m^3/s)
q_{ce}	Örtü - yoğun faz arası akış hızı (m^3/s)
Q_o	Yakıtın verdiği ısı (kj)
$Q_{KHYM+UM}$	Tutuşma sıcaklığına ulaşması içinKHYM yarı kok ,UM'ye verilen ısı (kj)
Q_t	İnert malzemeyle SB'ye giren ısı (kj)
Sh	Sherwood sayısı (boyutsuz)
R	Üniversal gaz sabiti (kj/kmol-K)
Re	Reynolds sayısı (boyutsuz)
r	Yanan taneciğin yarıçapı (m)
r_c	Yarı kok yanma hızı (kmol/s)
r_{CO}	Karbon monoksitin oksitlenme reaksiyon hızı (kmol/ m^3s)
r_{kt}	Kireçtaşı yanma hızı (kmol/s)

r_S	Kükürtün oksitlenme hızı (kmol/s)
r_{SUL}	Sülfatlaşma reaksiyon hızı (kmol/s)
r_T	Gaz - katı reaksiyonlarında reaktant reaksiyon hızı (kmol/s)
r_{UM}	Uçucu maddenin yanma hızı (kmol/s)
$t_{i,r}$	i boyutundaki taneciklerin SB'de bekleme süresi (s)
$t_{i,c}$	i boyutundaki yarı kok taneciğinin yanma zamanı (s)
T_m	Sınır tabaka sıcaklığı (K)
T_o	Ortam sıcaklığı (K)
T_p	Yanan kömür taneciklerinin sıcaklığı (K)
U_o	İşletme gaz hızı (m/s)
$U_{b,min}$	Minimum kabarcık hızı (m/s)
U_{tY}	Serbest bölgede taneciklerin yukarı yükselme hızı (m/s)
U_{tA}	Serbest bölgede taneciklerin aşağıya inme hızı (m/s)
$U_{t,o}$	Serbest bölgeye fırlatılan taneciklerin başlangıç hızı (m/s)
$U_{t,r}$	Relativ hız (m/s)
V	Hacim (m ³)
X	Fazlar arası kütle transfer katsayısı
X_C	Kömürün alt ısı değeri yarı kok tarafından sağlanan kısmı
$X_{çek}$	Aktif yataktan çekilen ısı kesri
X_i	Yatağa beslenen kömürün ağırlık kesri
$X_{i,KHYM}$	Kararlı halde i boyutundaki yarı kok taneciklerinin kütle kesri (kg _i /kg)
X_{kok}	Yataktaki inert malzemedeki yarı kok kesri (kg _{kok} /kg _{inert})
X_{UM}	Kömür UM'sinin aktif yatağa çıkma kesri
ΔZ	Kompartman yüksekliği (m)
Z_y	Genleşmiş aktif yatak yüksekliği (m)
Z_{SB}	Aktif yataktan itibaren SB yüksekliği (m)



Yunan Harfleri

α	Reaksiyonlara ait sabit değer
ϵ	Boşluk oranı
ϵ_r	Taneciğin emisivitesi
ϵ_{yb}	Toplam yatak boşluk oranı
σ	Stefan - Boltzman sabiti ($\text{kJ/hm}^2\text{K}^4$.)
μ	Gazın viskozitesi (kg/ms)
η	Sürüklenen taneciklerin tutulma verimi (%)
η_s	Kükürt yanma verimi (%)
η_y	Kömürün yanma verimi (%)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
λ	Hava fazlalık katsayısı
γ_i	Yakıttaki i. maddenin ağırlık dağılımı
ϕ	Şekil faktörü
Φ	Mekanizma faktörü
$\mathfrak{R}$	Büzülme hızı (m/s)

Alt İndis

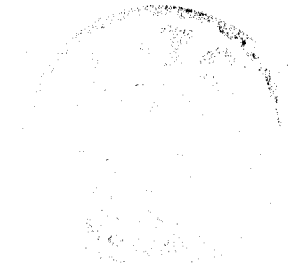
a	Akışkan
A	Kül
AY	Aktif yatak
b	Kabarcık
bg	Baca gazı
c	Karbon
CaO	Kalsiyum oksit
CaCO ₃	Kireçtaşı
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
e	Yoğun faz

g	Gaz
H	Hidrojen
h	Hava
H ₂ O	Su
i	İntersitial gaz
t	İnert malzeme
k	Katı
kt	Kireçtaşı
m	Maksimum
mf	Minumum akışkanlaştırma
min	Minumum
n _{I.B}	Serbest bölgede sıçrama bölgesi
n _{II.B}	Serbest bölgede yoğun tanecikli bölge
n _{III.B}	Serbest bölgede seyrek tanecikli bölge
N	Azot
O ₂	Oksijen
ort	Ortalama
p	Kömür taneciği
S	Kükürt
sür	Sürüklenen
UM	Uçucu madde
ter	Terminal (çıkış) hız
tut	Tutuşma
y	Yatak
yan	Yanan



Şekil Listesi

Şekil 2.1 Atmosferik basınçlı AY ünitesi	7
Şekil 2.2 Akışkan yataklı yakıcılarda işlevsel bölgeler	9
Şekil 2.3 Akışkan yataklı yakıcılarda kullanılan taneciklerin sınıflandırılması	19
Şekil 2.4 Akışkanlaşma ve basınç düşüşü	20
Şekil 2.5 Değişik akışkanlaşma rejimleri.....	20
Şekil 2.6 Kabarcıklı yatak modelinde gaz ve tanecik hareketi.....	25
Şekil 2.7 Kabarcık izinde taşınan taneciklerin SB'ye fırlatılması	28
Şekil 2.8 Serbest bölgeye sürüklenen tanecik debisini kabarcık çapının fonksiyonu olarak veren korelasyonların karşılaştırılması	30
Şekil 2.9 Serbest bölgede bekleme süresine tanecik boyutunun etkisi	33
Şekil 2.10 Kömür boyutunun SB'deki karbon miktarına etkisi	35
Şekil 2.11 Kömür boyutunun SB'deki karbon yanmasına etkisi	35
Şekil 2.12 Akışkan yataklarda gaz hızının, yatağa daldırılmış yüzeylerdeki film katsayısına etkisi.....	48
Şekil 3.1 Akışkan yatak modellerinin temel prensipleri	54
Şekil 4.1 Katı tanecikler için yapılan kütle dengesi	66
Şekil 4.2 Aktif yatakta tek fazlı geri-dönüşsüz katı tanecik modeli	72
Şekil 4.3 Serbest bölgede katı tanecik modeli	75
Şekil 4.4 Akışkan yatak içindeki kompartmanlarda gaz faz kütle dengesi	81
Şekil 4.5 Aktif yatakta enerji dengesi	92
Şekil 4.6 Serbest bölgede enerji dengesi	98
Şekil 5.1 Aktif yatak ve SB boyunca sıcaklık dağılımını bulan bilgisayar programının akış diyagramı	106



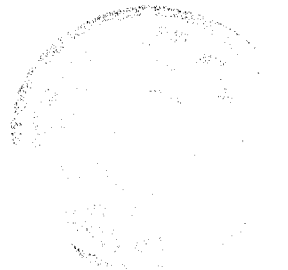
Şekil 5.1 Aktif yatak ve SB boyunca sıcaklık dağılımını bulan bilgisayar programının akış diyagramı	109
Şekil 6.1 Modelde tahmin edilen ve ölçülen taneciklerin boyut dağılımları	118
Şekil 6.2 Modelde tahmin edilen ve ölçülen taneciklerin boyut dağılımları	118
Şekil 6.3 Modelde tahmin edilen ve ölçülen taneciklerin boyut dağılımları	119
Şekil 6.4 Aktif yataktan SB'ye fırlatılan inert ve yarı kok taneciklerinin debisi	120
Şekil 6.5 Farklı fırlatma hızlarında taneciklerinin SB'de ulaştığı maksimum yükseklik	120
Şekil 6.6 Farklı fırlatma hızlarında yarı kok taneciklerinin SB'de bekleme süresi	121
Şekil 6.7 Aktif yatakta tahmin edilen ve ölçülen gaz konsantrasyon dağılımlarının karşılaştırılması	122
Şekil 6.8 Serbest bölgede tahmin edilen ve ölçülen gaz konsantrasyon dağılımlarının karşılaştırılması	123
Şekil 6.9 Aktif yatakta tahmin edilen ve ölçülen gaz konsantrasyon dağılımlarının karşılaştırılması	123
Şekil 6.10 Serbest bölgede tahmin edilen ve ölçülen gaz konsantrasyon dağılımlarının karşılaştırılması	124
Şekil 6.11 Aktif yatakta tahmin edilen ve ölçülen gaz konsantrasyon dağılımlarının karşılaştırılması	124
Şekil 6.12 Serbest bölgede tahmin edilen ve ölçülen gaz konsantrasyon dağılımlarının karşılaştırılması	125
Şekil 6.13 Yanma veriminin fazla hava ile değişimi	126
Şekil 6.14 Yanma veriminin fazla hava ile değişimi	126
Şekil 6.15 Kömür özelliklerinin sıcaklık dağılımına etkisi	128
Şekil 6.16 Farklı besleme havası sıcaklıklarında tahmin edilen ve ölçülen sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması	129
Şekil 6.17 Isı değiştirici yüzey konumlarının sıcaklık dağılımına etkisi	130
Şekil 6.18 Aktif yataktan çekilen ısının yatak sıcaklık dağılımına etkisi	131
Şekil 6.19 Aktif yatakta yanan UM'nin yatak sıcaklık dağılımına etkisi	132
Şekil 7.1 Modelde tahmin edilen ve ölçülen taneciklerin boyut dağılımları	134

Şekil 6.2 Modelde tahmin edilen ve ölçülen taneciklerin boyut dağılımları	134
Şekil 7.3 Aktif yatakta tahmin edilen ve ölçülen gaz konsantrasyon dağılımlarının karşılaştırılması	135
Şekil 7.4 Yanma veriminin fazla hava ile değişimi	137
Şekil 7.5 Aktif yatakta yanan UM'nin yatak sıcaklık dağılımına etkisi	137
Şekil 7.6 Aktif yataktan çekilen ısının yatak sıcaklık dağılımına etkisi	138



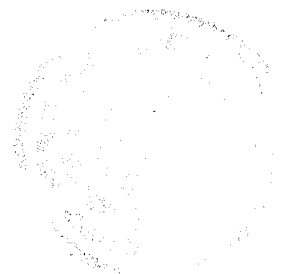
Tablo Listesi

Tablo 1.1 Türk linyitlerinin kül, nem ve kükürt içerikleri	2
Tablo 2.1 Yatak ile ilgili korelasyonlar	22
Tablo 2.2 Kabarcık çapını veren korelasyonlardan bazıları	23
Tablo 2.3 Karşılaştırılan korelasyonlarda kullanılan parametreler	31
Tablo 2.4 Akışkan yataklı yakıcıda gözönüne alınan gaz-katı reaksiyonları için kimyasal reaksiyon hız sabitleri	44
Tablo 2.5 Karbon monoksit oksidasyonu için ampirik hız ifadeleri	45
Tablo 3.1 Bir boyutlu KAY modeli için kabuller ve yorumlar	53
Tablo 3.2. Model özetleri	57
Tablo 3.3. Serbest bölge modellerinin özeti	60
Tablo 5.1 Bilgisayar programında kullanılan kömür veri tabanı	110
Tablo 5.2 Veri tabanında mevcut kömürlerin deneysel ve hesaplanan ısı değerleri	111
Tablo 5.3 Kireçtaşının kimyasal ve fiziksel özellikleri	111
Tablo 6.1 Yapılan deneylerin işletme koşulları	116
Tablo 6.2 Seyitömer linyitinin fiziksel - kimyasal özellikleri	116
Tablo 6.3 Model işletme parametreleri	127
Tablo 6.4 Modelde kullanılan kömür cinsleri	128
Tablo E1.1 Yatağa beslenen tanecikler ile ilgili veriler.....	140
Tablo E1.2 Kararlı halde yatakta mevcut tanecik boyut dağılımının hesaplanabilmesi için çözüm yöntemi.....	141
Tablo E2.1 Yanma ile ilgili bağıntılar.....	145
Tablo E3.1 Bazı maddelerin 25°C’de yanma ve oluşum entalpileri.....	150
Tablo E3.2 Bazı maddelerin özgül ısıları.....	152



Kısaltmalar Listesi

Kısaltma	Açıklaması
AlD	Alt Isıl Değer
AY	Akışkan Yatak
AYY	Akışkan Yataklı Yakıcı
Ca/S	Kireçtaşı-Kükürt Oranı
EA	Element Analizi
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
KA	Kısa Analiz
KAY	Kabarcıklı Akışkan Yatak
UM	Uçucu Madde
SB	Serbest Bölge
SK	Sabit Karbon
TAY	Taşınım Ayrışma Yüksekliği



Teşekkür

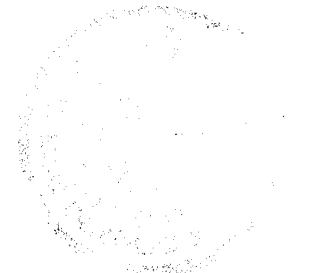
Bu tez çalışmasının oluşturulmasında; Marmara Üniversitesinde birlikte çalışma şansına eriştiğim günden bu güne kadar her konuda kendimi geliştirmemde katkıları olan, sayın hocam Prof.Dr. Eralp ÖZİL'in katkıları çok büyüktür.

Doktora tezim boyunca sürekli ilgi ve desteklerini esirgemeyen, olumlu eleştiri, önerileri ile çalışmanın şekillenmesi ve tamamlanmasına katkıda bulunan hocam Prof. Dr. Eralp ÖZİL'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmam sırasında kendisi ile tanışma fırsatı bulduğum, deneysel çalışmalarındaki birikimlerinden yararlandığım, literatür bulmamda yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ekrem EKİNCİ'ye, doktora çalışmamı Yıldız Teknik Üniversitesinde yürütebilmemde büyük katkıları olan Prof. Dr. Doğan ÖZGÜR'e ve Prof. Dr. Mahir ARIKOL'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında; bilgi alışverişinde bulunduğum, her türlü yardımı esirgemeyen arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Ramazan KÖSE'ye, bilgisayar programımın gerçekleştirilmesinde her türlü katkıyı yapan arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜNEŞ'e tezin yazımı sırasında yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Merih AYDINALP'e ve bana çalışmam sırasında anlayış gösteren değerli YTAM çalışanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bana gerekli tüm manevi desteği sağlayan eşim Tuğrul ve oğlum Koray'a teşekkür ederim.



Özet

Linyitlerimizin; yüksek uçucu madde, yüksek kükürt ve kül içeriği ile düşük ısı değere sahip olması yakılacağı sistem tasarımlarında bazı sorunlara neden olmaktadır. Bütün bu olumsuzlukları en az düzeye indirebilecek olan akışkan yataklı yakıcılar, düşük kaliteli linyitlerimizin daha verimli bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak, ülke ekonomisine katkıda bulunurken hava kirliliği probleminin çözümüne de yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada; daha önce aktif yatak için geliştirilen model daha iyileştirilmiş ve serbest bölge reaksiyonları ilave edilerek Türk Linyitlerinin akışkan yataklı yakıcıda davranımlarını belirleyen bir model geliştirilmiştir.

Gerçekleştirilen model ile öncelikle kararlı halde yatak içerisinde mevcut yarı kok taneciklerinin boyut dağılımı ve kütle kesri bulunmuştur. Katı taneciklerin aktif yatak ve serbest bölge boyunca hareketleri modellenmiş, ayrıca serbest bölgeye fırlatılan taneciklerin konsantrasyonu, boyut dağılımı ve bekleme süreleri belirlenmiştir. Model bazı işletme parametrelerinin, yatak ve serbest bölgedeki gaz konsantrasyonlarını ve sıcaklık dağılımlarını nasıl etkilediğini tahmin edebilmektedir.

Model sonuçlarının bir kısmı literatürde mevcut deneysel ölçümler ile karşılaştırılmış ve akışkan yataklı yakıcılar için uygunluğu incelenmiştir.



Abstract

Burning of low rank coals such as Turkish lignites will present severe operational problems due to their volatile matter, high sulfur and ash contents and low calorific values, if a combustion system is not designed properly. Fluidized bed combustors, on the other hand, can overcome these problems; contribute to country's economy, and decrease the possible pollution levels resulting from utilization of the lignites.

In this thesis, the model developed for the active bed section of a fluidized bed combustion system is much more improved and freeboard reactions are added in order to model the combustion behaviour of Turkish Lignites at the fluidized bed combustors.

The particle size distribution and mass fraction of the particles present in the bed at steady state are first calculated by the model developed. The movement of the particles along the active bed and freeboard is modelled, and also the concentration, size distribution, and residence time of the particles ejected to the freeboard are determined. The model is able to predict the effect of some operation parameters to the gas concentrations and temperature profiles at the active bed and freeboard.

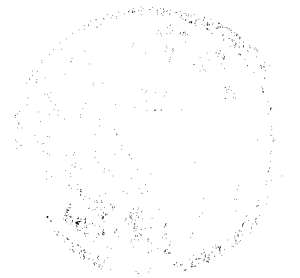
Some of the results of the model are then compared with the experimental results obtained from the literature and their applicability for fluidized bed combustors is examined.

1

Giriş

Petrol türevli yakıt fiyatlarındaki artış ve mevcut enerji darboğazı, günümüze kadar potansiyel bir enerji kaynağı olarak kabul edilemeyen değişik türde düşük kaliteli yakıtların da enerji kaynağı olarak değerlendirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Düşük ısı değeri, yüksek inert (eylemsiz) madde oranına sahip ve yüksek oranda kükürt ve alkali metaller içeren düşük kaliteli yakıtların yakılabilmesi içinde çok sayıda işleme gerek duyulmaktadır. Böyle düşük kaliteli bir yakıtı, alışlagelmiş yöntemlerle yakmanın zorluğu yanında çeşitli koşulların da uygulanması şartı vardır. Düşük ısı değeri yakıtların yüksek oranda kükürt ve azot içermesi ve ısı değerlerinin düşük olmasından dolayı birim ısı üretimi için çok daha fazla miktarda yakılması çevre kirliliğinin artmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı çevreyi koruma amacıyla yapılacak yatırımlar da artacaktır. O halde düşük kaliteli yakıtların değerlendirilmesinde yakma yöntemlerinden beklenen en önemli özellik, sistemin çevre kirliliğini ekonomik olarak önleyebilmesidir.

Yanmanın 800 - 900°C'de geliştiği ve yatak içerisinde % 90'nın üzerinde inert madde oranı olan akışkan yatak (AY) teknolojisi, düşük ısı değeri ve yüksek inert madde oranlı düşük kaliteli yakıtların değerlendirilebilmesi ve çevre kirlenmesini önlemesi özelliği nedeniyle en uygun yöntem olarak kabul edilmektedir. Akışkan yatakta yakma teknolojisi; düşük kaliteli katı yakıtların enerji üretim kaynaklarına eklenmesinin yanı sıra, düşük kaliteli yakıt ve atık madde arasındaki farkı da kaldırmıştır (Ekinci, 1981).



Akışkan yataklı yakıcı (AYY) larda; düşük ısıl değerli, yüksek kül, nem ve kükürt içerikli kömürler, linyitler, yıkama ve sanayi atıkları, şehir çöpleri gibi çok çeşitli yakıtlar enerji girdisi olarak kullanılabilir. Bir AYY'da gaz-katı fazların sürekli temasını sağlayarak, taneciklerin ve akışkanlaştırıcı gazın yatakta kalma sürelerini uzatarak ve yatağı uygun yatak sıcaklığında tutarak; AYY'da gerçekleşen fiziksel ve/veya kimyasal olayların kontrol edilmesiyle yakıcı veriminin artırılması mümkündür (Martenz, 1984).

Batı ülkelerinin linyitlerinden farklı olarak düşük ısıl kapasite, yüksek uçucu madde (UM), kükürt ve kül içeriğine sahip olan linyitlerimizin, yurdumuzun her yıl artmakta olan enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir yeri olacaktır. Nitekim, 1985 yılında 35 milyon ton linyit tüketilmiştir. Bu değerin 2000 yılında 80 milyon ton dolaylarına yükseleceği tahmin edilmektedir (Atakül v.ç.a., 1994).

Linyitlerimizin analiz sonuçları incelendiğinde; kül, nem ve kükürt değerlerinin geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir (Akcura, Gerger 1982; Arıkol v.ç.a., 1984). Ayrıca linyitlerimiz, rezervden rezerve olduğu kadar aynı rezerv içerisinde de önemli değişimler göstermektedir. Tablo 1.1 ülke genelindeki toplam linyit rezervlerimizin kül, nem, ve kükürt içerikleri bakımından dağılımını vermektedir.

Tablo 1.1 Türk Linyitlerinin Kül, Nem ve Kükürt İçerikleri (Enerji Raporu, 1993)

Kül İçeriği (%)	Rezervdeki Pay (%)	Nem İçeriği (%)	Rezervdeki Pay (%)	Kükürt İçeriği (%)	Rezervdeki Pay (%)
10 - 15	1.54	0 - 10	0.89	0 - 1	3.7
15 - 20	2.19	10 - 20	14.25	1 - 2	68.29
20 - 25	52.37	20 - 30	14.21	2 - 3	14.11
25 - 30	19.03	30 - 40	13.21	3 - 4	5.86
> 30	24.87	> 40	57.44	> 4	8.04

Tablo 1.1 de, %20'den az kül içeren linyitlerimizin, toplam rezerv içindeki yeri %3.73 olarak görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, linyitlerimizin %96'sı yüksek kül içermektedir. Kükürt içeriği %1'in altında olan linyitlerimiz ise toplam rezervin %3.7'ini oluşturmaktadır. Amerika'da kabul edilebilir kükürt oranının % 0.8 olduğu dikkate alınırsa Türk linyitlerinin %97'si yüksek kükürtlü kömürler sınıfına girmektedir. Nem içeriği %20'den az olan linyitler ise rezervin % 15.14'ünü kapsamaktadır (Enerji Raporu, 1993).

Akışkan yatakta yapılan teorik ve uygulamalı yakma çalışmalarında; baz olarak batıda mevcut yüksek ısı değerli, düşük UM ve kükürt içerikli kömürler alınmıştır. Bu tip kömürlerde besleme yatak içerisine veya hemen üzerine yapıldığı için yanmanın önemli bir kısmı aktif yatakta gerçekleşmektedir. Akışkan yataklı yakıcılarda yüksek ısı değerli kömürler ile farklı özelliklere sahip linyitlerimiz yakılırken davranım değişiklikleri göstermektedir. Bu farklılıklar, işletimde yatak içerisindeki bölgeler arasında fonksiyon değişikliklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Akışkan yataklı yakıcılarda yüksek UM içerikli yakıtların yakılmaya başlamasıyla o zamana kadar gereken ilgiyi görmeyen serbest bölge (SB) üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır.

Stubington ve Sumoryona (1984) yüksek UM içeren kömürlerde, kömür ısı değerinin yaklaşık %50'ye varan önemli bir oranının uçucuların yanmasıyla ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Urkan ve Arıkol (1989) yaptıkları çalışmada linyitlerimizin ısı değerinin %45'lere varabilen bir kısmının UM'ler tarafından sağlandığını vurgulamışlardır. Türk linyitleri gibi UM/SK oranı yüksek, düşük ısı değerli kömürler için yanmanın yeri ve yüzdesinin belirlenmesi özellikle ısı çekici yüzeylerin nereye yerleştirileceğinin belirlenmesi açısından çok önemlidir.

Ekinci v.ç.a. (1983), AYY'larda yüksek UM içerikli kömürlerin yatağa beslenmesiyle SB sıcaklığının aniden arttığını, aktif yatakta ise ısınma etkisinin belirli bir faz farkı ile görüldüğünü ve etkisini daha uzun süre hissettirdiğini belirtmişlerdir. Kok halindeki bir kömürün yakılması sonucunda SB'de net bir ısı artışı gözlenmemiştir. SB'ye yapılan

ikincil hava beslemesiyle kömür yakılması durumunda bu bölgede sıcaklık artışı kaydedilmiştir.

Tung et.al. (1980), değişik gaz hızlarında ve farklı kömür besleme çapları için geliştirdikleri model ve deneysel çalışmalarda SB ve aktif yatakta yanan karbon kesirlerini bulmuşlardır. UM ve/veya sabit karbon yanması sonucu küçülen veya başlangıçta da küçük olan taneciklerin SB'ye taşındığını ve buradaki sıcaklığa bağlı olarak SB'de yanmalarını sürdürdüklerini belirtmişlerdir.

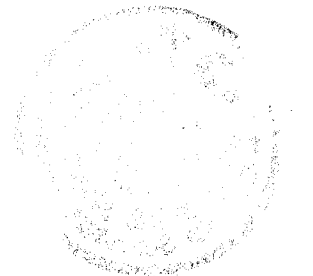
Literatürdeki deneysel çalışmalar; yanma verimini yüksek tutmak üzere seçilmiş uygun sabit yatak yüksekliklerinde bile SB'nin UM ve sabit kok yanmasında etkin rol oynadığını göstermektedir. Sonuç olarak; UM'nin yanabilmesi için SB'de uzun süre kalması ve SB'de ikinci bir yanma bölgesinin oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle SB tasarımının çok iyi yapılması ve sürüklenen yarı kok tanecikleri ile uçucuların burada uzun süre kalarak yanmalarını tamamlamaları sağlanmalıdır.

Linyitlerimizin kullanıldığı AYY'ların gerek deneysel ve gerekse simülasyon açısından incelenmesi gerekmektedir. Gerçekçi ve detaylı bir SB analizinin yapılabilmesi için aktif yatak yüzeyindeki model çıktıları alınarak; SB'deki denkliklerin çözümünde başlangıç değeri olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada; Köse, R.'nin 1995'de tamamladığı doktora tezinde geliştirdiği aktif yatak modeli iyileştirilmiş ve SB modeli ile birleştirilerek Türk linyitlerinin AYY'da davranımlarını belirleyen bir model geliştirilmiştir.

Farklı tanecik boyut dağılımında yatağa sürekli beslenen kömürlerin, uçucuları ayrıldıktan sonra bir kısmı sürüklenmekte kalan yarı kok tanecikleri ise kimyasal reaksiyonlar sonucu yeni bir boyut dağılımına sahip olmaktadır. Bu çalışmada öncelikle kararlı halde yatak içerisinde mevcut yarı kok taneciklerinin boyut dağılımı ve kütle kesri bulunmuştur. Katı taneciklerin aktif yatak ve SB boyunca hareketleri modellenmiş ayrıca SB'ye fırlatılan yarı kok taneciklerinin konsantrasyonu, boyut dağılımı ve bekleme süreleri belirlenmiştir.

Aktif yatak ve SB’de kimyasal reaksiyonlar sonucu gaz fazında meydana gelen değişimler ve yanma sonucu hava kirliliğine sebep olan emisyonların tutulması gözönüne alınmıştır. Bu model çalışmasıyla; kararlı halde yatakta mevcut (KHYM) ve sürüklenen yarı kok taneciklerinin boyut dağılımı, yatak ve SB yüksekliği boyunca kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan gazların konsantrasyonları ve sıcaklık dağılımları tahmin edilebilmektedir. Model, besleme havası sıcaklığı, aktif yataktan çekilen ısı, aktif yatakta yanan UM, ısı değiştirici yüzeylerin konumu gibi işletme parametrelerinin diğer parametreler sabit tutulduğunda yatak sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini belirleyebilmektedir.

Model sonuçlarının bir kısmı, literatürde mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak irdelenmiştir. Geliştirilen model yardımı ile Türk linyitlerine uygun AYY tasarımı yapılabilir.



2

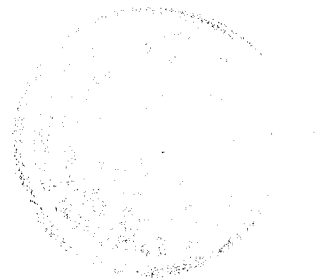
Genel Bilgiler

2.1 Akışkan Yataklı Yakma Sistemleri

Akışkan yatak, hem katı hem de sıvının fiziksel karakteristiklerini üzerinde taşımakta bu yüzden kimya ve proses endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamalarda yakma sistemi olarak AYY kullanımı, konvansiyonel kazanlar, sabit yataklı yakıt yakıcıları ve pülverize sistemler ile karşılaştırıldığında özel bir ilgi alanına sahiptir. Akışkan yatakta yakıt taneciklerinin yatakta kalma süresi baca gazının yatakta kalma süresine yakındır. Akışkan yataklı yakıcılar; yakıtın yatakta uzun kalma süresi, kütle transferinin yüksek oluşu gibi özelliklerinden dolayı konvansiyonel yakma sistemleri ile karşılaştırıldığında çok daha düşük sıcaklıklarda yüksek yanma verimi sağlarlar (Vural, 1989; Ekinci v.ç.a., 1986; Hamdullahpur et al., 1994).

Kömür ve sorbent (kireçtaşı veya dolomit) tanecikleri üniform sıcaklıkta sabit bir hızda yatağa sürekli beslenir. Kömür tanecikleri, yanma prosesleri ile sürekli tüketilirken bir kısmı taşarak (overflow), küçük olan tanecikler ise yüksek hızlarda sürüklenerek yatağı terkederler. Kalsine olarak sülfatlaşmış kireçtaşı tanecikleri ile yanma prosesleri sonucu oluşan kül aşırı akış veya sürüklenme akımları ile yataktan ayrılır.

Kararlı halde, yatakta kalan katılar sabit ağırlıktadır. Bu katılar; geniş bir tanecik boyut dağılımında olan kok, sorbent tanecikleri ve külden oluşur. Deneysel veri sonuçları;



Şekil 2.1 Atmosferik Basıncılı AY Ünitesi

Baca gazları ve sürüklenme ile yatağı terkeden katı malzeme bir seri siklon içerisinde geçirilir. Burada tutulan katı malzeme yatağa geri gönderilir ve orada yanma tamamlanır. Böylece tüm yanma veriminin iyileştirilmesi söz konusudur (Bukur et.al., 1981).

2.2 Akışkan Yatakta İşlevsel Bölgeler

Akışkan yataklarda kömürün yanma mekanizması, gerek akışkan yatağın oldukça karmaşık dinamik yapısı gerekse UM çıkışı ve yanması ile yarıkok yanması gibi çeşitli aşamaları içeren yanma süreci öncesinde ve sırasında süregelen kompleks bir çok olayın iç etkileşimi nedeni ile tam olarak aydınlatılamamıştır. **Waters**, yanma sürecinin gerçekleştiği akışkan yatağı bir reaktör olarak göz önüne almış ve Şekil 2.2’de görülen fonksiyonel bölgeleri tanımlamıştır, buna göre AYY iki bölgeden meydana gelmektedir:

a) Aktif yatak bölgesi

Bu bölge; inert katı tanecikleri içeren ve yakıtın hava ile temas ederek yandığı yakıcının alt bölgesidir.

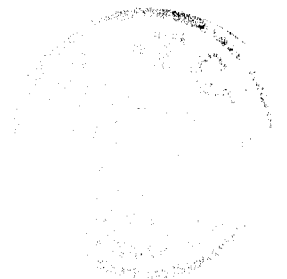
b) Serbest bölge

Aktif yatak bölgesinin üstünde kalan ve onun doğal uzantısı olan bölgedir. Bu bölgede, uçucu maddeler ve yataktan taşınan küçük yakıt tanecikleri hava ile karışarak yanmayı sürdürürler. Bu bölge; aynı zamanda bir taşınım ayrışma bölgesi işlevini de görmektedir.

Akışkan yatağın iç yapısı daha yakından ve ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde değişik gaz ve katı rejimlerinin yer aldığı ve çok çeşitli kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği birçok alt bölgeyi içerdiği görülür. Bu bölgelerin ve meydana gelen kimyasal reaksiyonların bir analizi Şekil 2.2’de verilmiştir.

I. Bölge:

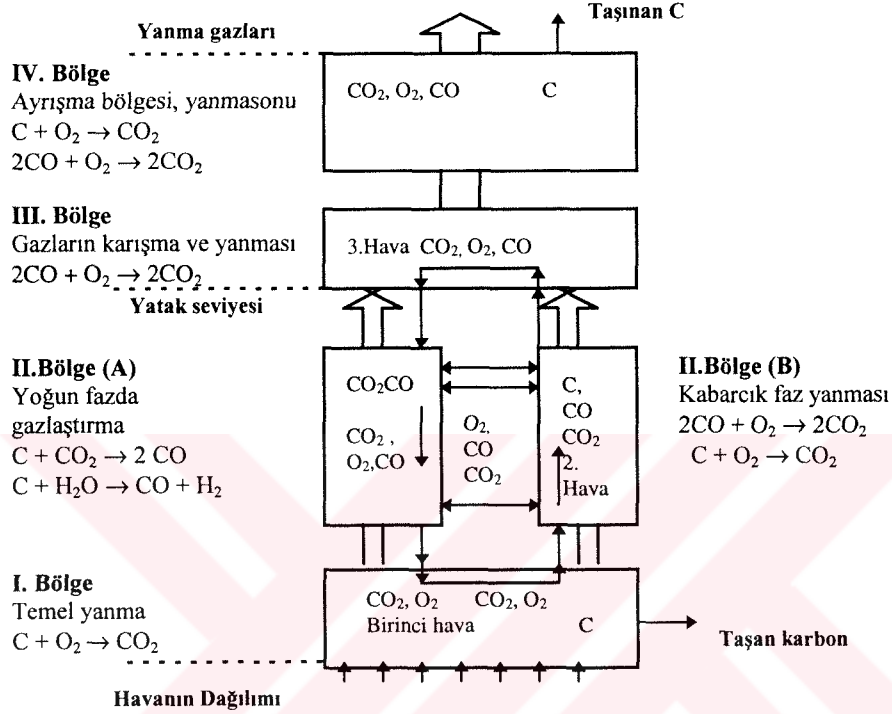
Bu bölge, dağıtıcı eleğin hemen üstündeki sıkı bölgedir. Hava ve katının çok iyi karıştığı bu bölgede tam yanma reaksiyonları görülmekte ve hızlı bir şekilde gelişmektedir. Bölgede gaz karışımının temel olarak CO_2 ve havadan oluştuğu sanılmaktadır.



II. Bölge:

İki fazlı kabarcık modeli temel alınır; bu bölgenin başlıca iki fazdan oluştuğu görülür:

- Hareketli katı tanecikleri içeren yoğun faz (A),
- Kabarcık faz (B),



Şekil 2.2 Akışkan Yataklı Yakıcılarda İşlevsel Bölgeler

(A) ve (B) fazları arasında, hızı kabarcık yükseldikçe düşen bir gaz akımı süregelmektedir. (B) fazında hava kabarcıklar halinde geçmektedir. II (A)'da bulunan karbon; II (B) bölgesinden gelen CO_2 ve H_2O tarafından gazlaştırılarak CO ve H_2 'e dönüştürülür.

Oluşan gazlar; (A) ve (B)'de kabarcıkların taşıdığı ikinci hava ile reaksiyon girerek kısmen yanarlar. Yoğun fazdan geçen gazların temel olarak CO_2 ve N_2 'den oluştuğu ve az miktarda CO içerdiği, buna karşın, kabarcık fazın taşıdığı gazın ise CO_2 ve havadan meydana geldiği tahmin edilmektedir. Kabarcıkların taşıdığı O_2 oranı; kabarcıklar yükseldikçe azalmaktadır. Böylece O_2 bakımından fakirleşen (A); gazlaştırıcı ve

indirgeyici bir ortam haline gelmektedir. **II (B)** bölgesinde kabarcıkların içinde kalan kömür taneciklerinin yanmasıyla önemli, ancak sınırlı bir yanma gerçekleşebilmektedir.

III. Bölge:

Bu bölge aktif yatağın hemen üstünde yer alan göreceli sık bir bölgedir. Aktif yatak boyunca yükselip, yatak yüzeyine ulaşınca patlayan kabarcıkların taşıdığı katı tanecikler bu bölgede önemli miktarlara ulaşmaktadır. Yoğun fazdan gelen CO, sürüklenen kömür tanecikleri ve UM'ler **III. Bölgede** kısmen karışarak kabarcık fazın taşıdığı hava ile reaksiyona girer ve yanarlar. Yanma sonucu önemli ölçüde enerjinin açığa çıktığı bu bölgede, gaz sıcaklığının çoğu zaman yatak içi sıcaklıklardan daha yüksek olduğu saptanmıştır.

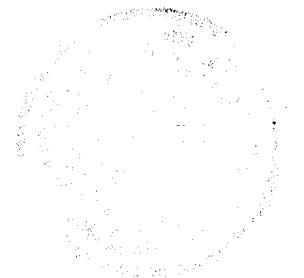
IV. Bölge:

Yüksekliği 3-5 m'ye kadar uzanabilen bu bölgenin başlıca işlevi; yataktan sürüklenen küçük kömür taneciklerinin bir kısmını ayrıştırmak, kömür tanecikleri ve CO için ek bir karışma hacmi ve yeterli bir yanma süresi sağlamaktır. Bu bölgede sıcaklıkların düşük, örneğin 600-650 °C, ve kömür derişiminin yüksek olması durumunda kısmi yanma sonucu bir miktar CO oluşabilir.

Yatağa beslenen kömür tanecikleri; yoğun fazda ve kendisini çevreleyen inert katı tanecikler tarafından birkaç saniyelik bir süre içinde yatak sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Isınma sürecinde kömürü terkeden UM'ler yoğun faz içerisinden geçen hava ile karışarak yanarlar. Etkin gaz karışımının meydana geldiği koşullarda UM'ler kabarcık faz içine difüze olarak orada da yanmayı sürdürmektedirler (Atakül, 1985).

2.3 Serbest Bölgenin Önemi

AYY hacminin yaklaşık %75'i SB'den, %25'i veya daha azıda aktif yataktan meydana gelmektedir. Diğer yandan akışkanlaşma hızı 1-2 m/s iken yanma reaksiyonlarının ortalama %90'ı aktif yatakta %10'u SB'de kendini göstermektedir. Ancak açığa çıkan enerji dağılımının kesin olarak bilinmesi çok önemlidir, aksi taktirde sistem performansında büyük düşüşler olacaktır (Vural, 1989).



Prins; (1989) iki boyutlu bir AY'de UM yanma davranışını deneysel olarak incelemiştir. Uçucu madde alevinin yoğun fazda oluşmadığını; buna karşılık kömür taneciği kabarcık fazı sınırlarında yer aldığı; kabarcık faz içinde UM alevinin oluşabileceğini belirtmişlerdir. Uçucu madde çıkış süresince kömür tanecikleri genellikle yüzeyde kalmaya eğilim gösterdiğinden UM alevinin büyük bir çoğunlukla aktif yatak yüzeyinde olduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışmada; %21 oksijen konsantrasyonunda UM alevlenme sıcaklığı yaklaşık 680°C olarak ölçülmüş ve uçucuların alev alma sıcaklığının yataktaki oksijen konsantrasyonunun azalmasıyla arttığı vurgulanmıştır (Prins, 1989).

Uçucu çıkış süresinin ani olduğu varsayımı matematik modelleme açısından belirgin kolaylıklar sağlamakla beraber geçerliliği tartışmaya oldukça açıktır. Bu varsayım geçerli ise UM dağılımının homojen olması besleme noktalarının konumuna bağlıdır. UM çıkışı ani değil ve yanmaları süresince iyi karışma sağlanamıyorsa UM'nin dağılımı homojen olmayacaktır. Uçucu çıkış ve karışım olayını birlikte inceleyen Stubington, uçucuların besleme noktasından geçen, düşeye göre simetrik ve yatak yüzeyine doğru yavaşça genişleyen uçucu madde çıkış bölgesinde bulunduklarını ve dağılımın homojen olmadığını vurgulamıştır. Bu durumda uçucu yanması, oksijenin bu bölgeye transferi ile sınırlıdır. Yatak boyunca yanmasını tamamlayamayan uçucular, aktif yatak yüzeyinde yanarlar. Kömür nemi de uçucuların bulunduğu fazı seyrelterek SB yanmasını kaçınılmaz hale getirmektedir (Bilge, 1988).

Stubington (1990) gerçekleştirdiği uçucu açığa çıkış modelinde uçucuların önemli bir kesrinin aktif yatak yüzeyinde açığa çıktığını (pilot ölçekli yakıcılarda yaklaşık %24, endüstriyel ölçekli yakıcılarda ise %32) belirtti. Bu değerler; **Atımtay** (1980) ve **Pillai**'nin (1982) deneysel çalışmalarındaki gözlemleri ile uyum içindedir (Stubington, 1990).

Ekinci v.ç.a. (1986) yaptıkları deneysel gözlemler sonucunda; UM yanmasının önemli bir kısmının sıçrama bölgesi ve SB'de yoğunlaştığını vurgulamışlardır. Özellikle

beslemenin yatak yüzeyi seviyesine veya SB'ye alınması ile UM yanmasının SB'de yoğunlaştığını belirlemişlerdir. Serbest bölgenin sıcaklık ve yüksekliği arttırılarak karbon taneciklerinin yanmadan AYY'den ayrılması önlenabilir. Buna uygun olarak SB'nin yüksekliği hesaplanmak istenirse; yataktan taşınmasına mücade edilebilecek taneciklerin terminal hızlarından giderek tasarım yapılabilir. Yatakta UM ve/veya SK yanması sonucu küçülen tanecikler veya başlangıçta küçük olan tanecikler SB'ye taşınır ve buradaki sıcaklığa bağlı olarak yanmalarını sürdürürler. Serbest bölgeye taşınan tanecikler üzerinde; taşınma ve reaksiyon proseslerinin yarışı söz konusudur. Tanecik sürüklenme hızı; yanma hızından çok yüksek ise yanma verimi düşer, düşük ise artar. Çok iri ve çok ince boyutlu tanecikler verimli yandıkları için bu değerlendirmenin dışındadır.

Ekinci v.ç.a (1986) AYY'larda SB'nin; kimyasal ortam olarak, besleme nokta sayısı ve konumu, kullanılan kömür ve kireçtaşı cinsi, tanecik büyüklüğü, işletme şartları ile sistem geometrisine, bağlı olarak işlevler yüklenebileceğini belirtmişlerdir.

Urkan, K. (1990) AY'de besleme sisteminin uçucu çıkış ve yanması üzerindeki etkisinin oldukça fazla olduğunu vurgulamıştır. Eğer yatak üzerinden kömür beslemesi yapılırsa küçük taneciklerde 1-15 s gibi kısa sürede uçucu çıkış ve yanması aktif yatak yüzeyinde gerçekleşmekte dolayısıyla SB'de önemli sıcaklık artışları gözlenmektedir. Diğer operasyon parametreleri uygun seçilmemişse; örneğin ani uçucu çıkışına karşılık yeteri kadar oksijen mevcut değil ise veya sıcak bölge hacmi yetersiz ise uçucular yanmadan yollarına devam edeceklerdir. Bazı kömürlerin kalorifik değerlerinin %40-50 kadarının uçuculara ait olduğu düşünüldüğünde verimde önemli düşüşler olduğu görülecektir

Aktif yatak yüzeyinde yanma olayı, **Ekinci, v.ç.a. ve Urkan, v.ç.a.** tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, SB'de sıcaklık artışının gözlenmesiyle doğrulanmıştır (Ekinci v.ç.a., 1983; Urkan v.ç.a., 1985).



Serbest bölge; AYY'nın tüm performansını belirlemede önemli bir rol oynar. Serbest bölgenin önemi, aşağıdaki koşullarda ortaya çıkmaktadır (Geldart et.al., 1986):

- Gaz ve katıların ek olarak teması sağlanır. Serbest bölgenin hidrodinamiği iyi anlaşılamamasına rağmen gazın tek fazlı (kabarcık fazın mevcut olmaması) ve tıkaç akış davranımında olmasından dolayı akışkanlaştırıcı gaz ile taneciklerin teması istenilen ölçüde sağlanabilir.
- Aktif yatakta sıcaklıklar hayli üniform olmaya eğilimli olmasına karşın SB'de önemli sıcaklık değişimleri mümkündür. Bu ise reaksiyon hızlarında artışa sebep olmaktadır.
- Isı transfer yüzeyleri SB'ye de yerleştirilebilir. Aktif yatak yüzeyine yakın yerlerde ısı transfer katsayıları daha yüksek olmakla birlikte yükseklik arttıkça; ısı transfer katsayıları hızla düşmektedir. Serbest bölgedeki taneciklerde radyasyon kayıpları önemli olabilir.

Akışkan yataklı yakıcı performansına SB'nin katkısı, çok sayıda faktöre bağlı olarak gerçekleşir.

Bunlar;

- Aktif yatakta gerçekleşen reaksiyonların miktarı,
 - Serbest bölgenin geometrisi ve yüksekliği,
 - Sürüklenen ince tanecik içeriği,
 - Siklonların veya diğer tanecik geri kazanma sistemlerinin verimliliği,
 - İşletme gaz hızı, basınç ve sıcaklık gibi işletme koşulları,
- olarak sıralanabilir.

Geldart, (1986) SB'de gerçekleşen reaksiyonların; aktif yatak derinliğine ve buraya fırlatılan taneciklerin miktarını etkileyen ısı çekici yüzeylerin mevcudiyetine bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir.

2.4 Akışkan Yataklı Yakma Sistemlerin Sınıflandırılması

Akışkan yataklı sistemler genel olarak 3 ana gruba ayrılır:

- a) Atmosferik basınçta çalışan kabarcıklı akışkan yataklar;



- b) Sirkülasyonlu akışkan yataklar;
- c) Basınçlı akışkan yataklar.

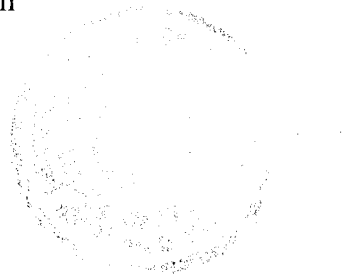
Bu üç grubun ana özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Bartok et.al., 1988; Meadowcroft, 1983; Uysal, 1991; Dry ve La Nauze, 1990; Arısoy, 1991):

a) Atmosferik basınçlı kabarcıklı akışkan yataklı kazanlar

- 1- Yatak derinliği genellikle 70-120 cm arasındadır (Kapasiteye bağlı olarak).
- 2- Yatak içinde gazın hızı 1.2-3 m/s dir. Bu da minimum akışkanlaştırma hızından (U_{mf}) büyüktür.
- 3- Yatak içindeki kabarcık kümeleri yukarıya doğru yükselirken türbülanslı bir ortam ve iyi bir karışım sağlarlar.
- 4- Yatak malzemesi olarak genellikle 500-1500 mm boyutunda kum veya külle işleme başlanır. Zamanla bunun bir kısmı oluşan yeni kül ve SO_x emisyonunu önlemek için katılan kireçtaşı veya dolomit gibi maddelerle yer değiştirir.
- 5- Kullanılabilecek maksimum kömür çapı yaklaşık 25 mm'dir.
- 6- Yatak içerisine yerleştirilen boruların yüzey alanı $6-10 \text{ m}^2/\text{m}^3$ yatak hacmi civarındadır.
- 7- Elde edilen ısı transfer katsayıları $300-500 \text{ W/m}^2\text{K}$ arasındadır.
- 8- Isı akışı;
 - Yakıt ve hava miktarları değiştirilerek yatak sıcaklığının değişimiyle,
 - Aktif yatak içerisinde kalan ısı transfer boru sayısının veya (yüzey alanının) yüzeylerinin yatak yüksekliği değiştirilerek ayarlanmasıyla, düzenlenebilir.
- 9- Sığ yatak tipinde yatak derinliği 0.15-0.3 m, gaz hızı ise 2-2.5 m/s'dir.

b) Sirkülasyonlu akışkan yataklı kazanlar

- 1- Yatak içindeki gazın hızı 3-10 m/s arasında değişebilir.
- 2- Yüksek hava hızı nedeniyle, (yüksek hızdan dolayı oluşabilecek erozyon



nedeniyle) yatak içine ısı değiştirici borular yerleştirilemez.

3- Isı transferi yan duvarlara yerleştirilen borular ile yapılmaktadır.

4- Kabarcıklı yataktaki gibi bir yatak yüzeyi tanımlamak mümkün değildir. Katı tanecikler tüm yanma hacmini doldurur ve yanma gazı ile kazandan dışarıya siklonlara doğru taşınır.

5- Siklonlarda baca gazından ayrılan tanecikler geri dönüş borusuyla yatağa gönderilir.

6- Sirkülasyonun sürekliliğinden dolayı yanmamış karbon taneciklerin kaçması çok daha düşük seviyelerde olmaktadır.

7- Birim alandan elde edilen ısı güç 4.5 MW/m^2 civarındadır. Kabarcıklı akışkan yatakta bu değer 1.3 MW/m^2 'dir.

c) Basınçlı akışkan yataklı kazanlar

1- Yatak derinliği 1.5-3 m arasında değişebilir.

2- Hava hızı 0.9-1.5 m/s civarındadır.

3- İşletme basıncı 20 bar'a kadar çıkabilmektedir.

4- Kabarcıklı veya sirkülasyonlu olarak yapılabilir.

5- Diğer yataklara göre birim alandan elde edilen güç daha fazladır.

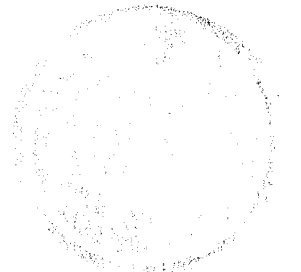
6- Azot oksit emisyonu daha az olmaktadır.

2.5 Akışkan Yatağın Avantaj ve Dezavantajları

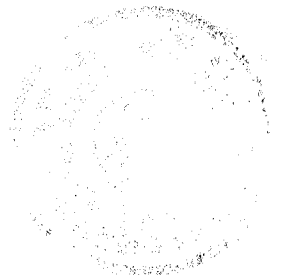
a) Akışkan yatağın avantajları

Akışkan yatakta yakma, pülverize kömürle veya diğer katı yakıtlar ile çalışan alışılmış enerji üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında çeşitli avantajları olan bir sistemdir. Akışkan yataklı yakıcıların en belirgin özellikleri; yatak içerisindeki türbülans sayesinde iyi bir karışım ve yüksek ısı transfer hızları elde edilebilmesidir. Bunun sonucu olarak Akışkan yataklarda homojen bir ısı dağılımı söz konusudur. Bu özellikleri sayesinde AY'ler aşağıda belirtilen avantajları sağlamaktadır:

1- Kimyasal reaksiyon hızı oldukça yüksektir. Bu nedenle AYY'de yakma; diğer sistemlerden daha küçük bir reaktör hacmi gerektirir.



- 2- Yatak sıcaklığının; 750°C - 950°C arasında olması yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme kullanımını gerektirmez.
- 3- Toplam olarak yatırım masrafları pülverize kömür yakma tesisleri ile kıyaslandığında %10-20 civarında daha azdır.
- 4- Yatak sıcaklığı; kül sinterleşme sıcaklığının (yaklaşık 950 °C) altında olduğundan AYY'de yanma sonucunda sinterleşmiş kül oluşmaz. Bu nedenle yatakta bulunan ısı değiştirici yüzeylerde sinterleşmiş kül aşındırması söz konusu değildir.
- 5- Kömürün pülverize edilmesi değil, sadece kırılması ve öğütülmesi yeterli olduğundan kömür hazırlama masraflarında da düşüş görülmektedir.
- 6- Yataktaki düşük çalışma sıcaklığı; (750°C-950°C) nedeniyle katı yakıtların içinde bulunan alkali tuzları çok az buharlaşırlar ve genellikle külde kalırlar. Böylece alkali tuzlarının buharlaşıp, yanma gazlarının geçtiği kısımlarda yoğunlaşarak oluşturdukları korozyon önlenmiş olur. Bu sebepten AYY'larda ki bakım giderleri diğer kömür yakma sistemlerine oranla %7-10 daha azdır.
- 7- Yatak içerisindeki iyi karışım ve yüksek ısı transfer hızları; oldukça kararlı bir yakma sistemi oluştururlar. Katı yakıt konsantrasyonu çok düşük olan yatakta (%5 civarında); inert malzeme bir ısı deposu görevi yaptığı için; ısı girdisinde yapılan değişikliklere sistemin tepkisi oldukça yavaştır. Dolayısıyla sıcaklık kontrolünün çok hassas olması gerekmez. Otomatik işletme kontrolü oldukça kolaydır.
- 8- Yatak içerisinde iyi bir karışımın olması ve yanma için gerekli bol miktarda havanın bulunmasından dolayı, yakıt veya hava teması olmayan kısımlar oluşmaz. Kömür taneciklerinin birbirine yapışarak hava ile temas alanının azalması söz konusu değildir. Bundan dolayı AYY'larda yanma prosesi; yakıtın karbon, nem, kül yüzdesi gibi özelliklerinden fazla etkilenmeksizin her çeşit yakıt için yüksek verimle gerçekleştirilebilir.
- 9- Akışkan yaatlarda tam ve yüksek verimle yanma sağlamak için kömürlerin ön hazırlama işlemlerinden geçirilmesine gerek yoktur. Yanma verimi; çıkan gazlardaki katı taneciklerin siklonlarla toplanarak yeniden yatağa beslenmesi yolu ile çok arttırılabilir. Bu yolla ve kömürlerin yatakta kalma sürelerini attırarak yanma verimini %90'nın üzerine yükseltmek mümkün olabilmektedir.



10- Akışkan yatakta yakma; çevre kirliliği açısından da büyük yararlar sağlamaktadır. Yatağa beslenen kireçtaşı veya dolomit; yanma sırasında oluşan SO_2 gazlarını kolayca tutabilmektedir. Bu yöntem; SO_2 'nin yıkama yolu ile gazlardan ayrıştırılmasından ekonomik ve teknik açıdan daha avantajlıdır. Kireçtaşını teorik miktarda kullanılması ile SO_2 çıkışı %80 oranında azalmakta, teorik miktarın iki katını kullanarak SO_2 'nin tutulma verimi %90'nın üzerine çıkarılabilmektedir. AYY sisteminde çalışma sıcaklığının 750-950°C gibi düşük değerlerde olmasından dolayı NO_x oluşuma da çok azdır. Yataktan yanma gazları ile çıkan uçucu kül partikülleri de siklonlarla kolayca tutulabilmektedir.

11- Akışkan yataklı yakıcı sistemleri, sadece katı yakıtlara bağımlı değildir. Katı, sıvı ve gaz yakıt aynı sistemde istenirse aynı anda da yakılabilir. Bu da sisteme çok yararlı bir esneklik getirmektedir.

Yukarıda sıraladığımız avantajlarından dolayı yakıt özelliklerine en az bağımlı bir teknoloji olarak beliren AY'ta yakma; yapısal olarak birbirinden çok farklı özellikler gösteren Türk linyitleri için en uygun teknoloji olarak gözükmektedir. Bu teknoloji ile en verimli yakmayı sağlamak için gerekli değişiklik ve düzenlemelerin ancak söz konusu linyitin özelliklerinin yeterince bilinmesi ile gerçekleştirilebilir (MESAB Raporu, 1983).

b) Akışkan yatağın dezavantajları

- 1-** Kömür ve kireçtaşı hazırlama tesisleri, siklon tutucular, vantilatörler gibi önemli ilk yatırım ve işletme masrafları vardır.
- 2-** Yataktaki basınç kaybı işletme masraflarını artırır.
- 3-** Kül oranları yüksek ve yanma sonucunda tanecik boyutlarında küçülme olmayan kömürlerde kül, üstten yanma gazlarıyla sistemi terk etmez. Ayrıca kül boşaltma sistemi gerekir. Bu ise ek masraflara ve verim kaybına neden olur.
- 4-** Yatağın ısı kapasitesinin yüksek olmasından dolayı yük kontrolü zor olabilir.
- 5-** Tanecikler akışkanlaştırma esnasında yatak yüzeyi ve ısı taşıyıcı borulara çarparak korozyona sebep olabilir.



2.6 Akışkan Yatağın Hidrodinamiği

Akışkan yataklı yakıcılar fonksiyonel olarak tanecik ve kabarcıklardan oluşan aktif yatak ve taneciklerin az yoğun bulunduğu SB olmak üzere iki farklı bölgeye ayrılırlar. Serbest bölgedeki taneciklerin kaynağı olan yoğun yatak bölgesindeki kabarcık hareketleri, taneciklerin SB'deki dağılımını belirler.

2.6.1 Akışkanlaştırmayı Etkileyen Taneciklerin Sınıflandırılması

Akışkan yataklı yakıcılarda kullanılan taneciklerin yoğunluk ve boyut dağılımı akışkanlaşma davranışı üzerine etki eden faktörlerdir. Tanecikler; çok küçük veya hafif olursa yakıcıdan dışarıya kolayca sürüklenebilir kaba veya ağır olursa yatağın akışkanlaşmamasına ve sabit kalmasına sebep olur. Kararlı bir AYY prosesinin sağlanabilmesi için yatak malzemesinde geçerli olan tanecik yoğunluğu ve boyut aralığı vardır. Akışkanlaştırmanın değişik rejimlerini açıklanmadan önce yatak malzemesinin nasıl sınıflandırılabilceği konusu üzerinde durulmasında yarar vardır (Hamdullahpur, et al. 1990). Şekil 2.3'de görülebileceği gibi; Geldart, taneciklerin akışkanlaşma karakterine göre dört grupta incelenebileceğini belirtmiştir (Geldart, 1986):

A Grubu:

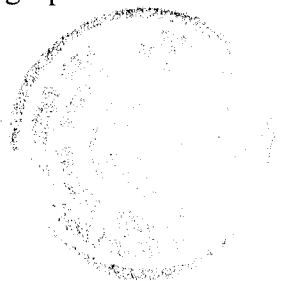
Yoğunluğu 1400 kg/m^3 değerinden az, ortalama çapı $20-100 \text{ } \mu\text{m}$ arasındaki taneciklerdir. Şekil 2.5'de görülen havanın slug oluşturmaya şeklindeki kabarcıklanma şekli başlamadan önce iyi bir yatak genişmesi gösterir. Gaz beslemesi kesildiğinde yatak yavaş yavaş çöker.

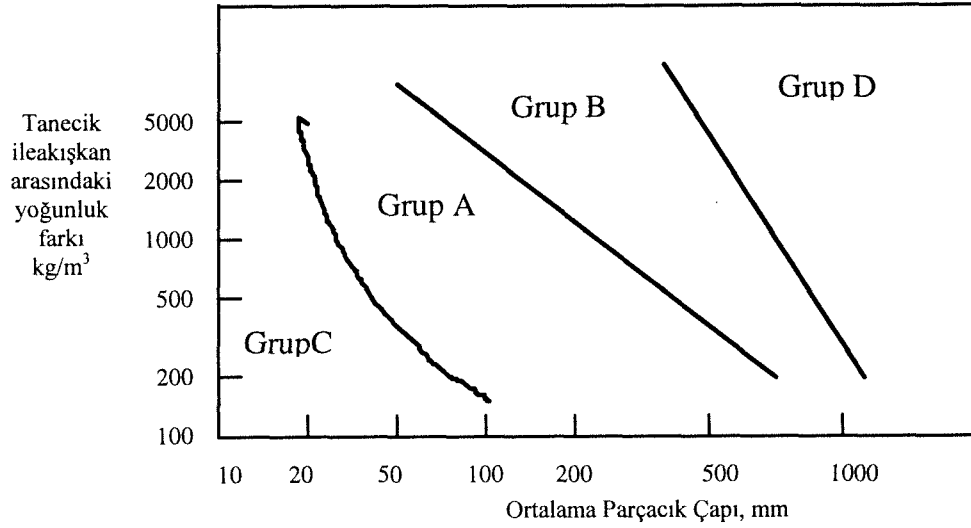
B Grubu:

Yoğunluğu $1400-4000 \text{ kg/m}^3$ ortalama çapı $400-500 \text{ } \mu\text{m}$ arasındaki taneciklerdir. Bu gruptaki tanecikler, A grubuna göre kararsız bir yatak genişmesi gösterirler. Minimum akışkanlaşma hızının biraz üzerinde kabarcıklanma başlar.

C Grubu:

Ortalama çapı yaklaşık $30 \text{ } \mu\text{m}$ değerinden küçük olan taneciklerdir. Bu gruptaki taneciklerin yığılma eğilimleri nedeniyle akışkanlaştırılmaları güçtür.





Şekil 2.3 Akışkan Yataklarda Kullanılan Taneciklerin Sınıflanması (Geldart, 1986)

D. Grubu

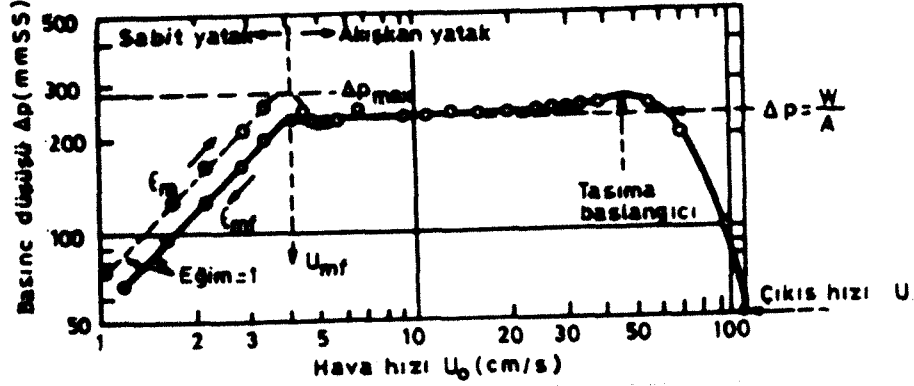
Ortalama çapları 600 μm değerinden büyük, yoğun taneciklerdir. Bu tanecikler akışkanlaşma açısından kararsızlardır.

Akışkan yataklı yakıcılar için en çok A ve B gruplarındaki tanecikler uygundur (Arısoy v.ç.a., 1988).

2.6.2 Akışkanlaştırma

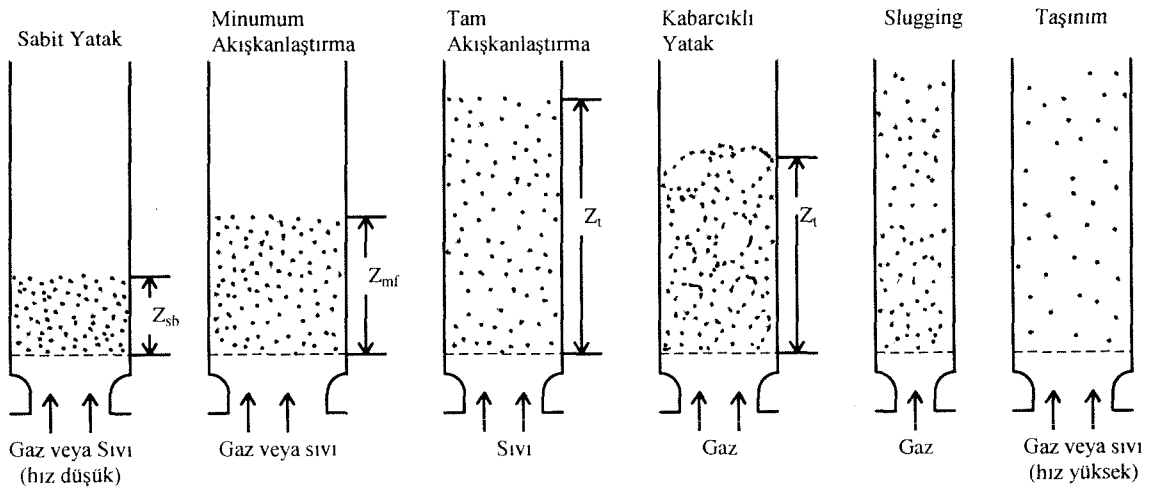
Akışkanlaştırma; gaz - katı yatağında, gaz akışının sebep olduğu çekme kuvvetleri ile katı taneciklerin batmayacak şekilde dengeye ulaştığı zaman gerçekleşir. Akışkan yataklı yakıcı, dağıtıcı bir plaka üzerine yerleştirilen bir konteynerden oluşur. Kararlı bir hızla artan akışkan (gaz); dağıtıcı plaka içerisinden yukarıya doğru geçirildiği zaman tanecikleri birbirinden ayıran güç inert malzeme arasındaki boşlukların gaz ile doldurulmasını sağlar (Hamdullahpur et.al.,1994). Düşük akış hızında akışkan hareketsiz halde bulunan taneciklerin arasındaki boşluktan süzülerek geçer. Bu tür yataklara “**sabit yatak**” denir. Bu yatak alışılmış türdeki ızgara üstünde yakma sistemlerinde görülebilir. Eğer akışkan hızı biraz arttırılırsa tanecikler birbirinden çok az ayrılırlar ve bazıları titreşirler. Bu yatağa “**genleşmiş yatak**” denir. Akış hızı daha arttırılırsa her bir tanecik gaz içerisinde asılı hale dönüşür ve bu akış davranışı

“minumum akışkanlaştırma” olarak isimlendirilir. Şekil 2.4 deki U_{mf} noktasına ulaşılmıştır. Bu noktadaki minumum akışkanlaştırma hızı AYY’nın en önemli tasarım ve işletme parametresidir. Şekil 2.4’de akışkanlaştırma ile basınç düşüşü arasındaki ilişki görülür.



Şekil 2.4 Akışkanlaştırma ve Basınç Düşüşü

Akışkanlaştırmanın en önemli özelliği; yatağı oluşturan taneciklerin yerçekimi etkisinden kurtarılarak kararsız bir hareket biçimine kavuşturulmasıdır. Akışkan hızının etkisi altındaki taneciklerin böyle bir harekete geçebilmesi için yatağın yükselerek belli bir boşluk değerine sahip olması gerekmektedir. Minumum akışkanlaşmanın meydana gelmesi için gerekli olan bu boşluk değerine “minumum boşluk oranı” denir. Şekil 2.5’de gaz ve sıvılarda değişik akışkanlaştırma rejimleri şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.5 Değişik Akışkanlaştırma Rejimleri

Akışkan hızının artırılmasına devam edilirse, eğer akışkan sıvı ise yatak düzgün bir genleşme gösterir ve kabarcıklanma olmaz. Bu tür yataklar **“homojen akışkan”** veya **“sıvı akışkan”** yatak olarak isimlendirilir. Akışkanın gaz olması halinde ise hızın artması ile yatak yüksekliği fazla değişmemekle birlikte yatakta kabarcıklanma başlar. Bu tür yataklara **“heterojen akışkan”** veya **“kabarcıklı akışkan”** yatak denir. Kabarcıklar yukarı doğru birleşerek yükseldikleri ve izlerinde katı tanecikleri taşıdıkları için verimin ve ısı transferinin azalmasına sebep olurlar.

Eğer kabarcıklar birleşerek özellikle derin (yatak yüksekliğinin yatak çapına göre büyük olduğu) yataklarda yakıcının tüm kesitini kaplarsa oluşan kabarcıklara slug bu olaya ise **“yığılma”** denir. Bu istenmeyen oluşum verimin ve ısı transferinin kötüleşmesine sebep olmaktadır. Gaz hızı arttırılmaya devam ederse önce küçük sonra iri tanecikler yataktan dışarıya taşınırlar. Tanecikleri dışarıya taşımaya başlayan akışkan hızına **“terminal hız”** (çıkış hızı) denir. Taneciklerin terminal hıza ulaştığı akışkanlaştırma hızında yatak üst yüzeyi konum ve biçim bakımından ayırt edilemez. Buna **“taşınım evresi”** denir.

Akışkan yataklı yakıcılarda akışkanlaşmanın kalitesi; tanecikler ile akışkanın özelliklerine, yatak geometrisine, akışkanın hızına, dağıtıcı eleğe, yatak içindeki ısı değiştirici yüzeylere, bağlıdır (Kunii ve Levenspiel, 1977; Ekinci v.ç.a., 1986; Urkan, 1990; Hamdullahpur, 1994).

2.6.3 Kabarcık ve Yoğun Faz Oluşumu

Literatürde mevcut kabarcıklı akışkan yatak modelleri, genel olarak üç kısımda incelenmektedir (Saxena, 1988):

- Yavaş kabarcıklı ; yoğun ve kabarcık faz arasında ayrım yok.
- İki fazlı kabarcıklı; yoğun ve kabarcık faz olmak üzere iki ayrı faz mevcut.
- Üç fazlı kabarcıklı yatak modeli; yoğun, kabarcık ve etrafındaki bulut (örtü) olmak üzere üç ayrı fazdan oluşmaktadır. Günümüze kadar yapılan model çalışmalarının çoğunda iki fazlı kabarcıklı yatak modeli incelenmiştir. İki fazlı kabarcıklı akışkan yatak

modelinde; kabarcık ve yoğun faz olmak üzere iki ayrı faz mevcuttur. Yanmanın gerçekleştirilmesi için yatağa gönderilen hava ikiye ayrılır. Birincisi taneciklerden ayrı kabarcık akımı ikincisi ise katı taneciklerin bulunduğu yoğun faz içerisinde yükselen intersitial gaz akımıdır. Kabarcık fazda; U_{mf} üzerindeki gaz hızlarında yatağı akışkanlaştırmada kullanılan gazların fazlası düşük katı yoğunluğunun bulunduğu kabarcıkları meydana getirir. Yoğun faz, dışarıdan gönderilen hava hızından bağımsız, minimum akışkanlaştırma koşulunda bulunan ve gaz tarafından akışkanlaştırılan taneciklerin bulunduğu fazdır. Kabarcıklı akışkan yatak modelinde işletme gaz hızı minimum akışkanlaştırma hızının iki katı veya $U_o > 2U_{mf}$ olduğu koşullarda şiddetli kabarcıklanma için uygun koşullar oluşmuştur. Bu durumda genel olarak yatak içerisinde üç farklı bölge tanımlanabilir. Bunlar; kabarcık, örtü ve yoğun fazdır.

Tablo 2.1’de yatak faz hacimlerinin bulunmasında kullanılan korelasyonlar görülmektedir.

Tablo 2.1 Yatak ile ilgili Korelasyonlar

Yatak hacmi (m^3, cm^3)	$V_y = \frac{\pi D_y^2}{4} Z_{mf}$
Kabarcık faz hacmi (m^3, cm^3)	$V_b = V_y \epsilon_b$ $\epsilon_b = \frac{(U_o - U_{mf})}{U_b}$
Yoğun faz hacmi (m^3, cm^3)	$V_e = V_y (1 - \epsilon_b)$
Intersitial gaz hacmi (m^3, cm^3)	$V_i = V_e \epsilon_{mf}$
İnert malzeme hacmi (m^3, cm^3)	$V_t = V_e - V_i$
İnert malzeme ağırlığı (kg)	$m_t = V_t 0.95 \rho_t$
Yatak hacimsel gaz akış hızı ($m^3/s, cm^3/s$)	$q_y = \frac{\pi D_y^2}{4} U_o$
Kabarcık gaz akış hızı ($m^3/s, cm^3/s$)	$q_b = \frac{\pi D_y^2}{4} (U_o - U_{mf})$
Yoğun fazda intersitial gaz akış hızı ($m^3/s, cm^3/s$)	$q_i = \frac{\pi D_y^2}{4} U_{mf}$
Yatak boşluğu	$\epsilon_{yb} = \epsilon_b + (1 - \epsilon_b) \epsilon_{mf}$

2.6.4 Kabarcık Büyüklüğü ve Yükselme Hızı

Akışkan yataklı yakıcılarda yanma prosesinin işletimi ve dizaynı için kabarcık boyutunun bilinmesi gerekmektedir. Literatürde kabarcık boyutunun tahmini için çok sayıda korelasyon mevcuttur. Tablo 2.2’de verilen korelasyonlardan görülebileceği gibi kabarcık çapı d_b ’nin U_o ve U_{mf} arasındaki fark ile orantılı olduğu görülür:

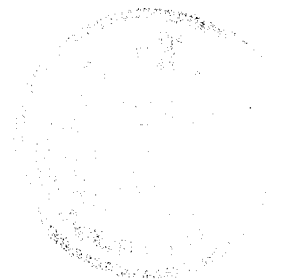
$$d_b \propto (U_o - U_{mf}) \text{ ve/veya } d_b \propto (U_o / U_{mf})$$

Tablo 2.2 Kabarcık Çapını Veren Korelasyonlardan Bazıları

Araştırmacılar	Korelasyonlar
Cranfield, Geldart (1974)	$d_{bm} = 0.0326 (U_o - U_{mf})^{1.11} z^{0.81}$
Mori ve Wen (1975)	$d_b = d_{bm} - (d_{bm} - d_{bo}) \exp(-0.3z / D_Y)$ $d_{bm} = 0.652 [A_y (U_o - U_{mf})]^{0.4}$ $d_{bo} = 0.347 [A_y (U_o - U_{mf}) / (n_d)]^{0.4}$
Geldart (Mori, Wen 1975)	$d_b = d_{bo} + 0.027 (U_o - U_{mf})^{0.94} z$
Geldart (Bukur, Nasif 1985)	$d_b = d_{bo} + 2.05 (U_o - U_{mf})^{0.94} z^1$
Horio, Nonaka (Shiau, Lin 1993)	$\frac{dd_b}{dz} = 0.3 \frac{d_{bm} - d_b}{D_y} \rho_t d_b^{1/2}$

Atmosferik basınçlı kabarcıklı bir yatakta kabarcık yükselme hızı Davidson ve Harrison’un (1963) verdiği denklemden hesaplanabilir (Davidson et al., 1985). Kabarcık yükselme hızı ile kabarcık çapı arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde görülebilir.

$$U_b = (U_o - U_{mf}) + 0.711 \sqrt{g d_b} \quad (2.1)$$



$d_b < (D_y / 3)$ koşulu için denklik 2.2 yazılabilir.

$$U_b = (U_o - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gd_b} \quad (2.2)$$

İşletme gaz hızı $U_o = U_{mf} / \epsilon_{mf}$ denkleminde $\epsilon_{mf} = 0.4$ alınarak hesaplanabilir.

2.7 Akışkan Yataklarda Tanecik Hareketleri

Akışkan yataklı yakıcı tasarımında tanecik hareketlerinin önemi büyüktür. Yatakta taneciklerin eksenel veya yanal olarak taşınmaları; katı-gaz teması, sıcaklık dağılımı, ısı transfer katsayısı, katı taneciklerin aktif yataktan atılma noktalarının yer ve sayısı, dağıtıcı elek seviyesinde ölü noktaların oluşup oluşmaması gibi faktörleri etkilemektedir.

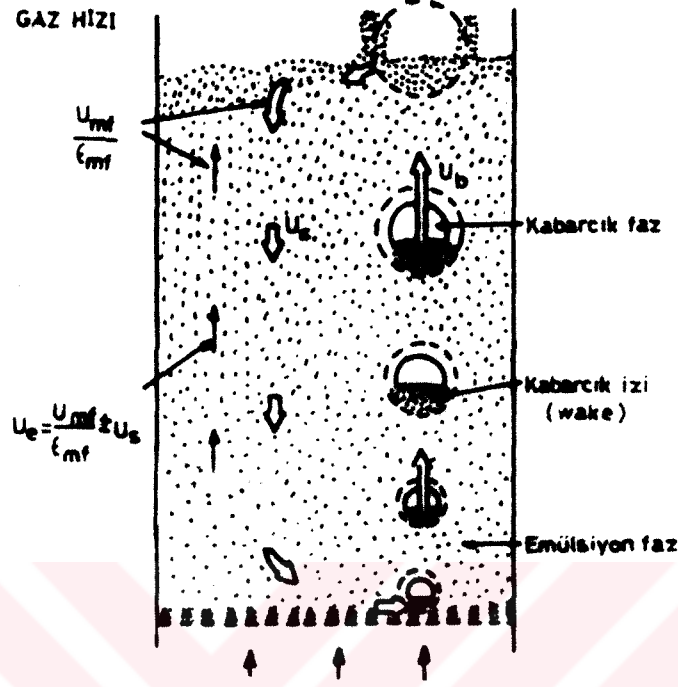
Katı taneciklerin akışkan yataktaki hareketlerinin; aktif yatak ve SB'de ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir.

2.7.1 Aktif Yatakta Tanecik Hareketleri

Dağıtıcı eleğin hemen üzerinde oluşmaya başlayan gaz kabarcıkları yoğun faz içerisinde yükselirken birleşerek daha büyük çaplı kabarcıklar meydana getirir. Kabarcık belli bir büyüklüğe eriştiğinde parçalanarak irili ufaklı yeni kabarcıklar meydana getirir ve bu durum aktif yatak yüzeyine ulaşınca kadar devam eder. Bu akışa tıkaç akış (plug flow) denir. Akışkan yataklı yakıcılara giren kömür tanecikleri, kabarcık hareketi sebebiyle yatak yüzeyine doğru yükselir ve başlangıçta yanından geçen bir kabarcık tarafından kaldırılıncaya kadar sabit kalır. Tanecik kabarcık tarafından aktif yatakta daha üstte sabit bir noktaya taşınırken aynı zamanda yana, eksenel olarak da yer değiştirir.

Şekil 2.6'da kabarcıklı akışkan yatak modelinde; gaz ve taneciklerin hareketleri görülebilir. Şekilde; kabarcık bir örtü ile çevrilidir ve kabarcıklar tanecikleri izlerinde (wake) taşırlar. Bu konuda çalışan **Rowe ve Partridge**; kabarcık toplam küresel

hacminin %25'ini kabarcık iz hacminin kapsadığını ve tanecik çapı azalması ile bu miktarının artmaya eğilimli olduğunu göstermişlerdir (Yates et.al., 1983).



Şekil 2 .6 Kabarcıklı Yatak Modelinde Gaz ve Tanecik Hareketi

2.7.2 Serbest Bölgedeki Tanecik Hareketleri

Serbest bölgedeki tanecikler; birçok faktöre bağlı olarak değişmekte ve oldukça karmaşık bir davranım göstermektedirler.

Serbest bölge aşağıda açıklanan farklı özellikler gösteren bölgelere ayrılır:

I.Bölge: Aktif yatak yüzeyinin hemen üzerindeki saçılma (splash) bölgesi,

II.Bölge: Taşınım ayrışma yüksekliğine (TAY) kadar olan ayrışma bölgesi (saçılma ve ayrışma bölgesi arasında belli bir sınır olmadığı için burası saçılma bölgesinde içerir),

III.Bölge: Taşınım ayrışma yüksekliğinin üzerindeki bölge.

Aktif yatak yüzeyinden, **I. ve II. bölgeye** fırlatılan tanecikler; tanecik boyutu ve gaz hızına bağlı olarak ya yukarı ya da aşağı doğru hareket ederler. **I. bölgede;** tanecik

hareketlerinin çoğunlukla yukarı doğru olduğu kabul edilir ve tanecik dağılımı oldukça ünitormdur. Fırlatılan nispeten büyük çaplı taneciklerin çoğunluğu aktif yatağa geri döner. Genel olarak başarılı AYY dizaynlarında, SB yüksekliğinin TAY'ye eşit olduğu ve bundan dolayı **III. Bölgenin** mevcut olmadığı görölmektedir (Geldart, 1986).

Taneciklerin sürüklenme hızı SB boyunca eksponansiyel azalma göstermektedir (Wen ve Chen,1980; Martens, 1984). Bu konuda üç farklı görüş söz konusudur. Bazı araştırmacılar; bu azalmayı yatak yüzeyindeki taneciklerin enerji dağılımını Maxwell-Boltzman dağılım kanunu ile açıklayarak göstermeye çalıştılar. Bir grup araştırmacı ise bu eksponansiyel azalmanın tanecik taşınması açısından SB'de gözlenen üç farklı faz arasında katı tanecik değişimi sonucu ortaya çıktığını ileri sürmektedirler. Üçüncü bir görüş ise gerçek gaz hızının SB yüksekliği ile eksponansiyel olarak azalması sonucunda olduğu şeklindedir (Eskin, 1989, Martenz, 1984).

Serbest bölgenin üst seviyelerindeki katı tanecik taşınımı; SB yüksekliğine göre değişir. Yapılan deneysel çalışmalardan görölebileceği gibi tanecik taşınması açısından yukarıda belirtildiği gibi SB; üç farklı bölgeye ayrılır:

- Saçılma bölgesi $0 > Z_{SB} > 0.3 \text{ m}$
- Yoğun tanecikli bölge $0.3 > Z_{SB} > 0.7 \text{ m}$
- Seyrek tanecikli bölge $0.7 > Z_{SB} > 1.5 \text{ m}$

Serbest bölgeye taşınan taneciklerin debisi konusunda günümüze kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yukarıda sıralanan yaklaşımlar gözönüne alınarak SB içerisinde katı taneciklerin yüksekliğe bağlı olarak taşınma hızlarını veren ifade aşağıdaki gibidir.

$$F = F_{\infty} + (F_0 - F_{\infty}) \exp (-a Z_{SB}) \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'deki F; SB'ye taşınan toplam tanecik debisi, F_{∞} ; SB'de TAY'nin üzerinde sürüklenen toplam tanecik debisi (SB'den dışarı taşınan tanecik debisi), F_0 ; aktif

yataktan SB'ye atılan taneciklerin toplam debisi, Z_{SB} ise SB yüksekliğini ifade etmektedir. Sistemin karakteristiğini temsil eden sabit sayı a 'dır. Bu denklemde; saçılma bölgesinde $a=2$, yoğun tanecikli bölgede $a=11.8$, seyrek tanecikli bölge için ise $a= 4.3$ değerini almaktadır (Martenz, 1984).

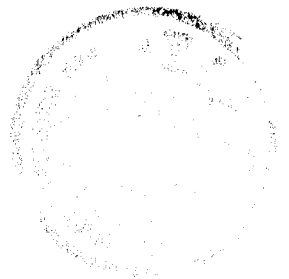
2.7.2.1 Serbest Bölgeye Atılan Taneciklerin Kaynağı

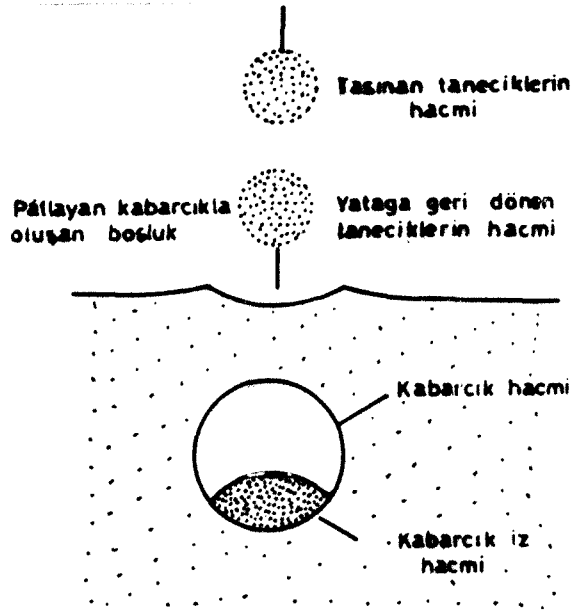
Serbest bölgedeki tanecik yoğunluğunun ısı aktarımına ve AY'den tanecik taşınımının genel mekaniğine etkisi açısından yatak yüzeyinden SB'ye atılan taneciklerin kaynağının tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Bu taneciklerin hız dağılımı, SB'deki yoğunluklarını ve dinamiğini kontrol eder. Serbest bölgede taneciklerin yoğunluğu ise tanecik çapı (dolayısıyla kabarcık çapı), akışkanlaşma hızına (dolayısıyla kabarcık büyüklüğü ve sayısı), yatak içindeki ince tanecik miktarına bağlı bir parametredir (Ekinci v.ç.a., 1986).

Genel olarak taneciklerin; aktif yatak yüzeyinde kabarcıklar patladığı zaman açığa çıkan gaz ile SB'ye fırlatıldıkları gözlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde SB'ye atılan taneciklerin orijini ile ilgili iki farklı görüş söz konusudur.

Do et al. iki boyutlu bir yatakta aktif yatak boyunca yükselerek yüzeye ulaşan kabarcığın patlaması ile fırlatılan taneciklerin kabarcığın üst kısmı ile taşındığını fotoğraf tekniği ile gözlemişler, taneciklerin SB'ye fırlatılma hızının ise kabarcık yükselme hızından daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Basov et al., Leva ve Wen, George ve Grace gibi araştırmacılar ise alternatif görüşü savunmuşlar ve SB'ye atılan taneciklerin önemli bir kısmının kabarcığın iz bölgesindeki taneciklerden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır (Yates et.al., 1983). Serbest bölgeye fırlatılan taneciklerin modeli; Şekil 2.7'de görülebilir.





Şekil 2.7 Kırcık İzinde Taşınan Taneciklerin SB'ye Fırlatılması (Yates ve Rowe)

Gözlemler; iki kırcığın yüzeye yakın birleşmesi halinde taneciklerin daha yükseğe atıldığını göstermiştir. **Baskakov et al.**'un geliştirdiği patlama modeli bu mekanizmayı şöyle açıklamaktadır. Modele göre yüzeye yakın bölgede kırcık birleşimi meydana geldiği zaman üst kısımdaki kırcığın yüzeye ulaşması ile açılan derin kraterden açığa çıkan gaz; taneciklerin SB'nin üst kısımlarına atılmasına sebep olur. Serbest bölgeye fırlatılan taneciklerin orijini; küçük çaplı olmaları durumunda alt kısımdaki kırcığın izinden büyük çaplı olmaları halinde ise öndeki kırcığın üst kısmından atılır (Ekinci v.ç.a., 1986).

2.7.2.2 Taneciklerin Yatak Yüzeyinden Serbest Bölgeye Taşınması

Aktif yatak yüzeyinden SB'ye taşınan taneciklerin debisi konusunda bugüne kadar çeşitli çalışmalar yapılmış olmakla birlikte konuya tam anlamıyla bir açıklama getirilememiştir. Pemberton et.al. (1984) kırcıklı akışkan yatak yüzeyinden SB'ye sürüklenen taneciklerin kırcık patlama mekanizmasına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Yatak geometrisine, işletme hızına ve tanecik tipine bağlı olarak tanecikler kabarcık izinde ve üst kısmı ile taşınarak SB'ye fırlatılırlar.

Pemberton et al.; iki alternatif fırlatma mekanizması olduğunu ileri sürmektedirler:

1.Yaklaşık olarak $U_o/U_{mf} < 10-15$ değerlerini alan B grup tanecikler patlayan kabarcığın üst kısmından SB'ye fırlatılır.

2.Yaklaşık olarak $U_o/U_{mf} > 10-15$ değerlerini alan A ve B grup taneciklerden SB'ye atılanların önemli bir kısmını kabarcık izindeki tanecikler meydana getirir. Taneciklerin; yüzeyden sürüklenme ve fırlatılma hızı mekanizma 1 ile karşılaştırıldığında çok daha büyüktür (Pemberton ve Davidson, 1986a, 1986b).

George ve Grace (1978) bu konuda yaptıkları çalışmalar sonucu SB'ye aktif yataktan fırlatılan taneciklerin debisini, aşağıdaki korelasyonla ifade etmişlerdir:

$$F_o = 0.5 (1.42 d_b - 0.091) \rho_t (1 - \epsilon_{mf}) (U_o - U_{mf}) \quad (2.4)$$

Bu ifade; yaklaşık çapı $d_t = 350 \cdot 10^{-6}$ m olan silis kumu, minimum işletme hızı $U_{mf} = 0.1$ m/s kabarcık çapı, $0.064 < d_b < 0.15$ m, yatak çapı $D_y = 0.457$ m değerleri için elde edildi. Daha sonra ise katı tanecik debisi; F_o için **Wen ve Chen** (1982) aşağıda görülen bağıntıyı önermişlerdir.

$$F_o = 3.07 \cdot 10^{-9} \frac{d_b A_y \rho_g^{3.5} g^{0.5} (U_o - U_{mf})^{2.5}}{\mu^{2.5}} \quad (2.5)$$

Araştırmacılar yukarıdaki korelasyonu; yatak çapı $0.051 \text{ m} < D_y < 0.61 \text{ m}$, inert malzeme yoğunluğu $840 \text{ kg/m}^3 < \rho_t < 2650 \text{ kg/m}^3$, işletme hızı $0.12 \text{ m/s} < U_o < 0.9 \text{ m/s}$, inert tanecik çapı $59 \cdot 10^{-6} \text{ m} < d_t < 450 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ arasındaki değerler için önermişlerdir (Martenz, 1984).

Genel olarak her iki bağıntıda; kabarcıklı AYY'lerde düşük işletme hızları, küçük tanecik boyutları için çevre basınç ve sıcaklığı baz alınarak bulunmuştur.

Pemberton ve Davidson (1983) yarı küresel kabarcık kabulü ile yatak yüzeyinden atılan taneciklerin debisini incelemiş ve aşağıdaki korelasyonları sunmuşlardır:

Kabarcık üst kısmı (roof) ile SB'ye taşınan tanecik debisi;

$$F_o = \frac{3 d_t \rho_t (1 - \epsilon_{mf}) (U_o - U_{mf})}{d_b} \quad (2.6)$$

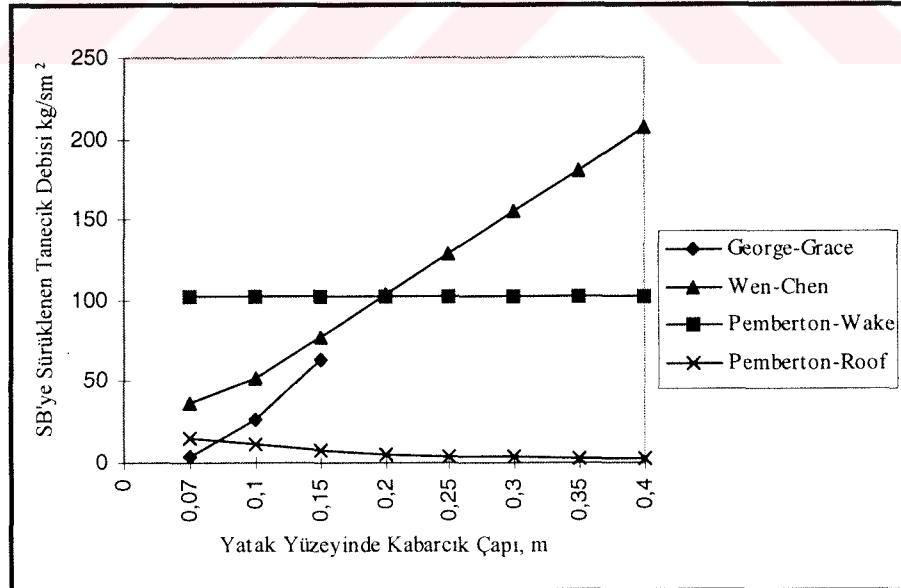
Kabarcık izinde (wake) SB'ye taşınan taneciklerin debisi;

$$F_o = 0.1 \rho_t (1 - \epsilon_{mf}) (U_o - U_{mf}) \quad (2.7)$$

Kabarcık üst kısmı ile taşınan taneciklerin, kabarcık izinde taşınanlara oranı; $30 \frac{d_b}{d_t}$ 'dır.

Pemberton (1982) tarafından; düşük tanecik debisinde $F_o < 10 \text{ kg/m}^2\text{s}$ değerleri için denklem 2.6, $F_o > 50 \text{ kg/sm}^2$ değerlerinde ise denklem 2.7'in kullanılmasını önerilmektedir (Martenz, 1984).

Aktif yatağın üst yüzeyinden SB'ye fırlatılan taneciklerin debisi; aktif yatak yüzeyine ulaşan kabarcık çapına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim Şekil 2.8'de görülebilir. Aynı zamanda Şekil 2.8'de yukarıda adı geçen araştırmacıların; önerdiği korelasyonlar karşılaştırılmaktadır.



Şekil 2.8 Serbest Bölgeye Sürüklenen Tanecik Debisini Kabarcık Çapının Fonksiyonu Olarak Veren Korelasyonların Karşılaştırılması

Tablo 2.3’de Şekil 2.8’de birbirleri ile kıyaslanan korelasyonlarda kullanılan parametreler ve aldıkları değerler görülebilir.

Tablo 2.3 Karşılaştırılan Korelasyonlarda Kullanılan Parametreler

Parametreler	Birim	Değer
Min.Akış. Hızı	m/s	0.093
Min. Akış. Boşluk	-	0.45
İşletme Hızı	m/s	0.8
Yatak Çapı	m	0.16
Ort İnert Malzeme Çapı	m	$0.35 \cdot 10^{-3}$
İnert Malzeme Yoğunluğu	kg/m^3	2640
Akışkanlaştırıcı Gaz Yoğ.	kg/m^3	1.118
Akışkanlaştırıcı Gaz Vis.	kg/ms	$1.798 \cdot 10^{-5}$

2.7.2.3 Taneciklerin Serbest Bölgeden Taşınması

Serbest bölgeye taşınan taneciklerin büyük bir kısmı aktif yatağa geri döner. En basit ifadeyle; taneciklerin serbest düşme hızları; gaz hızından büyük ve SB yeterince yüksek ise taneciklerin büyük bir kısmı geri dönerler. Bunun aksi söz konusu olduğunda tanecikler; yatak işletme hızındaki gaz tarafından yataktan dışarı sürüklenirler.

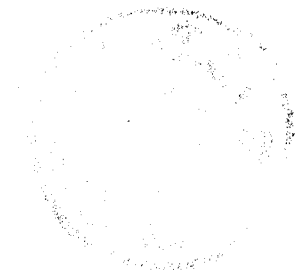
Yataktan sürüklenen i boyutundaki taneciklerin debisi $F_{i\infty}$ denklik 2.8’den hesaplanabilir:

$$F_{i\infty} = E_{i0} X_i \quad (2.8)$$

Denklem 2.8’deki E_{i0} ; sürüklenme hız sabiti, X_i ise yatakta mevcut i boyutundaki taneciklerin ağırlık kesridir.

Aktif yataktan taşınan taneciklerin toplam miktarı ise denklem 2.9’dan bulunabilir:

$$F_{\infty} = \sum_i F_{i\infty} \quad (2.9)$$



Denklem 2.8'deki sürüklenme hız sabitini veren birçok korelasyon literatürde mevcuttur. Bu korelasyonların uygulanabilirliği belli deneysel koşullar için geçerlidir ve farklı çaptaki yataklara, değişik işletim koşulları için uygulanması bazen olumsuz sonuçlar verebilir. Gerçekleştirilen modelde; uygulama alanı geniş olan **Merrick & Highley** (1974) tarafından geliştirilen denklem 4.24 kullanılmıştır.

Serbest bölgede yukarıya doğru yükselen i boyutundaki taneciklerin debisi:

$$F_{iY} = F_{i\infty} + (F_{i0} - F_{i\infty}) \exp(-a Z_{SB}) \quad (2.10)$$

Serbest bölgede aşağıya doğru inen i boyutundaki taneciklerin debisi:

$$F_{iA} = (F_{i0} - F_{i\infty}) \exp(-a Z_{SB}) \quad (2.11)$$

2.7.2.4 Serbest Bölgede Mevcut Taneciklerin Konsantrasyonu

Serbest bölgede yanmanın modellenenebilmesi için en önemli kriterin; SB yüksekliği boyunca karbon miktarının (carbon-loading) tahmin edilmesi olduğu daha önce de belirtilmişti. SB'de mevcut karbon miktarı; prensipte iki faktöre bağlıdır:

- Taneciklerin aktif yatak yüzeyinden taşınma debisi (F_0),
- Taneciklerin SB'de bekleme süresi (t_r),

Serbest bölgede mevcut taneciklerin miktarının bulunabilmesi için denklem 2.12 kullanılabilir:

$$H_t = \sum_i \frac{F_{iY}}{U_{i,Y}} + \sum_i \frac{F_{iA}}{U_{i,A}} \quad (2.12)$$

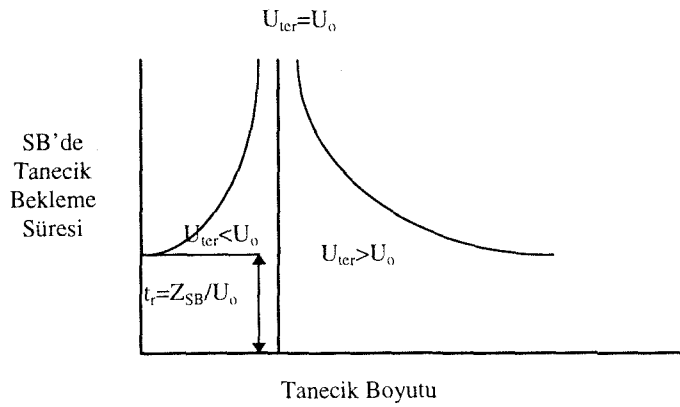
Denklem 2.12'de; i boyutundaki taneciklerin SB'de yukarı yükselme hızı $U_{i,Y}$, aşağıya inme hızı ise $U_{i,A}$ ile belirtilmiştir. Serbest bölgede mevcut i boyutundaki taneciklerin

konsantrasyonunu H_{it} , SB'de mevcut taneciklerin toplam konsantrasyonunu ise H_t vermektedir.

$U_{ter} > U_o$ olduğu durumlarda $U_{i,tY}$, kabarcık yükselme hızı U_b 'ye eşit alınabilir. $U_{i,tA}$ 'nın ise terminal hız ile işletme hız farkına ($U_{ter}-U_o$) denk olduğu kabul edilebilir. Şekil 2.9'dan görülebileceği gibi büyük tanecikleri etkileyen sürüklenme kuvveti; yerçekim kuvveti ile karşılaştırıldığında daha küçüktür. Bu sebepten büyük çaplı tanecikler; SB'de daha az zaman harcarlar ve aktif yatağa geri dönerler.

Bazı tanecik boyutları için tanecik terminal hızının; işletme hızına denk ($U_{ter} \cong U_o$) olduğu durumlarda tanecikleri etkileyen çekim kuvvetleri ile sürüklenme kuvvetleri tam dengededir. Bu durumda tanecikleri etkileyen net kuvvet, yaklaşık olarak sıfırdır ve SB'de bekleme süresi teorik olarak sonsuzdur. Serbest bölgeye taşınan tanecikler üzerinde taşınma ve reaksiyon proseslerinin yarışı söz konusudur. Reaksiyon prosesleri sonucu tanecik boyutu azalmasıyla taşıma kuvvetlerinin etkisi artar ve tanecikler yatak dışına sürüklenme eğilimi gösterirler. Dolayısıyla boyutu küçülen tanecikleri etkileyen; yerçekim kuvvetindeki azalma sürüklenme kuvvetinin artmasına sebep olmaktadır.

$U_{ter} < U_o$ olduğu koşullarda küçük tanecikler için $U_{i,tA}$ mevcut değildir (Tung et.al., 1980).



Şekil 2.9 Serbest bölgede Bekleme Süresine Tanecik Boyutunun Etkisi

Taneciklerin boyutu küçüldükçe yatak dışarısına sürüklenmeye daha eğilimlidir ve akışkanlaştırıcı gaz ile hareket ederler. Küçük boyutlu tanecikler için; SB'de bekleme süresi denklik 2.13'den hesaplanabilir.

$$t_r = \frac{Z_{SB}}{U_o} \quad (2.13)$$

Literatürde mevcut modellerde ortaya çıkan problem; $U_{ter} \cong U_o$ denkliğinin gerçekleştiği zamanlarda bekleme süresindeki olağan dışı durumdur. U_{ter} ve U_o değerlerinin birbirlerine yakınsadığı bu durum literatürde kritik bölge olarak tanımlanmaktadır.

Kritik bölge:

$$\frac{(U_{i_{ter}} - U_o)}{U_o} < 0.15 \quad (2.14)$$

olarak tarif edilebilir. Yani kritik bölgede mevcut tanecikler, işletme gaz hızının % 15'i civarında terminal hıza sahiptir. Deneysel gözlemler sonucu kritik bölge dışında kalan taneciklerin SB'deki katı tanecik konsantrasyonunda eksponansiyel azalma olduğu görülmektedir (Tung et.al, 1980).

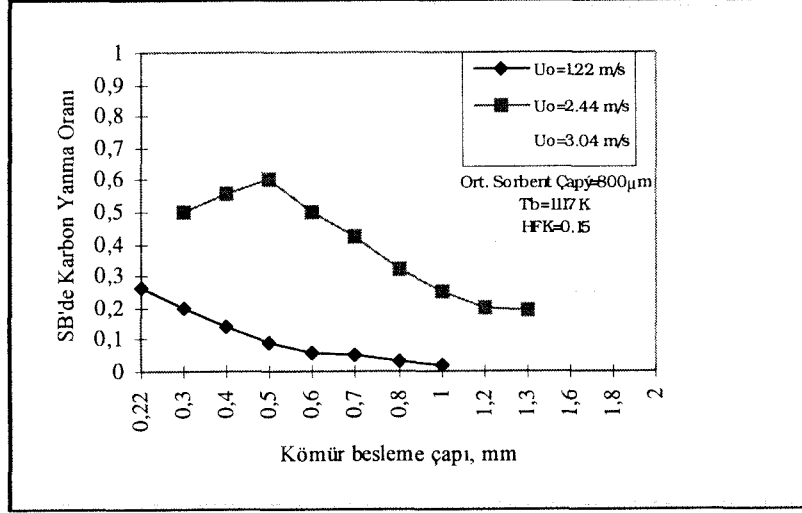
Yukarıda belirtildiği gibi kurulan modellerde; SB'de kok konsantrasyonu için genel olarak iki farklı tanecik dağılımı göz önüne alınmaktadır.

Kurulan modellerde:

- Serbest bölge boyunca tanecik konsantrasyonunun eksponansiyel azaldığı,
 - Kritik bölgede mevcut taneciklerin; SB'de üniform dağıldığı,
- kabul edilebilir.

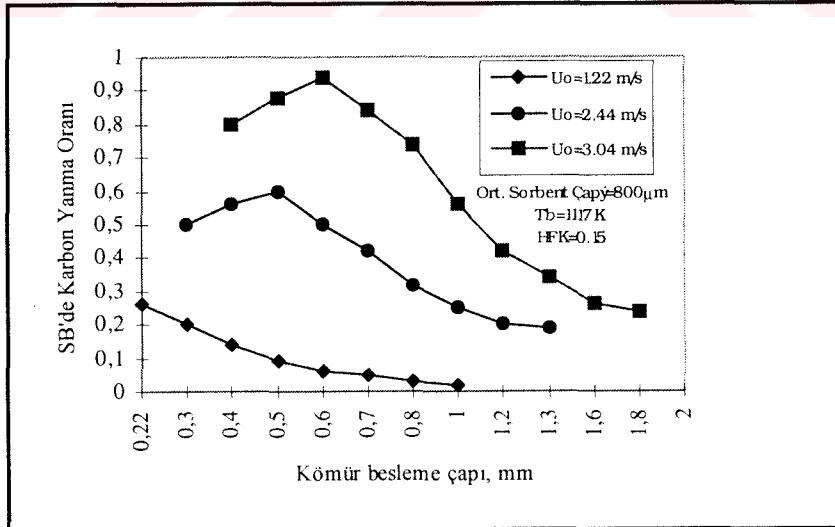
Her iki kabule göre tanecik konsantrasyonu; SB'nin yüksekliği boyunca azalacak ve bunun sonucu olarak açığa çıkan ısıda azalacaktır

Tung et al.; değişik işletme hızlarında ve farklı boyut dağılımında yatağa beslenen kömürler için geliştirdikleri model ve deneysel çalışmalardan; SB ve aktif yatakta mevcut karbon miktarının oranını bulmuşlardır (şekil 2.10).



şekil 2.10 Kömür Boyutunun SB'deki Karbon Miktarına Etkisi

Aynı araştırıcılar; değişik işletme hızlarında ve değişik kömür besleme çapları için SB ve aktif yatakta yanan karbon fraksiyonlarını bulmuşlardır (şekil 2.11). şekil 2.11'den görülebileceği gibi işletme gaz hızının artması SB'de karbon yanma oranını arttırırken, belli tanecik boyutlarından sonra tanecik boyutundaki artış bu oranı düşürmektedir.



şekil 2.11 Kömür Boyutunun SB'de Karbon Yanmasına Etkisi

2.7.2.5 Tek Boyutlu Tanecik Fırlatma Modeli

Yukarı doğru hareket eden tanecikleri etkileyen taşıma, yerçekimi ve atalet kuvvetleri arasındaki denge; **Zenz ve Weil** (1958) ile **Do et al.**(1972) tarafından denklem 2.15’de ifade edildi. Aktif yatakta mevcut tanecikler yatak yüzeyinden fırlatıldığında yukarıya doğru maksimum bir yüksekliğe ulaşır ve orada tanecik aşağıya doğru yön değiştirir. Taneciklerin SB’de ulaştığı maksimum yükseklik denklem 2.15’den hesaplanabilir. Maksimum yükseklikte taneciklerin hızı sıfırdır.

$$\frac{dU_{tY}}{dt} = - \left\{ \frac{3/4 C_D \rho_g U_{tr} |U_{tr}|}{\rho_t d_t} + \frac{(\rho_t - \rho_g)g}{\rho_t} \right\} \quad (2.15)$$

Taneciğin SB yüksekliği boyunca hız değişiminin hesaplanabilmesi için 2.15 nolu ifade denklem 2.16’e bölünerek; yüksekliğe bağlı bir fonksiyona dönüştürülebilmekte ve denklem 2.17 elde edilmektedir.

$$U_{tY} = \frac{dZ_{SB}}{dt} \quad (2.16)$$

Böylece SB’deki tanecik hızının; yüksekliğe bağlı değişimi;

$$\frac{dU_{tY}}{dZ_{SB}} = - \frac{1}{U_{tY}} \left\{ \frac{3/4 C_D \rho_g U_{tr} |U_{tr}|}{\rho_g d_t} + \frac{(\rho_t - \rho_g)g}{\rho_t} \right\} \quad (2.17)$$

denklem 2.17’den bulunabilir.

Aktif yatak yüzeyinde; kabarcıkların patlaması sonucu oluşan gaz jetlerine bağlı taneciklerin yukarı yükselme hızları U_{tY} ; yatak işletme hızı U_o , kabarcık hızı U_b , ve dağıtıcı elekten itibaren aktif yatak yüksekliği Z_y olmak üzere kabarcık çapına bağlı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Martenz, 1984):

$$U_{tY} = U_b \quad Z_y < 4.7 d_b \quad (2.18)$$

$$U_{tY} = U_o + \left(1.35 - 0.0744 \frac{Z_y}{d_b} \right) (U_b - U_o) \quad 4.7 < \frac{Z_y}{d_b} < 18.2 \quad (2.19)$$

$$U_{tY} = U_o \quad Z_y < 18.2 d_b \quad (2.20)$$

Taneciklerin ağırlıkları; gazın sürtünme kuvvetinden büyük olduğu durum için taneciklerin hızı gaz hızına eşit kabul edilebilir.

Denklem 2.17'nin çözülebilmesi için tanecikleri etkileyen relativ hız U_r 'nin hesaplanması gerekmektedir. Serbest bölgede sürüklenen taneciklerin başlangıç hızı U_{to} ile kabarcık patlaması ile oluşan gaz jetlerine bağlı tanecik hızlarının U_{tY} farkı; relativ hız U_r 'yi vermektedir:

$$U_r = U_{to} - U_{tY} \quad (2.21)$$

Relativ hıza bağlı olarak küresel tanecikler için Reynolds sayısı denklik 2.22'den bulunabilir.

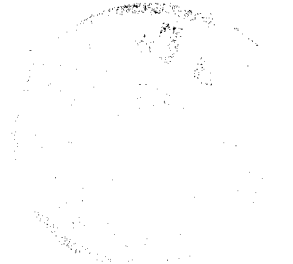
$$Re_t = \frac{\rho_g U_r d_t}{\mu_g} \quad (2.22)$$

Küresel taneciklere etki eden direnç katsayıları ise Reynolds sayısının aldığı değerlere bağlı olarak;

$$C_D = \frac{24}{Re_t} (1.0 + 0.15 Re_t^{0.687}) \quad 0 \leq Re_t \leq 1000 \quad (2.23)$$

yukarıdaki denklikten hesaplanabilir.

Yukarıdaki denklem 2.17'nin çözülebilmesi ve SB'de mevcut tanecik hızlarının modellenebilmesi için yatak yüzeyinden fırlatılan taneciklerin; başlangıç hız değeri U_{to} 'a ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı araştırmacılar; sabit kabarcık çapı veya birleşerek



büyüyen kabarcık çapı için başlangıç hız değerini veren ampirik ve teorik ifadeler geliştirdiler (Fung et.al.,1993a, 1993b).

Do et al. (1972)'de tanecik başlangıç hız değerinin yatak yüzeyindeki kabarcık davranışına bağlı olduğunu gösterdi. Bunun sonucu olarak araştırmacılar;

$$U_{t_o} = 1.15 U_b \quad \text{sabit kabarcık çapı,} \quad (2.24)$$

$$U_{t_o} = 2U_b \quad \text{birleşerek büyüyen kabarcık çapı,} \quad (2.25)$$

için yukarıdaki denklikleri önerdiler.

George ve Grace; SB'ye fırlatılan taneciklerin hızının genellikle patlayan kabarcık hızından daha büyük olduğunu gözlediler ve ortalama dikey tanecik hızının; kabarcık hızının 2.1 katı olduğu sonucuna vardılar.

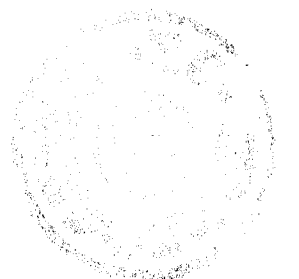
Hatano ve Ishida; taneciklerin SB'ye fırlatılma hızını optik bir probe kullanarak ölçtüler. Araştırmacıların ölçüm sonuçları; tanecik başlangıç hız değerinin tanecik patlama mekanizmasına oldukça bağlı olduğunu gösterdi.

Hatano ve Ishida;

$$0.3 \leq \frac{U_{t_o}}{U_b} \leq 1.1 \quad \text{sabit kabarcık çapı,} \quad (2.26)$$

$$1.1 \leq \frac{U_{t_o}}{U_b} \leq 2.3 \quad \text{birleşerek büyüyen kabarcık çapı,} \quad (2.27)$$

için yukarıdaki denklikleri literatüre sundular.



Pemberton ve Davidson taneciklerin SB'ye taşınmasında; iki farklı mekanizma olduğunu öne sürdüler. Bu yüzden kabarcık üst kısmı veya kabarcık izinde taşınan tanecikler için iki farklı ifade önerdiler.

$$U_{t_o} = U_b \sqrt{\frac{d_b}{12d_t}} \quad \text{taneciklerin kabarcık üst kısmında taşınması;} \quad (2.28)$$

$$U_{t_o} = 2.5 U_b \quad \text{taneciklerin kabarcık izinde taşınması;} \quad (2.29)$$

durumunda yukarıdaki denklemler kullanılabilir.

Horio et al.(1983) tarafından önerilen korelasyondan görülebileceği gibi taneciklerin başlangıç hızı; yatak yüzeyindeki kabarcık hızının 1.1 ile 2.5 katı civarındadır (Oymak, v.ç.a., 1991).

2.8 Yatakta Gerçekleşen Reaksiyonların Modelleri

Yatak içindeki reaksiyonlar; gaz-katı ve gaz-gaz reaksiyonları olarak iki ana grupta incelenmektedir. Aşağıda öncelikle gaz-katı ve gaz-gaz reaksiyonlarının modellenmesi ele alınmıştır.

2.8.1 Gaz-Katı Reaksiyonlarının Modellenmesi

Akışkan yataklı yakıcılarda tek bir kok taneciğinin yanma hızı (gaz-katı reaksiyonlarının, reaksiyon hızları); difüzyon ve kimyasal reaksiyon hızları göz önüne alınarak bulunmuştur.

Modelde gaz-katı reaksiyonlarında, reaktant gaza göre reaksiyonlar birinci dereceden ve tersinmezdir. Reaktantın reaksiyon hızı r_c ; denklik 2.30 ile ifade edilebilir:

$$r_c = k_c A_c C_i \quad (2.30)$$

Denklem 2.30'da A_c kok taneciğinin dış yüzey alanı; C_i , reaktant gazın tanecik etrafındaki konsantrasyonu, k_c ise toplam reaksiyon hız sabitidir.

Akışkan yataklı yakıcılarda gaz-katı reaksiyonları içinde en etkin olanı, kokun oksijenle reaksiyonudur. Yatak içerisine beslenen kömürün; uçucuları ayrıldıktan sonra geriye kok taneciği kalır.

Kok taneciği; ortamda bulunan O_2 ile aşağıdaki yanma reaksiyonuna göre yanar.



Kok taneciği; kok tanecik çapı ve içinde bulunduğu ortam sıcaklığına bağlı olarak karbonmonoksit veya karbondioksit indirgenir. Denklem 2.31'de Φ ; mekanizma faktörü olup 1 değeri için CO_2 , 2 değeri için CO oluşur. Küçük çaplı taneciklerde; kokun yanmasıyla meydana gelen CO , hızlı kütle transferi nedeniyle tanecik dışına difüzyonla çıkar ve taneciğin dışında yanarak CO_2 meydana getirir. Büyük çaplı taneciklerde ise kütle transferi daha yavaş olduğundan CO taneciğin sınır tabakası içinde yanar ve CO_2 difüzyonla tanecikten dışarı taşınır (Rajan ve Wen, 1980).

Mekanizma faktörü literatürde kok tanecik çapı d_c ve CO/CO_2 oranı p 'nin fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.

$$\Phi = \frac{2p+2}{p+2} \quad d_c < 0.005 \text{ cm} \quad (2.32)$$

$$\Phi = \frac{(2p+2) - p(d_c - 0.005) / 0.095}{p+2} \quad 0.005 < d_c < 0.1 \text{ cm} \quad (2.33)$$

$$\Phi = 1 \quad d_c > 0.1 \text{ cm} \quad (2.34)$$

Kok yanması boyunca yüzeyde oluşan CO/CO₂ oranı p; Arthur'un 1954'de yaptığı çalışmasından alınarak denklem 4.35'de ifade edilmiştir (Rajan ve Wen, 1980).

$$p=2500 \exp(-5,19 \cdot 10^7 / RT_y) \quad (2.35)$$

Denklem 2.30'da verilen yanma hızı ifadesi; reaktant gaz oksijen olduğunda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$r_c = \pi d_c^2 k_c C_{O_2} \quad (2.36)$$

Denklem 2.36'da πd_c^2 kok taneciğinin dış yüzey alanı; C_{O2}, oksijenin tanecik etrafındaki konsantrasyonudur.

Toplam reaksiyon hız sabiti k_c; aşağıdaki denklemden bulunabilir:

$$k_c = \frac{RT_m / M_c}{\frac{1}{k_{CR}} + \frac{1}{k_{CD}}} \quad (2.37)$$

Küçük çaplı taneciklerde; oksijenin kok yüzeyine difüzyonu büyük çaplı taneciklere nazaran daha hızlıdır. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda ve büyük taneciklerde difüzyon hız sabiti k_{CD}, düşük sıcaklıklarda ise kimyasal reaksiyon hız sabiti k_{CR} etkindir.

Yukarıdaki denklikte kimyasal reaksiyon hız sabiti k_{CR}, denklem 2.38'den bulunabilir:

$$k_{CR} = k_o T_c^n \exp(-E / RT_c) \quad (2.38)$$

Tablo 2.4'de C-O₂ reaksiyonu için literatürde mevcut değerler görülebilir (Rajan, Wen 1980). Field et al. (1967) yapılan deneysel çalışmaları analiz ederek kok reaktivitesi için denklem 2.39'u önerdiler. Bu değer; gerçekleştirilen modelde kullanıldı:

$$k_{CR} = 596 T_c \exp(-17965 / T_c) \quad (2.39)$$

Difüzyon hız sabiti k_{CD} ise denklik 2.40'dan hesaplanabilir:



$$k_{CD} = Sh M_c D_G \Phi / (d_c R T_m) \quad (2.40)$$

Denklem 2.37’de ki T_m kok taneciği etrafındaki gaz film sıcaklığı olup denklem 2.41’de görülmektedir:

$$T_m = (T_c + T_y) / 2 \quad (2.41)$$

Kok tanecik sıcaklığı T_c ; ortamdaki gaz sıcaklığından daha fazladır. Kok tanecik sıcaklığı T_c ; taneciğin çevresi için kurulan enerji dengesinden hesaplanabilir.

Karbon yanmasının; CO ve/veya CO₂ formunda olacağı yukarıda açıklanmıştı. Denklem 2.31’de tanecik yüzeyinde oluşan reaksiyon; mekanizma faktörünün fonksiyonu olarak yazılmıştı. Yanan tanecik yüzeyinde CO üretildiği için yanan tanecik ile ilgili enerji dengesinin yazılması oldukça güçtür.

Karbonun CO₂’e yanması için gerekli reaksiyon ve bu reaksiyondan taneciğe ulaşan reaksiyon ısısı H_r ise tanecik üzerinde yapılan enerji dengesi şöyle yazılabilir:

$$\frac{\pi}{6} d_c^3 \rho_c C_{p_c} \frac{dT_c}{dt} = \pi d_c^2 \sigma \epsilon_r (T_c^4 - T_y^4) + \pi d_c^2 h (T_c - T_y) - H_r \rho_c \left(-\frac{dm_c}{dt} \right) \quad (2.42)$$

Denklemin sol tarafı tanecik tarafından üretilen ısı miktarını; sağ tarafı ise yanan tanecikten kaybolan ısı miktarını göstermekte olup ilk terim ısıtım ikinci terim ise taşınım elemanıdır. Reaksiyon ısısı H_r ; denklik 2.43’den hesaplanabilir:

$$H_r = -283000 \left(\frac{2}{\phi} - 1 \right) - 110510 \left(2 - \frac{2}{\phi} \right) \quad (2.43)$$

Taneciğin kütlesi m_c , yüzey alanı A_c ve taneciğin büzülme oranı $\mathfrak{R}(r) = -dr/dt$ ile gösterilirse denklem 2.42 aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{m C_{p_c}} \left[A_c \sigma \epsilon_r (T_c^4 - T_y^4) + A_c h (T_c - T_y) - H_r \rho_c \mathfrak{R}(r) \right] \quad (2.44)$$

Burada; $m_c = A_c d_c \rho_c / 6$; $A_c = \pi d_c^2$ değerlerini almaktadır.

Akışkan yataklarda göz önüne alınan diğer gaz-katı reaksiyonları ise aşağıda verilmektedir:



Yukarıdaki reaksiyonlara ait reaksiyon hızları; denklem 2.30'da verilen bağıntıya uygun olarak hesaplanmıştır. Bu reaksiyonlardan CaO-SO₂; diğerlerinden biraz farklılık gösterir. Tablo 2.4'de C-O₂, C-CO₂, CaO-SO₂ reaksiyonları için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen ve bu çalışmada kullanılan reaksiyon hız sabitleri verilmiştir.

Akışkan yatakta yanma sonucu açığa çıkan SO₂; yatağa beslenen kireçtaşı ile tutularak yanma sonucu açığa çıkan gazlar ile çevreye atılmaz. Bir kireçtaşı taneciğinin reaksiyon hızı r_{kt} ; yatak sıcaklığına, tanecik çapına ve kireçtaşının dönüşüm faktörüne bağlı olarak ifade edilebilir:

$$r_{kt} = \frac{\pi}{6} d_{kt}^3 k_{kt} (T, f_{kt}) C_{SO_2}^m \quad (2.47)$$

Burada k_{kt} ; toplam hacimsel reaksiyon hız sabitidir ve kireçtaşı dönüşüm faktörü f_{kt} 'nin bir fonksiyonudur. Üs katsayısı m; 1-1.088 arasında değerler alır.

Toplam hacimsel reaksiyon hız sabiti k_{kt} denklem 2.48'den hesaplanabilir:

$$k_{kt} = \dot{k}_{kt} A_{kt} r_{kt} (d_{kt}, T_y, f_{kt}) \quad (2.48)$$

Denklem 2.48'de ki $\dot{k}_{kt}$ ise Wen ve Ishida (1973), tarafından tavsiye edilmekte ve denklem 2.49 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\dot{k}_{kt} = 490 \exp(-17,5 \cdot 10^3 / RT_y) \quad (2.49)$$

Spesifik tanecik yüzey alanı A_{kt} ise kalsinasyon sıcaklığına bağlı olarak Borgwardt et al.'un verilerine bağlı olarak korele edilebilir.



$$A_{kt} = -38.43 T_y + 5.64 \cdot 10^4 \quad T \leq 1253 \text{ K} \quad (2.50)$$

$$A_{kt} = 35,9 T_y - 3,67 \cdot 10^4 \quad T \leq 1253 \text{ K} \quad (2.51)$$

Kireçtaşının reaktivitesi r_{kt} ; yatak sıcaklığına, tanecik çapına ve kireçtaşının dönüşüm faktörüne bağlıdır (Rajan et.al., 1978; Rajan ve Wen, 1980).

Tablo 2.4 Akışkan Yataklarda Gözönüne Alınan Gaz-Katı Reaksiyonlarında Kimyasal Reaksiyon Hız Sabitleri ($k_{CR} = k_o T^n \exp(-E/RT)$)

Reaksiyon	Referans	Reaksiyon Derecesi	k_o (m/sK)	E/R (K)	n	Reaksiyon yüzeyi	Referans
C-O ₂	Walsh	1	596	17965	1	Dış	Field
C-O ₂	Bu çalışma	1	596	17965	1	Dış	Field
C-CO ₂	Rajan	1	$4,1 \cdot 10^6$	29787	0	Dış	Caram
C-CO ₂	Rajan	1	$4,1 \cdot 10^6$	29787	0	Dış	Caram
CaO-SO ₂	Rajan	1	49	8799	0	Dış	Rajan
CaO-SO ₂	Bu çalışma	1	49	8799	0	Dış	Rajan

2.8.2 Gaz-Gaz Reaksiyonlarının Modellenmesi

Aktif yatakta ve SB'de görülen gaz-gaz reaksiyonlarının ana kaynağını; kömür uçucularının açığa çıkması ve yataktaki oksijene bağlı olarak yanması teşkil eder.

Karbon monoksidin aşağıda görülen yanma reaksiyonu esas alınarak;



karbon monoksit yanma hızı r_{CO} için denklik 2.53'de görülen genel ifade yazılabilir:

$$r_{CO} = A \exp(E/RT_i) C_{CO}^a C_{H_2O}^b C_{O_2}^c \quad (2.53)$$

Tablo 2.5'de çeşitli çalışmalarda kullanılan A, a, b, c katsayıları verilmiştir. Karbon monoksitin oksitlenme reaksiyonu için kullanılan hız ifadesi; denklem 2.54'de görülebilir. Bu denklem, literatürde Howard et al. tarafından önerilmiş olup çalışmada

kullanılmıştır. Aşağıdaki ifadede T_i ; yatak içerisindeki kompartmanlarda yükselen intersitial gaz sıcaklığı, C_{CO} , C_{O_2} , C_{H_2O} sırasıyla gaz fazdaki CO, O_2 , H_2O 'nun konsantrasyonudur.

$$r_{CO} = 1,3 \cdot 10^{11} \exp(15083 / T_i) C_{CO} C_{H_2O}^{0.5} C_{O_2}^{0.5} \quad (2.54)$$

Denklem 2.54'de görülen reaksiyon hızı; mol oranları cinsinden elde edilmektedir.

Tablo 2.5 Karbon monoksit Oksidasyonu İçin Ampirik Hız İfadeleri

Referans	Sıcaklık Aralığı (K)	A ($m^3/kmol \cdot s$)	E/R (K)	a CO	b H_2O	c O_2
Howard	840 - 2360	$1,3 \cdot 10^{11}$	15083	1.0	0.5	0.5
Hottel	1280 - 1535	$1.9021 \cdot 10^3$	804.7	1.0	0.5	0.3
Bu çalışma	840 - 2360	$1,3 \cdot 10^{11}$	15074	1.0	0.5	0.5

2.9 Akışkan Yataklı Yakıcılarda Isı Geçişi Bağlılıları

Ekinci v.ç.a (1986) yaptıkları çalışmada AY'den çekilecek ısıyı; yatak yüksekliğini, genleşmeyi ve SB'de tanecik yoğunluğunu etkileyen faktörleri denetleyerek ayarlamamanın mümkün olabileceğini bildirmişlerdir. Araştırmacılar yatak içi ve SB'de ki ısı aktarım katsayılarını; dağıtıcı elekten belli yükseklikleri baz alarak akışkanlaştırma hızının ve sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçmüşlerdir. Araştırmacılar; akışkan hız fazlası ($U_o - U_{mf}$; akışkanlaşmanın iki faz teorisine göre yatak içindeki kabarcık oranının direk ölçüsü kabul edilir) arttıkça; (kabarcık oranının artışıyla) yatak içindeki ısı taşınım katsayısı hızla düşerken SB'de nispeten daha yavaş bir düşme gözlemişlerdir. Bunun nedeni; akışkan hız fazlasının artışıyla SB'de taneciklerin yoğunluğu artmakta ve yatağın genleşmesiyle yükselen yatak yüzeyinden dolayı aktif yatağın üst kısmı ile SB arasına yerleştirilecek ısı aktarım yüzeylerinin daha fazla devreye girmesidir (Ekinci v.ç.a., 1986).

Mevcut deneysel ve literatürdeki veriler; ısı aktarım katsayılarının; genel olarak yatak yüzeyinden yukarıya doğru exponansiyel bir bağıntı ile azaldığı sonucuna uymaktadır. Yapılan tasarımların çoğunda AY'lı sistemlerde yatağın kullanılma gayesine göre yatak içine yerleştirilen ısıtıcı veya soğutucu yüzeyler yardımıyla ısı geçişi sağlanır. Bu yüzeylerin bir kısmı aktif yatak bölgesine geri kalan kısmı ise akışkanlaşmış bölgenin üzerindeki SB'ye yerleştirilir. Bu iki bölgedeki ısı geçişi birbirinden farklıdır.

Yatakta çift yönlü bir ısı transferi söz konusudur. Yatak içinde hareketli olan (yukarı çıkıp, belli bir süre sonra aşağı doğru inişe geçen) tanecikler bir yandan ısılarını akışkanlaştırıcı gaza verirken diğer yandan ısı çekici yüzeylerle temas ederek borulardan geçen ve sıcaklıkları daha düşük olan akışkana ısılarını vermektedirler.

Yatak içerisindeki ısı transfer olayları:

- tanecikler ile gaz,
- tanecikler ile yüzeyler,

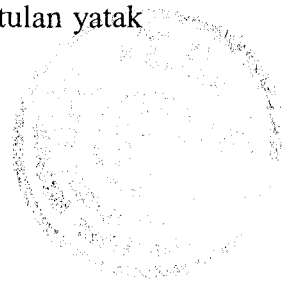
arasında olmak üzere ayrı ayrı incelemeyi gerektirmektedir (Geldart, 1986).

2.9.1 Tanecik - Gaz Arasında Isı Transferi

Juveland et al.'un (1966) vurguladığı gibi tanecikler ile akışkanlaştırıcı gaz arasında ısı alışverişi, gaz-tanecik film katsayısının küçük olmasına rağmen ($6-23 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), büyük temas yüzeylerinin ($3000-45,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$) mevcut olmasından dolayı iyi bir şekilde gerçekleşmektedir.

Sign ve Ferron (1978) gaz ve tanecikler arasındaki sıcaklık farkını tesbit etmek için yaptıkları deneysel çalışmalar termocouple kullanarak yatak sıcaklığını ölçtüler. Yatak sıcaklığının; %80'nini tanecikler, %20 sini ise gaz sıcaklığının meydana getirdiğini belirttiler.

Yatak içerisine giren akışkanlaştırıcı gaz sıcaklığı kontrol edilebilir ve ölçülebilir. Isı değiştirici yüzeyler ve/veya yatak cidarından ısının transfer edilmesiyle soğutulan yatak



ile yatağa gönderilen akışkanlaştırıcı gaz arasında ısı alışverişi gerçekleşmektedir. Yatak giriş bölgesinde gaz sıcaklığı hızla artar. Eğer gazın tıkaç akışı mevcut ve yatak içerisinde tanecikler çok iyi karışmış ise basit bir ısı dengesi kurulabilir (Botterill, 1975).

$$C_{p_g} U_o \rho_g \Delta T_g = h_{gt} A_t (T_g - T_t) dz \quad (2.55)$$

Yatak boyunca yüksekliği dz ve derinliği x olarak seçilen bir kontrol hacmi içerisinde geçen gazın sıcaklık değişimi ΔT_g ; yatak birim hacmindeki taneciklerin yüzey alanı ise A_t 'dir.

Yukarıdaki denkleğin integrali:

$$\ln \frac{T_g - T_t}{T_{go} - T_t} = - \left(\frac{h_{gt} A_t}{C_{p_g} U_o \rho_g} \right) z \quad (2.56)$$

denklem 2.56'yı verir. Denklem 2.56'da yatakta mevcut bir kompartmanın yüksekliği z , kompartmana giren akışkanlaştırıcı gaz sıcaklığı T_{go} , kompartmandan çıkan gaz sıcaklığı ise T_g 'dir.

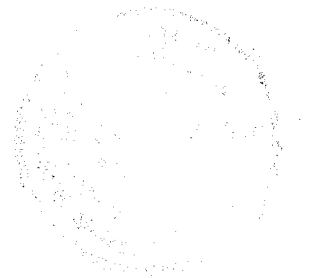
Kunii ve Levenspiel tanecik Reynolds sayısına bağlı olarak çok sayıda araştırma sonuçlarından yararlanarak denklik 2.58'de görülen aşağıdaki bağıntıyı geliştirdiler:

$$Re = \frac{d_t U_o \rho_g}{\mu_g} \quad (2.57)$$

$$Re < 50 \quad \text{için} \quad Nu_{gt} = \frac{h_{gt} d_t}{k_g} = 0.03 Re^{1.3} \quad (2.58)$$

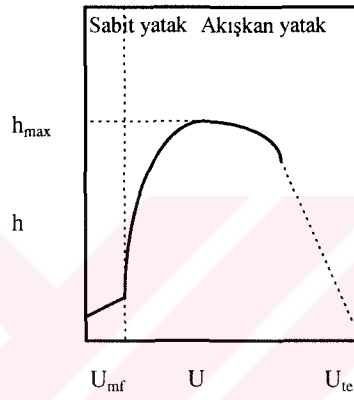
Denklem 2.58'de görülen gaz ısı iletim katsayısı ise k_g 'dir. Tanecik-gaz arasındaki ısı transfer katsayısı h_{gt} ise denklem 2.59'dan hesaplanabilir:

$$h_{gt} = \frac{0.03 d_t^{0.3} U_o^{1.3} \rho_g^{1.3} k_g}{\mu^{1.3}} \quad (2.59)$$



2.9.2 Yatak -Yüzey Arasında Isı Transferi

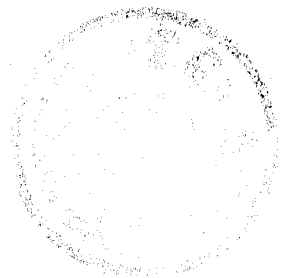
Akışkan yataklarda; yatak sıcaklığını sabit tutabilmek için kullanılma gagesine göre yatak içinden belirli bir ısı çekmek veya ısı vermek gerekir. Bu nedenle, uygun bir tasarım yapabilmek için yatak içine daldırılmış yüzeyler ile yatak arasındaki film katsayısının bilinmesi gerekir. Gaz akışkanlaştırılmış yataklarda; yatak ile yüzey arasındaki film katsayısı aynı hız ve sıcaklıkta sadece gaz akması durumundaki film katsayısından 20 ila 40 defa daha fazladır. Şekil 2.12’de akışkan hızına göre film katsayısının değişimi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.12 Akışkan Yataklarda Gaz Hızının, Yatağa Daldırılmış Yüzeylerdeki Film Katsayısına Etkisi (Arısoy, v.ç.a. 1988)

Genel olarak kabarcıklı AYY’da işletim koşullarına bağlı olarak akışkanlaştırmış gaz ile daldırılmış yüzeyler arasında mevcut ısı aktarım katsayısı h ’ın yaklaşık olarak üç farklı komponentten oluştuğu düşünülebilir (Botterill, 1975, Geldart, 1986).

1. Tanecik taşınımına ait komponent, h_{tc} : Isı transfer yüzeyine yakın bölge ile yatak hacmi arasında taneciklerin sirkülasyonu ile oluşan ısı transferidir. Tanecik taşınımına ait komponent h_{tc} ; özellikle yataktaki kabarcık davranışına bağlıdır. Yüksek akışkanlaştırma hızlarında; kabarcıklar ısı transfer yüzeylerini kaplar. Bu olay ise yatak-yüzey arasındaki ısı transferinin azalmasına sebep olur.



2. Fazlar arası gaz taşınımına ait komponent, h_{gc} : Fazlar arası gaz taşınımı ile artan yüzey ile tanecik arasındaki ısı transferidir.

3. Işınıma ait komponent, h_r : Yüksek işletme sıcaklıklarında önem kazanan radyasyon (ışınım) sebebi ile gerçekleşen ısı transferidir.

Akışkanlaştırılmış gaz ile daldırılmış yüzeyler arasında ısı taşınım katsayısı:

$$h = h_{tc} + h_{gc} + h_r \quad (2.60)$$

{Geçerli olduğu aralık} {40 μ m $\rightarrow$ 1 mm}.... {>800 μ m}..... {yüksek sıcaklıklarda (>900 K)}

2.9.3 Isı Transfer Katsayıları - Dizayn Arasındaki İlişkiler

Akışkan yataklı yakıcılarda ısı değiştirici yüzeylerin dizaynı; optimal performans ve başarılı bir sıcaklık kontrolü için çok önem taşımaktadır. Genel uygulamalarda; AY'lerde ısı transfer katsayıları için birkaç model ve korelasyon başarılı olabilmektedir. Farklı dizaynlarda kullanılabilecek uygun model ve korelasyonların seçimine aşağıdaki teoriler yardımcı olacaktır (Glicksman et al., 1980).

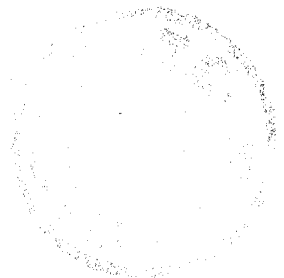
a) Yatak Cidarından Isı Çekmek

Dış yüzey alanı; yatak içine yerleştirilen ısı çekici yüzeyin önemli bir oranını teşkil ettiği için küçük ölçekli AYY'lerde dış yüzeylerden ısı çekmek oldukça önemlidir.

b) Serbest Bölgeye Yerleştirilen Yüzeyler Yardımıyla Isı Çekmek

Serbest bölgeye yerleştirilen yüzeyler; aktif yatak sıcaklık kontrolünde daha az bir etkiye sahip olmasına karşı eksozt gazları ile yataktan dışarı atılan duyulur ısının çekilmesinde etkindirler. Aktif yatağa yakın yerleştirilen ısı çekici yüzeyler daha uzak mesafeye yerleştirilen yüzeyler ile karşılaştırıldığında daha büyük ısı transfer katsayılarına sahip olmakla birlikte gerçekleşmesi istenen SB reaksiyonlarına engel olabilmektedirler.

Serbest bölgede ısı transferinin tanecik taşınımına ait komponenti; taneciksiz ısı taşınım katsayısı olarak McAdams tarafından aşağıdaki denklemde ifade edilmektedir.



$$h_{tc} = 0.26 \frac{k_g}{d_b} Re^{0.6} Pr^{0.3} \quad (2.61)$$

Babcock ve Wilcox tarafından yayınlanan verilere göre; SB için ısı transfer katsayısı; yaklaşık olarak 130 kJ/hm²K'dır (Glicksman et al., 1980).

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda SB'ye yerleştirilmiş ısı değiştirici yüzeylere ısı aktarımı çoğunlukla laboratuvar ve pilot tesis düzeyinde oda sıcaklığındaki sistemlerde deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar genellikle grafik ve ampirik bağıntılarla değerlendirilmiş ve sonuçların AY yüzeyinden SB'nin üst kesimlerine doğru gidildikçe eksponansiyel olarak azaldığı görüşünde birleşmiştir. Elde edilen sonuçların ve bağıntıların genel bir tasarım için kullanılması halinde SB'deki ısı aktarım katsayılarının değerleri; yatak içi ısı aktarım değerleri ile gaz konveksiyon ısı aktarım değerleri arasında olduğu görülmektedir (Ekinci, vça., 1986).

c) Aktif Yatak İçine Daldırılmış Yüzeyler Yardımıyla Isı Çekmek

Yatak cidarları kafi derecede ısı transfer yüzey alanı sağlayamıyorsa yatak içerisine daldırılan yüzeylerin kullanımı ile istenilen transfer yüzeyi gerçekleştirilebilir. Yatak içerisine yüzeylerin yerleştirilmesi kabarcık davranışını etkilerken yatağın akışkanlaştırma davranışında değiştirmektedir. Bu ise katı taneciklerin sirkülasyon yolunu ve ısı transferindeki tanecik taşınımına ait komponent h_{tc} 'yi etkiler. Yatak içine daldırılmış dikey borular yatak yüzeyine doğru yükselen kabarcıkların büyümesini desteklerken yatay yerleştirilen borular slug oluşumunu engellemektedir.

Akışkan yataklı yakıcılar dizaynında; yatay ve dikey boru grupları arasında seçim yaparken büyük ölçüde yakıcı konstrüksiyonuna uygun olup olmadığına bakılır. Yatak içerisine yüzeyler ne kadar iyi temas ettirilebiliyorsa o tercih edilir. Özellikle derin yataklarda dikey boru konfigürasyonları tercih edilmektedir. Yatak içerisine yatay borular yerleştirildiğinde ise daha çok ısı transfer yüzeyi katıların çapraz akışına maruz kalır. Bu özellik ısı transferi açısından oldukça büyük avantajdır.



Newby ve Keairns (1979); yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda yüzeylerin üst kısımlarında yüksek ısı transfer katsayıları ölçtüler. Bunun sebebi üçgen yerleşim planına göre monte edilen borular arasında yükselen kabarcıklar ile yatak malzemesinin yüzeylerin üst kısımlarına ulaşmasıdır. Böylece boruların yukarısındaki durgun tanecikler yer değiştirir. Bu yüzden üçgen yerleşim planının ısı transferi açısından daha iyi olduğu gözlenmektedir. Yatak malzemesinin borular etrafındaki hareketi özellikle yüksek hızlarda erozyona sebep olabilmekte ve boruların altında, kıvrımlarında daha çok erozyon görülmektedir.

Akışkan yatak içine daldırılmış çeşitli geometrilerdeki yüzeylerde film katsayılarının bulunuşu ile ilgili birçok korelasyon geliştirilmiştir. Burada pratikteki önemleri nedeniyle yatay konumdaki yüzeylere ait ısı taşınım katsayısı ile ilgili bağıntılar sunulmuştur.

Vreedenberg (1958) boru çapı, tanecik büyüklüğü, şekil ve yoğunluğu ile akışkanlaştırıcı gaz hızının yatay konumdaki yüzeylerdeki ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisini incelemiştir. Elde edilen korelasyonlar denklik 2.36 ve 2.37’de verilmiştir.

$$h = 0.66 \left[\left(\frac{U_o d_{yüz} \rho_t}{\mu_g} \right) \left(\frac{1 - \epsilon_{yb}}{\epsilon_{yb}} \right) \right]^{0.44} Pr^{0.3} \frac{k_g}{d_{yüz}} \quad \frac{U_o d_t \rho_t}{\mu_g} < 2050 \quad (2.62)$$

$$h = 420 \left[\left(\frac{U_o d_{yüz} \rho_t}{\mu_g} \right) \left(\frac{\mu_g^2}{d_t^3 \rho_t^2 g} \right) \right]^{0.3} Pr^{0.3} \frac{k_g}{d_{yüz}} \quad \frac{U_o d_t \rho_t}{\mu_g} > 2250 \quad (2.63)$$

Andeen ve Glicksman 1976’da, **Vreedenberg** tarafından geliştirilen korelasyonları modifiye ettiler. Gaz akış hızının artışıyla, yatak-yüzey arasındaki ısı taşınım katsayısında azalmanın gözlemlendiği bu korelasyon pratikte daha iyi sonuçlar vermektedir (Geldart, 1986).

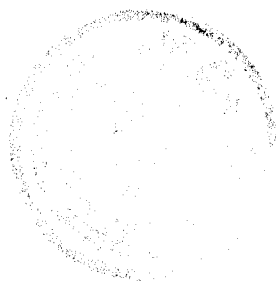
3

Literatürdeki Model Çalışmaları

3.1 Genel Model Kabulleri

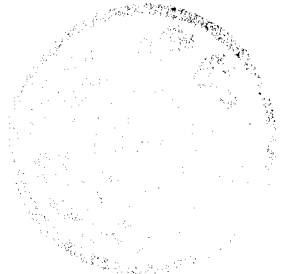
Akışkan yataklı yakıcılarda tüm etkileri içeren bir model geliştirmek oldukça zordur. Bu nedenle, problemi daha basite indirgemek için modelleme esnasında bazı kabuller yapılır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda; gazların akış şekilleri, katı taneciklerin hareketleri, kömürün yanma mekanizması ve kömür taneciklerinin gazlarla sürüklenmesi üzerinde yapılan varsayımlarda farklılıklar görülmesine rağmen, modelleme aşamasında genel kabul yapılması gerekli konular Tablo 3.1’de verilmektedir

Bir boyutlu KAY modeller; gaz akış dinamiği, tanecik akış dinamiği, kömürün uçucusundan ayrılması, kokun oksidasyonu, uçucu yanması, tanecik aşınması, tanecik sürüklenmesi (yataktan kayıplar), işletme basıncı, gazlaştırma reaksiyonları, çok farklı tanecik boyutları, yatay ve düşey konumlu ısı değiştirici borular, taşınım ve ışınlama oluşan ısı transferi, azotun okside olması taneciklerdeki kükürtün tutulmasını (kireçtaşı ve dolomit) göz önüne alarak kurulmuştur.



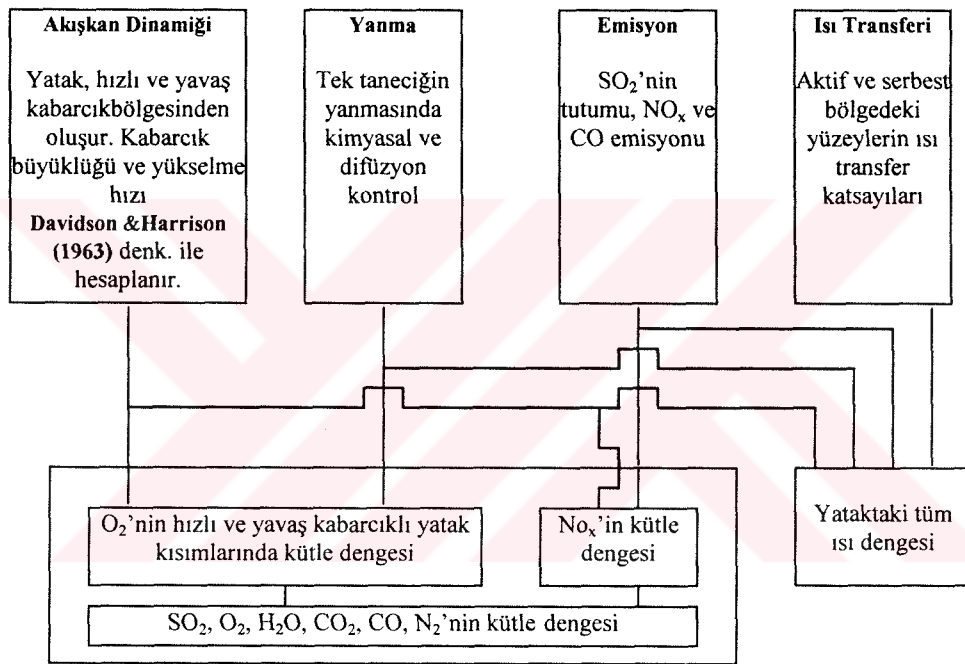
Tablo 3.1 Bir Boyutlu KAY Modeli İçin Kabuller ve Yorumlar

Kabuller	Yorumlar
Bir boyutlu	Yatak içerisinde özellikler (O_2 konsantrasyonu, sıcaklık vb.) radyal yönde değişmez, eksenel yönde değiştiği kabul edilir veya üniformdur.
Akışkan yatak modeli(2 fazlı-3 fazlı vs.)	Genelde 2 faz (kabarcık, yoğun) üzerine çalışılmış. Temeli Davidson & Harrison teorisidir. (Davidson et. al., 1963). Akışkanlaştırma için gerekli havanın fazlası kabarcık fazındadır. Chen & Saxena 3 faz teorisini incelemiş (Saxena et.al., 1980).
Katıların karışımı	Küçük tanecikler o kadar çok hareket ederlerki bunun sonucu sıcaklık, tanecik boyut dağılımı ve taneciklerin kompozisyonu yatağa doğru üniformdur. Karışım zamanı Andrei et.al. tarafından verilen korelasyon ile bulunabilir.
Gazların akış şekli (tıkaç akış- karışık akış)	Kabarcık akışta tıkaç akış, yoğun fazda karışık akış kabul edilir. Akışkanlaştırma hızı ile kabarcıklar büyür ve genişler Kabarcık boyutlarını üzerine ilk ifadeler Cranfield & Geldart tarafından verilmiş.
Kabarcık hidrodinamiği	Kabarcık yükselme hızı Davidson & Harrison 'un verdiği denklemden hesaplanır.
Uçucunun kömürden ayrılması	Genel olarak uçucunun ani ayrıldığı kabul edilir.
Kömür yanmasının kinetiği	Kimyasal ve difüzyon kontrol ayrı ayrı ve bazen birlikte incelenmiştir.
Gaz, katılar ve ısı değiştirici yüzeyler arasındaki ısı transferi	Kunii & Levenspiel tarafından verilmektedir (Levenspiel et.al., 1977) .
Serbest bölge reaksiyonları	Genelde dikkate alınmamıştır.
Yatak sıcaklığı	Büyük tanecik hareketlerinde üniform
Gaz emisyonlarının kont. (SO_2 , NO_x ve CO)	Kireçtaşı ilavesi ile SO_2 , düşük yanma sıcaklığı ile NO_x kontrol edilir.
Kok ve kireçtaşının yataktan taşınmaları	Taneciklerin aktif yataкта boyutları küçülür ve serbest bölgeye doğru sürüklenirler. Taneciklerin taşınması ve sürüklenmesi ile ilgili ilişkiler Merrick & Highley tarafından verilmiş.
Yatak ısı gücü	Genelde laboratuvar düzeyinde çalışılmış.
Yanma verimi	Yanmamış partikül ve sürüklenen taneciklerden hesaplanır.



Aktif yatak modellerinde genel olarak; akışkan dinamiği, yanma, emisyon ve ısı transferi olmak üzere 4 ana modül bulunmaktadır. Modüllerin birbiri ile ilişkisi Şekil 3.1’de görülebilir. Son 20 senedir yapılan model çalışmalarının büyük kısmında **Davidson ve Harrison** tarafından geliştirilen iki faz modeli kullanılmıştır (Davidson et.al., 1963).

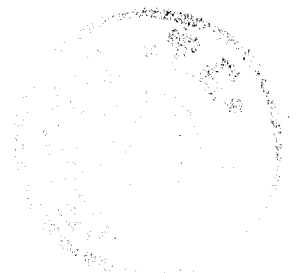
Serbest bölge modelleri ise genel olarak akış dinamiği, yanma ve kütle transferi, ısı transferi olmak üzere üç ana komponentten oluşmaktadır.



Şekil 3.1 Akışkan Yatak Modellerinin Temel Prensipleri

3.2 Literatürdeki Model Çalışmaları

Literatürde AYY’de kömür yanmasıyla ilgili çok sayıda model çalışması mevcuttur. Tablo 3.2’de görülebileceği gibi 1970’li yıllarda araştırmacılar yataktaki kompleks fiziksel ve kimyasal olaylar üzerine daha gerçekçi ve çok sayıda varsayımlar yaparak kurdukları modellerde; deneysel çalışmalar ile uyum içinde sonuçlar aldılar.



Günümüze kadar yapılan model çalışmaları; La Nauze'un yaptığı çalışmalar baz alınarak tarafımızdan tablo haline getirilmiş olup Tablo 3.2'den görülebilir. (La Nauze, 1985).

Tablo 3.2 ile ilgili açıklamalar aşağıda görülmektedir:

A-Akışkan yatak modeli:

- 1- İki fazlı kabarcıklı model; kabarcık ve yoğun faz
- 2- Üç fazlı kabarcıklı model; kabarcık, örtü ve yoğun faz
- 3- Seri modelde bölümler; Her bir bölümde iki faz.
- 4- Yavaş kabarcık rejimli model; Yoğun ve kabarcık faz arasında fark yok.

B- Yatakta gazların akış şekilleri

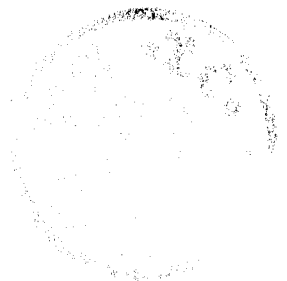
- 1- Kabarcık fazında tıkaç akış, yoğun fazında karışık akış.
- 2- Her iki fazda karışık akış.
- 3- Her iki fazda tıkaç akış. İki faz arasındaki gaz değişimi sınırlıdır.
- 4- Yatağa doğru tıkaç akış; Fazlar arasında fark yok.

C- Yataktaki katıların hareketi

- 1- İyi karışmış
- 2- Bölümlerin büyük kısmında iyi karışmış
- 3- Katıların dağılımı sınırlıdır. Kütle dengesi için dağılım katsayısı kullanılır.

D- Uçucunun kömürden ayrılması

- 1- Uçucunun ayrılması anidir. Uçucu, üniform olarak kömür besleme noktasında açığa çıkmaktadır.
- 2- Beslenen kömürün karışımına kıyasla uçucudan ayrılma daha yavaştır. Uçucunun açığa çıkması yatağa doğru üniformdur.
- 3- Belli değil.
- 4- Uçucunun ayrılması kömür besleme noktasında anidir.



5- Uçucunun ayrılmasında 2.ve 4.şıkların her ikisi de eşit hisselere sahiptir.

6- Uçucudan ayrılma katıların difüzyonu gibi olur. Uçucular difüzyon kontrollü yanmaya uğrar.

E- Kömür yanmasının kinetiği

1- Difüzyon kontrollü

2-Kok tanecik yüzeyinde yanmanın difüzyon ve kinetik kontrollü gerçekleştiği fakat CO'nun CO₂'ye homojen oksidasyonunun çok hızlı olduğu kabul edilir.

3- CO oksidasyonunun hızı diğer reaksiyonlarla kıyaslanabilir.

4- Kül tabaka difüzyonu mevcut.

F- Elutration dikkate alınmış mı?

Elutration, pnömatik taşıma rejimine ulaşılmadan, yüksek hızlarda ince tozların karışımdan ayrılıp yatağı terketmesidir.

1- Kok yanması sürüklenmenin büyüklüğüne bağlı.

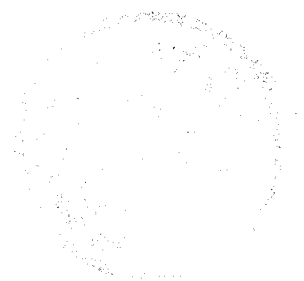
2- Parçalanmaya (attrition) müsait.

3- Belli değil.

G- Serbest bölgede yanma dikkate alınmış mı?

1- Hayır

2- Evet



Tablo 3.2. Model Özetleri

ARAŞTIRICILAR	A	B	C	D	E	F	G
Yagi, Kunii (1955)	4	4	1	3	2,4	1,2	1
Wen, Wang (1970)	3	1	2	3	4	3	1
Avedesian, Davidson (1973)	1	1	1	3	1	3	1
Becker et.al.1975)	3	3	1	1,2	1	1	1
Campbell, Davidson (1975)	1	1	1	3	1	3	1
Gibbs (1975)	1	1	1	3	1	3	1
Gordon, Amundson (1976)	1	1	1	3	1,3	3	1
Baron et.al.(1977)	1,4	1,4	1	2	2	1,2	1
Borghi et.al.(1977)	1,4	1,4	1	2	2	1,2	1
Chen, Saxena (1977)	2	3	1	3	1	1	1
Horio et.al.(1977)	1	1	1	3	2	1	1
Baron et.al.(1978)	1	1	1	3	1	1	1
Chen, Saxena (1978)	2	1	2	3	1	1	1
Gordon et.al.(1978)	1	1	1	3	3	3	1
Horio, Wen (1978)	3	2	2	1	2	1	1
Rajan et.al.(1978)	3	2	2	1	2	1	1
Sarofim, Beer (1978)	1	1	1	1	3	1	1
Donsi et.al.(1979)	1	1,2	1	2	2	1,2	2
Fan et.al.(1979)	1	1	3	3	1	3	1
Park et.al.(1980)	4	4	1	4	2	1	1,2
Bywater (1980)	4	4	3	6	2	3	1
Rajan, Wen (1980)	3	2	2	5	2	1,2	2
Saxena, Rehmat (1980)	1	1	1	3	2,4	3	1
Wells, Krishna (1980)	1,4	3	2	2	3	1,2	1
Park et.al.(1981)	4	4	1	4	2	1	1,2
Bukur, Amundson (1981)	1	1	1	3	1	1	1
Chakaborty, Howard (1981)	4	4	1	3	2,3	3	1
Congalidis, Georgakis (1981)	3	1	2	2	3	1,2	1
Beer et.al.(1981)	2	2	1	1	-	-	2
Ross, Davidson (1982)	1	1	1	3	2,3	3	1
Selçuk, Pekyılmaz (1982, 1983)	1	1	1	4	2	1	1
Overturf, Reklaitis (1983)	1	1	1	4	2	1	2
Walsh et.al.(1984)	4	4	1	2	2	2	1
Fee et.al.(1984)	1	1	1	3	2,3	3	2
Borghi (1985)	1	2	1	2	2	3	1
Neogi et.al.(1986)	1	4	1	4	1	3	1
Preto (1986)	1	1	1	1	-	1,2	2
Agarwal, Wildegger (1987)	1	1	1	4	3	3	1
Agarwal, Mitchell (1988)	1	2	3	3	-	3	1
El-Halwagi, El-Rifai (1988)	2	1	3	3	-	3	1
Ho et.al.(1989)	4	1	3	3	2	1	1
De Souza-Santos (1989)	4	3	4	4	2	1	2
Lee (1989)	3	1	2	2	1,4	2	1
Eskin (1990)	1	1	1	1	2	1	2
Arena et.al.(1991)	1	1	1	3	2	1	1
Oymak (1991)	1	1	1	1	-	1,2	2
Tabis, Essekhat (1992)	2	1	2	1	-	3	1
Adanez et.al. (1992)	1	1	1	1	2	1	2
Köse (1995)	1	1	1	1	2	1,2	1

Akışkan yataklı yakıcılarda SB'nin önemi 1980'li yıllarda **Rajan ve Wen** tarafından sunulan çalışma ile önem kazandı. Günümüze kadar çok sayıda araştırmacı; AYY'nin bu kısmının rolünü inceledi. Tablo 3.3'de bu alanda çalışan araştırmacıların; model çalışma sonuçları görülebilir.

Tablo 3.3 ile ilgili açıklamalar aşağıda belirtilmiştir:

A- Serbest bölgede gözönüne alınan reaksiyonlar

- 1- Kok yanması.
- 2- Uçucu madde ve CO yanması.
- 3- Kükürt giderme.
- 4- Azot oksidin, azota indirgenmesi.

B-Gaz- Katı reaksiyonlarında reaksiyon hızları

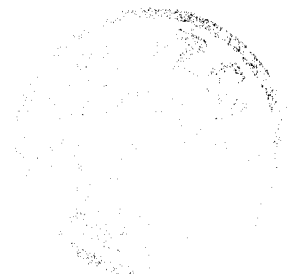
- 1- Yanma; kinetik ve difüzyon kontrollü.
- 2- Yanma kinetik kontrollü.
- 3- Belirtilmemiş.

C- Serbest bölgede gaz akış şekli

- 1- Tıkaç akış.
- 2- Kompartmanlarda iyi karışmış.
- 3- Gazlar eksenel dağılmış.
- 4- Tıkaç akışta iyi karışmış.

D- Serbest bölgeye fırlatılan taneciklerin yönü ve hızı

- 1- Tanecikler; yukarı doğru ($U_o - U_{ter}$) hızında ve aşağı doğru (U_{ter}) hızında hareket ederler.
- 2- Tanecikler; yukarı doğru ($U_o - U_{ter}$) hızında hareket ederler.
- 3- Tanecikler; aktif yatak yüzeyinden U_{to} başlangıç hızıyla SB'ye fırlatılırlar, ve hareket denklemi ile SB'de maksimum yüksekliğe ulaşırlar.



4- Tanecikler; yukarı doğru U_0 hızında hareket ederler.

5- Belirtilmemiş.

E- Tanecik yüzey sıcaklığı

1- Gaz sıcaklığı ile aynı.

2- Ölçülmüş.

3- Belirtilmemiş.

F- Gazların sıcaklığı ve konsantrasyon dağılımları

1- Enerji ve kütle dengesi kurularak hesaplanmış.

2- Kütle dengesi kurularak gaz konsantrasyonları ölçülmüş.

3- Sıcaklık dağılımı ve gaz konsantrasyonları ölçülmüş.

4- Belirtilmemiş.

G- Model deneysel çalışmalarla test edilmiş mi?

1- Yapılmamış.

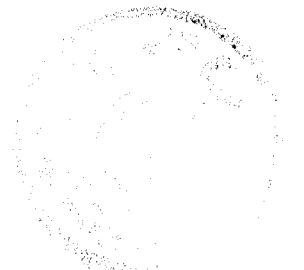
2- Gaz konsantrasyonları için yapılmış.

3- Sıcaklık dağılımı için yapılmış.

4- Kükürt dioksit konsantrasyonu için yapılmış.

5- Azot oksit konsantrasyonu için yapılmış.

6- Yanma verimi için yapılmış.



Tablo 3.3 Serbest Bölge Modellerinin Özeti

Araştırmacılar	A	B	C	D	E	F	G
Bethell et.al. (1973)	3	3	1	5	3	4	4
Sarofim ve Beer (1978)	2	3	1	5	3	4	5
Rajan ve Wen (1980)	1,2,3,4	1	2	1	1	1	3,2
Beer et.al. (1981)	1,4	3	1	5	3	4	2
Park et.al. (1981)	1,2	1	4	2	1	2	1
Chen ve Wen (1982)	1,3,4	1	3	3	2	4	4,5
Overturf ve Reklatis (1983)	2	-	1	-	-	-	1
Fee et.al. (1984)	3	3	4	3	3	4	4
Walsh et.al. (1984)	1	1	1	2	2	2	2
Preto (1986)	1,2	-	-	-	-	-	4,5
Eskin (1989)	1,2,3,4	2	2	4	3	1	2,3
Roostaazad et.al. (1990)	1,2	2	1,4	3	1	1	2,3,6
Oymak (1991)	1,2	2	-1	3	1	1	2,3,4,6
Mançuhan (1997)	1,2	2	2	3	1	1	2,3

Rajan ve Wen (1980) gerçekleştirdikleri modelde; SB bir dizi mükemmel karıştığı kabul edilen seri kompartmanlara bölünmüştür. Her kompartmandaki tanecikler için işletme ile terminal hız farkının ($U_o - U_{ter}$) sabit varsayımı ile kok konsantrasyonu ve tanecik boyut dağılımı hesaplandı. Bunu kükürt giderme, azot oksitlerin indirgenmesi ve kok yanması prosesleri izledi. Araştırmacıların model sonuçları; önemli miktarda kükürt tutulmasının yatak yüzeyi çevresinde gerçekleştiğini gösterir. Tanecik boyut dağılımı, sıcaklık, gaz türlerinin konsantrasyon profilleri, kükürt giderme verimi ve azot oksit emisyonlarının model sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile uyum içindedir.

Park, Levenspiel ve Fitzgerald, (1980) yaptıkları çalışmada; SB'nin yanma üzerine etkilerine önem vermediler ama 1981'de revize ettikleri çalışmalarında SB'de kok yanmasını incelediler. En önemli yanmamış yakıt kaybının kok taneciklerinin sürüklenmesinden ileri geldiğini bildirdiler. Modelde; yüzeyden SB' ye atılan tanecikler

yerine buraya sürüklenen ince boyutlu taneciklerinin reaksiyona girdiği ve sürüklenen taneciklerin SB boyunca (U_0-U_{ter}) hızı ile hareket ettiklerini kabul edildi. Yakıcı boyunca elde edilen gaz konsantrasyon ve sıcaklık profilleri deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmadı.

Rajan ve Wen (1980) SB'de taneciklerin sabit hızda olduğu varsayımıyla yaptıkları çalışmayı 1982'de **Chen ve Wen** inceleyip eleştirdiler ve sürüklenme, entrainment ve reaksiyonları içeren kapsamlı bir SB modeli geliştirdiler. Taneciklerin SB'de sabit terminal hızla (U_{ter}) alçaldığı varsayımına dayanarak; SB'ye fırlatılan taneciklerin hız dağılım profilini bulmak için deneysel bir yöntem tanıtıldı. Kok yanması, kükürt absorblanması, azot oksitlerin indirgenmesi **Rajan ve Wen**'in 1980'de kullandıkları reaksiyon kinetikleri baz alınarak bu çalışmada kullanıldı. Serbest bölge boyunca kükürt dioksit ve azot oksit konsantrasyon profillerinin model sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırıldı. Çalışmada SB'de oksijen konsantrasyonu, gaz sıcaklık profili ve kok yanması ile ilgili model tahminleri yapılmadı.

Walsh et.al. (1984) 700 KW'lık bir atmosferik basınçlı AYY'nin SB'sinde O_2 konsantrasyonlarını ölçtü. Yapılan çalışmada; SK'nın umulmayacak kadar büyük bir kesrinin yaklaşık %40'nın SB'de yandığını, %10-40'nın ise sürüklenme ile kaybolduğunu belirttiler. İlginç olan SK'nın küçük bir kesrinin yatakta çoğunluğunun ise SB'de yanmasıdır. Daha sonra 1986'da **Walsh et.al.** eski çalışmalarını gözden geçirerek iyileştirdiler. Araştırmacılar yeni çalışmalarında; SK'nın yaklaşık % 30'nun yatakta, %30'nun SB'de yandığını geri kalan miktarının ise sürüklendiğini belirttiler.

Akışkan yataklı yakıcıların yatak ve SB'de ki performansını incelemek üzere bir model 1990'da **Roostaazaad v.ç.a.**; tarafından gerçekleştirildi. Bu çalışmadaki yatak modeli; iki fazlı akış, uçucu karbonun karbon monoksit yanması ve kok taneciklerinin kinetik ve difüzyon kontrollü reaksiyon ile CO_2 yandığı varsayımlarına dayanarak **Pekyılmaz, v.ç.a.** (1986) tarafından yapılan çalışmaların modifiye edilmiş şeklidir. Bu çalışmada tüm UM'nin yoğun fazda yandığı kabul edildi. SB'nin tam karışmış ve piston akışlı

varsayılan iki bölgeden oluştuğu ve SB’de mevcut kok taneciklerinin kinetik kontrollü reaksiyon ile CO_2 ’e yandığı varsayılmıştır. Kükürt giderme dikkate alınmamıştır.

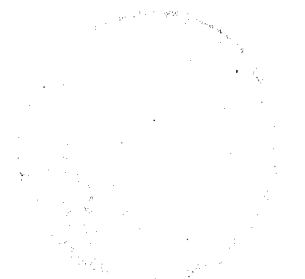
Oymak v.ç.a. (1991) tarafından gerçekleştirilen modelde; SB’nin piston akışlı bir reaktör olduğu, yanmanın SB’ye sıçrayan kömür taneciklerinden salınan UM’dan de kaynaklandığı ve uçucu karbonun CO_2 ’e yandığı varsayılmıştır. Matematiksel modelden elde edilen gaz ve sıcaklık profilleri pilot-ölçekli bir AYY’ye uygulanmış ve deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma model sonuçlarının ölçümler ile uyum sağladığını ve SB’de yanmanın esas olarak o bölgeye sıçrayan kömür taneciklerinden salınan UM’nin yanmasından kaynaklandığını göstermiştir.

Eskin, (1989)’da yaptığı çalışmasında gözönüne alınan AY modelinde:

- Kömürün uçucularından ayrılması ve bunu takiben uçucu ve kokun yanması,
- Kükürt dioksitin kireçtaşı ile tutulması,
- Azot oksidin kok ile azota indirgenmesi,
- Kok ve kireç taneciklerinin aşınması ve yataktan taşınması,
- Akışkan yatakta taneciklerin karışması,
- Serbest bölge reaksiyonları,
- Gaz ve katı, katı ile ısı değiştirici yüzey arasındaki ısı geçişi,

gözönüne alınmış ve model sonuçları farklı geometrik boyutlardaki AYY’lerden elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kömür tanecik boyutunun sıcaklık dağılımını önemli ölçüde etkilemediği görülmesine rağmen küçük tanecik boyutlarında SB ile aktif yatak arasındaki sıcaklık farkı artmaktadır.



4

Gerçekleştirilen Model

4.1 Giriş

Batı ülkelerinde ve ABD’de iki ayrı amaç için (santrallerin yatırım maliyetlerini düşürme ve hava kirliliğini önlenmesi) AYY teknolojisine ilgi oldukça artmış ve küçük ölçekli AYY’da çeşitli deneysel çalışmalar yapılarak değişik oluşumlar incelenmiştir. İşletim koşulları değiştirilerek yapılan yeni deneylerle yeni tasarım bilgileri türetilmiştir. Bu konudaki çalışmalar arttıkça deney sonuçlarının teorik inceleme ile ele alınması zorunlu hale gelmiş ve bunun sonucunda AYY’ların teorik olarak modellenmesi önem kazanmıştır. Akışkan yataklı yakıcıların çeşitli çalışma şartları altında performanslarını tesbit etmek amacı ile 1970’lerden itibaren (gerçekte 1960’larda başlamasına rağmen) ciddi matematik modeller geliştirilmeye başlamıştır.

Akışkan yataklı yakıcının modellenmesinde, yatağı meydana getiren gaz ve katı fazın davranımları ayrı ayrı ele alınıp birbirlerine olan etkilerinin incelenmesi gereklidir. Bu nedenle önce kararlı halde yatakta mevcut kok taneciklerinin aktif yatak ve SB’de boyut dağılımı, daha sonra katı taneciklerin aktif yatak ve SB’de davranımları modellenmiştir. Yatakta gaz-gaz ve gaz-katı arasında gerçekleşen reaksiyonlar göz önüne alınarak aktif yatak ve SB’de enerji dengelerinin yapılabildiği bir model geliştirilmiştir. Teorik olarak geliştirilen modellerin uygunluğu; gözönüne alınan işlemlere ve yapılan varsayımlara bağlıdır.

Bu çalışmada geliştirilen modelde; aşağıdaki işlemler esas alınmıştır:

- Kömürün uçucularının ani olarak ayrılması, uçucuların ve yarı kokun yanması,
- Kükürt dioksidin kireçtaşı ile tutulması,
- Yarı kok ve kireçtaşının yataktan sürüklenmeleri,
- Kararlı halde yatakta mevcut büzülmüş yarı kok taneciklerinin boyut dağılımı ve kütle kesri,
- Kararlı halde SB’de mevcut taneciklerin boyut dağılımı ve kütle kesri,
- Aktif yatakta katı tanecik davranımı ve gerçekleşen reaksiyonlar,
- Serbest bölgede katı tanecik davranımı ve gerçekleşen reaksiyonlar,
- Aktif yatakta gaz sıcaklığının yüksekliğe bağlı değişimi,
- Serbest bölgede gaz sıcaklığının yüksekliğe bağlı değişimi,
- Akışkan yataklı yakıcıda tanecik-gaz, yatak-yüzey arasında gerçekleşen ısı transferi,

Bu çalışmada gerçekleştirilen modellerle ilgili yapılan varsayımlar dördüncü bölümde ayrıntıları ile görülebilir.

4.2 Kütle ve Enerji Dengeleri

Akışkan yataklı yakıcı model çalışmalarında; yatağı meydana getiren gaz ve katı fazın karşılıklı etkileşimi ve bunlara ait korunum denklemlerinin çıkartılması gerekmektedir. Bu nedenle öncelikle, kararlı rejime ulaşmış bir yatakta kütle ve enerji büyüklüklerinin belirlenebilmesi gerekmektedir. Kontrol hacmine giren kütle ve enerji miktarı ya dışarı çıkacak yada kontrol hacmi içerisinde değişime uğrayacaktır. Başka bir deyişle kontrol hacmi içerisine giren kütle veya enerji miktarı; dışarı çıkan kütle ve enerji miktarı ile içeride değişime uğrayan miktarın toplamına eşittir. Kontrol hacminde yazılan bu genel denklemi; herhangi bir büyüklük için yazmak mümkün olup genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Sisteme} \\ \text{giren} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Sistemden} \\ \text{çıkan} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Sistem içindeki} \\ \text{değişiklik} \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

Akışkan yataklı yakıcıda katı ve gaz olmak üzere iki fazın bir arada oluşu sebebi ile katı taneciklerin ve gazın kütle dengesini ayrı olarak tanımlamak gerekmektedir.

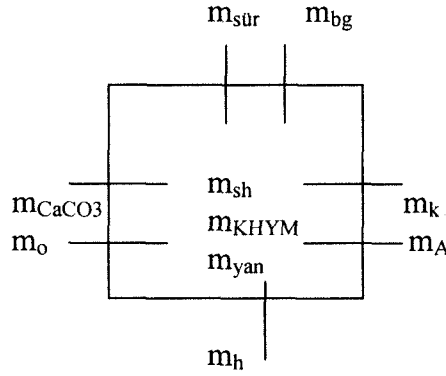
4.2.1 Katı Tanecikler İçin Yapılan Kütle Dengesi

Katı taneciklerin kütle dengesi için geliştirilen denklemlerde; taneciklerin yanarak küçüldüğü; küçülen ve aşınma ile oluşan ince partiküllerin baca gazları ile sürüklendiği düşünülmüştür. Yatağa giren katılar; kömür ve SO_2 gazının önlenmesi için ilave edilen kireçtaşıdır. Sürekli kömür beslemesinin yapıldığı AYY'da kömürün uçucusu ani olarak ayrılmakta ve geriye yarı kok tanecikleri kalmaktadır. Yatak sıcaklığının etkisiyle hızla sıcaklıkları yükselen yarı kok tanecikleri büzülmemektedir. Büzülen yarı kok taneciklerinin bir kısmı yanarken geriye kalan yarı kok taneciklerinin miktarı zamanla değişmemekte ve yarı kok taneciklerinin sıcaklığı tutuşma sıcaklığına kadar yükselmektedir. Dolayısıyla kararlı şartlar altında yataktaki yarı kok taneciklerinin kütlesi sabit kalır. Yatak içerisindeki inert malzemede herhangi bir değişiklik söz konusu değildir ve bu sebepten dolayı kurulan denklikte ihmal edilmiştir. Çalışmanın daha sonraki bölümlerinde **yarı kok** ifadesi yerine **kok** ifadesi kullanılacaktır.

Kurulan denklikte:

- Yanmanın kararlı (steady-state) rejimde gerçekleştiği,
 - Boyut dağılımı bilinen (elek analizi yapılan) kireçtaşı ve kömür taneciklerinin devamlı beslendiği,
 - Kok taneciklerinin büzülerek (shrinking particle model) yandığı, zamana bağlı olarak kütlesi ve boyutunun azaldığı, fakat yoğunluğunun değişmediği,
 - Sürüklenerek taşınan taneciklerin geri dönmediği,
 - Yanma esnasında oluşan külün yataktan tamamen çekildiği,
 - Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan katının yataktan tamamen çekildiği,
 - Taşma sonucu yataktan ayrılan katı miktarının olmadığı,
- kabul edilmiştir.

Şekil 4.1’de AYY içerisinde yukarıdaki varsayımlara bağlı olarak yapılan kütle dengesi şematik olarak görülebilir.



Şekil 4.1 Katı Tanecikler İçin Yapılan Kütle Dengesi

Kararlı halde yatakta mevcut kok tanecikleri için kütle dengesi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Yatağa giren} \\ \text{kömür miktarı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Sürüklenme ile} \\ \text{yatağı terkeden} \\ \text{kok miktarı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Büzülerek} \\ \text{kaybolan kok} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{KHYM} \\ \text{kok miktarı} \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \text{Kimyasal} \\ \text{reaksiyona giren} \\ \text{kok miktarı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Yataktan çekilen} \\ \text{kül miktarı} \end{array} \right\}$$

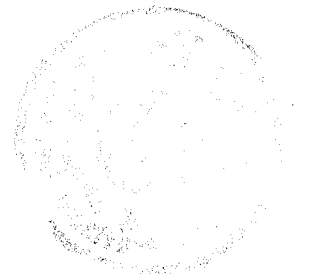
Yukarıdaki denklemi matematiksel olarak ifade edersek;

$$\text{Kömür: } m_o = m_{sür} + m_{sh} + m_{KHYM} + m_{yan} + m_A \quad (4.3)$$

$$\text{Kül: } m_A = m_{yan} \gamma_A \quad (4.4)$$

denklem 4.3 ve 4.4 elde edilir.

Kararlı halde yatakta mevcut kireçtaşı için kütle dengesi aşağıdaki şekilde yazılmıştır:



$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Yatağa giren} \\ \text{kireçtaşı} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Sürüklenmeyle} \\ \text{yatağı terkeden} \\ \text{kireçtaşı miktarı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Kimyasal} \\ \text{reaksiyona giren} \\ \text{kireçtaşı miktarı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Kimyasal} \\ \text{reaksiyonla} \\ \text{oluşan katı} \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

$$\text{Kireçtaşı: } m_{\text{CaCO}_3} = m_{\text{sür CaCO}_3} + m_{\text{yan CaCO}_3} + m_k \quad (4.6)$$

a) Yatağa beslenen taneciklerin boyut dağılımı

Elek analizi yapılarak yatağa beslenen kömürün boyut dağılımı ve ağırlık kesri tarafımızdan bilinmektedir. Her bir boyut aralığındaki ağırlık kesri X_i , çapı d_{ip} olarak yatağa beslenen taneciklerin ortalama boyutu d_p :

$$d_p = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{d_{ip}}} \quad (4.7)$$

denklik 4.7'den hesaplanabilir.

Yatağa beslenen kömür miktarı m_o , farklı boyutta kömür taneciklerinin ağırlık kesri X_i ise yatağa beslenen i boyutundaki kömür miktarı m_{io} ;

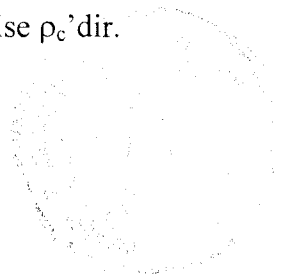
$$m_{i_o} = m_o X_i \quad (4.8)$$

denklem 4.8'den bulunabilir.

Gerçekçi bir kütle denkliği için yatak kararlı rejime ulaştığında; yatak içerisinde mevcut kok tanecik boyutlarında meydana gelen değişikliğin belirlenmesi gerekmektedir. Kömür taneciği yatağa girdikten sonra uçucu ayrılma zamanına bağlı olarak kısa bir süre sonra kok haline dönüşür. Yatak içerisinde uçucusu ayrılan kok taneciklerinin boyut dağılımı denklem 4.9'dan hesaplanabilir:

$$d_{ic} = d_{ip} \frac{\rho_c^{0.33}}{\rho_p} \quad (4.9)$$

Denklem 4.9'da kömürün yoğunluğu ρ_p , uçucusu ayrılan kokun yoğunluğu ise ρ_c 'dir.



Elementel analizi bilinen kömürün yoğunluğu;

$$\rho_p = 1534 - 51.96\gamma_H + 7.375\gamma_O - 24.72\gamma_N + 3.853\gamma_S \quad (4.10)$$

denklem 4.10'dan bulunabilir.

Uçucusu ayrılan kok taneciklerinin yoğunluğu;

$$\rho_c = \rho_p (1 - \gamma_{UM}) \quad (4.11)$$

denklik 4.11'den hesaplanabilir.

b) Kararlı rejimde yatakta mevcut taneciklerin boyut dağılımı

Belli bir kok taneciğinin yanmasını tamamlaması için gereken zamanın hesaplanmasında **Davidson ve Harrison** (1963)'un iki faz teorisi kullanılmıştır. Yatak içerisinde mevcut farklı boyuttaki kok tanecikleri d_{ic} ; farklı zamanda yanarlar. Denklem 4.12'den; kok tanecik yanma zamanı hesaplanabilir:

$$t_{ic} = \frac{m_{ic}}{12C_o A_y \left\{ U_o - (U_o - U_{imf}) \exp(-X) \right\}} + \frac{d_{ic}^2 \rho_c}{96 \text{ Sh } D_G C_o} \quad (4.12)$$

Her bir tanecik boyutu için hesaplanan yanma zamanı t_{ic} ; o taneciğin yatak içerisinde beklediği süreyi verir. Bu süre boyunca kok taneciklerinin çapı büzülme hızına bağlı olarak küçülmektedir.

Denklem 4.12'deki X, yanma zamanı süresince yataktan yukarıya taşınan kabarcık sayısını göstermektedir. Kabarcıkların yatakta kalma zamanı, taneciğin yatakta yanma zamanından çok küçüktür. Bu sebepten O_2 konsantrasyonunun, kabarcığın yatak içinde yükselme süresinde sabit olduğu kabul edilebilir. Denklem 4.13 yardımıyla X değeri hesaplanabilir.

$$X = \frac{6.34 Z_{mf}}{d_b (gd_b)^{1/2}} \left[U_{mf} + \frac{1.3 \epsilon_{mf} D_G^{1/2} g^{1/4}}{(1 + \epsilon_{mf}) d_b^{1/4}} \right] \quad (4.13)$$

Yarıçapı r_i olan kok taneciklerinin büzülme hızı $\mathfrak{R}_i(r)$ olup denklem 4.14 ve 4.15’de görülebilir (Congalidis et.al., 1981).

$$\mathfrak{R}_i(r) = -\frac{dr_i}{dt} \quad (4.14)$$

$$\mathfrak{R}_i(r) = -2 \frac{M_c}{r_{ic}} \frac{(\gamma_c + \gamma_A)}{\gamma_A} k_c C_o \quad (4.15)$$

Yukarıdaki denklemde; γ_C , beslenen kömürün kısa analizindeki sabit karbon kesri γ_A , beslenen kömürdeki kül kesri M_C , karbonun moleküler ağırlığı, k_C ise reaksiyon hız sabiti olup Bölüm 2 denklem 2.37’den hesaplanabilir.

Kok taneciklerinin büzülme hızı ve yanma zamanının çarpımı ile kok tanecik çapının farkı bize KHYM taneciklerin çapı d_{ish} ’yi vermektedir.

$$d_{ish} = d_{ic} - \{t_{ic} \mathfrak{R}_i(r)\} \quad (4.16)$$

Reynolds sayısı tanım olarak atalet kuvvetlerin vizkoz kuvvetlere oranı olup yatak içerisindeki akışın karakterini gösterir.

$$Re = \frac{\rho_g d_p U_{mf}}{\mu_g \epsilon_{mf}} \quad (4.17)$$

Denklem 4.18’den akışkanlaştırıcı gazın viskozitesi μ_g bulunabilir.

$$\mu_g = \frac{(1.46 \cdot 10^{-6} T_y^{1.504})}{(T_y + 120)} \quad (4.18)$$

Denklem 4.17’de görülen ρ_g ; akışkanlaştırıcı gazın yoğunluğu olup yatak sıcaklığına bağlı olarak denklem 4.19’dan hesaplanabilir.

$$\rho_g = 1.293 \cdot 273.15 / T_y \quad (4.19)$$

Bu çalışmada Re sayısı; **Nakamura et.al.** (1985) tarafından Ar sayısına bağlı olarak önerilen denklem 4.20'den hesaplanmaktadır.

$$Re = \sqrt{1135.7 + 0.04088 Ar} - 33.7 \quad (4.20)$$

$$Ar = \left[d_p^3 g \rho_g (\rho_p - \rho_g) \right] / \mu_g^2 \quad (4.21)$$

Reynold sayısının fonksiyonu olarak i boyutundaki kok taneciklerinin minumum akışkanlaştırma hızı U_{imf} , denklem 4.22'de görülebilir:

$$U_{imf} = \frac{Re \mu_g}{d_{ic} \rho_g} \quad (4.22)$$

i boyutundaki kok taneciklerinin terminal hızı U_{iter} ;

$$U_{iter} = \frac{4g^2 d_{ic}^3 (\rho_c - \rho_g)^2}{225 \rho_g \mu_g^{1/3}} \quad (4.23)$$

denklem 4.23 kullanılarak bulunabilir.

Akışkan yataklı yakıcıda en büyük karbon kaybını; küçük kok taneciklerinin sürüklenerek yataktan uzaklaşması oluşturmaktadır. Literatürde sürüklenme miktarının hesaplanmasında kullanılan birçok korelasyon mevcuttur. Deneysel sonuçlar; **Merrick ve Highley**'in 1974'de geliştirdiği denklem 4.24'ün her boyuttaki tanecik için geçerli olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle yataktan sürüklenen katıların miktarının bulunmasında 4.24'nolu denklem kullanılmıştır.

$$E_{io} = 130 U_o \rho_g A_y \exp \left\{ -10.4 \left(U_{iter} / U_o \right)^{0.5} \left[U_{imf} / (U_o - U_{imf}) \right]^{0.25} \right\} \quad (4.24)$$

E_{io} ; i boyutundaki taneciğin sürüklenme sabitini, $\eta(r)$ ise taneciğin tutulma verimini göstermektedir. Gerçekte sürüklenen taneciklerin bir kısmı yatağa geri dönmekte bir kısmı ise yataktan dışarı taşınmaktadır. Yatak içinden sürüklenen taneciklerle ilgili iki durum söz konusudur:

- Sürüklenen taneciklerin tamamının yatağa geri gönderilmemesi durumunda; yani $\eta(r)=0$ olması halinde sürüklenme sabiti E_{i0} ; maksimum değer almakta,
- Sürüklenen taneciklerin tamamının yatağa geri gönderilmesi durumunda; yani $\eta(r)=1$ olması halinde sürüklenme sabiti E_{i0} ; sıfır olmaktadır.

Bu model çalışmasında; birinci durum incelenmiştir. Boyut dağılımı ve buna bağlı yanma zamanı bilinen i boyutundaki taneciklerin; sürüklenen miktarı denklem 4.25'den hesaplanabilir:

$$m_{i_{sür}} = t_{i_{cm}} E_{i0} [1 - \eta(r)] \quad (4.25)$$

Yatakta mevcut kok miktarı:

$$m_{i_y} = m_{i0} - m_{i_{sür}} \quad (4.26)$$

Yatakta mevcut kok miktarının; bir kısmı yanmakta, bir kısmı büzülerek kaybolmakta ve kömür cinsine bağlı olarak açığa çıkan kül miktarı yataktan çekilmektedir. Bir miktar kok ise sürekli yatakta kalarak; kararlı yanmanın gerçekleşmesini sağlamaktadır.

$$m_{i_y} = m_{i_{sh}} + m_{i_{KHYM}} + m_{i_{yan}} + m_{i_A} \quad (4.27)$$

Bu çalışmada; KHYM taneciklerin miktarını, boyut dağılımını ve kütle kesrini bize verecek olan bir model geliştirilmiştir. Modelin nasıl kurulduğu Ekler bölümünde Ek1'de bir örnek ile açıklanmıştır.

Serbest bölgenin hidrodinamiği aktif yatak içinden oldukça farklıdır. Kabarcıklar SB'de mevcut değildir. Dağıtıcı eleğin hemen üzerinde oluşmaya başlayan gaz kabarcıkları yoğun faz içerisinde yükselirken inert malzeme ve kok taneciklerini izlerinde taşırlar. Aktif yatak yüzeyine ulaşan kabarcıkların patlamasıyla açığa çıkan gazın tanecikleri SB'ye fırlattığı gözlenir. Kabarcık patlamaları ile SB'ye atılan taneciklerin serbest düşme hızları gaz hızından büyük ve SB yeterince yüksek ise büyük bir kısmı geri dönerek yatak malzemesi ile karışır. Taneciklerin aktif yatak ve SB'de farklı davranımlarının söz konusu oluşu; farklı tanecik modellerinin gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Böylece AY davranışının daha gerçekçi olarak modellenebilmesi mümkündür. Daha sonraki bölümlerde çalışmada baz alınan, aktif yatak ve SB tanecik modelleri ayrıntılı olarak görülebilir.

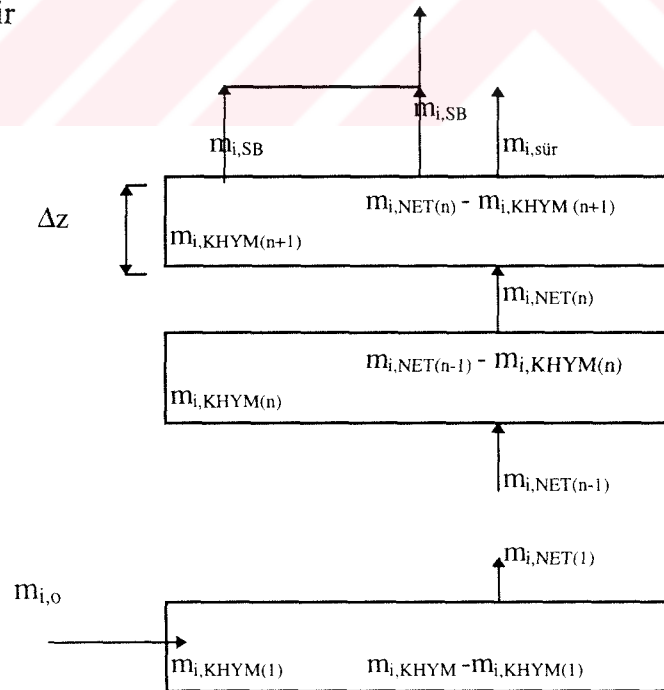
4.2.1.1 Aktif Yatak Tanecik Modeli

Bu modelleme çalışmasında aktif yatakta meydana gelen tanecik hareketleri “**Aktif Yatakta Katı Tanecik Modeli**” olarak ifade edilmiştir. Aktif yatakta katı tanecik hareketlerinin modellendiği bu çalışma ; **Wen et.al.**, (1978) tarafından geliştirilen 2 fazlı geri-dönüslü modelden uyarlanmış ve tek fazlı geri-dönüslüz model olarak tanımlanmıştır. Katı taneciklerin hareketlerinin tek fazda olduğu varsayılan aktif yatak bir dizi mükemmel karıştığı kabul edilen seri kompartmanlara bölünmüştür. Şekil 4.2’de bu çalışmada kullanılan tek fazlı geri-dönüslüz model şematik olarak görülebilir (Wen ve Horio, 1978).

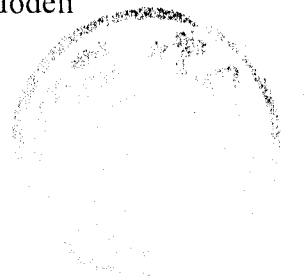
Problemi sadeleştirmek için modelde yapılan varsayımlar ve sınır şartları aşağıda belirtilmektedir. Kurulan denklikte:

- Model tek boyutlu ele alınarak tanecikler arası boşluk oranının kompartman kesit alanında aynı kaldığı,
- Yerçekim kuvvetinden daha fazla etkilenen büyük boyutlu taneciklerin aktif yatağın alt küçük boyutlu taneciklerin ise üst kısımlardaki kompartmanlarda yandığı,

kabul edilmiştir



Şekil 4.2 Aktif Yatakta Tek Fazlı Geri-Dönüslüz Katı Tanecik Modeli



Kompartman sayısı n ; kompartman yüksekliği Δz 'e bağılı olarak;

$$n = \frac{\Delta Z_y}{\Delta z} \quad (4.28)$$

denklem 4.28'den hesaplanabilir. Denklem 4.28'de ΔZ_y genişmiş yatak yüksekliğini ifade etmektedir.

Kararlı halde yatakta mevcut kok miktarı; kompartman sayısına bölünerek bir kompartmanda mevcut i boyutundaki kok miktarı denklik 4.29'dan bulunabilir:

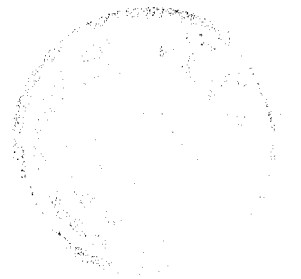
$$m_{i,KHYM(n)} = \frac{m_{i,KHYM}}{n} \quad (4.29)$$

Bir kompartmanda mevcut i boyutundaki kok miktarının; aktif yataktaki her kompartmanda eşit miktarda ve homojen olarak dağıldığı varsayımına dayanarak denklem 4.30 yazılabilir:

$$m_{i,KHYM(1)} = m_{i,KHYM(n)} = m_{i,KHYM(n+1)} \quad (4.30)$$

Bir kompartmandan diğerine taşınan d_{ic} boyutundaki net kok miktarı; KHYM kok taneciklerinin miktarı $m_{i,KHYM}$ ile her bir kompartmanda yanması mümkün olan kok miktarı $m_{KHYM(n)}$ 'nin farkı alınarak denklem 4.31'den hesaplanabilir.

$$m_{i,NET(n)} = m_{i,KHYM} - m_{KHYM(n)} \quad (4.31)$$



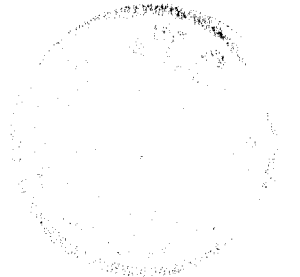
4.2.1.2 Serbest Bölge Tanecik Modeli

Aktif yatak üzerindeki SB’de her zaman tanecik vardır. Bu tanecikler; kabarcıklarla veya türbülanslı gaz hareketleri ile taneciklere ilk hızlarının verildiği; aktif yataktan gelmektedir. Bu konuda daha önce yapılmış çalışmalar ve modeller hakkında bilgi Bölüm 2’de geniş bir şekilde verilmiştir.

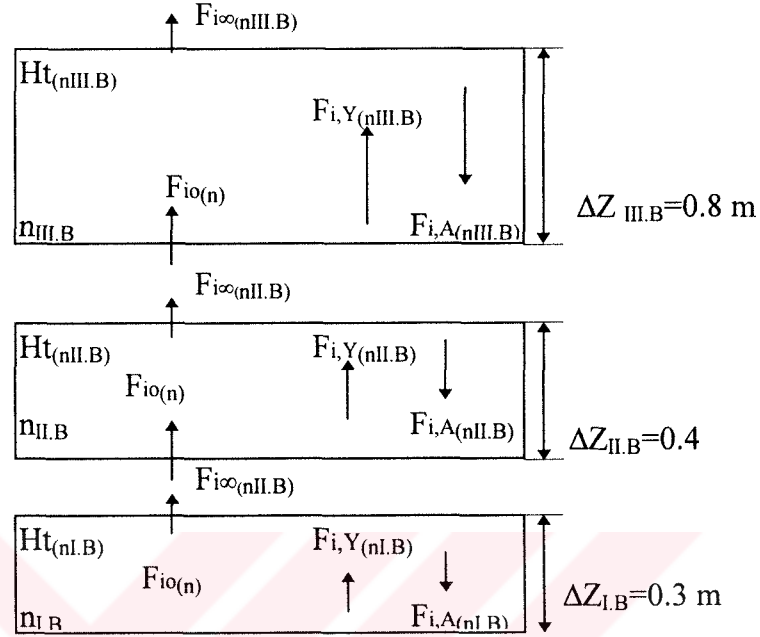
Bu çalışmada; SB’de tanecik davranımını veren bir tanecik modeli geliştirilmiş ve **“Serbest Bölgede Katı Tanecik Modeli”** olarak ifade edilmiştir. Model tek boyutlu tutularak, bütün yanal tanecik hareketleri ihmal edilmiştir. Aktif yatak tanecik modelinde olduğu gibi eksenel hızların ve katı madde hacımsal oranının, aynı kaldığı kabul edilmiştir. Tanecik modelinde SB cidarlarının katı madde debisi üzerindeki etkisi gözönüne alınmamıştır. Modelde gözönüne alınan kabuller ve modelin sınır şartları aşağıda verilmektedir.

Gerçekleştirilen SB katı tanecik modelinde:

- Serbest bölgenin, aktif yatak gibi mükemmel karışmış bir dizi kompartmanlara bölündüğü,
 - Yataktan SB’ye fırlatılan taneciklerin; KHYM taneciklerin boyut dağılımında olduğu,
 - Türbülans ve bundan kaynaklanan vortekslerin, SB’de ölçülen nispeten düşük türbülans yoğunluğu nedeni ile ihmal edildiği,
 - Tanecik boyut dağılımının ve yoğunluğunun kompartman içinde değişmediği,
 - Taneciklerin birbirleri ile ve SB cidarı ile etkileşimlerinin ihmal edildiği,
 - Aglomerasyonun meydana gelmediği böylece taneciklerin tek olarak ayrı hareket ettikleri,
 - Gaz türbülansının tanecik hareketi üzerindeki etkisinin ihmal edildiği,
 - Modelde kömür ve kül taneciklerin küresel olduğu,
- varsayılmıştır.



Şekil 4.3’de bu çalışmada geliştirilen; tek-fazlı geri dönüşsüz SB katı tanecik modeli şematik olarak görülmektedir.



Denklem 4.32 ile hesaplanan $F_{o(n)}$; aktif yataktaki son kompartmandan SB’ye fırlatılan taneciklerinin debisidir. Modelde; Pemberton ve Davidson’nın (1983) kabarcık izinde Serbest bölgeye taşınan taneciklerin debisi için literatüre sunduğu korelasyon kullanılmıştır.

$$F_{o(n)} = 0.1 \rho_t (1 - \epsilon_{mf}) (U_o - U_{mf}) \quad (4.32)$$

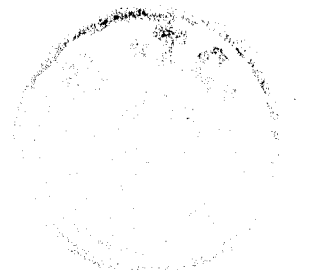
Serbest bölgeye fırlatılan taneciklerden büyük bir kısmını inert malzeme küçük bir kısmını da kok tanecikleri oluşturmaktadır. Kararlı halde yataкта mevcut kok miktarının, inert malzeme miktarına oranı; X_{kok} olup denklem 4.33’den hesaplanabilir.

$$X_{kok} = \frac{m_{KHYM}}{m_t} \quad (4.33)$$

O halde; SB’ye taşınan kok taneciklerinin debisi, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$F_{o\text{ kok}(n)} = F_{o(n)} X_{kok} \quad (4.34)$$

Kararlı halde yataкта mevcut; i boyutundaki kok taneciklerinin kütle kesri $X_{i,KHYM}$; denklik 4.35’de görülebilir (Bakınız **EK1**):



$$X_{i,KHYM} = \frac{m_{i,KHYM}}{m_{KHYM}} \quad (4.35)$$

Serbest bölgeye fırlatılan i boyutundaki kok taneciklerin debisi ise $F_{io(n)}$;

$$F_{io(n)} = F_{o_{kok(n)}} X_{i,KHYM} \quad (4.36)$$

denklik 4.36'dan hesaplanabilir.

Serbest bölgede katı-gaz reaksiyonlarının simülasyonunun yapılabilmesi için SB'de mevcut kok konsantrasyonunu tahmin edilmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle SB'de mevcut kompartmanlar içerisinde yukarı ve aşağı hareket eden kok taneciklerinin debisi ve hızları belirlenmelidir.

Şekil 4.3'de görülebileceği gibi SB'de tanecik taşınması açısından yüksekliğe bağlı olarak üç farklı bölge (kompartman) söz konusudur. Bu kompartmanlar $n_{I,B}$, $n_{II,B}$, $n_{III,B}$ olarak isimlendirilir ve yükseklikleri farklıdır. Aşağıdaki denklemler; $n_{I,B}$ için yazılmış olup diğer kompartmanlarda aynen kullanılmaktadır.

Serbest bölgede n_{IB} . kompartmanda yukarıya doğru yükselen i boyutundaki kok taneciklerinin debisi denklem 4.37 kullanılarak bulunabilir:

$$F_{i,Y(nI,B)} = F_{i\infty(nI,B)} + (F_{io(n)} - F_{i\infty(nI,B)}) e^{-a Z_{SB(nI,B)}} \quad (4.37)$$

Serbest bölgede n_{IB} . kompartmanda aşağıya doğru inen i boyutundaki kok taneciklerinin debisi ise denklem 4.38'den hesaplanabilir:

$$F_{i,A(nI,B)} = F_{i\infty(nI,B)} + (F_{io(n)} - F_{i\infty(nI,B)}) e^{-a Z_{SB(nI,B)}} \quad (4.38)$$

O halde; n_{IB} . kompartmanda mevcut i boyutundaki kok taneciklerin konsantrasyonu, denklem 4.37 ve 4.38 kullanılarak;



$$H_{i,t(nI.B)} = \sum_i \frac{F_{i,Y(nI.B)}}{U_{i,tY}} + \sum_i \frac{F_{i,A(nI.B)}}{U_{i,tA}} \quad (4.39)$$

denklik 4.39'dan hesaplanabilir.

Serbest bölgede taneciklerin yukarı yükselme hızı denklem 4.40, aşağıya inme hızı ise denklem 4.41'de görülebilir.

$$U_{i,tY} = U_b \quad (4.40)$$

$$U_{i,tA} = U_{i,ter} - U_o \quad (4.41)$$

Serbest bölgede n_{IB} . kompartmanda mevcut i boyutunda toplam kok tanecik sayısı;

$$N_{i,(nI.B)} = \frac{H_{i,t(nI.B)}}{m_{i,c}} V_{(nI.B)} \quad (4.42)$$

denklemler 4.42'den hesaplanabilir. Bu denklikte sıçrama bölgesi olarak isimlendirilen kompartmanın hacmi $V_{(nI.B)}$ 'dir. SB'de mevcut i boyutundaki kok taneciğinin ağırlığı $m_{i,c}$ olup denklem 4.43 ile ifade edilebilir:

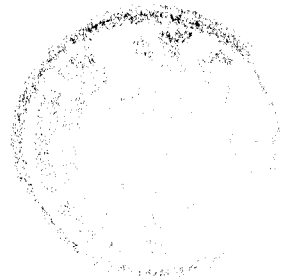
$$m_{i,c} = \frac{\pi d_{ic}^3}{6} \rho_c \quad (4.43)$$

Denklem 4.43'de; d_{ic} çapındaki taneciğin hacmi $\pi d_{ic}^3/6$; kokun yoğunluğu ise ρ_c 'dir.

Bölüm 2'de; taneciklerin aktif yatak yüzeyinden SB'ye fırlatıldıkları başlangıç hızı (U_{to}) ile ilgili literatürde yayınlanan korelasyonlar sunulmuştu. Bu çalışmada; U_{to} için **Pemberton ve Davidson**'ın kabarcık izinde taşınan tanecikler için önerdiği ifade kabul edilmektedir.

$$U_{to} = 2.5 U_b \quad (4.44)$$

Serbest bölgeye sıçrayan kok taneciklerin ulaştığı maksimum yükseklik; denklem 4.45'ün integrali alınarak hesaplanabilir.



$$\frac{dU_{tY}}{dZ_{SB}} = -\frac{1}{U_{tY}} \left\{ \frac{3/4 C_D \rho_g U_{tr} |U_{tr}|}{\rho_g d_t} + \frac{(\rho_t - \rho_g)g}{\rho_t} \right\} \quad (4.45)$$

Denklem 4.45’de görülen U_{tr} ; relativ hız olup denklem 4.46’dan hesaplanabilir.

$$U_{tr} = U_{to} - U_{tY} \quad (4.46)$$

Denklik 4.45’in sağ tarafını A ile ifade edersek:

$$A = \left\{ \frac{3/4 C_D \rho_g U_{tr} |U_{tr}|}{\rho_g d_t} + \frac{(\rho_t - \rho_g)g}{\rho_t} \right\} \quad (4.47)$$

Denklem 4.45 integre edildiğinde i boyutundaki taneciklerin SB’de ulaştığı maksimum yükseklik denklik 4.48’den bulunabilir.

$$Z_{i,m} = \frac{U_{tY}^2}{2A} \quad (4.48)$$

$U_{ter} \leq U_o$ koşulunu sağlayan kok taneciklerinde SB’de maksimum bekleme süresi;

$$t_{i,r_m} = \frac{Z_{i,m}}{U_o} \quad (4.49)$$

denklem 4.49’dan bulunabilir.

$U_{ter} > U_o$ koşulunu sağlayan kok taneciklerinin SB’de maksimum bekleme süresi ise

$$t_{i,r_m} = \frac{Z_{i,m}}{U_b} + \frac{Z_{i,m}}{(U_{i,ter} - U_o)} \quad (4.50)$$

denklem 4.50’den hesaplanabilmektedir.

Denklem 4.14 kullanılarak her bir kok tanecik boyutu için hesaplanan yanma zamanı $t_{i,c}$; o taneciğin yatak içerisinde beklediği süreyi vermektedir. Denklem 4.49 ve 4.50 yardımıyla hesaplanan t_{i,r_m} ise kok taneciğinin SB’de maksimum bekleme süresidir. Kok

tanecikleri; yanma zamanı ve SB’de bekleme süresine bağlı olarak ya kısmen yada tamamen yanabilir. Yanmayan kok tanecikleri ise boyutuna bağlı olarak ya yatak dışına sürüklenecek yada aktif yatağa geri dönecektir (Rajan ve Wen, 1980; Tung et.al., 1980).

O halde:

$$t_{i,r_m} \geq t_{i,c} \quad (4.51)$$

koşulunu sağlayan kok tanecikleri SB’de yanmaktadır.

$$t_{i,r_m} < t_{i,c} \quad (4.52)$$

koşulunu sağlayan kok tanecikleri ise tanecik boyutuna bağlı olarak ya sürüklenmekte yada aktif yatağa geri dönerek orada yanmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen; “**SB katı tanecik modelinde**” SB’de yanan kok tanecik sayısı;

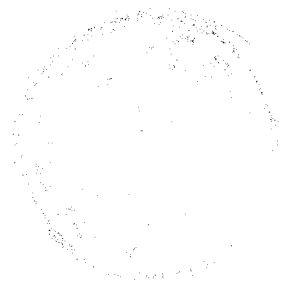
$$N_{i, \text{yan}(\text{nl.B})} = \frac{t_{i,r_m}}{t_{i,c}} N_{i(\text{nl.B})} \quad (4.53)$$

denklem 4.53’den hesaplandı.

Model denkliklerinin çözümünde; aktif yataktan SB’ye fırlatılan kok taneciklerinin küçük bir kesrinin burada yandığı ve çoğunluğunun aktif yatağa geri döndüğü görülmektedir.

4.2.2 Gaz Fazının Kütle Dengesi

Akışkan yataklı yakıcıların modellenmesinde; aktif yatağın yoğun ve kabarcık fazdan meydana geldiği ve UM’nin yoğun fazda açığa çıktığı kabul edilmişti. Şekil 4.3’de kompartmanlara giren ve kompartmanlardan çıkan gazların kütlesi ile reaksiyonlar sonucu gazların kütlesinde meydana gelen değişimler gözönüne alınarak denklik 4.54’de yazılmıştır:



$$\left\{ \begin{array}{c} n\text{'inci} \\ \text{kompartmentandan} \\ \text{\u00e7\u0131kan} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} (n-1)\text{'inci} \\ \text{kompartmentana} \\ \text{giren} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Kimyasal} \\ \text{reaksiyon} \\ \text{ile artan} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Kimyasal} \\ \text{reaksiyon} \\ \text{ile azalan} \end{array} \right\} \pm \left\{ \begin{array}{c} \text{Fazlar} \\ \text{aras\u0131 transfer} \\ \text{edilen} \end{array} \right\} \quad (4.54)$$

Oksijen dengesi aktif yatak ve SB i\u00e7in yapılmı\u015ftır.

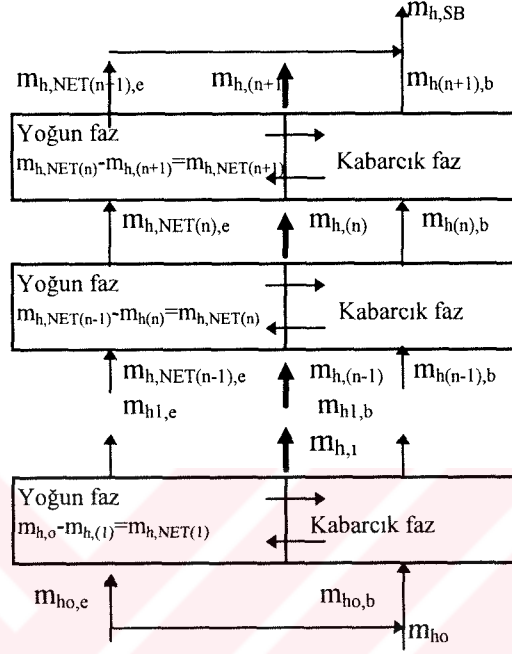
4.2.2.1 Aktif Yatakta Faz Dengesi

Aktif yatakta; gaz fazının hareketlerinin incelenmesinde, iki fazlı aktif yatak modeli kullanılmı\u015ftır. Aktif yatak; kabarcık faz ve tanecikler ile intersitial gaz\u0131 i\u00e7eren yo\u011fun faz olmak \u00fczere iki ayrı fazdan olu\u015mu\u015ftur. Aktif yatakta kompartmentlara giren ve \u00e7ıkan gaz k\u00fctleleri ile reaksiyonlar sonucu gaz k\u00fctlelerinde meydana gelen de\u011fi\u015fiklikler g\u00f6z \u00f6n\u00fcne alınarak \u00e7alı\u015mada ge\u00e7ekle\u015tirilen model \u015ekil 4.4'de g\u00f6r\u00fclebilir. Modelde yapılan varsayımlar a\u015a\u011fıda belirtilmi\u015ftir.

Kurulan denklikte:

- Gaz hız\u0131; minumum akı\u015fkanla\u015ftırma hızında yo\u011fun faz bo\u015flu\u011funa sahiptir. Yata\u011fa i\u015letme hızında (U_o) giren akı\u015fkanla\u015ftırıcı gazın bir kısmı; U_{mf} hızında yo\u011fun faza, geri kalanının ($U_o - U_{mf}$) ise kabarcık faz olarak yatak boyunca y\u00fckseldi\u011fi,
- Kabarcıkların, yatak y\u00fcksekli\u011fi boyunca maksimum kabarcık \u00e7apına ula\u015fıncaya kadar birle\u015ferek b\u00fcy\u00fcd\u00fckleri,
- Kabarcık faz ile yo\u011fun faz arasındaki gaz alı\u015veri\u015finin kabarcık \u00e7apının fonsiyonu oldu\u011fu,
- Yo\u011fun fazda gazların tamamen karı\u015ft\u0131\u011fi ve O_2 'nin homojen olarak da\u011f\u0131ld\u0131\u011fi,
- U\u00e7ucu karbonun, yo\u011fun fazda karbonmonoksit formunda yand\u0131\u011fi,
- Karbon monoksidin karbon dioksit oksidasyonunun, yo\u011fun fazda kinetik kontroll\u00fc ger\u00e7ekle\u015fti\u011fi,
- K\u00f6m\u00fcr\u00fc terkeden u\u00e7ucu maddeler yandıktan sonra geriye kalan kokun yand\u0131\u011fi,
- Kok taneciklerinin yanması; sadece yo\u011fun fazda ger\u00e7ekle\u015fmekte, yanma i\u00e7in gerekli O_2 'nin bir kısmının kabarcıklardan yo\u011fun faza O_2 transferi ile kar\u015fıland\u0131\u011fi,
- Kok tanecikleri, karbon ve k\u00fclden meydana gelmekte olup k\u00fcresel oldu\u011fu,

- Kok yanmasının difüzyon ve reaksiyon kinetiklerinin kombinasyonları ile yönlendirildiği, kabul edilmiştir.



Şekil 4.4 Akışkan Yatak İçindeki Kompartmanlarda Gaz Faz Kütle Dengesi

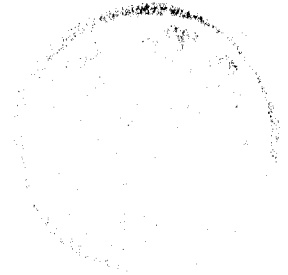
a) Aktif yatakta kabarcık ve yoğun faz arasında kütle dengesi

Aktif yatakta fazlar arasındaki O_2 konsantrasyonu için aşağıdaki denklik yazılabilir. Yoğun yatakta, n. kompartmandaki oksijen mol dengesi aşağıda verilmiştir.

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmana} \\ \text{giren } O_2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmanda} \\ \text{kabarcık faza} \\ \text{giren } O_2 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmanda} \\ \text{yoğun faza} \\ \text{giren } O_2 \end{array} \right\} \pm \left\{ \begin{array}{c} \text{Fazlar arası} \\ \text{transfer} \\ \text{edilen } O_2 \end{array} \right\} \quad (4.55)$$

Aktif yatak girişindeki O_2 konsantrasyonu denklik 4.56'dan bulunabilir:

$$C_o = \frac{0.21}{RT_y} \quad (4.56)$$



Burada; üniversal gaz sabiti R, yatak sıcaklığı T_y 'dir.

Dağıtıcı eleğin üzerinden itibaren oluşmaya başlayan gaz kabarcıkları yatak boyunca yükselirken birleşerek daha büyük çaplı kabarcıklar meydana getirirler. Kabarcık başlangıç çapı denklem 4.57'den bulunabilir. Denklemdaki n_d dağıtıcı plakadaki delik sayısıdır.

$$d_{b_o} = 0.347 \left[A_y (U_o - U_{mf}) / (n_d) \right]^{0.4} \quad (4.57)$$

Kabarcıkların birleşmeleri maksimum kabarcık çapına d_{bm} 'ye erişinceye kadar devam eder. Bu büyüklüğe erişildiğinde, kabarcık parçalanarak irili ufaklı yeni kabarcıklar meydana gelir ve aktif yatak yüzeyine ulaşınca kadar bu davranımı tekrar eder.

Kabarcığın aktif yatak yüzeyinde eriştiği maksimum çap d_{bm} ;

$$d_{b_m} = 0.652 (A_y (U_o - U_{mf}))^{0.4} \quad (4.58)$$

denklem 4.58'den elde edilmektedir.

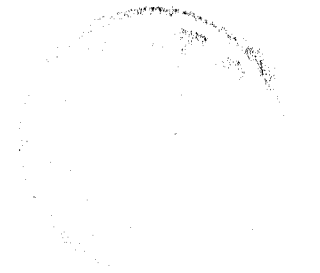
Mori ve Wen (1975) kabarcık çapının yatak yüksekliğine bağlı olarak değişimini ve aktif yataktaki her bir kompartman boyutu Δz için $d_{b(n)}$ değerini aşağıdaki denklikle ifade etmitlerdir:

$$d_{b(n)} = d_{b_m} - (d_{b_m} - d_{b_o}) e^{-0.3 \Delta z / D_y} \quad (4.59)$$

Atmosferik basınçlı kabarcıklı bir yatakta kabarcık yükselme hızı; **Davidson ve Harrison**'un (1963) verdiği denklemden hesaplanabilir (Davidson et.al., 1985). Kabarcık çapının; yatak içerisinde yükselirken büyümesi; kabarcık yükselme hızında artmasına sebep olmaktadır. Kabarcık yükselme hızı ile kabarcık çapı arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde görülebilir.

$$U_{b(n)} = (U_o - U_{mf}) + 0.711 \sqrt{g d_{b(n)}} \quad (4.60)$$

Fazlar arasındaki gaz değişimi iki adımda gerçekleşir:



- kabarcık-örtü,
- örtü-yoğun.

Gaz değişim hızının analitik ifadeleri; $U_o > 2U_{mf}$ akışkanlaştırma koşulları için **Kunii ve Levenspiel** tarafından denklem 4.61, 4.62 ile tanımlanmıştır (Saxena, 1977).

n. kompartmanda kabarcık-örtü arasındaki gaz değişimi:

$$q_{bc(n)} = (3/4)\pi d_{b(n)}^2 U_{mf} + 0.975\pi D_G^{1/2} g^{1/4} d_{b(n)}^{7/4} \quad (4.61)$$

n. kompartmanda örtü- yoğun faz arasındaki gaz değişimi:

$$q_{ce(n)} = 1.13\pi \left(\frac{\epsilon_{mf}^2 D_G U_{b(n)}}{d_{b(n)}^3} \right)^{1/2} d_{b(n)}^3 \quad (4.62)$$

Denklem 4.61 ve 4.62'de gaz difüzyon katsayısı D_G ; yatak sıcaklığının fonksiyonu olarak aşağıdaki denklikten hesaplanabilir:

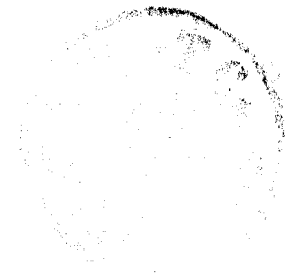
$$D_G = 9.741 \cdot 10^{-10} T_y^{1.75} \quad (4.63)$$

n. kompartmanda, kabarcık-yoğun faz arasındaki toplam gaz değişim katsayısı $q_{be(n)}$ ise denklem 4.64'den bulunabilir:

$$\frac{1}{q_{be(n)}} = \frac{1}{q_{bc(n)}} + \frac{1}{q_{ce(n)}} \quad (4.64)$$

Kabarcık fazdaki oksijenin yükseklikle değişimi ve fazlar arasındaki oksijen transferi için denklem 4.65 yazılabilir:

$$V_{b(n)} U_{b(n)} \frac{dC_b}{dz} = q_{be(n)} (C_b - C_e) \quad (4.65)$$



Denklem 4.65’de C_e ; yoğun fazdaki oksijen konsantrasyonunu, C_b ise kabarcık fazdaki oksijen konsantrasyonunu belirtmektedir. $V_{b(n)}$; bir kompartmanda mevcut kabarcık hacmi olup $\pi d_{b(n)}^3/6$ değerini almaktadır.

Denklem 4.65’deki eşitliğin sol tarafı yüksekliğe bağlı olarak kabarcık fazdaki oksijen azalmasını, sağ tarafı ise yoğun ve kabarcık faz arasındaki oksijen transferini göstermektedir. Kabarcık fazdaki O_2 konsantrasyonu C_b ; yüksekliği Δz olan her bir kompartmanda zamanla değişir. Kabarcıkların birleşerek daha büyük çaplı kabarcıklar meydana getirdiği varsayımı ve $z=0$ için $C_b=C_o$ sınır şartı ile denklem 4.65 integre edildiğinde Δz yüksekliğinde bir kompartmanda kabarcık fazdaki O_2 konsantrasyonu aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$C_{b(n)} = C_{e(n)} + (C_o - C_{e(n)}) e^{-q_{be(n)} \Delta z / U_{b(n)}} \quad (4.66)$$

Her bir kompartman için yoğun fazdaki O_2 konsantrasyonu ise;

$$C_{e(n)} = C_o - C_{b(n)} \quad (4.67)$$

denklem 4.67’den hesaplanabilir.

b) Tüm yatak için O_2 kütle dengesi

Aktif yatakta n. kompartmanda, oksijenin mol dengesinin genel şekilde yazılışı aşağıdaki gibidir. Yoğun fazda oksijen; kok taneciklerinin, UM’nin CO’nun yanması ve kükürtün sülfatlaşma reaksiyonu için tüketilir.

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmana} \\ \text{giren } O_2 \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmandan} \\ \text{çıkan } O_2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmanda} \\ \text{kok yüzeyinde} \\ \text{tütilen } O_2 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmanda} \\ \text{uçucu yanmasıyla} \\ \text{tütilen } O_2 \end{array} \right\} \\ + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmanda} \\ \text{gaz – gaz reaksiyonunda} \\ \text{tütilen } O_2 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmanda} \\ \text{sülfatlaşmayla} \\ \text{tütilen } O_2 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. kompartmanda} \\ \text{piritik kükürtle} \\ \text{tütilen } O_2 \end{array} \right\} \quad (4.68)$$

Bir kompartmanda mevcut i boyutundaki toplam kok miktarı $m_{i,KHYM(n)}$ 'nin, i boyutundaki tek bir kok taneciğinin ağırlığı $m_{i,c}$ 'ye bölünmesi ile bir kompartmanda yoğun faz hacminde mevcut i boyutundaki kok tanecik sayısı $N_{i,e(n)}$;

$$N_{i,e(n)} = \frac{m_{i,KHYM(n)}}{m_{i,c}} \quad (4.69)$$

denklem 4.69'dan bulunabilir.

Denklik 4.70, aktif yatak içerisinde ki n . kompartmanda homojen olarak dağılmış $N_{i,e(n)}$ adet kok taneciğinin yüzeylerindeki O_2 tüketim hızını vermektedir.

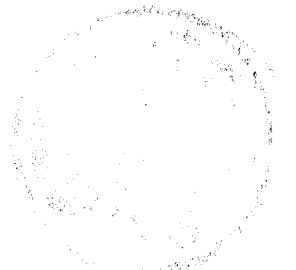
$$\left\{ \begin{array}{l} n. \text{ kompartmanda} \\ \text{mevcut kok taneciklerinin} \\ \text{yüzeylerinde } O_2 \text{ tüketimi} \end{array} \right\} = r_{C(n)} = \pi d_{ic}^2 k_C C_{e(n)} N_{i,e(n)} \quad (4.70)$$

Kok yanması için toplam reaksiyon hız sabiti k_C ; Bölüm 2 denklem 2.37'den hesaplanabilir.

Uçucuların üniform olarak aktif yatakta açığa çıktığı ve homojen olarak dağıldığı varsayımına dayanarak her kompartmanda açığa çıkan UM miktarı aktif yatakta mevcut kompartman sayısına bölünerek bulunabilir.

Böylece her kompartmanda mevcut UM'nin yanması ile O_2 tüketim hızı;

$$\left\{ \begin{array}{l} n. \text{ kompartmanda} \\ \text{uçucu yanmasıyla} \\ \text{tüketilen } O_2 \end{array} \right\} = r_{UM(n)} = X_{UM} \dot{m}_{o(n)} \left(0.5 \frac{\gamma_C - f_C}{M_C} + 0.5 \frac{\gamma_H}{M_H} - \frac{\gamma_O}{M_O} \right) \quad (4.71)$$



denklik 4.71 kullanılarak hesaplanabilir. Denklik 4.71'de görülen X_{UM} ; kömür kısa analizinde verilen uçucu miktarının; aktif yatakta açığa çıkan kesridir. Birim zamanda yatağa beslenen kömürün kütlesi ise $\dot{m}_o$ 'dır.

Denklik 4.72'de karbon monoksitin oksitlenme reaksiyonu için kullanılan hız ifadesi görülebilir. Bu ifade Bölüm 2 denklem 4.25'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

$$r_{CO} = \frac{dC_{CO}}{dt} = \left[A e^{-E/RT_g} C_{CO} C_{O_2}^{0.5} C_{H_2O}^{0.5} \right] \quad (4.72)$$

Karbon monoksit yanma reaksiyonu esas alınarak; r_{CO} reaksiyon hızına bağlı O_2 tüketim hızı ayrıntılı olarak yazılırsa;

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{n. kompartmanda} \\ \text{gaz - gaz reaksiyonuyla} \\ \text{tüketilen } O_2 \end{array} \right\} = r_{CO(n)} = \left[0.5 V_i A e^{-E/RT_{i(n)}} C_{CO} C_{O_2}^{0.5} C_{H_2O}^{0.5} \right] \quad (4.73)$$

denklem 4.73 elde edilir.

n. kompartmanda yanabilir kükürt O_2 tüketim hızı; denklik 4.74'de görülebilir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{n. kompartmanda} \\ \text{piritik kükürtle} \\ \text{tüketilen } O_2 \end{array} \right\} = r_{S(n)} = \dot{m}_{o(n)} \left(\frac{\gamma_s \eta_s}{M_s} \right) \quad (4.74)$$

n. kompartmanda sülfatlaşma reaksiyonu ile O_2 tüketim hızı;

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{n. kompartmanda} \\ \text{sülfatlaşmayla} \\ \text{tüketilen } O_2 \end{array} \right\} = r_{SUL(n)} = \dot{m}_{o(n)} \left(0.5 \frac{\gamma_s \eta_s}{M_s} \right) \quad (4.75)$$

denklem 4.75 kullanılarak bulunabilir. Denklem 4.74 ve 4.75’de görülen η_s ; yanabilir kükürt yüzdesi olup çalışmada 0.9 olarak alınmıştır.

O halde; n. kompartmanda toplam O_2 tüketim hızı, kmol bazında denklem 4.76’dan bulunabilir:

$$r_{T(n)} = r_{C(n)} + r_{UM(n)} + r_{CO(n)} + r_{S(n)} + r_{SUL(n)} \quad (4.76)$$

Her bir kompartmanda tüketilen O_2 ’nin konsantrasyonu;

$$\dot{C}_{O_2(n)} = \frac{r_{T(n)}}{q_y} \quad (4.77)$$

denklem 4.77’den hesaplanabilir. Denklem 4.77’de görülen q_y , yataktaki gaz akış hızıdır.

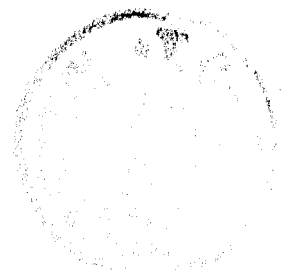
Her bir kompartmanda mevcut O_2 konsantrasyonunu denklik 4.78 ile ifade edilmektedir:

$$C_{O_2(n)} = C_{e(n)} - \dot{C}_{O_2(n)} \quad (4.78)$$

Karbon dioksit konsantrasyonu, denklem 4.79’dan hesaplanmaktadır:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{n. kompartmanda} \\ \text{uçucu kok ve koktan} \\ \text{çıkan } CO_2 \text{ kons.} \end{array} \right\} = C_{CO_2(n)} = \frac{1}{q_y} \left\{ \left[\pi d_{ic}^2 k_C C_{e(n)} N_{i,e(n)} \right] + \left[X_{UM} \dot{m}_{o(n)} \left(\frac{\gamma_C - f_C}{M_C} \right) \right] \right. \\ \left. + \left[V_i A e^{-E/RT_{i(n)}} C_{CO} C_{O_2}^{0.5} C_{H_2O}^{0.5} \right] \right\} \quad (4.79)$$

Karbon monoksit konsantrasyonu, reaksiyonların stokiometrik oranlarına bağlı olarak denklem 4.80’den hesaplanabilir:



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{n. kompartmanda} \\ \text{uçucu kok yanmasıyla} \\ \text{CO konsantrasyonu} \end{array} \right\} = C_{\text{CO}(n)} = \frac{1}{q_y} \left\{ 0.5 V_i A e^{-E/RT_{i(n)}} C_{\text{CO}} C_{\text{O}_2}^{0.5} C_{\text{H}_2\text{O}}^{0.5} \right\} \quad (4.80)$$

4.2.2.2 Serbest Bölgede Faz Dengesi

Serbest bölge hidrodinamik açıdan aktif yataktan farklıdır ve burada kabarcık faz yoktur. Serbest bölgede kok taneciklerinin davranımını veren model Bölüm 4.2.1.2’de tanıtılmakta ve farklı özellikler gösteren bölgeler Şekil 4.3’de ayrıntılı olarak verilmektedir. Modelde; SB’deki farklı bölgelerde mevcut kok taneciklerinin boyut dağılımı ve sayısı belirlendi. Serbest bölgede mevcut kok taneciklerinin ve SB’ye sıçrayan kok taneciklerinden açığa çıkan uçucu karbonun karbon dioksit’e yandığı varsayılmıştır.

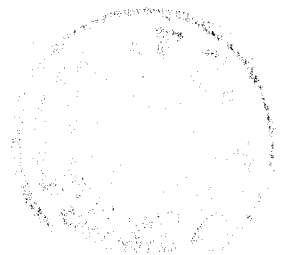
Aktif yatak çıkışındaki gaz konsantrasyon ve sıcaklık değerleri; aşağıdaki denklemlerinin çözümünde başlangıç değeri olarak alınmaktadır.

Serbest bölgede mevcut kok taneciklerinin kinetik kontrollü reaksiyon ile CO₂’e yandığı varsayılmıştır.

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{l,B} \text{ kompartmanında} \\ \text{mevcut kok taneciklerinin} \\ \text{yüzeyinde O}_2 \text{ tüketimi} \end{array} \right\} = r_{\text{enl},B} = \pi d_{ic}^2 k_{CR} C_{\text{O}_2(n)} N_{i,\text{yan}(nl,B)} \quad (4.81)$$

Denklemler 4.81’de ki k_{CR} kimyasal reaksiyon hız sabitidir. Serbest bölgede mevcut kok taneciklerinin küçük olması nedeniyle yanmanın kinetik kontrollü olduğu kabul edilmektedir.

Denklemler 4.82’den kompartman $n_{l,B}$ ’de UM’nin yanması için oksijen tüketim hızı bulunabilir:



$$\left\{ \begin{array}{l} n_{l.B.} \text{ kompartmanda} \\ \text{uçucu yanmasıyla} \\ \text{tüketilen } O_2 \end{array} \right\} = r_{UMnl.B} = (1 - X_{UM}) \dot{m}_{o,nl.B} \left(0.5 \frac{\gamma_C - f_C}{M_C} + 0.5 \frac{\gamma_H}{M_H} - \frac{\gamma_O}{M_O} \right) \quad (4.82)$$

Kömür kısa analizinde verilen uçucu miktarının; aktif yatakta açığa çıkma kesrinin X_{UM} olduğu yukarıda belirtilmişti .O halde; SB’de açığa çıkan UM kesri ise $1-X_{UM}$ olarak alınabilir.

Kompartman $n_{l.B}$ ’de karbon monoksidin oksitlenmesinde oksijen tüketim hızı denklem 4.83’den hesaplanabilir:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{l.B.} \text{ kompartmanda} \\ \text{gaz – gaz reaksiyonuyl} \\ \text{tüketilen } O_2 \end{array} \right\} = r_{COnl.B} = \left[0.5 V_{nl.B} A e^{-E/RT_1(n)} C_{CO} C_{O_2}^{0.5} C_{H_2O}^{0.5} \right] \quad (4.83)$$

Şekil 4.3’de görülebileceği gibi $n_{l.B.}$ kompartmanın yüksekliği 0.3 m olarak modelde kabul edilmişti. Bu varsayıma dayanarak $n_{l.B.}$ kompartmanın hacmi; denklik 4.84’den hesaplanabilir:

$$V_{nl.B} = \Delta z_{nl.B} A_y \quad (4.84)$$

Serbest bölgede $n_{l.B.}$ kompartmanda toplam O_2 tüketim hızı kmol bazında aşağıdaki ifadeden elde edilebilir:

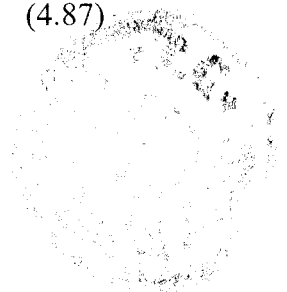
$$r_{Tnl.B} = r_{Cnl.B} + r_{UMnl.B} + r_{COnl.B} \quad (4.85)$$

Kompartman $n_{l.B}$ ’de tüketilen O_2 ’nin konsantrasyonu denklik 4.86’dan hesaplanabilir:

$$\dot{C}_{O_2nl.B} = \frac{r_{Tnl.B}}{q_y} \quad (4.86)$$

O halde; $n_{l.B.}$ kompartmanda mevcut O_2 konsantrasyonu denklik 4.87 ile ifade edilebilir:

$$C_{O_2nl.B} = C_{O_2(n)} - \dot{C}_{O_2nl.B} \quad (4.87)$$



Karbon dioksit konsantrasyonu, $n_{I.B.}$ kompartman için denklem 4.88 ile belirtilmektedir:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{I.B.} \text{ kompartmanda} \\ \text{uçucu kok ve koktan} \\ \text{çıkan CO}_2 \text{ kons.} \end{array} \right\} = C_{CO_2 nI.B.} = \frac{1}{q_y} \left\{ \left[\pi d_{ic}^2 k_{CR} C_{O_2 nI.B.} N_{i, yan nI.B.} \right] + \left[(1 - X_{UM}) m_{onI.B.} \left(\frac{\dot{\gamma}_c - f_c}{M_c} \right) \right] \right. \\ \left. + \left[V_{nI.B.} A e^{-E/RTi(n)} C_{CO} C_{O_2}^{0.5} C_{H_2O}^{0.5} \right] \right\} \quad (4.88)$$

Karbon monoksit konsantrasyonu, reaksiyonların stokiometrik oranlarına bağlı olarak denklem 4.89'dan bulunabilir:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{I.B.} \text{ kompartmanda} \\ \text{uçucu kok yanmasıyla} \\ \text{CO kons.} \end{array} \right\} = C_{CO nI.B.} = \frac{1}{q_y} \left\{ \left(0.5 V_{nI.B.} A e^{-E/RTi(n)} C_{CO} C_{O_2}^{0.5} C_{H_2O}^{0.5} \right) \right\} \quad (4.89)$$

Serbest bölgede $n_{II.B.}$ ve $n_{III.B.}$ olarak tanımlanan diğer kompartmanlar için O_2 , CO_2 , CO konsantrasyonları; 4.87, 4.88, 4.89 nolu denklemler kullanılarak hesaplanabilir.

4.2.3 Enerji Dengesi

Gerçekleştirilen model, aktif yatak içerisinde açığa çıkan enerji yüzdesini yüksek öngörürse, yatak sıcaklığı düşecektir. Sıcaklığı düzeltmek için işletim koşullarında yapılacak değişimler ise sistem verimini azaltacaktır. Bu nedenle aktif yatak ve SB arasındaki enerji ayrışmasını etkileyen faktörlerin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Kullanılan kömür özellikleri ve akışkanlaşma hızı en önemli iki faktördür. Kireçtaşının özellikleri de enerji ayrışmasını oldukça etkilemektedir.

Akışkan yataklı yakıcılarda CO oksidasyonu, ile kok ve UM 'nin yanması ile açığa çıkan enerji; yatak sıcaklığını artırır. Aktif yatakta ve SB'de bulunan ısı değiştirici yüzeyler ile ısı çekilerek yatak sıcaklığının kül ergime sıcaklığına kadar çıkmasına ya da yatağın

yapıldığı malzemenin dayanıklılığı açısından sıcaklık profilinde farklılaşmalara engel olunmaya çalışılır. Bunun yanısıra kükürt dioksidin kireçtaşı veya dolomit tarafından absorbe edilmesi dar bir sıcaklık aralığında daha etkindir. Bu nedenle AYY'lerde sıcaklığın artmasına izin verilmez.

Modelde kararlı rejime ulaşmış olan yatakta yanma sonucu yatağa verilen enerji ile yataktan ısı değiştirici yüzeyler tarafından çekilen enerji göz önüne alınarak hem aktif yatak hem de SB için enerji dengelerini yazmak mümkündür.

4.2.3.1 Aktif Yatakta Enerji Dengesi

Kararlı rejime ulaşmış bir yatakta enerji denkliği genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Yararlı} \\ \text{ısı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Giren} \\ \text{enerji} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Çıkan} \\ \text{Enerji} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Kimyasal reaksiyon} \\ \text{ile açığa çıkan enerji} \end{array} \right\} \quad (4.90)$$

Denklem 4.90'ı aşağıda sıraladığımız kabullere bağlı olarak daha açık bir şekilde ifade edebiliriz.

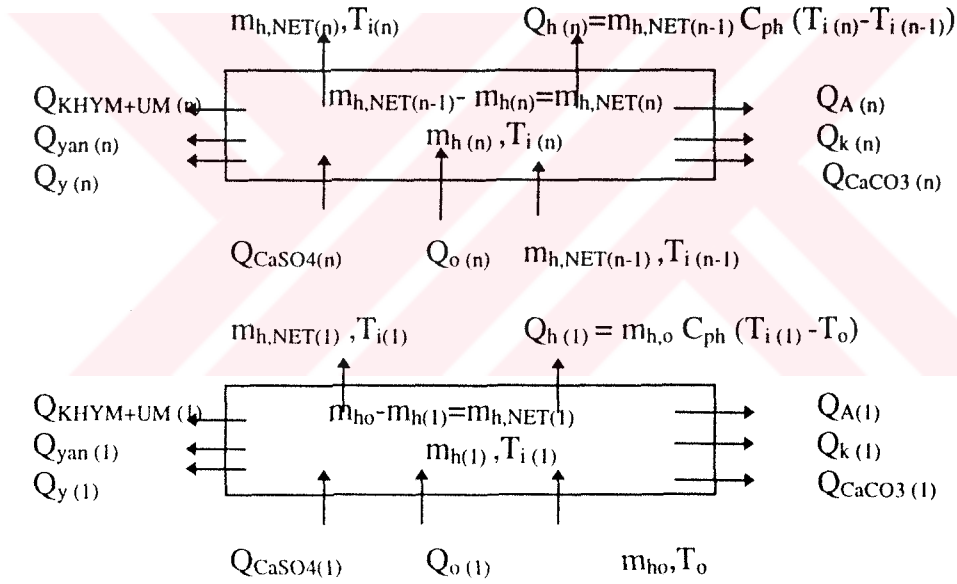
Kurulan denklikte:

- Yakma havası ile kömür ve kireçtaşı karışımının çevre sıcaklığında sürekli beslendiği;
- Yanmanın kararlı rejimde gerçekleştiği,
- Kömürün neminden yatağa girdiği anda hemen kurtulduğu,
- Yanan kok taneciklerinin, yüzey sıcaklığının, intersitial gaz sıcaklığından 150°C fazla olduğu,
- Kararlı halde yatakta mevcut kok tanecikleri ve UM'nin sıcaklığının, tutuşma sıcaklığına (T_{tut}) yükseldiği,



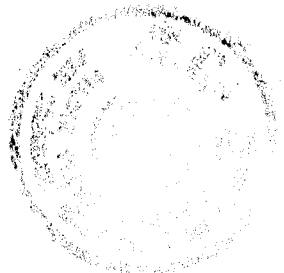
- Kabarcık ve yoğun fazdaki havanın özgül ısısının sıcaklıktan bağımsız ve yatak boyunca uniform olduğu,
- Yatak dış yüzeyleri iyi yalıtılmış olup yanma sonucunda oluşan ısıнын büyük bir kısmı yatak içindeki borulara aktarılır. Bu yüzden taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin ihmal edildiği,
- Kül ve sülfatlaşmış kirecin yatağı intersitial gaz sıcaklığında terkettiği,
- Aktif yatakta X_{UM} kesrine bağlı olarak açığa çıkan UM'nin homojen olarak dağıldığı, kabul edilmiştir.

Aktif yatakta enerji dengesi herhangi bir n kompartmanı esas alınarak Şekil 4.5'de görülebilir.



Şekil 4.5 Aktif Yatakta Enerji Dengesi

Yukarıdaki kabullere bağlı olarak bir n kompartmanında enerji dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:



$$\begin{aligned}
& \left\{ \begin{array}{c} \text{n. komp.} \\ \text{yakıtın} \\ \text{verdiği ısı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. komp.} \\ \text{sülfatlaşma} \\ \text{ısı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{n. komp.} \\ \text{kalsinasyon} \\ \text{ısı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. komp.} \\ \text{yakma havasına} \\ \text{verilen ısı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. komp. ısı} \\ \text{değiştirici} \\ \text{yüzeylerle} \\ \text{çekilen ısı} \end{array} \right\} \\
& + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. komp.} \\ \text{yanan yakıtı} \\ \text{verilen ısı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. komp.} \\ \text{yanmamış} \\ \text{ürünlerin ısı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{n. komp. KHYM kok ve} \\ \text{UM'nin } T_{\text{tut}} \text{'a ulaşması} \\ \text{için verilen ısı} \end{array} \right\} \quad (4.91)
\end{aligned}$$

Aktif yatağa beslenen kömür ile giren ısı;

$$Q_{o(n)} = m_{o(n)} H_o [X_C + (1 - X_C) X_{UM}] \quad (4.92)$$

yukarıdaki ifadede hesaplanabilir. Denklem 4.92'de yatağa beslenen kömürün n. kompartmandaki miktarı $m_{o(n)}$, kömürün ÜİD'si H_o ; ve kömürün ÜİD'sinin kok tarafından sağlanan kısmı X_C olarak belirtilmiştir.

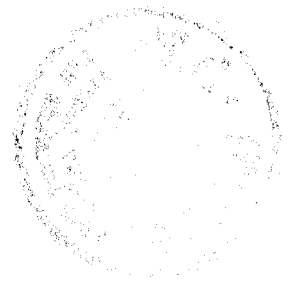
Yanan koka verilen ısı miktarı denklem 4.93'den bulunabilir:

$$Q_{yan(n)} = m_{yan(n)} C_{pc} (T_{i(n)} + \Delta T - T_o) \quad (4.93)$$

Kararlı halde yatakta mevcut kok ve yatakta açığa çıkarak homojen olarak dağılan UM'nin tutuşma sıcaklığına (T_{tut}) ulaşması için gerekli ısı miktarı ise denklem 4.94'den elde edilebilir:

$$Q_{KHYM+UM(n)} = (m_{KHYM(n)} + m_{UM(n)}) C_{pc} (T_{tut} - T_o) \quad (4.94)$$

Denklem 4.94'deki C_{pc} kömürün özgül ısısını göstermekte olup literatürde C_{pc} ile ilgili deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilen birçok korelasyon mevcuttur. Bu çalışmada; Arıkol ve Özdoğan (1994) tarafından verilen korelasyon kullanılmıştır. Özgül ısı; kömürün elementel analizinden yararlanılarak denklik 4.95'den hesaplanabilir (Arıkol v.ç.a., 1994).



$$C_{p_c} = 0.189\gamma_C + 0.874\gamma_H + 0.491\gamma_N + 0.36\gamma_{O_2} + 0.215\gamma_S \quad (4.95)$$

Yatağa işletme koşullarında gönderilen gazın büyük bir kısmı; yanma işleminde kullanılacak geri kalanı ise yataktan dışarıya ısı taşıyacaktır. Kullanılan gaz hava olduğuna göre n. kompartmandan yanma havası tarafından çekilen ısı:

$$Q_{h(n)} = m_{h,NET(n-1)} C_{p_h} (T_{i(n)} - T_{i(n-1)}) \quad (4.96)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem 4.96'da ki $m_{h,NET(n-1)}$; n. kompartmana (n-1). kompartmandan gelen yanma havası miktarıdır ve gerçekleştirilen modelde nasıl hesaplandığı ayrıntılı olarak **Ek 2'**de verilmiştir.

n. kompartmandan dışarı alınan kül ile çekilen ısı enerjisi denklem 4.97'den hesaplanabilir:

$$Q_{A(n)} = m_{A(n)} C_{p_A} (T_{i(n)} - T_o) \quad (4.97)$$

n. kompartmanda kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan katıların dışarı alınmasıyla çekilen ısı enerjisi ise denklem 4.98 kullanılarak hesaplanabilir:

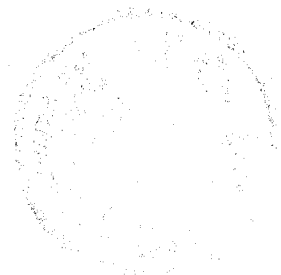
$$Q_{k(n)} = m_{k(n)} C_{p_k} (T_{i(n)} - T_o) \quad (4.98)$$

Isı değiştirici yüzey ile n. kompartmandan çekilen ısı enerjisi denklik 4.99'da ifade edilmektedir:

$$Q_{y(n)} = X_{cek} h A_{yüz(n)} (T_{i(n)} - T_a) \quad (4.99)$$

Denklem 4.99'da; ısı değiştirici boruların yüzey alanı $A_{yüz(n)}$, borulardan geçen akışkanın sıcaklığı ise T_a , aktif yataktan çekilen ısının kesri ise X_{cek} 'dir.

Denklik 4.91'de görülebileceği gibi AY'de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ve bunların sonunda açığa çıkan ısılarında hesaplanması gerekmektedir. Bu nedenle AYY'de meydana gelen temel reaksiyonların; endotermik (ısı alan) veya ekzotermik (ısı



veren) olduğu belirlenerek reaksiyon entalpilerinin hesaplanması gerekmektedir. Böylece, yataktaki kimyasal reaksiyonlar sonucu gerçekleşen ısı değişimlerinin hesaplanması mümkün olabilmektedir.

Yatak sıcaklığında; sülfatlaşma sonucu ortaya çıkan ısı ve kireçtaşının kalsinasyon esnasında yataktan çektiği ısı **EK3**'de ayrıntıları ile verilmektedir. Ayrıca yatağa ilave edilen kireçtaşı (m_{CaCO_3}) ile sülfatlaşma reaksiyonu sonucu açığa çıkan kalsiyum sülfat miktarları (m_{CaSO_4}) **EK3**'de hesaplanmaktadır.

Kireçtaşının kalsinasyonu esnasında n. kompartmandan çekilen ısı aşağıdaki ifadeden bulunabilir:

$$Q_{CaCO_3(n)} = \frac{\Delta H_{CaCO_3}}{M_{CaCO_3}} m_{CaCO_3(n)} \quad (4.100)$$

Sülfatlaşma ile n. kompartmanda açığa çıkan ısı; denklik 101'den hesaplanabilir:

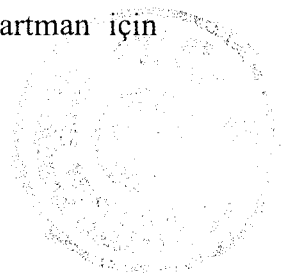
$$Q_{CaSO_4(n)} = \frac{\Delta H_{CaSO_4}}{M_{CaSO_4}} m_{CaSO_4(n)} \quad (4.101)$$

Denklik 4.91'de n. kompartman için yazılan enerji dengesini matematiksel olarak ifade etmek istediğimizde aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\begin{aligned} [Q_{o(n)}] + [Q_{CaSO_4(n)}] &= [Q_{CaCO_3(n)}] + [Q_{y(n)}] + [m_{h,NET(n-1)} C_{p_h} (T_{i(n)} - T_{i(n-1)})] \\ &+ [m_{k(n)} C_{p_k} (T_{i(n)} - T_o)] + [m_{KHYM+UM(n)} C_{p_c} (T_{tut} - T_o)] \\ &+ [m_{A(n)} C_{p_A} (T_{i(n)} - T_o)] + [m_{yan(n)} C_{p_c} (T_{i(n)} + \Delta T - T_o)] \end{aligned} \quad (4.102)$$

a) İntersitiasal gaz sıcaklığı

Yatak girişi $z=0$ 'da, intersitiasal gaz sıcaklığı $T_{i(n-1)}$ 'nin besleme havası sıcaklığı T_o 'a eşit olduğu sınır şartı esas alınarak denklem 4.102 çözüldüğünde ilk kompartman için



intersitial gaz sıcaklığı hesaplanabilir. Denklik 4.102'nin iteratif çözümü her bir kompartmandaki $T_{i(n)}$ 'nin hesaplanmasını sağlamaktadır.

b) Kabarcık fazda gaz sıcaklığı

Minumum akışkanlaştırma için gerekli akışkanın fazlası kabarcıklar halinde yatağın üst kısımlarına çıkmaktadır. Kabarcıklar fazındaki sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için aktif yatakta Δz yüksekliğinde bir n kompartmanı kontrol hacmi seçilerek enerji dengesi kurulabilir.

$$\frac{dT_b}{dz} = H_{be} (T_i - T_b) \frac{1}{\rho_g C_{p_g} U_b} \quad (4.103)$$

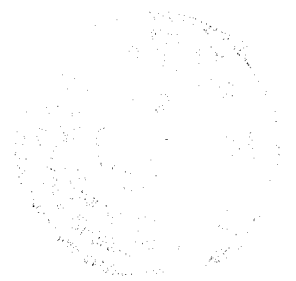
Kabarcık ve yoğun faz arasındaki ısı transfer katsayısı H_{be} ; Kunii ve Levenspiel tarafından literatüre sunulan ampirik denklem 4.104'den hesaplanabilir (Kunii ve Levenspiel, 1977):

$$H_{be} = 4.5 \left(\frac{U_{mf} \rho_g C_{p_g}}{d_b} \right) + 5.85 \left[\frac{\left(k_g \rho_g C_{p_g} \right)^{0.5} g^{0.25}}{d_b^{1.25}} \right] \quad (4.104)$$

Kabarcık fazdaki gaz sıcaklığının yükseklikle değişimi ve fazlar arasındaki ısı transferi için yazılan denklem 4.103 $z = 0$ 'da $T_{b(1)} = T_o$ sınır şartı ile integre edildiğinde denklik 4.105 elde edilir. Böylece denklem 4.105'den 1. kompartmandaki kabarcık sıcaklığı; $T_{b(1)}$ bulunabilir.

$$T_{b(1)} = T_{i(1)} + (T_o - T_{i(1)}) \exp \left(- \frac{H_{be} Z_{(1)}}{\rho_g C_{p_g} U_{b(n)}} \right) \quad (4.105)$$

n. kompartmandaki kabarcık sıcaklığı $T_{b(n)}$; denklem 4.106'dan $T_{i(n)}$ ve $T_{b(n-1)}$ 'in fonksiyonu olarak hesaplanabilir:



$$T_{b(n)} = T_{i(n)} + (T_{b(n-1)} - T_{i(n)}) \exp \left(- \frac{H_{be} Z_y}{\rho_g C_{p_g} U_{b(n)}} \right) \quad (4.106)$$

c) Yatak Sıcaklığı

Her bir kompartmandaki yatak sıcaklığı $T_{y(n)}$; yatak içerisindeki kabarcık faz, intersitiasl gaz ve yatakta mevcut katı (inert + kok) malzeme hacimlerinin toplam yatak hacmine oranına bağılı olarak denklem 4.107'den hesaplanabilir.

$$T_{y(n)} = \frac{V_b}{V_y} T_{b(n)} + \frac{V_i}{V_y} T_{i(n)} + \frac{V_t}{V_y} T_{i(n)} \quad (4.107)$$

Denklem 4.107'de genişmiş yatakda; kabarcık faz hacmi V_b , intersitiasl gaz hacmi V_i , yoğun fazda mevcut inert malzemenin hacmi V_t ile gösterilmiştir. Yataktaki katı malzemenin içerisinde kok kesri X_{kok} 'un çok küçük olduğu gerçekleştirilen modelde görülmektedir. Bu sebepten yataktaki katı maddelerin inert malzemeden oluştuğı ve sıcaklığının; intersitiasl gaz sıcaklığına denk olduğu kabul edilmektedir.

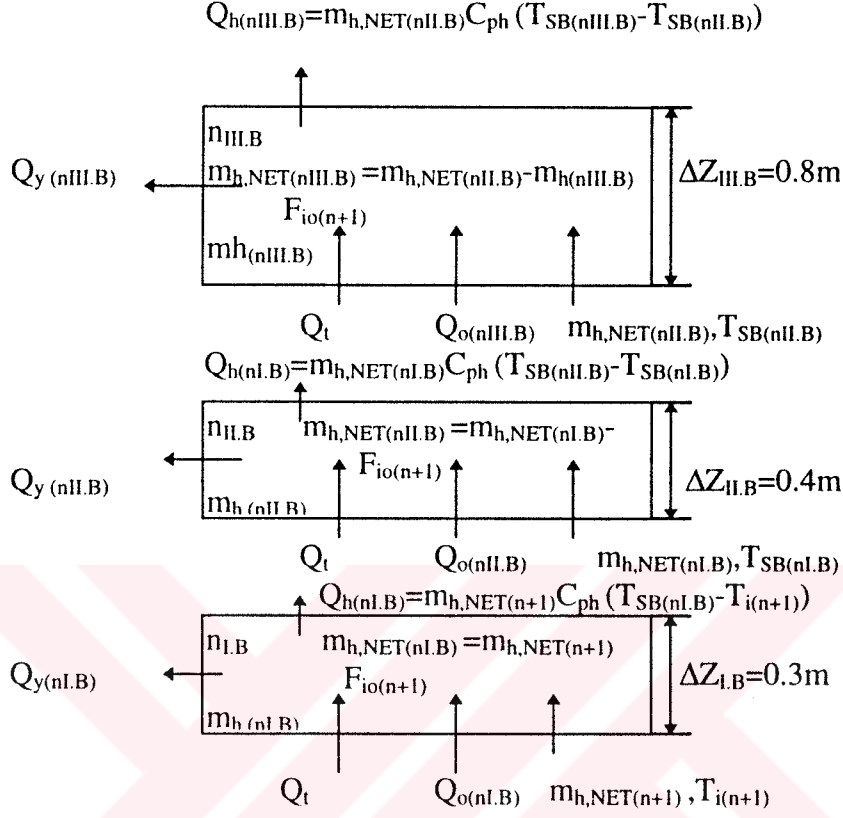
O halde; herhangi bir kompartmandaki yatak sıcaklığı, kabarcık ve intersitiasl gaz sıcaklığının fonksiyonu olarak Denklik 4.107'den hesaplanabilmektedir.

4.2.3.2 Serbest Bölge İçin Enerji Dengesi

Aktif yataktaki varsayımlara eklenen bazı kabuller yardımıyla benzer şekilde SB için bir enerji dengesinin kurulması mümkündür.

- Serbest bölgede $(1-X_{UM})$ kesrine bağılı olarak açığa çıkan UM'nin homojen olarak dağıldığı,
 - Serbest bölgeye fırlatılan inert malzemenin intersitiasl gaz sıcaklığında olduğu,
 - Serbest bölge dış yüzeylerinin iyi yalıtıldığı yanma sonucunda oluşan ısının $(1-X_{çek})$ kesrine bağılı olarak SB içindeki yüzeylere aktarıldığı,
- kabul edilmiştir.

Serbest bölgede enerji dengesi; farklı yükseklikte kompartmanlar için Şekil 4.6'da görülebilir.



Şekil 4.6 Serbest Bölgede Enerji Dengesi

Yukarıdaki varsayımlara bağlı olarak $n_{I.B}$.kompartmanda enerji dengesi denklik 4.108'de ifade edilebilir. Diğer kompartmanlarda ise ($n_{II.B}$ ve $n_{III.B}$) aynı denklik geçerlidir.

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{I.B} \cdot \text{komp} \\ \text{yakıtın} \\ \text{verdiği ısı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} n_{I.B} \cdot \text{komp} \\ \text{inert malz.} \\ \text{giren ısı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} n_{I.B} \cdot \text{komp} \\ \text{yakma havasına} \\ \text{verilen ısı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} n_{I.B} \cdot \text{komp} \\ \text{ısı değiştirici} \\ \text{yüzeylerle} \\ \text{çekilen ısı} \end{array} \right\} \quad (4.108)$$

Serbest bölgede $n_{I.B}$. kompartmana beslenen kömür ile giren ısı:

$$Q_{o(nI.B)} = m_{o(nI.B)} H_o (1 - X_C) (1 - X_{UM}) \quad (4.109)$$

Serbest bölgede $n_{I.B.}$ kompartmana fırlatılan inert malzeme ile giren ısı:

$$Q_{t(nI.B)} = F_{i,o(n+1)} C_{pI} (T_{SB(nI.B)} - T_{y(n+1)}) \quad (4.110)$$

Serbest bölgede $n_{I.B.}$ kompartmandan yanma havası tarafından çekilen ısı:

$$Q_{h(nI.B)} = m_{h,NET(n+1)} C_{pH} (T_{SB(nI.B)} - T_{y(n+1)}) \quad (4.111)$$

Isı değiştirici yüzey ile $n_{I.B.}$ kompartmandan çekilen ısı denklik 4.112'den bulunabilir:

$$Q_{y(nI.B)} = (1 - X_{çek}) h A_{yüz(nI.B)} (T_{SB(nI.B)} - T_a) \quad (4.112)$$

Denklik 4.108'de $n_{I.B.}$ kompartman için yazılan enerji dengesini matematiksel olarak ifade etmek istediğimizde aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$[Q_{o(nI.B)}] + [Q_{t(nI.B)}] = [Q_{y(n)}] + \left[m_{h,NET(n+1)} C_{pH} (T_{SB(nI.B)} - T_{y(n+1)}) \right] \quad (4.113)$$

Aktif yatağın son kompartmanındaki yatak sıcaklığının SB girişindeki gaz sıcaklığına eşit olduğu sınır şartı esas alınarak denklik 4.113 çözülürse; $n_{I.B.}$ kompartmanın çıkışındaki gaz sıcaklığı hesaplanabilir. Denklem 4.113; $n_{II.B.}$ ve $n_{III.B.}$ kompartmanlara iteratif olarak uygulanırsa; $T_{SB(nII.B)}$ ile; $T_{SB(nIII.B)}$ bulunabilmektedir.

4.3 Yanma Verimi

Akışkan yataklı yakıcı performansını, etkileyen en önemli parametrelerden birisi yanma verimidir. Yanma verimi, beslenen karbonun CO_2 'ye dönüşmesiyle belirlendiğinden %100'den daha azdır. Fakat bunlarda sürüklenen tanecik miktarının fazla olması yanma verimini azaltır. Yanma verimi, uçan külün veya AYY'de aşırı akıştaki külün taşıdığı yanmamış karbonlar ile sürüklenme sonucu atılan taneciklerden hesaplanabilir. Pratik işlemlerde, uçan küldeki kömür taneciklerinin yanmamış uçucuları veya baca gazındaki

CO genellikle %1'den daha az, olduğundan hesaplamalarda ihmal edilebilmektedir. Yüksek uçucuya sahip kömürlerde ise yanma verimi, kokdan daha çok CO'nun yanmasıyla etkilenmektedir. Aktif yatakta yanmalarını tamamlayamayan uçucuların serbest bölgede yanmalarını tamamlayabilmeleri ve verimin yüksek olması için serbest bölge dizaynı çok önemlidir. Karbon monoksidin yanması için orada uzun süre kalması ve bunun için SB'de ikinci bir yanma bölgesi oluşturulması gerekir. Fakat genelde uçucuların yanması, kok ile kıyaslandığında çok hızlı olduğundan normal işletme şartlarında, uçucuların yanma verimine olan etkisi ihmal edilebilir.

Yanma verimi; birim zaman aralığında yatakta açığa çıkan ısıнын, giren ısıya oranı olup beslenen yakıt ile kaybolan karbon miktarı ve CO'nun ısıl değerinden bulunabilir. Açığa çıkan ısıyı etkileyen faktörler; karbonun eksik yanması sonucu karbon monoksit oluşması, UM'lerin yanmalarını tamamlayamamaları ve yanmamış karbon miktarıdır. Bunlar ise yatağın özelliğine (çapı, yüksekliği vs.), işletme parametrelerine (fazla hava miktarı, U_{mf} , U_o , yatak sıcaklığı, kömür besleme miktarı vs.) ve yakıta (analizi, boyutu vs.) bağlıdır.

Karbon yanma verimi genel olarak aşağıdaki denklem ile bulunabilir:

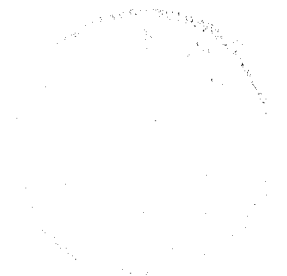
$$\eta_c = \left(1 - \frac{\text{Karbon kaybı} \times \text{Karbonun ısıl değeri}}{\text{Yakıtın ısıl değeri}} \right) \times 100 \quad (4.114)$$

Bu denklemin geçerli olması için yapılan kabuller:

- Yanma boyunca ortaya çıkan hidrokarbonlar ve tüm CO'nun , CO₂ formunda yandığı,
- Yakıt içerisindeki hidrojenin tamamının suya dönüştüğüdür.

Yanmamış karbon yataktan üç şekilde ayrılmaktadır:

- Yatak malzemesiyle, (ihmal edilebilir - önemli değil);
- Yanmamış gazlarla, (kaybolan miktar azdır - ileride yanabilir);
- Sürüklenmeyle (elütration)



Kritik bir boyuta ulaşınca kadar büzülen büyük tanecikler yatakta kalmaya devam ederler. Kritik boyutun altındaki taneciklerin büyük kısmı, reaksiyonunu tamamlamadan yataktan ayrılacağı ve sürüklenme başlayacağı için önemlidir. Yani burada reaksiyon ile sürüklenme arasında bir rekabet oluşmaktadır. Sürüklenme büzülmeden daha hızlı olduğunda yataktan önemli miktarda karbon kaybolmakta, yavaş olduğu zaman ise karbon kullanımı artmaktadır.

Karbon yanma verimi hesaplanırken:

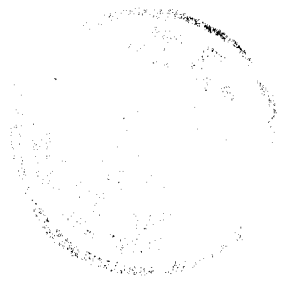
- Sürüklenen katılardaki karbon kaybı (yatak karbon konsantrasyonu, taneciklerin boyutu ve akışkanlaştırma hızı ile belirlenir),
- Aşırı akış (overflow ve carryover) ile karbon kaybı (yatak karbon yükü ve inert malzeme besleme hızı ile belirlenir)
- CO oluşumu nedeni ile (eksik yanma) ısı kaybı, göz önüne alınmalıdır.

Deneysel çalışmalarda, CO emisyonları dikkate alınmadığından hesaplamalarda ihmal edilebilmektedir.

Yukarıda belirtilen faktörlerin ısı değerleri ve miktarları bilindiğinde deklemler 4.114 aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$\eta_c = \left(1 - \frac{m_{\text{sür}} \times H_C + n_{\text{CO}} \times H_{\text{CO}}}{m_o \times H_{\text{AID}}} \right) \quad (4.115)$$

Denklik 4.115’de H_{CO} karbon monoksidin reaksiyon ısısı olup değeri 110510 kJ/kmol’dur. Yanma sonucu oluşan yanma ürünleri miktarı, **Ek-2** Tablo E2.1 yardımıyla hesaplanabilir. Karbonun reaksiyon ısısı H_C olup değeri 393510 KJ/kmol’dur (Köse v.ç.a., 1995).



5

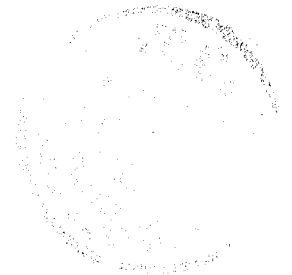
Bilgisayar Programının Tanıtılması

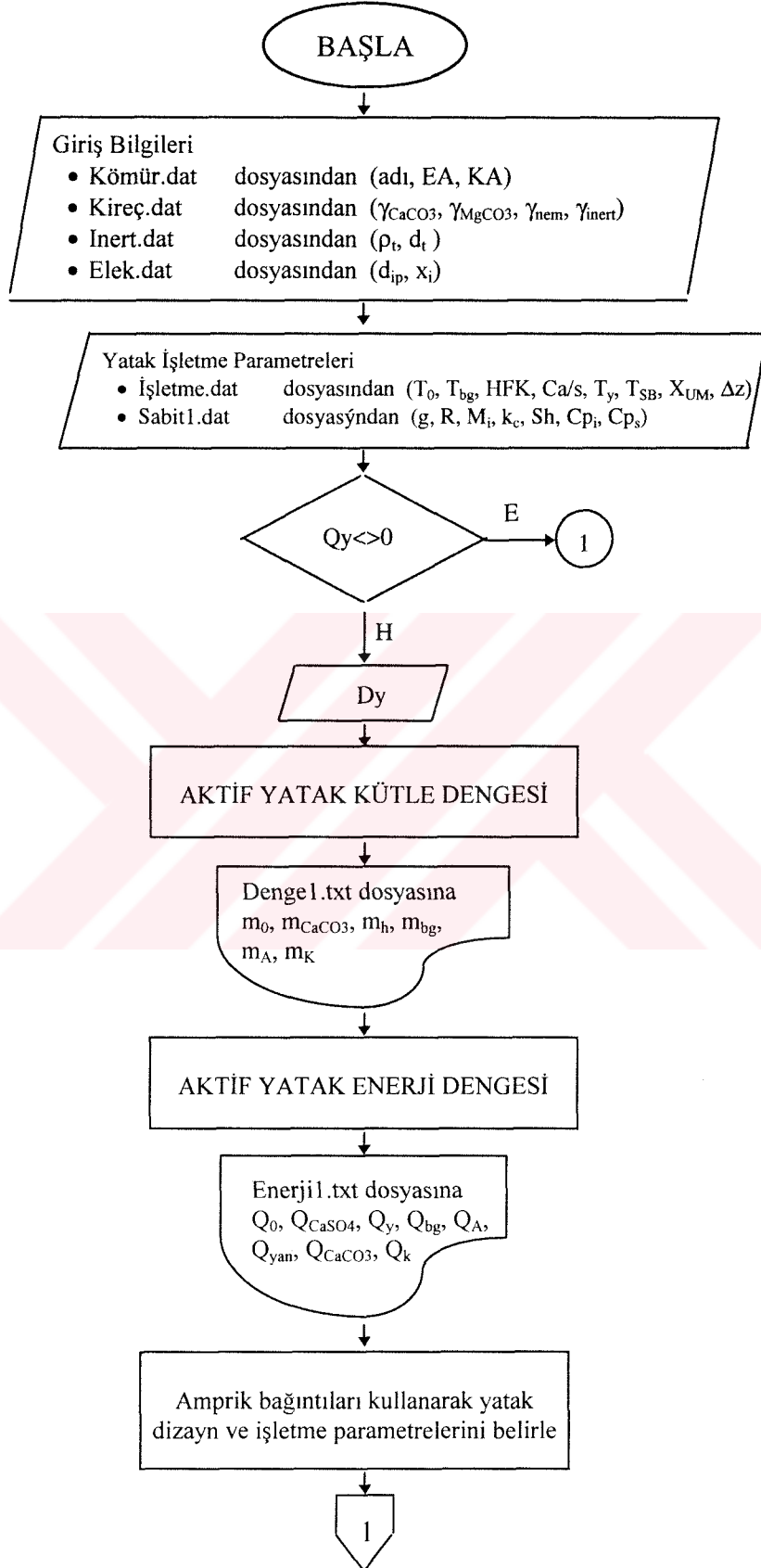
Programda iki ayrı modül mevcuttur. Birinci modül; iki ayrı tasarım yöntemine göre çalışmaktadır. Birinci tasarım yönteminde; kullanılan kömür cinsi ve AYY'den çekilmesi istenilen ısı bellidir. Buna bağlı olarak dizayn parametreleri hesaplanabilir. Diğer tasarım yönteminde ise AYY'nın çapı bellidir. Çapı belli olan yatakta yakılan kömür cinsine bağlı olarak çekilecek ısı miktarı ve diğer dizayn parametreleri bulunabilmektedir. Şekil 5.1'de ayrıntıları ile görülen birinci modülde aktif yatak ve SB yüksekliği boyunca gaz konsantrasyonları bulunabilmektedir. Şekil 5.1 incelendiğinde aktif yatakta gerçekleştirilen kütle ve enerji dengesinden yatağa beslenmesi gereken kömür ve hava miktarının hesaplanabileceği görülmektedir. Bölüm 2 tablo 2.1'de verilen bağıntılar yardımıyla yatak dizaynı yapılabilmektedir.

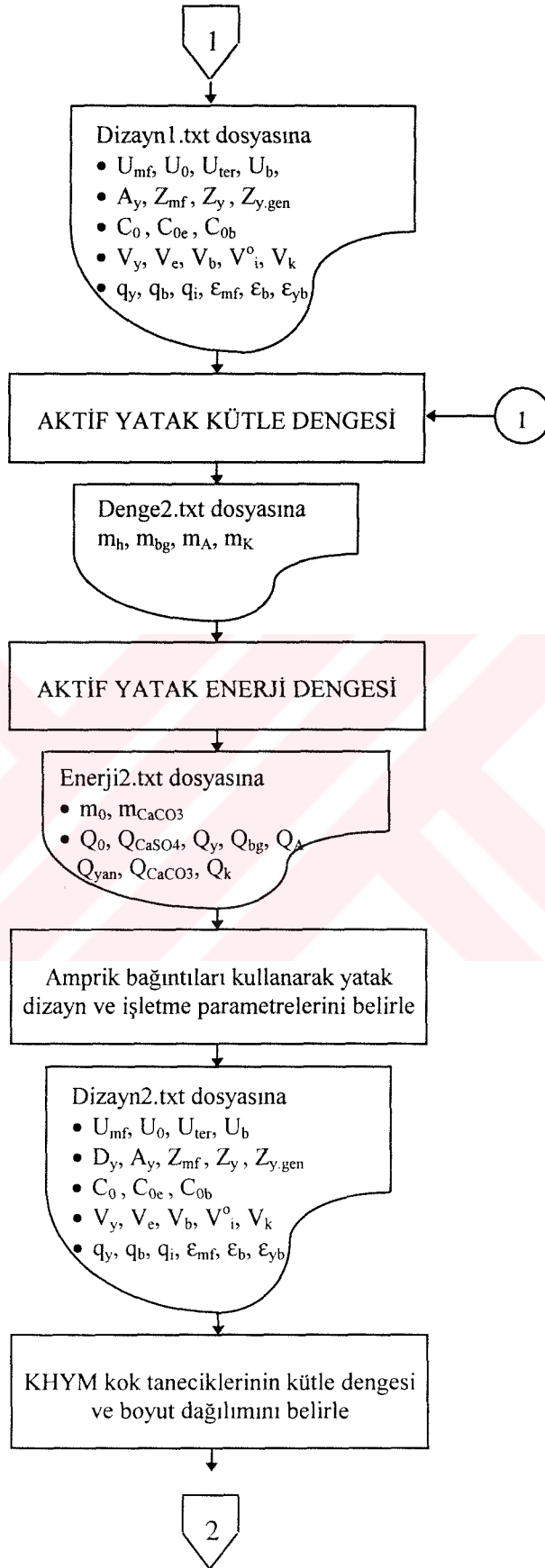
Her iki tasarım yöntemi için geçerli olan işletme parametreleri; giriş bilgisi olarak programa verilerek yatak işletme parametrelerinin, gaz konsantrasyonlarını nasıl etkilediği görülebilir.

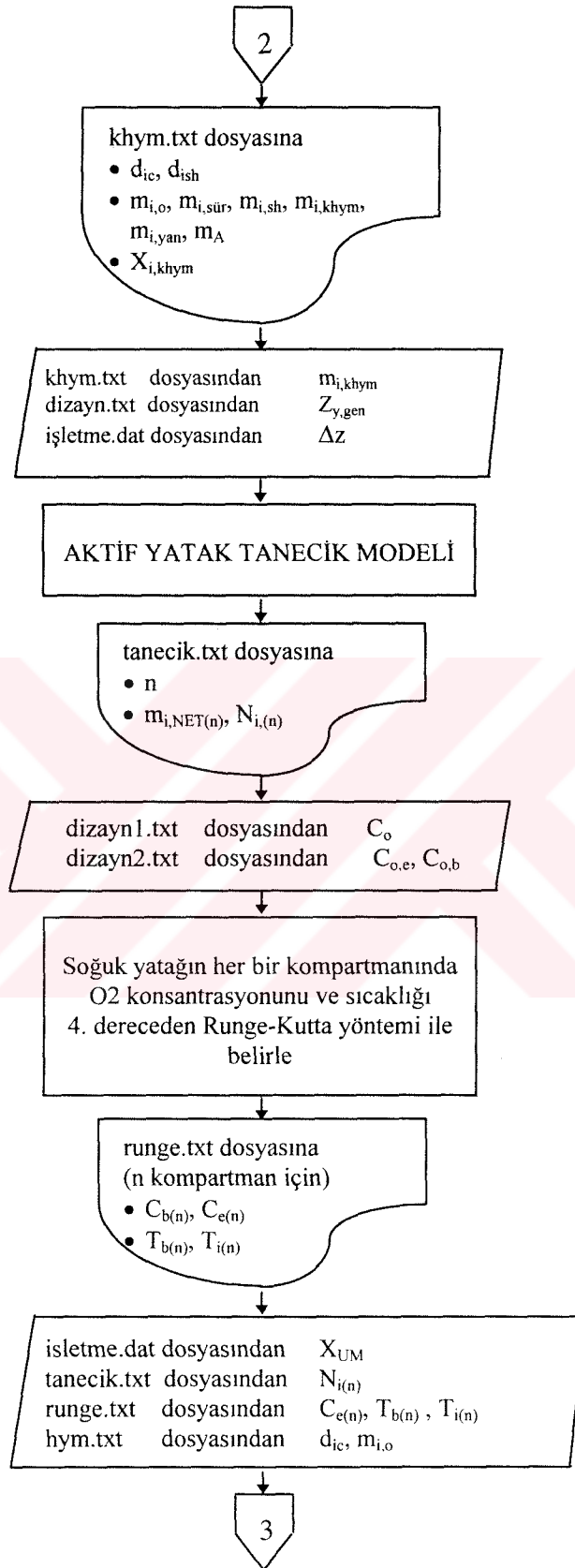
Bir liste ile ekrana sunulan ve giriş bilgisi olarak kullanıcı tarafından belirlenebilen işletme parametreleri;

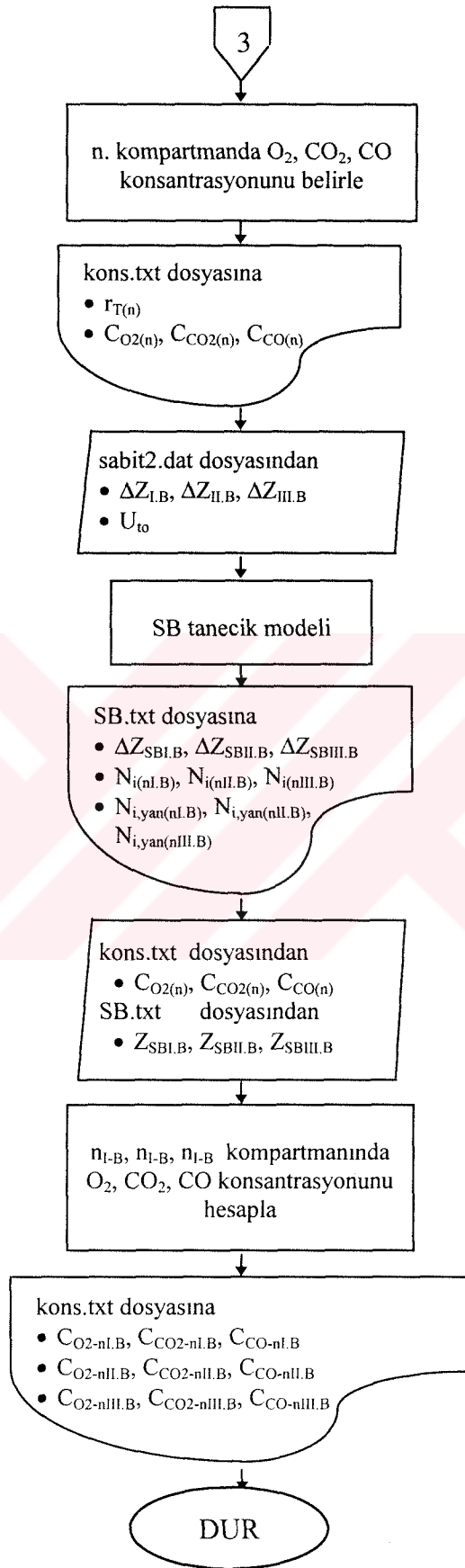
- Besleme havası sıcaklığı (T_o),
- Baca gazı sıcaklığı (T_{bg}),





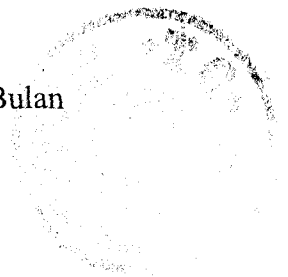






Şekil 5.1 Aktif Yatak ve SB Boyunca Gaz Konsantrasyonları Dağılımını Bulan

Bilgisayar Programının Akış Diyagramı



- Tahmini yatak sıcaklığı (T_y),
- Tahmini SB sıcaklığı (T_{SB}),
- Hava fazlalık katsayısı (HFK),
- Yataktan çekilen ısı (Q_y)
- Kalsiyum/ Kükürt oranı (Ca/S),
- Kömür UM'sinin aktif yatakta açığa çıkma kesri (X_{UM}),
- Aktif yataktaki kompartman yüksekliği, (Δz)

olarak belirlenmiştir.

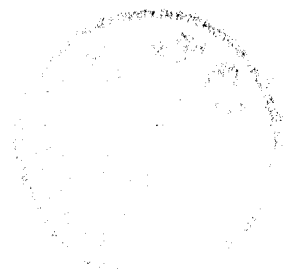
İkinci modül; birinci tasarım yöntemine göre çalıştırılmakta yani kömür cinsi ve AYY'den çekilmesi gereken ısı miktarı giriş verisi olarak kullanılmaktadır.

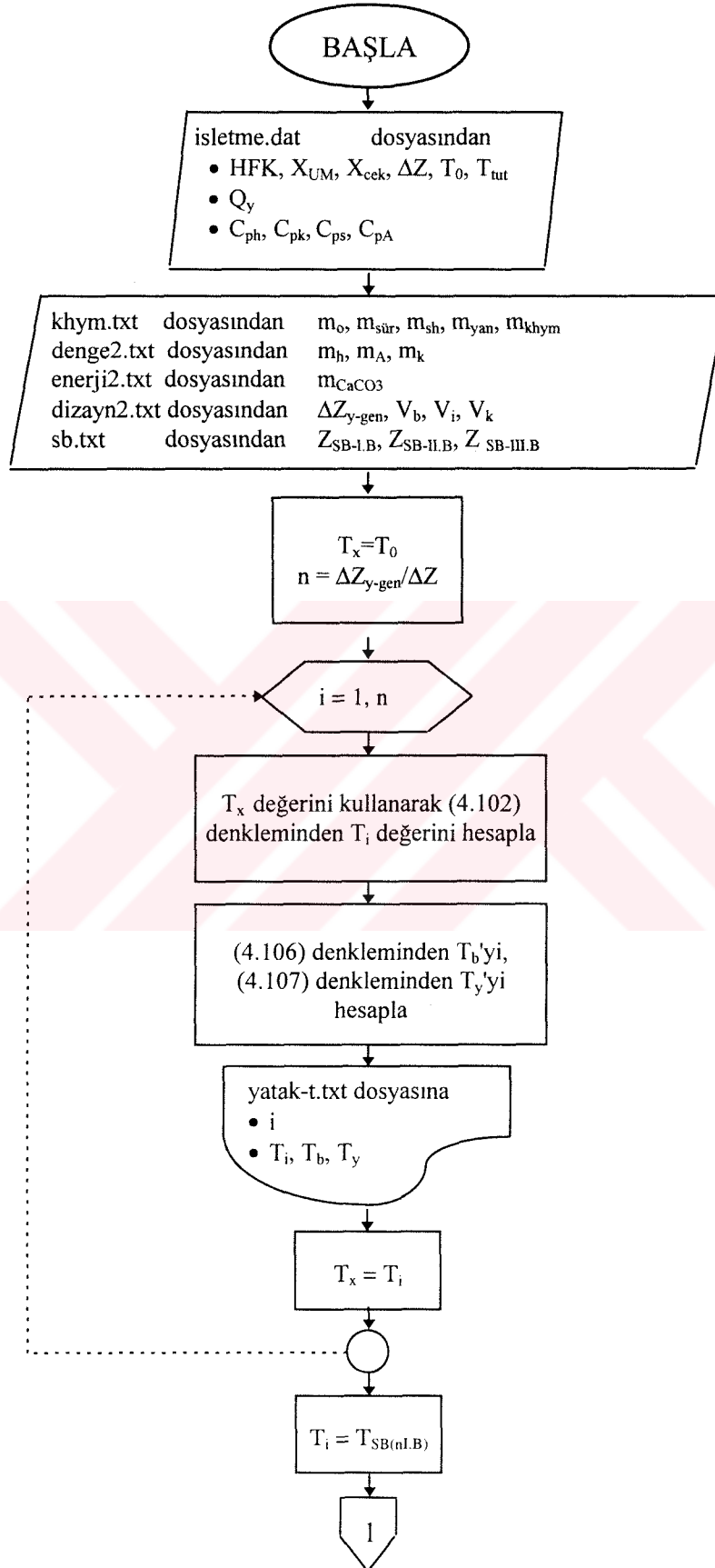
İkinci modülde ekrana sunulan yatak işletme parametreleri;

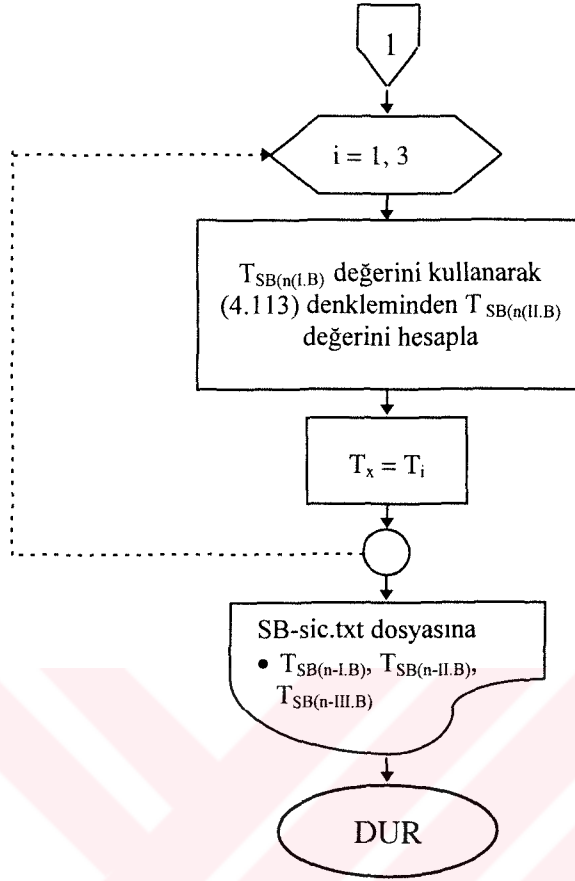
- Hava fazlalık katsayısı (HFK),
 - Kömür UM'sinin aktif yatakta açığa çıkma kesri (X_{UM}),
 - Aktif yataktaki kompartman yüksekliği, (Δz)
 - Aktif yatakta çekilmesi istenen ısı kesri ($X_{çek}$),
- olup kullanıcı tarafından giriş bilgisi olarak belirlenebilmektedir.

Şekil 5.2'de ayrıntıları görülen ikinci modül ile aktif yatak ve SB yüksekliği boyunca sıcaklık dağılımları bulunabilmektedir. İşletme parametrelerinin, yatak sıcaklık dağılımını nasıl etkilediği Bölüm 6'da görülebilir.

Yatağa beslenen kömürün boyut dağılımı ile ilgili program iki ayrı seçenek sunmaktadır. Birinci seçenekte; yatağa beslenen taneciklerin boyut dağılım (elek analizi) verileri; ikinci seçenekte ise ortalama boyut dağılımı kullanıcı tarafından girilebilmekte ve arzu edilirse veri dosyasına kaydedilebilmektedir. Yataktan sürüklenen taneciklerin geri dönmediği varsayımıyla beslenirken boyut dağılım ve ağırlık kesri bilinen kömürün; yatak kararlı rejime ulaştığında ki boyut dağılım ve kütle kesri Ek.1'de açıklandığı gibi program tarafından hesaplanabilmektedir. Sürüklenme sabiti; Merrick ve Highley tarafından verilen ampirik denklem 4.24'den bulunmuştur.



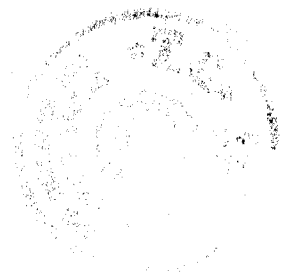




Şekil 5.2 Aktif Yatak ve SB Boyunca Sıcaklık Dağılımını Bulan Bilgisayar Programının Akış Diyagramı

Her iki modülde kullanılabilecek kömür, kireçtaşı cinsi, inert malzeme için veri dosyaları hazırlanmıştır. Kullanıcı bu veri dosyalarına yeni veriler ekleyebilir veya veri dosyasından seçim yaparak programda kullanabilir.

Kömür veri tabanında mevcut kömür cinsleri ve kimyasal özellikleri Tablo 5.1’de görülebilir. Tablo 5.1, **Akçura ve Gerger (1982)**, **Bilge (1988)**, **Urkan (1990)**, **Oymak ve Selçuk (1990)**’un çalışmalarında baz aldıkları kömürlerin; analiz değerlerinden oluşturulmuştur. Tablo 5.1’de görülen KA değerleri orijinal, EA değerleri ise kuru bazda verilmiştir.

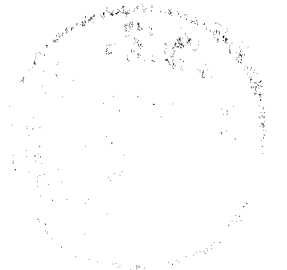


Tablo 5.1 Bilgisayar Programında Kullanılan Kömür Veri Tabanı

Araştırmacı	Kömür	KISA ANALİZ (Orijinal Baz) (%)				ELEMENTEL ANALİZ (Kuru Baz) (%)					
		UM	SK	KÜL	NEM	C	H	N	S	O	KÜL
Bilge, D.	Zonguldak	29.32	51.82	14.07	4.79	71.58	4.42	1.13	0.45	7.64	14.78
	Tunçbilek	32.19	37.58	15.50	14.73	56.6	4.51	1.44	3.03	16.24	18.18
	Malkara	35.56	24.89	18.41	21.14	47.61	4.13	1.22	4.16	19.49	23.39
	Tavşanlı	21.92	18.91	43.01	16.17	28.91	3.10	1.12	2.99	11.67	51.31
	Saray	35.60	23.19	24.57	16.65	45.51	4.19	0.89	3.77	16.67	28.97
Urkan, K.	Orhaneli	29.96	22.55	21.78	25.71	44.86	4.40	0.85	3.37	17.20	29.32
	Karlıova	34.92	38.80	16.50	9.78	59.64	4.98	1.65	1.33	14.11	18.29
	Yatağan	36.02	20.51	12.81	30.66	49.01	4.78	0.71	3.91	23.12	18.47
	Kemerburgaz	32.65	21.6	11.47	34.28	51.11	4.86	0.82	3.64	22.12	17.45
	Eşme	35.50	27.25	32.01	5.24	45.55	4.26	0.90	12.1	3.37	33.78
	Seyitömer-1	36.90	29.39	10.00	23.71	55.18	5.15	1.19	1.15	24.22	13.11
	Soma	43.36	21.30	20.37	14.97	48.14	4.90	1.22	4.12	17.66	23.96
	Konya-İlgin	43.00	32.18	11.20	13.52	55.02	4.93	0.78	2.39	23.93	12.95
	İthal	42.79	42.73	7.38	7.10	65.33	5.36	1.56	0.34	19.47	7.94
Selçuk, N.	Seyitömer-2	47.07	24.27	14.77	13.89	52.3	4.16	1.55	1.86	22.96	17.17
	Beyazır	20.31	31.48	27.98	20.93	43.64	3.42	1.27	3.36	13.23	34.63

Linyitlerin deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ısı değerleri ÜİD'olup programdaki hesaplamalarda AİD kullanılmaktadır. Element analizi kullanılarak hesap edilen ÜİD ile deneysel değerler arasındaki fark ihmal edilebilir düzeydedir. Tablo 5.2'de programda kullanılan kömürlerin program tarafından hesaplanan ve deneysel ısı değerleri görülmektedir. Hata payının ihmal edilebilir düzeyde olması her iki ısı değerinde; programda kullanabileceğini belirtmektedir.

Kömürlerin EA'sı kullanılarak hesaplanan ısı değer ile veri dosyasından okutulan deneysel ısı değer sonuçları ekranda kullanıcıya sunulur. Programı çalıştırırken kullanıcı istediği değeri seçebilir.



Tablo 5.2 Veri Tabanında Mevcut Kömürlerin Deneysel ve Hesaplanan Isıl Değerleri

Kömür	ELEMENTEL ANALİZ (Orijinal) (%)							ÜİD-Deney. (kj/kg)	ÜİD-Teo. (kj/kg)	Hata (%)
	C	H	N	S	O	KÜL	NEM			
Zonguldak	68.15	4.21	1.08	0.43	7.27	14.07	4.79	27241	27047	0.7
Tunçbilek	48.26	3.85	1.23	2.58	13.85	15.50	14.73	19759	19051	3.5
Malkara	37.54	3.26	0.96	3.28	15.37	18.45	21.14	15028	14449	3.5
Tavşanlı	24.23	2.60	0.94	2.51	9.78	43.01	16.17	9785	10124	-3.4
Saray	37.93	3.49	0.74	3.14	13.89	24.15	16.65	14799	15209	-2.7
Orhaneli	33.32	3.27	0.63	2.50	12.78	21.78	25.71	13462	13521	-0.4
Karlıova	53.80	4.49	1.49	1.20	12.73	16.50	9.78	22993	21855	4.9
Yatağan	33.98	3.31	0.49	2.71	16.03	12.81	30.66	13884	13244	4.61
Kemerburgaz	33.59	3.19	0.54	2.39	14.54	11.47	34.28	13847	13179	4.8
Eşme	43.16	4.04	0.85	11.5	3.19	32.01	5.24	18200	20365	11.8
Seyitömer-1	42.09	3.93	0.91	0.88	18.48	10.00	23.71	17648	16170	8.3
Soma	40.93	4.17	1.04	3.50	15.02	20.37	14.97	16304	16982	-4.1
Konya-İlgın	47.58	4.26	0.67	2.07	20.69	11.20	13.52	19762	18159	8.1
İthal	60.69	4.98	1.45	0.32	18.09	7.37	7.10	27050	23770	12.1
Seyitömer-2	45.03	3.58	1.33	1.60	19.77	14.79	13.89	17372	16479	5.1
Beypazarı	34.81	2.73	1.01	2.68	10.55	27.62	20.23	14174	13652	3.6

AYY'larda SO₂ yayını, yatağa kireçtaşı veya dolamit ilave edilerek kolayca ve etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu nedenle kullanıcının isteğine bırakılarak programa girdi olarak konulmuştur. Hava kirliliğinin önlenmesi amacıyla veri dosyasında mevcut kireçtaşlarının 3 tanesinin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 5.3'de görülebilir. Kireçtaşı veri dosyasına da dışarıdan değer ilave etmek mümkündür.

Tablo 5.3 Kireçtaşlarının Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kireçtaşı Cinsi	Kimyasal Bileşimi (%)				Fiziksel Özellikler	
	CaCO ₃	MgCO ₃	Nem	İnert Kısım	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (kj/kgK)
Kireçtaşı-1	90.00	-	5	5.0	2800	1000
Kireçtaşı-2	75.00	3	5	17.0	2650	1000
Kireçtaşı-3	95.60	2	-	2.4	2800	1200

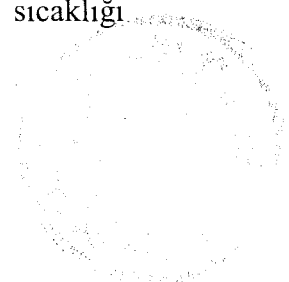
Yatağa beslenen kireçtaşının, kalsinasyonu sonucu oluşan CaO miktarı, kimyasal analizi kullanılarak hesaplanmıştır. Akışkan yataklı yakıcı içinde CaO'ın oluşması için gerekli ısı denklem E3.11'den, sülfatlaşma sonucu kazanılan ısı ise denklem E3.13'den elde edilmiştir.

Programda, AYY'da göz önüne alınan gaz-katı reaksiyonları için kimyasal reaksiyon hız sabitleri Bölüm 2, Tablo 2.4'de verilmiş ve Field (1967) tarafından önerilen ifade kullanılmıştır. Gaz-gaz reaksiyonları için ampirik hız ifadeleri ise Tablo 2.5'de görülebilir. Karbon monoksit oksitlenme tepkime hızları Howard (1983) tarafından önerilen ampirik denklemden hesaplanmıştır. Programda çift film modeli ve Sherwood sayısı 2 kabul edilerek hesaplama yapılmaktadır.

Yanma sonucu oluşan gazların yoğunluğu viskozitesi yatak sıcaklığının fonksiyonu olarak hesaplanabilmektedir. Minimum akışkanlaştırma hızı gazın viskozitesine bağlı olarak değişmekte dolayısı ile sıcaklığın fonksiyonudur.

Kabarcıkların birleşerek daha büyük çaplı kabarcıklar meydana getirdiği varsayımı ile $z=0$ için $C_b=C_o$ sınır şartı ile denklem 4.65 dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak çözülmektedir. Böylece Δz yüksekliğindeki kompartmanda; $C_{b(n)}$ bulunabilir. Başlangıçtaki O_2 konsantrasyonu; $C_o = 0.21 / RT_y$ ifadesi çözülerek bulunmaktadır. Denklik 4.67'den bir kompartmandaki $C_{e(n)}$ hesaplanabilir. Yoğun fazda mevcut O_2 ; kok taneciklerinin, UM'nin, CO'nun yanması ve kükürtün sülfatlaşma reaksiyonu ile tüketilir. Her bir kompartmanda mevcut O_2 konsantrasyonu denklik 4.78'den; tüketilen oksijene bağlı olarak açığa çıkan CO_2 ve CO konsantrasyonları ise denklem 4.79 ve 4.80'den hesaplanabilmektedir.

Kabarcık fazdaki gaz sıcaklığının yükseklikle değişimi ve fazlar arasındaki ısı transferi için yazılan denklem 4.103; $z = 0$ 'da kabarcık faz sıcaklığı $T_b = T_o$ sınır şartlarıyla yatak yüksekliği boyunca integre edilerek 4. dereceden Runge-Kutta yöntemi ile çözülmektedir. Kullanıcı; başlangıçta yatağa gönderilen akışkanlaştırıcı gaz sıcaklığı



(T_0) için istediği değeri programa girebilir. Böylece kabarcık fazdaki sıcaklık değişiminin; değişik işletme koşullarında hesaplanabilmesi mümkün olabilmektedir.

Kabarcık fazdaki gaz konsantrasyonları ve sıcaklığının bulunmasında kullanılan diferansiyel denklemlerin çözümünde kompartman yüksekliği Δz ; kullanıcının isteğine bağlı işletme parametresi olarak programa girilebilir.

İkinci modülde; kullanıcı AYY'den çekilmesi gerekli ısı miktarının ne kadarının aktif yataktan çekileceğine; işletme parametresi $X_{\text{çek}}$ 'i değiştirerek karar verebilir. Dolayısıyla geriye kalan ısı miktarı; SB'den çekilmektedir. Ayrıca kullanıcıya ısı değiştirici yüzeylerin; aktif yatak ve SB boyunca değişik konumlara yerleştirme olanağı verilmiştir. Böylece diğer işletme parametreleri sabit tutulduğunda yatak sıcaklık dağılımında meydana gelen değişimler görülebilir.

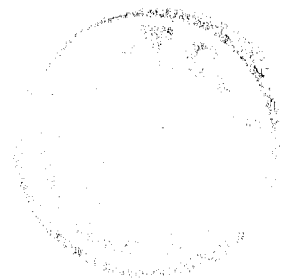
İkinci modül; her bir kompartmandaki yatak sıcaklığını, intersitiasl gaz ve kabarcık sıcaklığının fonksiyonu olarak hesaplayabilmektedir. Yatak girişi $z=0$ 'da; intersitiasl gaz sıcaklığı $T_{i(n-1)} = T_0$ sınır şartı esas alınarak denklem 4.102 çözüldüğünde; ilk kompartmanda intersitiasl gaz sıcaklığı hesaplanabilir. Denklik 4.102'nin iteratif çözümü her bir kompartmandaki $T_{i(n)}$ 'nin hesaplanmasını sağlar. İntersitiasl gaz sıcaklığının fonksiyonu olan kabarcık sıcaklığı ise denklik 4.106 kullanılarak kompartman bazında bulunabilir. O halde her bir kompartman için $T_{y(n)}$; kabarcık ve intersitiasl gaz sıcaklığına bağlı olarak denklik 4.107'den hesaplanabilmektedir.

Serbest bölgede mevcut kok tanecik konsantrasyonunun hesaplanabilmesi öncelikle SB'ye taşınan tanecik debisinin belirlenmesine bağlıdır. Programda; literatürde mevcut korelasyonlardan Pemberton ve Davidson (1983) tarafından önerilen denklem 4.32 kullanılmıştır. Serbest bölgede i boyutunda kok taneciklerinin konsantrasyonu denklik 4.39; mevcut kok tanecik sayısı ise denklik 4.42 yardımıyla bulunabilir. Taneciklerin aktif yatak yüzeyinden SB'ye fırlatıldıkları batlangıç hızı (U_{t0}); literatürde mevcut denklem 4.44 kullanılarak hesaplanmıştır. Serbest bölgeye fırlatılan i boyutundaki

taneciklerin ulaştığı maksimum yükseklik denklik 4.45'in integrali alınarak bulunmuştur. Serbest bölgede bekleme süresi (t_{ir}), farklı işletme koşullarında değişen ve kok taneciklerinin yanabilmesi için gerekli zamanın SB'de olup olmadığını belirleyici bir faktördür. Denklem 4.53 ile i boyutunda SB'de yanan kok tanecik sayısı hesaplanabilir.

Aktif yatağın son kompartmanında program tarafından hesaplanan gaz konsantrasyon ve sıcaklık değerleri; SB denklemlerinin çözümünde başlangıç değeri olarak alınmaktadır. Serbest bölgede $n_{I,B}$ olarak isimlendirilen kompartmandaki O_2 , CO_2 , CO konsantrasyonları; 4.86, 4.87, 4.88 denkliklerinin çözümü ile bulunabilir. Bulunan değerler ile aynı denkliklerin iteratif çözümü bize $n_{II,B}$ ve $n_{III,B}$ 'deki O_2 , CO_2 , CO konsantrasyonlarını vermektedir.

Aktif yatağın son kompartmanındaki interstitial gaz sıcaklığının; SB girişindeki gaz sıcaklığına eşit olduğu sınır şartı esas alınarak denklik 4.113 çözüldüğünde $n_{I,B}$.kompartman çıkışındaki gaz sıcaklığı hesaplanabilir. Denklik 4.113'ün iteratif çözümü; $n_{II,B}$ ve $n_{III,B}$ kompartmanlarındaki gaz sıcaklıklarını ($T_{SB(n_{II,B})}$, $T_{SB(n_{III,B})}$) vermektedir.



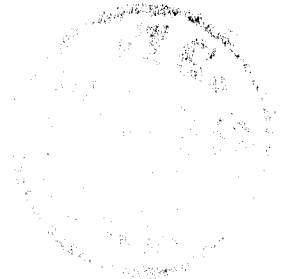
6

Model Sonuçlarının Tartışılması

Bu çalışmada gerçekleştirilen model fazla havanın, KHYM ve sürüklenen kok taneciklerinin boyut dağılımı ile kütle kesrini, yataktaki gaz konsantrasyonlarını, yanma verimini nasıl etkilediğini tahmin edebilmektedir. Model, besleme havası sıcaklığı, aktif yataktan çekilen ısı, aktif yataкта yanan UM, ısı değiştirici yüzeylerin yerleştirilmesi gibi işletme parametrelerinin diğer parametreler sabit tutulduğunda yatak sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini belirleyebilmektedir. Literatürde bulunan düşük kaliteli linyitleri içeren en ayrıntılı deneysel çalışma Kırmızıgül, Ü. tarafından yapılan çalışmadır. Bu nedenle model sonuçlarının bir bölümü bu çalışmayla karşılaştırılacaktır. Bu amaçla yapılan çalışma, Bölüm 6.1’de kısaca özetlenmiştir.

6.1 Pilot Ölçekli Yakıcının Özellikleri ve Deneysel Çalışma

Ortadoğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünde mevcut pilot ölçekli bir AYY ile yapılan deneysel çalışma sonuçları; ilk olarak Ayyıldız, A. tarafından 1986’da gerçekleştirilen yüksek lisans tezinde sunulmuştur. Bazı küçük modifikasyonlar ve yeni komponentler 1989 yılında Kırmızıgül, Ü. tarafından pilot ölçekteki AYY’ye ilave edilmiştir. Araştırmacı, Seyitömer linyitinin yanma karakteristiklerini 0.25 m çapında 2.4 m yüksekliğindeki bir AYY’da incelemiş ve deneysel çalışma sonuçlarını 1989’da sunmuştur (Kırmızıgül, 1989).



Pilot ölçekli yakıcıda yapılan deneylerin işletme koşulları, Tablo 6.1’de verilmiştir. Tabloda yapılan deneyler, sırasıyla Deney-1, Deney-2, Deney-3 olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Yapılan Deneylerin İşletme Koşulları

Deney no	Kömür debisi (kg/h)	HFK	İşletme Hızı (m/s)	Ort. Yatak Sıc. (K)	Ort. SB Sıc. (K)
Deney-1	17.26	1.00	1.83	1155	874
Deney-2	17.26	1.19	2.11	1119	865
Deney-3	17.26	1.48	2.60	1109	863

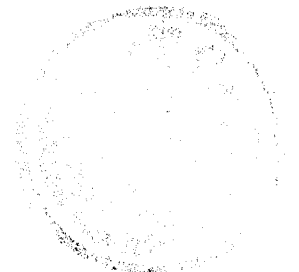
Kömür, hızı ayarlanabilen bir burgulu besleyici ile yatak yüzeyinin 0.05 m altından beslenmektedir. Yatak yüksekliği, bir taşma borusu yardımı ile 0.60 m’de sabit tutulmuştur. Soğuk yatak devreye alınırken ön ısıtması LPG ile sağlanmaktadır. Soğuk yatak, 673 K sıcaklığa ulaşınca kömür beslenmeye başlamış ve yatak sıcaklığı 1123 K’e ulaştığında ön ısıtma devreden çıkartılmıştır.

Model sonuçlarının karşılaştırıldığı deneylerde kullanılan Seyitömer linyitinin EA, KA ve elek analiz değerleri, Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2 Seyitömer Linyitinin Fiziksel - Kimyasal Özellikleri

KISA ANALİZ (Orijinal baz)		ELEMENTEL ANALİZ (Kuru baz)		ELEK ANALİZİ	
Komponent	Ağırlık Kesri (%)	Komponent	Ağırlık Kesri (%)	Çap (mm)	Ağırlık Kesri (%)
UM	47.07	C	52.3	4.699-3.327	42.51
		H	4.16	3.327-2.362	19.47
SK	24.27	N	1.55	2.362-1.651	17.58
		S	1.86	1.651-0.991	16.26
KÜL	14.77	O	22.96	0.991-0.833	1.52
		KÜL	17.17	0.833-0.000	2.65
NEM	13.89				

Tablo 6.2’de fiziksel ve kimyasal özellikleri verilen Seyitömer linyitinin ÜİD’si, 17347 kJ/kg’dır. Yatağa beslenen kömürün ortalama tanecik büyüklüğü ise $d_p=2.15$ mm’dir.



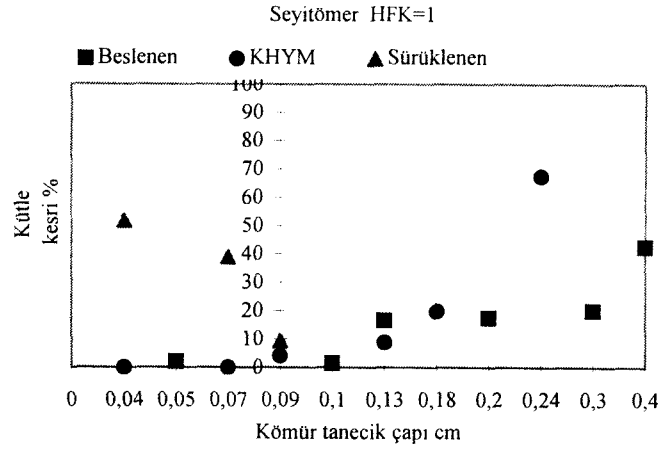
6.2 Modelin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Önerilen model sonuçlarının uygunluğu; yukarıda özellikleri ve işletme koşulları verilen pilot ölçekli bir yakıcıda Kırmızıgül, Ü. tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak test edilmektedir. Model için gerekli girdilerin bazıları anılan deneysel çalışmada verilmiş ise, verilen değer, verilmemiş ise çeşitli makul değerler kullanılmıştır.

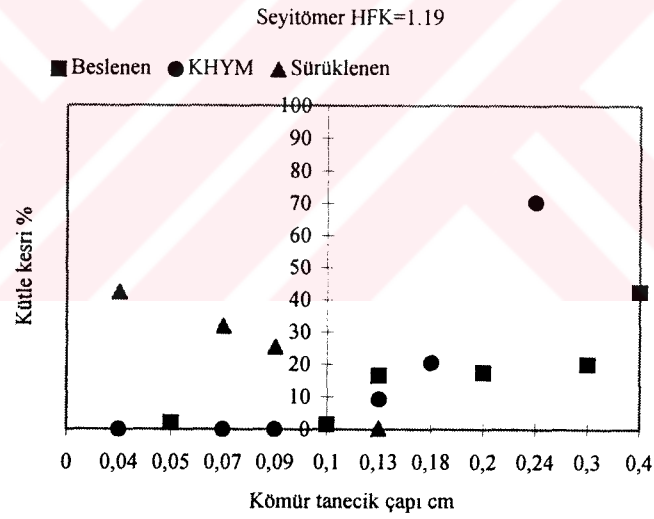
6.2.1 Yatağa Beslenen, KHYM ve Sürüklenen Kok Taneciklerinin Boyut Dağılımı ve Kütle Kesri

Yatağa beslenen kömür taneciklerinin boyut dağılımı; Tablo 6.2’de verilen elek analiz değerleridir. Yatağa beslenen kömür; kimyasal reaksiyonlar sonucu yeni bir boyut dağılımına sahip olmakta; KHYM kok taneciklerinin boyut dağılım ve kütle kesri Şekil 6.1, 6.2, 6.3’de HFK’nın 1, 1.19 ve 1.48 değerleri için görülmektedir. Kararlı halde yatakta mevcut taneciklerin boyut dağılım ve kütle kesrini veren deneysel veriler literatürde mevcut değildir. Bu çalışmada; KHYM taneciklerin boyut dağılım ve kütle kesrinin bulunması için Ek-1’de ayrıntıları verilen bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Yatağa gönderilen fazla havadan en çok yataktan sürüklenen tanecikler etkilenmektedir. Sürüklenen taneciklerin boyut dağılım ve kütle kesri; HFK’nın 1, 1.19, 1.48 değerleri için farklı değerler almaktadır.

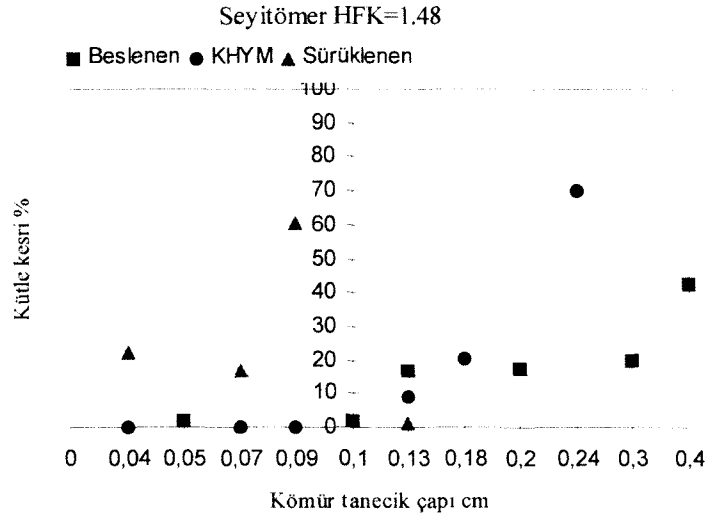
Model sonuçlarında, KHYM taneciklerin kütle kesrinin fazla hava ile azaldığı görülmektedir. Bunun iki farklı sebebi vardır. Birincisi artan fazla hava ile yataktan sürüklenen kok tanecikleri artmakta, ikincisi; kok taneciklerinin yanma hızı artmaktadır. O halde; KHYM kok miktarı, HFK’nın artmasıyla azalmaktadır. Model tarafından KHYM kok miktarının, inert malzemeye oranı $HFK=1$ için %1.2 olarak tahmin edilmektedir. Yanan kömür taneciklerinin tüm yatak malzemesi içindeki oranının %2 ile %5 civarında değiştiği literatürde belirtilmiştir. Akışkan yataklı yakıcıda, yanmanın kararlı halde sürebilmesi için %1’lik bir kömür oranının yeterli olabileceği ise deneysel verilerde görülmektedir (Atakül, H. 1985).



6.1 Modelde Tahmin Edilen ve Ölçülen Taneciklerin Boyut Dağılımları



6.2 Modelde Tahmin Edilen ve Ölçülen Taneciklerin Boyut Dağılımları



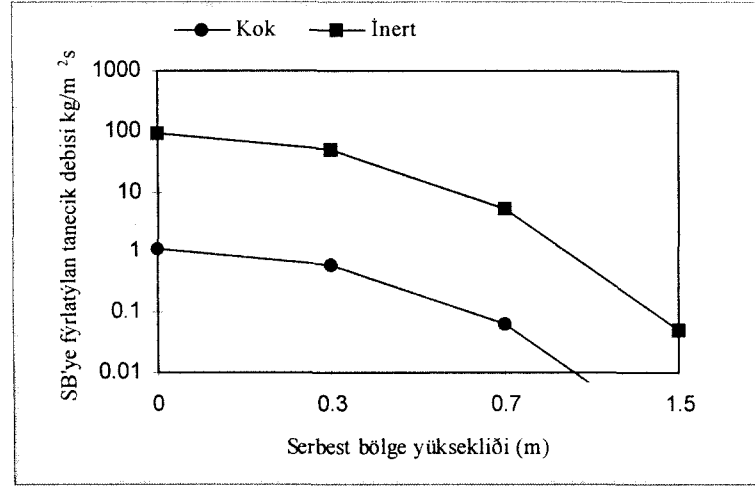
6.3 Modelde Tahmin Edilen ve Ölçülen Taneciklerin Boyut Dağılımları

6.2.2 Serbest Bölgeye Fırlatılan Taneciklerin Konsantrasyonu

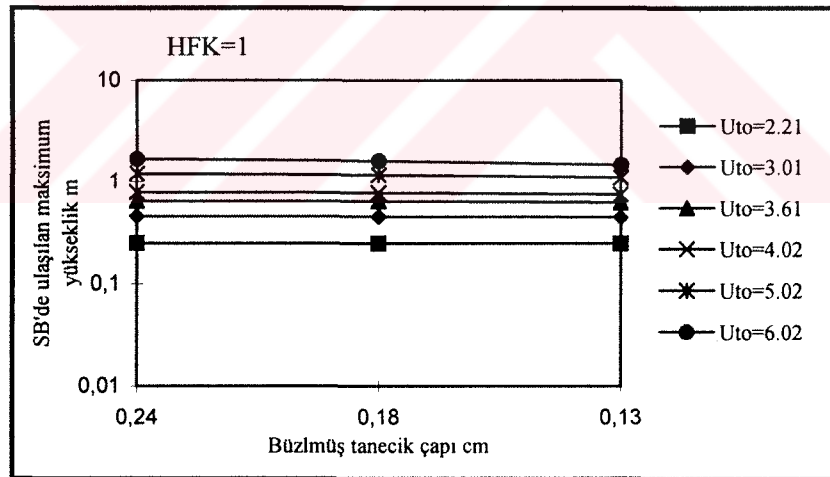
Serbest bölgede mevcut karbon miktarının, iki faktöre bağlı olduğu Bölüm 4’de belirtilmişti. Bunlardan birincisi, taneciklerin aktif yatak yüzeyinden taşınma debisi (F_0), ikincisi taneciklerin SB’de bekleme süresi (t_r)’dir. Modelde, SB’ye fırlatılan taneciklerin debisi için literatürde mevcut ifadelerden Pemberton et. al. tarafından önerilen korelasyon kullanılmıştır. Şekil 6.4’de görüldüğü gibi aktif yataktan SB’ye fırlatılan taneciklerin (inert+kok) debisi, yaklaşık $95 \text{ kg/m}^2\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Aktif yataкта KHYM kok miktarının inert malzemeye oranı %1.2 ise SB’de mevcut kok tanecikleri debisinin, $1.14 \text{ kg/m}^2\text{s}$ olduğu hesaplanabilir. Serbest bölgede mevcut kok tanecikleri boyut dağılımı, KHYM kok taneciklerinin boyut dağılımı ile aynıdır.

Serbest bölgede taneciklerin ulaştığı maksimum yükseklik, taneciklerin SB’de bekleme süresini doğrudan etkilemektedir. Kok tanecikleri, yanma zamanı ve SB’de bekleme süresine bağlı olarak ya kısmen ya da tamamen SB’de yanabilir. Şekil 6.5’den görülebileceği gibi taneciklerin SB’de ulaştığı maksimum yükseklik, taneciklerin aktif yataktan fırlatıldıkları başlangıç hızı U_{t0} ’ın fonksiyonudur. Bu çalışmada, $U_{t0} = 2.5 U_b$ olarak alınmıştır. Farklı hızlarda SB’ye fırlatılan taneciklerin; SB’de ulaştığı

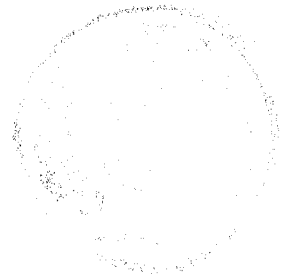
maksimum yükseklik ve buna bağlı bekleme sürelerini, Şekil 6.5 ve 6.6'da görmek mümkündür.

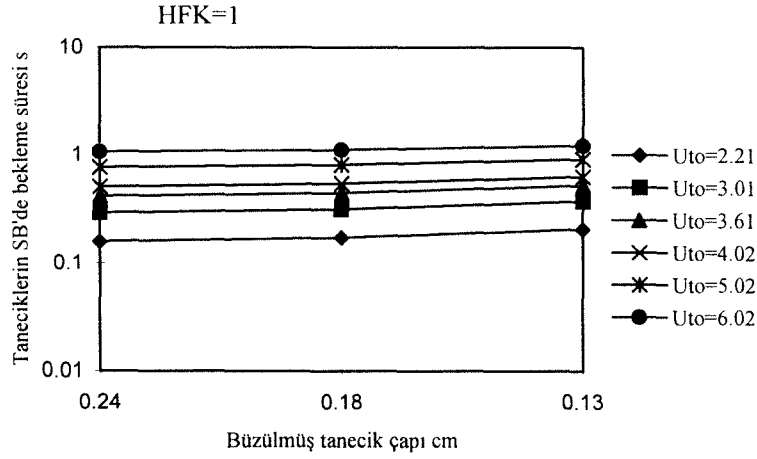


Şekil 6.4 Aktif Yataktan SB'ye Fırlatılan İnert ve Kok Taneciklerinin Debisi



Şekil 6.5 Farklı Fırlatma Hızlarında Kok Taneciklerinin SB'de Ulaştığı Maksimum Yükseklik





Şekil 6.6 Farklı Fırlatma Hızlarında Kok Taneciklerinin SB'de Bekleme Süresi

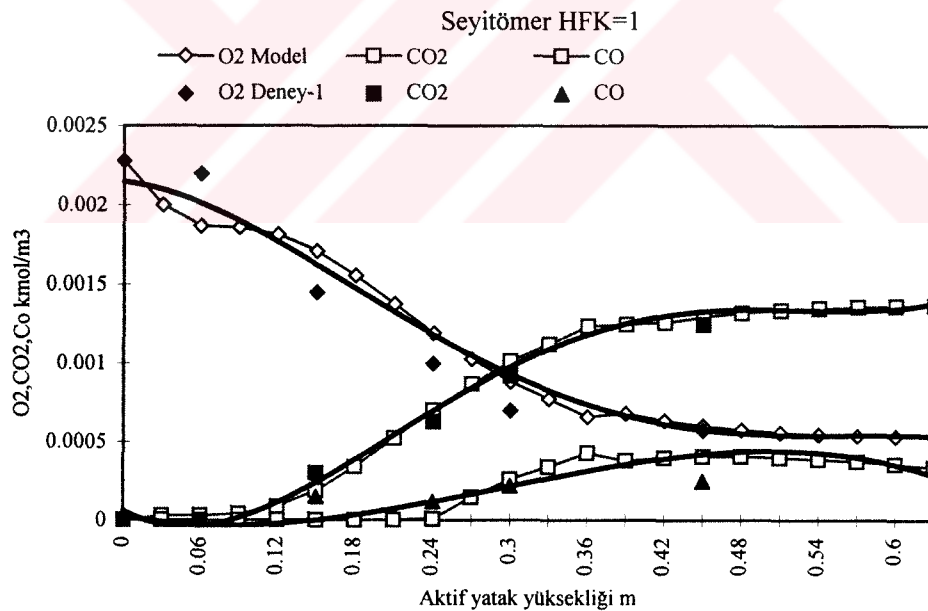
6.2.3 Konsantrasyon Dağılımları

Bu çalışmada gerçekleştirilen modelde, Tablo 6.1'de verilen deney işletme koşulları giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Şekil 6.7 ve 6.8 stokiometrik hava için yatakta ve SB'de O_2 , CO_2 , CO gazlarının konsantrasyon dağılımlarını göstermektedir. Model sonuçlarına göre CO konsantrasyonu aktif yatak boyunca artmaktadır. Deney-1'e göre ise aktif yatağın alt kısmında; maksimum verip daha sonra sabit bir değerde kalmaktadır. Bu sonuç kabarcık fazda; sıcaklığın düşük olduğu yatağın alt kısmı dışında CO 'nun oksitlenmesi için şartların elverişli olduğunu ortaya koymaktadır. O halde kabarcıklar fazındaki tepkimenin yatak performansı üzerindeki etkisi oldukça fazladır.

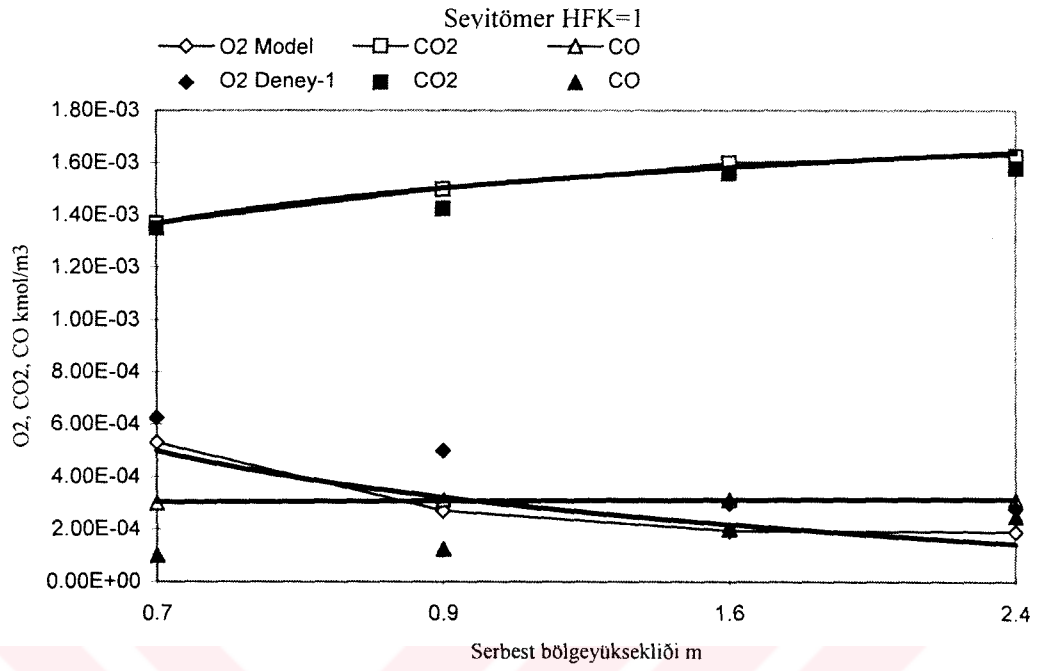
Bu çalışmada gerçekleştirilen modelde, kömür taneciklerinin uçucu maddelerini kaybettikten sonra yüzeyde karbon monoksit oluşturan iki tepkime ile yandığı, karbon monoksidin ise yoğun faz gazında oksitlendiği varsayılmıştır. Model tahminleri ile Deney 1-2-3'ün sonuçları arasındaki farkın sebebi budur. O halde mevcut modelden kabarcık fazında tepkime olmadığı varsayımı kaldırılır kütle ve enerji denklikleri, kabarcık fazında CO 'in oksitlenme reaksiyonunu içerecek şekilde çözülürse sonuçlar olumlu yönde etkilenecektir.

Pekyılmaz, Aygün (1982) tarafından gerçekleştirilen modelde, kok taneciklerinin yüzeyde CO oluşturan iki tepkime ile yandığı, CO'nun ise yoğun faz ve kabarcık fazda oksitlendiği varsayılmıştır. Model sonuçlarında kabarcıklar fazındaki tepkimenin ihmal edilmesi halinde yanma veriminin %5 düşük bulunduğu bu tepkimenin ihmal edilmemesi gerektiği vurgulanmaktadır. Modelin öngördüğü konsantrasyon dağılımlarının deney sonuçları ile daha uyumlu olabilmesi için mevcut modelde kömür taneciklerinden açığa çıkan karbon monoksidin yoğun fazda oksitlendiği kabulünün kaldırılması gerekmektedir.

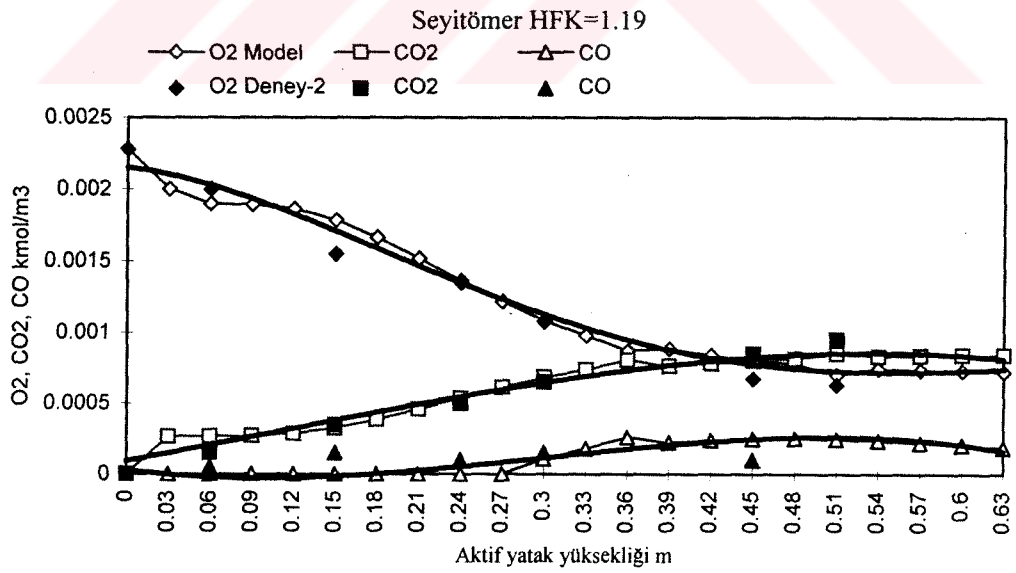
Şekil 6.9, 6.10, 6.11, 6.12'de görüleceği gibi hava fazlalık katsayısının arttırılmasıyla; O_2 konsantrasyonu artmakta CO ve CO_2 konsantrasyonları azalmaktadır. Karbon monoksit konsantrasyonunun azalması; daha verimli yanma sağlanması, CO_2 konsantrasyonunun azalması ise fazla havanın yanma gazlarını seyreltmesi olarak açıklanabilir.



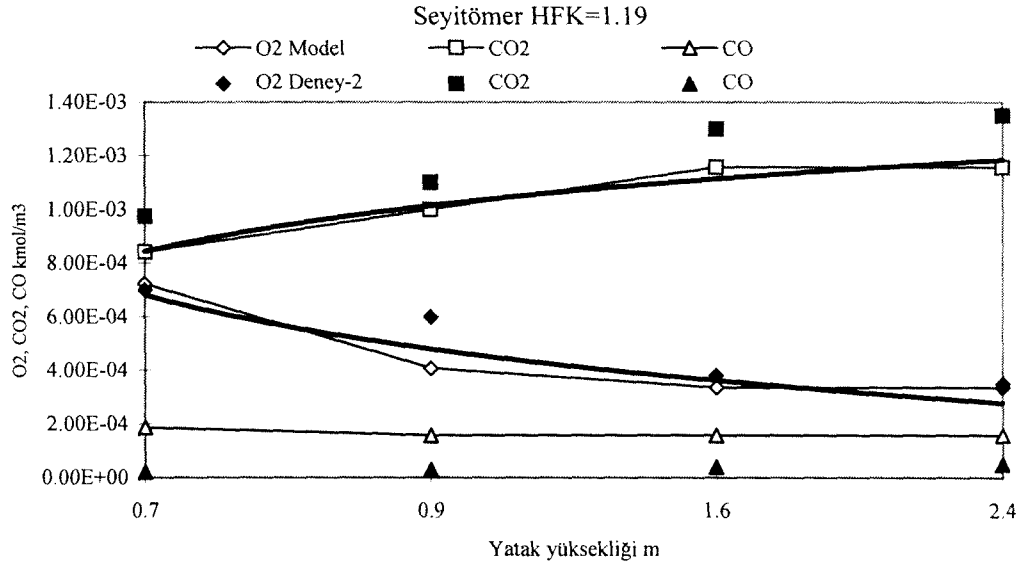
Şekil 6.7 Aktif Yatakta Tahmin Edilen ve Ölçülen Gaz Konsantrasyon Dağılımlarının Karşılaştırılması



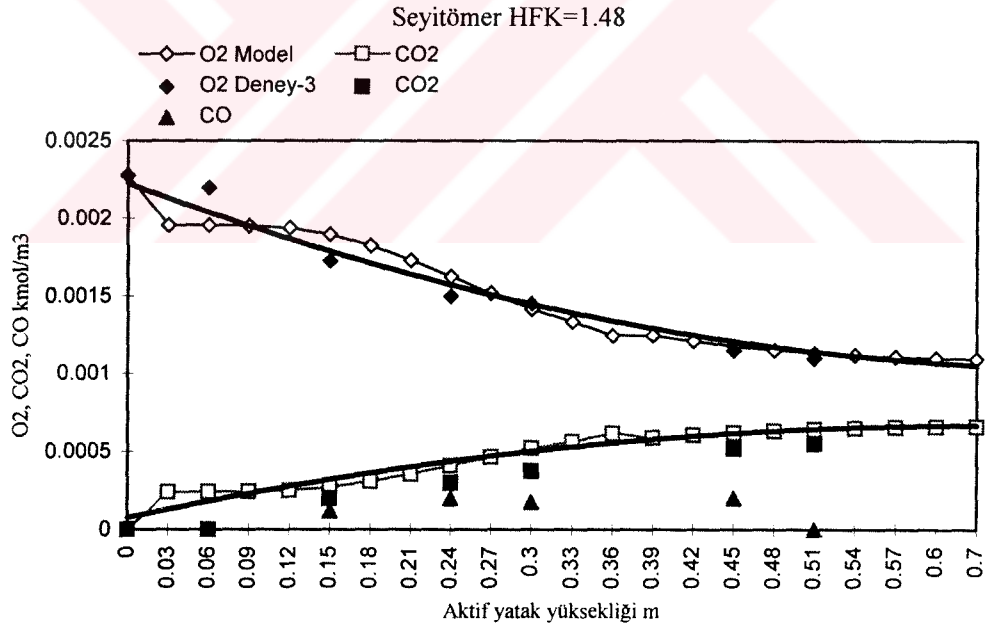
Şekil 6.8 Serbest Bölgede Tahmin Edilen ve Ölçülen Gaz konsantrasyon Dağılımlarının Karşılaştırılması



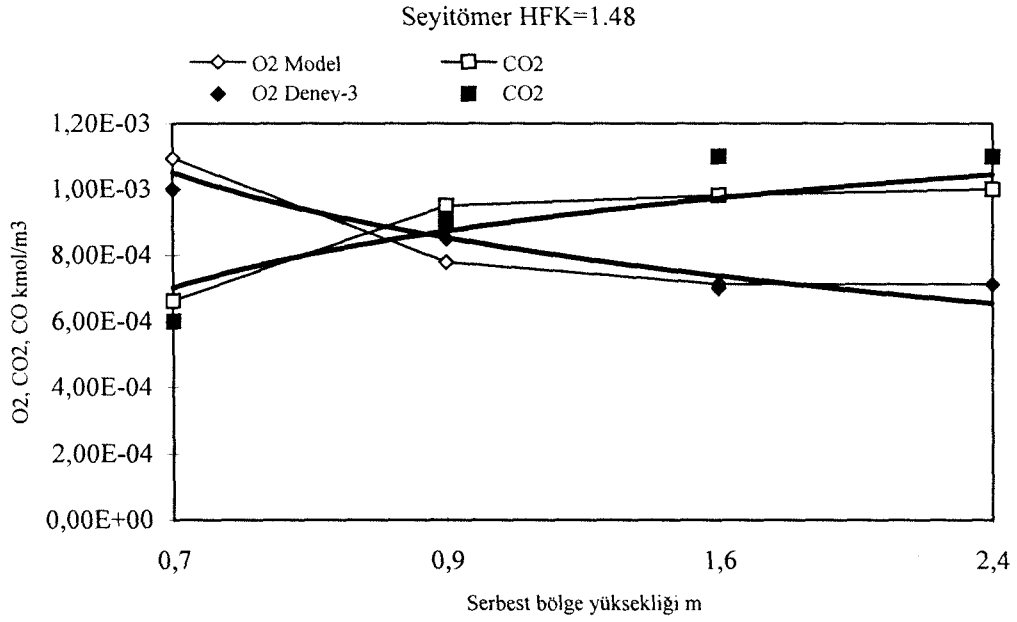
Şekil 6.9 Aktif Yatakta Tahmin Edilen ve Ölçülen Gaz konsantrasyon Dağılımlarının Karşılaştırılması



Şekil 6.10 Serbest Bölgede Tahmin Edilen ve Ölçülen Gaz konsantrasyon Dağılımlarının Karşılaştırılması



Şekil 6.11 Aktif Yatakta Tahmin Edilen ve Ölçülen Gaz konsantrasyon Dağılımlarının Karşılaştırılması

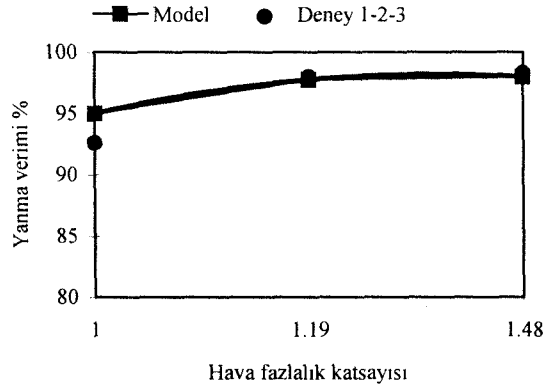


Şekil 6.12 Serbest Bölgede Tahmin Edilen ve Ölçülen Gaz konsantrasyon Dağılımlarının Karşılaştırılması

6.2.4 Yanma Verimi

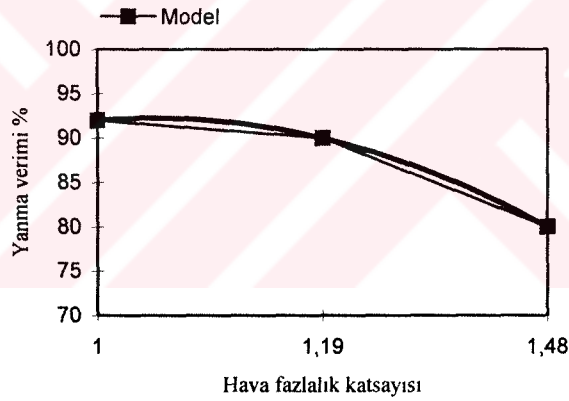
Yanma verimi, birim zaman aralığında yatakta açığa çıkan ısıнын, giren ısıya oranı olup beslenen yakıt ile kaybolan karbon ve CO'nun ısı değerlerinden bulunabilir. Yatakta açığa ısıyı etkileyen faktörler; karbonun eksik yanma sonucu karbon monoksit oluşması, UM'lerin yanmalarını tamamlamamaları ve yanmamış karbon miktarıdır. İşletme parametrelerinden fazla hava miktarının, yanma verimini nasıl etkilediği Şekil 6.13 ve 6.14'de görülebilir.

- Yataktan sürüklenen tüm kok taneciklerinin gazdan ayrılarak geri gönderildiği varsayımına dayanarak yanma veriminin; HFK ile değişimi; Şekil 6.13'de görülmekte ve deney sonuçları ile uyum içindedir. Yanma verimi; fazla hava ile önce artmakta sonra azalmaktadır. Bunun nedeni CO yanma hızının; HFK ile önce O₂ konsantrasyonunun artışına bağlı olarak artması sonra ise yatak sıcaklığının azalmasına bağlı olarak düşmesidir.



Şekil 6.13 Yanma Veriminin Fazla Hava ile Değişimi

- Yataktan sürüklenen taneciklerin, gazdan ayrılarak geri gönderilmediği varsayımına dayanılırsa ki modelde bu varsayım geçerlidir. Yanma verimi, Şekil 6.14'de görüldüğü gibi oldukça düşmektedir.



Şekil 6.14 Yanma Veriminin Fazla Hava ile Değişimi

6.2.5 Serbest Bölge Reaksiyonları

Serbest bölge giriş ve çıkışındaki oksijen konsantrasyonları arasındaki farkın AYY'deki toplam O_2 tüketimine oranı; SB'de gerçekleşen reaksiyonların derecesini ifade etmektedir. Modelde; stokiometrik koşullarda SB reaksiyonlarının; fazla hava koşullarında çalışılan yataklara oranla daha fazla gerçekleştiği görülmektedir. Bunun

sebebi; aktif yatakta yanmak için yeterli oksijen bulamayan yanıcı maddelerin; daha fazla oksijenin mevcut olduğu SB’de yanması olarak açıklanabilir.

Gerçekleştirilen modelde; SB’de O_2 tüketiminin, stokiometrik koşullarda %21 fazla hava koşullarında ise %19 civarında olduğu görülmektedir. Kırmızıgül, Ü.; Seyitömer linyitinin yanma karakteristiklerini belirlemek için yaptığı deneysel çalışmalarda; SB’de harcanan oksijenin, normal işletme koşullarında yaklaşık %23 olduğunu belirtmiştir.

6.3 İşletme Parametrelerinin Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkileri

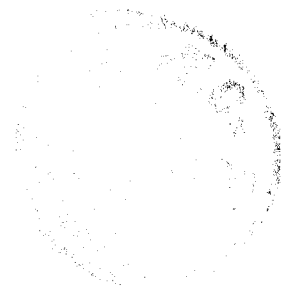
Akışkan yataktaki yanma olayının analizi için yakıt özellikleri ve işletme parametrelerinin birbirleri ile etkileşimlerini incelemek gerekir. Akışkan yataklı yakıcıda yanma olayının analizi sonucunda sağlanacak teknik bilgiler bize, uygun yakma sistemi tasarımı, yakıt emisyonlarının kontrolü, verimli yakma, tasarım ve işletme standartlarının hazırlanması gibi konularda yardımcı olacaktır.

Yatak içerisindeki sıcaklık dağılımına tesir eden parametreleri incelemek amacıyla Tablo 6.3’de verilen değerler mevcut modele uygulanmış ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.3 Model İşletme Parametreleri

Model Deneme Sayısı	T_o (K)	Kömür Debisi (kg/h)	HFK	X_{UM} (%)	$X_{çek}$ (%)	Q_y (kW)	Isı Değiştirici Yüzey Konumu	U_o (m/s)
Model-1	300	17.26	1.19	60	60	62.5	$\frac{1}{2} Z_y$	2.11
Model-2	400	17.26	1.19	60	60	62.5	$\frac{1}{2} Z_y$	2.11
Model-3	500	17.26	1.19	60	60	62.5	$\frac{1}{2} Z_y$	2.11

Mevcut modelde kullanılan kömür cinsleri ve kimyasal özellikleri Tablo 6.4’de görülebilir. Modelde kullanılan kömür cinsleri için elek analiz değerleri Tablo 6.2’den alınmıştır

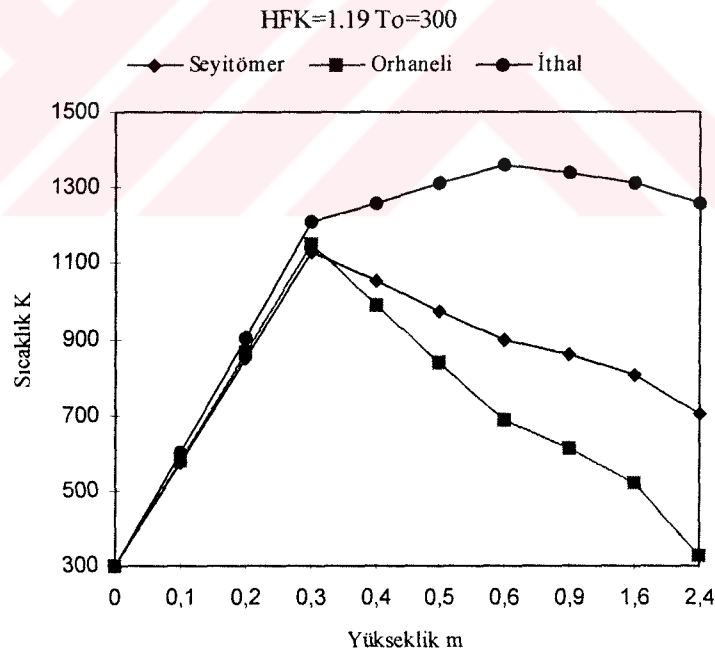


Tablo 6.4 Modelde Kullanılan Kömür Cinsleri

Kömür	KISA ANALİZ (Orijinal Baz) (%)				ELEMENTEL ANALİZ (Kuru Baz) (%)						ÜİD (Kj/kg)
	UM	SK	KÜL	NEM	C	H	N	S	O	KÜL	
Seyitömer	47.07	24.27	14.77	13.89	52.3	4.16	1.55	1.86	22.96	17.17	17623
Orhaneli	29.96	22.55	21.78	25.71	44.86	4.40	0.85	3.37	17.20	29.32	13443
İthal	42.79	42.73	7.38	7.10	65.33	5.36	1.56	0.34	19.47	7.94	27011

6.3.1 Kömür Özelliklerinin Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Mevcut modele Model-1'deki işletme parametreleri giriş bilgisi olarak verildiğinde kömür özelliklerinin, yatak sıcaklık dağılımını nasıl etkilediği Şekil 6.15'den görülebilir. Isıl değeri yüksek olan İthal kömür yakıt olarak AYY'de kullanılırsa, aktif yatak çıkışında en yüksek sıcaklığa ulaşılmakta ve baca gazları yaklaşık 1300 K'de SB'yi terketmektedir.



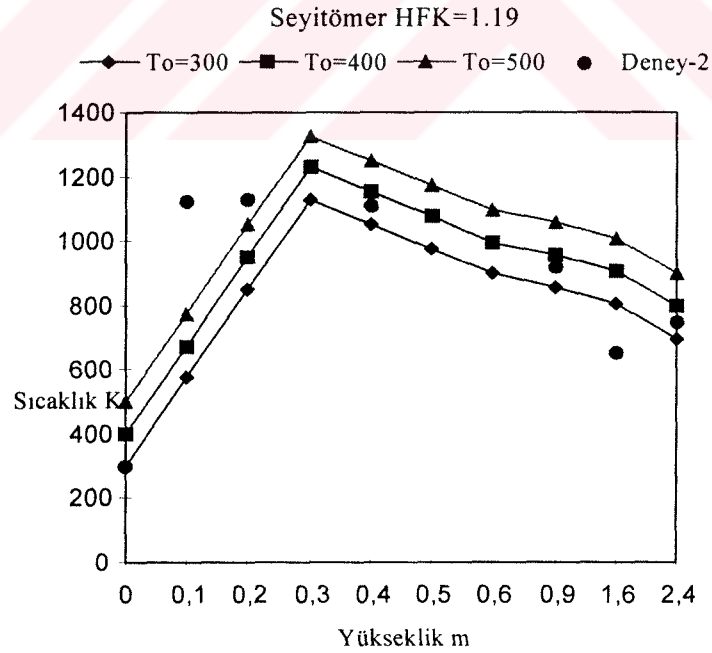
Şekil 6.15 Kömür Özelliklerinin Sıcaklık Dağılımına Etkisi

O halde, yakıcıda İthal kömür kullanıldığında çekilecek ısı miktarı artırılmalı veya yatağa beslenen kömür debisi azaltılmalıdır. Seyitömer ve Orhaneli linyiti, yakıcıda

kullanıldığında aktif yatak ortalarında maksimum sıcaklığa ulaşılmakta ve ısı değeri en düşük olan Orhaneli linyiti SB'yi yaklaşık 300 K'de terketmektedir. Yakıcıda, Orhaneli linyiti kullanılırsa çekilecek ısı miktarı azaltılmalı veya kömür besleme debisi artırılmalıdır.

6.3.2 Besleme Hava Sıcaklığının Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Model 1-2-3'de görülen besleme havası sıcaklıkları, diğer işletme parametreleri sabit tutularak mevcut modele uygulandığında, farklı besleme havası sıcaklıklarının yatak sıcaklık dağılımını nasıl etkilediği Şekil 6.16'dan görülebilir. Akışkan yataklı yakıcıda yakıt olarak Seyitömer linyiti kullanılmaktadır. Besleme havası sıcaklığı 300 K iken Model-1 ve Deney-2'den elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında yatak içinde 1100 K sıcaklığa ulaşılmaktadır. Fakat model tarafından aktif yatak ortalarında 1100 K sıcaklık tahmin edilirken Deney-2'de yatağın üçte birinde bu sıcaklığa ulaşılmaktadır.

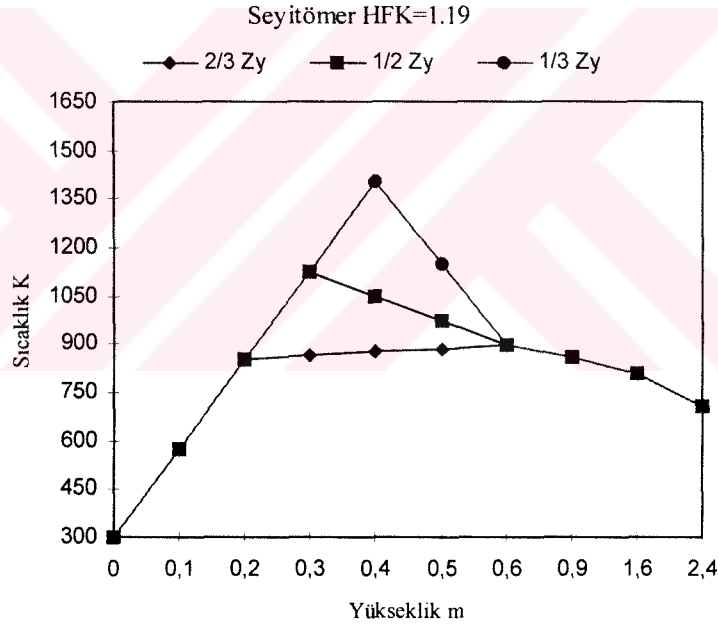


Şekil 6.16 Farklı Besleme Hava Sıcaklıklarında Tahmin Edilen ve Ölçülen Sıcaklık Dağılımlarının Karşılaştırılması

6.3.3 Isı Değiştirici Yüzey Konumlarının Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Geliştirilen modelde, ısı değiştirici yüzeyleri aktif yatak ve SB boyunca değişik konumlara yerleştirme olanağı mümkündür. Tablo 6.3, Model-1’de verilen işletme parametreleri sabit tutulduğunda ısı değiştirici yüzey konumlarının yatak sıcaklık dağılımını nasıl etkilediği Şekil 6.17’de görülebilir.

Şekil 6.17’den anlaşılabacağı gibi yatak sıcaklık dağılımında meydana gelen istenmeyen artışlar ve düşüşler yüzeylerin aktif yatakta yerleri kaydırılarak bertaraf edilebilmektedir. Yakıt olarak Seyitömer linyitinin kullanıldığı AYY’da genleşmiş yatak yüksekliğinin yarısından itibaren yüzeyler yerleştirildiğinde en uygun sıcaklık dağılımı elde edilmektedir.



Şekil 6.17 Isı Değiştirici Yüzey Konumlarının Sıcaklık Dağılımına Etkisi

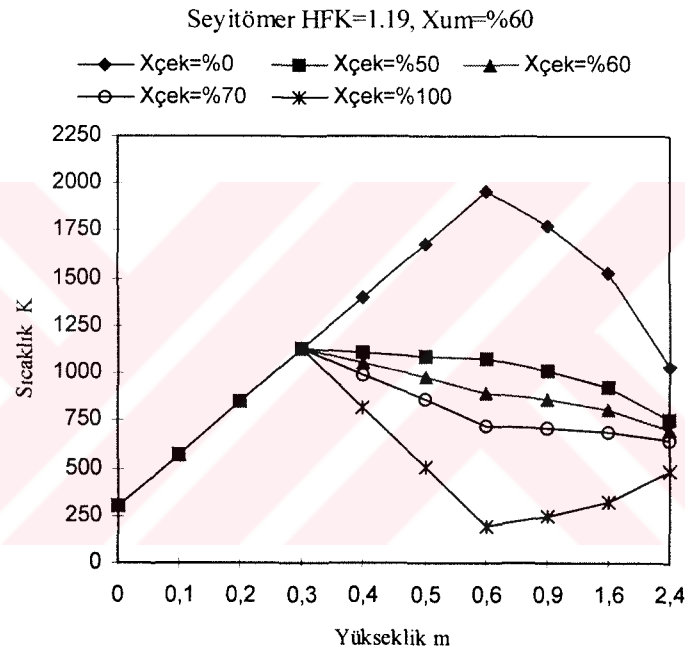
6.3.4 Aktif Yataktan Çekilen Isının Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Mevcut model, akışkan yataklı yakıcıdan çekilmesi gerekli ısı miktarının ne kadarını aktif yataktan çekilebileceğine işletme parametresi $X_{çek}$ ’i değiştirerek karar verebilir. Şekil 6.18’de Model-1’e uygulanan işletme parametreleri sabit tutulduğunda yakıcıda

açığa çıkan ısıнын aktif yatakta çekilen miktarına bağlı olarak yatak sıcaklık dağılımındaki değişimler görülebilir. Ayrıca çıkan ısıнын tümü aktif yataktan çekildiğinde SB girişinde sıcaklık minimuma düşmekte ve SB çıkışına doğru sıcaklık artmaktadır.

Aktif yataktan hiç ısı çekilmediğinde, SB girişinde yatak sıcaklığı maksimum değer almakta ve SB çıkışına doğru mevcut ısı değiştirici yüzeylerden dolayı azalmaktadır.

Açığa çıkan ısıнын yarısı aktif yataktan çekildiğinde Seyitömer linyiti için optimum sıcaklık dağılımı elde edilmektedir.



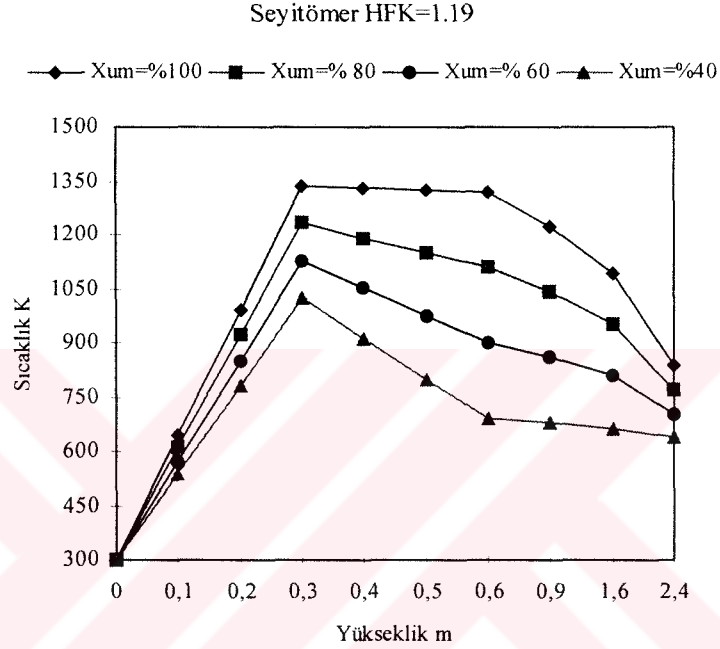
Şekil 6.18 Aktif Yataktan Çekilen Isının Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi

6.3.5 Aktif Yatakta Yanan Uçucu Maddelerin Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Türk linyitleri gibi UM/SK oranı yüksek kömürlerde, UM'nin yandığı yerin ve yüzdesinin belirlenmesi, AYY'ların tasarımında oldukça önemlidir.

Model, linyitlerin özelliğine bağlı olarak çıkan UM'nin ne kadarının aktif yatakta yandığını tahmin edebilmektedir. Şekil 6.19'da, Model-1'de verilen işletme parametreleri sabit tutulduğunda aktif yatakta yanan UM'nin yüzdesine bağlı olarak

yatak sıcaklık dağılımındaki değişimler görülebilir. Seyitömer linyitinde açığa çıkan UM'nin tümü aktif yatakta yanarsa, aktif yatak sıcaklığı 1300 K'e çıkmakta ve SB girişine kadar yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Seyitömer linyitinden açığa çıkan UM'nin yaklaşık %70'i aktif yatakta yanarsa, yatakta optimum sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. O halde, SB'de yanan UM kesri, $100 - X_{UM}$ 'den %30 olarak bulunabilir.



Şekil 6.19 Aktif Yatakta Yanan UM'nin Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Sonuçlar ve Öneriler

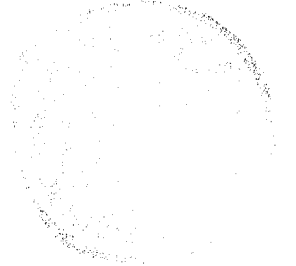
Model tarafından tahmin edilen değerler deneysel verilerle karşılaştırılarak; yorumlandığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

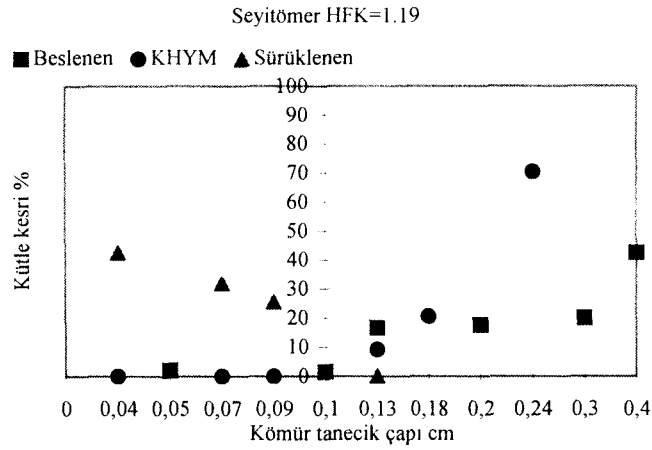
7.1 Sonuçlar

1- Farklı boyut dağılım ve ağırlık kesrine sahip yatağa sürekli beslenen kömür tanecikleri; uçucu ayrılmasıyla büzülerek yeni bir boyut dağılım ve kütle kesrine sahip kok taneciklerine dönüşmektedir. Tablo 6.4’de kimyasal özellikleri verilen Seyitömer ve Orhaneli linyitlerinin elek analiz değerleri Tablo 6.2’den alınmış olup her ikisi için geçerlidir.

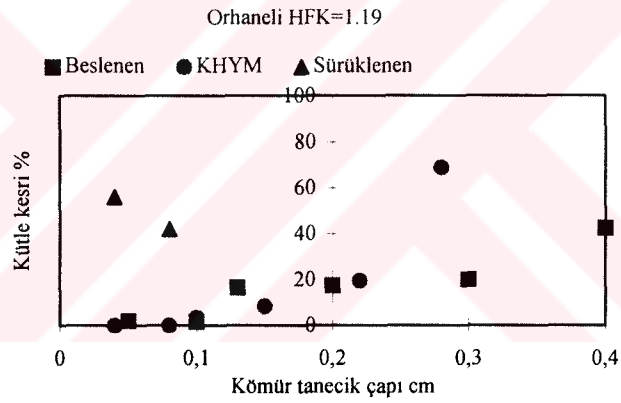
Şekil 7.1’de Seyitömer linyitinin, yatağa beslenen, KHYM, ve sürüklenen taneciklerinin boyut dağılımı görülmektedir. Ağırlık kesri % 42.5 ortalama çapı 0.4 cm olan kömür tanecikleri yatağa beslenmektedir. Bu verilerin kullanıldığı model; yatak kararlı rejime ulaştığında, ortalama 0.24 cm çapındaki kok taneciklerinin %70 kütle kesrine sahip olduğunu tahmin etmektedir.

Şekil 7.2’de ise aynı elek analizi, farklı kimyasal özelliklere sahip Orhaneli linyitinin boyut dağılım ve kütle kesri görülmektedir. Model, yatağa ortalama 0.4 cm çapında beslenen taneciklerinin yatak kararlı rejime ulaştığında 0.28 cm çapında kok taneciklerine dönüştüğünü tahmin edebilmektedir. O halde; kömür taneciklerinin büzülme hızı, kömür özelliklerine göre değişmektedir.





Şekil 7.1 Modelde Tahmin Edilen ve Ölçülen Taneciklerin Boyut Dağılımı

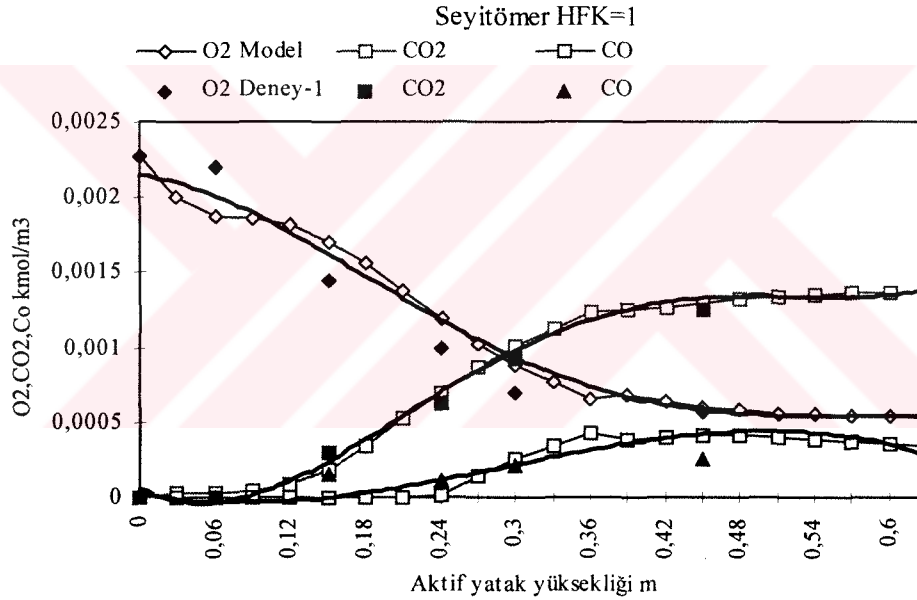


Şekil 7.2 Modelde Tahmin Edilen ve Ölçülen Taneciklerin Boyut Dağılımı

2- Aktif yataktan SB'ye fırlatılan taneciklerin (inert +kok) debisi HFK=1 için yaklaşık 95 kg/m²s iken SB'ye fırlatılan kok tanecik debisi 1.2 kg/m²s olarak hesaplanmaktadır. Serbest bölgeye fırlatılan kok taneciklerinin debisi, fazla hava miktarı dolayısıyla işletme hızına bağlı olarak artmaktadır

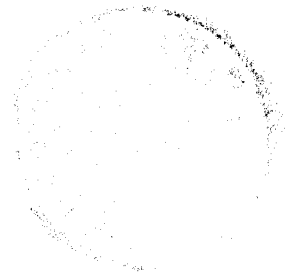
3- Şekil 7.3'den görüleceği gibi aktif yatak içerisinde O₂ konsantrasyonu sürekli olarak düşerken, CO₂ konsantrasyonu aynı şekilde artmaktadır. Karbon monoksit eğrisi, yatak

3- Şekil 7.3'den görüleceği gibi aktif yatak içerisinde O_2 konsantrasyonu sürekli olarak düşerken, CO_2 konsantrasyonu aynı şekilde artmaktadır. Karbon monoksit eğrisi, yatak ortalarında maksimum değere ulaşmakta yaklaşık bu değerde aktif yatağı terketmektedir. Model sonuçlarına göre CO konsantrasyonu aktif yatak boyunca artmaktadır. Deney-1'e göre ise aktif yatağın alt kısmında; maksimum verip daha sonra sabit bir değerde kalmaktadır. Bu sonuç kabarcık fazda; sıcaklığın düşük olduğu yatağın alt kısmı dışında CO'nun oksitlenmesi için şartların elverişli olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. O halde kabarcıklar fazındaki tepkimenin yatak performansı üzerindeki etkisi oldukça fazladır.



Şekil 7.3 Aktif yatakta tahmin edilen ve ölçülen Gaz Konsantrasyonlarının Karşılaştırılması

4-Yanma reaksiyonları, aktif yatak üzerindeki sıçrama bölgesinde sürmektedir. Bu reaksiyonlardan en dikkati çeken CO'nun oksitlenmesidir. Karbon monoksidin oksitlenme derecesi hem yatak sıcaklığı hem de fazla havaya bağlı olarak artmaktadır. Serbest bölge çıkışındaki CO konsantrasyonu hava fazlalık katsayısı arttıkça azalmaktadır.



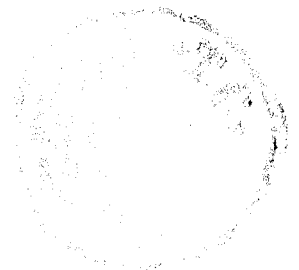
5- Model denklikleri çözüldüğünde, aktif yataktan SB'ye fırlatılan kok taneciklerinin küçük bir kesrinin burada yandığı ve çoğunluğunun aktif yatağa geri döndüğü görülmektedir. Çünkü genel olarak kok taneciklerinin yanma zamanı, SB'de bekleme süresinden daha büyüktür.

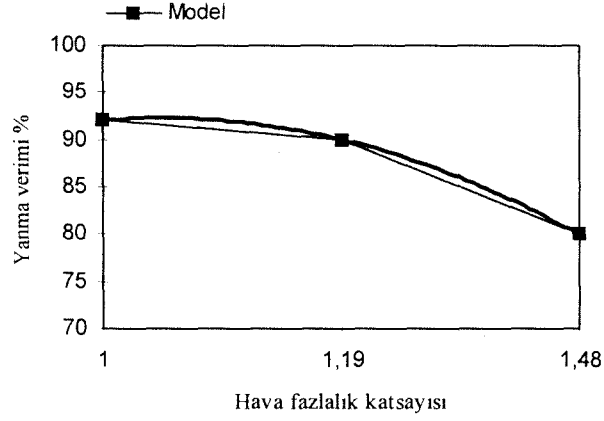
Model, SB'de sadece kok taneciklerinin yandığı varsayımına dayandırıldığında deney sonuçlarında görülen O_2 tüketimi elde edilmemektedir. Serbest bölgede oksijen konsantrasyonunun yüksekliğe bağlı olarak azalması, uygun sıcaklık koşullarının mevcut olduğu sıçrama bölgesinde bulunan kok taneciklerinden açığa çıkan UM'nin özellikle burada yandığının belirtisidir.

6- Serbest bölgede gerçekleşen reaksiyonların derecesi, burada tüketilen oksijenden ortaya çıkmaktadır. Aktif yatak sıcaklığı ve fazla hava arttıkça SB'de gerçekleşen reaksiyonlar azalmaktadır. Model tarafından SB'de oksijen tüketimi, stokiometrik koşullarda %21 fazla hava koşullarında ise %19 civarında tahmin edilmektedir.

7- Yanma verimi hesaplanırken iki farklı durum ele alınmıştır. Birinci durumda, yataktan sürüklenen kok taneciklerinin gazdan ayrılarak geri gönderildiği varsayımına göre yanma verimi hesaplanmıştır. Yanma verimi; model tarafından HFK'nın 1, 1.19, 1.48 değerleri için %95, %98, %98 olarak tahmin edilmektedir. İkinci durumda yataktan sürüklenen kok taneciklerinin yatağa geri beslenmediği varsayımına dayanarak; HFK'nın 1, 1.19, 1.48 değerlerinde yanma verimi sırasıyla %92, %90, %81 değerlerini almaktadır.

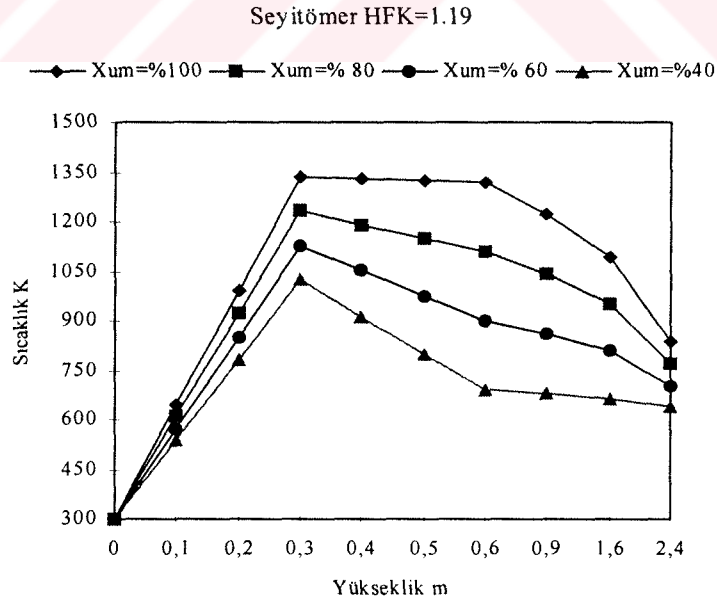
Şekil 7.4'de yataktan sürüklenen taneciklerin geri dönmediği varsayımına dayanarak yanma veriminin, fazla hava ile değişimi görülebilir. O halde, yanma verimini en fazla yakıcıdan sürüklenen kok tanecikleri etkilemektedir. Geliştirilen modelde, yataktan sürüklenen kok tanecikleri için farklı korelasyonlar kullanılabilir.





Şekil 7.4 Yanma Veriminin Fazla Hava ile Değişimi

8-Model, linyitlerin özelliğine bağlı olarak çıkan UM'nin ne kadarının aktif yatakta yandığını tahmin edebilmektedir. Şekil 7.5'de, Model-1'de verilen işletme parametreleri sabit tutulduğunda aktif yatakta yanan UM'nin yüzdesine bağlı olarak yatak sıcaklık dağılımındaki değişimler görülebilir. Seyitömer linyitinde açığa çıkan UM'nin tümü aktif yatakta yanarsa, aktif yatak sıcaklığı 1300 K'e çıkmakta ve SB girişine kadar yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.

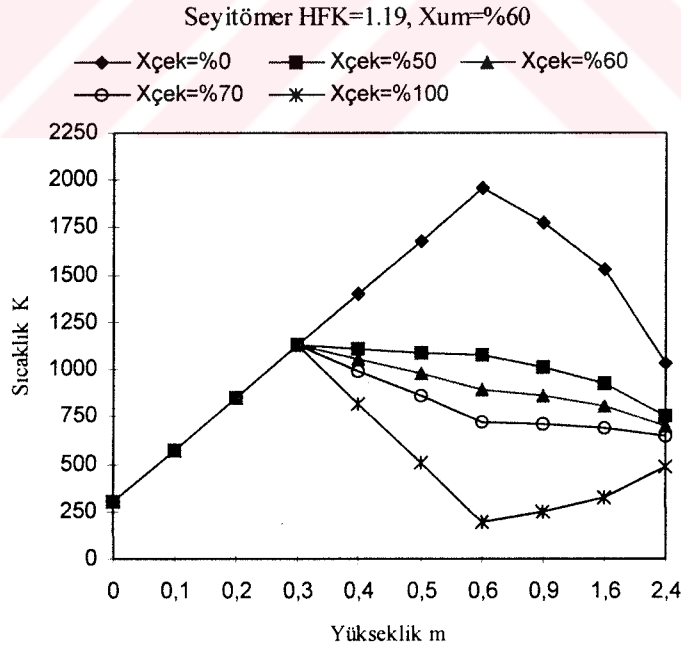


Şekil 7.5 Aktif Yatakta Yanan UM'nin Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Seyitömer linyitinden açığa çıkan UM'nin yaklaşık %70'i aktif yatakta yanarsa, yatakta optimum sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. O halde, SB'de yanan UM kesri, $100 - X_{UM}$ 'den %30 olarak bulunabilir.

9- Şekil 7.6'da Model-1'e uygulanan işletme parametreleri sabit tutulduğunda yakıcıda açığa çıkan ısıнын aktif yatakta çekilen miktarına bağlı olarak yatak sıcaklık dağılımındaki değişimler görülebilir. Ayrıca çıkan ısıнын tümü aktif yaktan çekildiğinde SB girişinde sıcaklık minimuma düşmekte ve SB çıkışına doğru sıcaklık artmaktadır.

Aktif yaktan hiç ısı çekilmediğinde, SB girişinde yatak sıcaklığı maksimum değer almakta ve SB çıkışına doğru mevcut ısı değiştirici yüzeylerden dolayı azalmaktadır. Yakıcıda açığa çıkan ısıнын yarısı aktif yaktan çekildiğinde Seyitömer linyiti için optimum sıcaklık dağılımı elde edilmektedir.



Şekil 7.6 Aktif Yaktan Çekilen Isının Yatak Sıcaklık Dağılımına Etkisi

7.2 Öneriler

Bu çalışmada gerçekleştirilen modelde, kömür taneciklerinin uçucu maddelerini kaybettikten sonra yüzeyde karbon monoksit oluşturan iki tepkime ile yandığı, karbon monoksidin ise yoğun faz gazında oksitlendiği varsayılmıştır. O halde mevcut modelden kabarcık fazında tepkime olmadığı varsayımı kaldırılıp kütle ve enerji denklikleri, kabarcık fazında CO'nin oksitlenme reaksiyonunu içerecek şekilde çözülmüşse sonuçlar olumlu yönde etkilenecektir.

Yanma verimini; en fazla sürüklenen kok tanecikleri etkilemektedir. Bu yüzden aktif yatak yüzeyinden sürüklenen taneciklerin daha ayrıntılı olarak incelenmesinde yarar vardır. Isı değiştirici yüzeylerin yakıcı içerisindeki yerleştirilişi, yakıcıdaki sürüklenmeyi etkilemektedir. Yakıcının özelliklerine bağlı olarak sürüklenme hız sabitlerinin, deneysel çalışmalarla belirlenmesinde yarar vardır. Muhtemelen sürüklenme hız sabitlerinin; ısı değiştirici yüzeylerin yakıcıdaki yerinin fonksiyonu olarak ifade edilmesinde yarar vardır. Sürüklenme hız sabiti ile ilgili literatürde mevcut başka korelasyonlar modele ilade edilerek sonuçları irdelenebilir.

Büzülme hızını veren korelasyonların, kömürlerin kimyasal özellikleri ile yakından ilgisi vardır. Kok taneciklerinin büzülme hızı ise sürüklenme olayında dikkate değer bir etkiye sahiptir. Deneysel çalışmalarla, kömür kimyasal özelliklerinin fonksiyonu olarak büzülme hızını veren yeni ifadelerin geliştirilmesinde yarar vardır.

Türk linyitleri gibi UM/SK oranı yüksek kömürlerde UM'nin yanma yeri ve yüzdesinin belirlenmesi çok önemlidir. Seyitömer linyitinin yakıldığı bu yakıcıda, UM'nin aktif yatak ve SB'de yanma kesri belirlenmeye çalışılmıştır. Diğer linyitlerimiz içinde bu yorumu yapabilmemiz için çok sayıda deneysel veriye ve bu verilerin modele uygulanarak sonuçlarının incelenmesine gereksinim vardır.

Ek 1

Kararlı Rejimde Yatakta Mevcut Tanecik Boyut Dağılımının Modellenmesi

Yatağa beslenen kömür miktarı m_o olsun, elek analizi yaparak yatağa beslenen taneciklerin; boyut ve ağırlık kesrini biliyoruz. Aşağıda çözümü verilen örnekte, yatağa taneciklerin 4 farklı boyut, 4 farklı ağırlık kesrinde beslendiğini kabul ediyoruz. Boyutu en büyük olan taneciğin d_{pmax} yanma zamanı en büyük, boyutu en küçük olan taneciğin d_{pmin} yanma zamanı ise en küçüktür.

Tablo E 1.1’de sırasıyla (en büyükten - en küçük çapa kadar) yatağa beslenen tanecikler ile ilgili veriler görülebilir:

Tablo E 1.1 Yatağa Beslenen Tanecikler İle ilgili Veriler

Tanecik boyut dağılımı (mm)	Beslenen kömürün ağırlık kesri (%)	Kömür besleme debisi (kg/s)	Yanma zamanı (s)
d_{1p}	X_1	$m_{x1,o} = m_o X_1$	t_{1c}
d_{2p}	X_2	$m_{x2,o} = m_o X_2$	t_{2c}
d_{3p}	X_3	$m_{x3,o} = m_o X_3$	t_{3c}
d_{4p}	X_4	$m_{x4,o} = m_o X_4$	t_{4c}

Yatakta mevcut en büyük çaplı kok taneciğinin yanma zamanı t_{cmax} , en küçük çaplı kok taneciğinin yanma zamanı ise t_{cmin} olsun. Yatak içerisindeki kok taneciklerinin kararlı

rejime ulaşıncaya kadar geçirdiği farklı durumlar; yanma zamanlarının birbirine oranı olup adım olarak isimlendirilsin:

$$\text{adım} = t_{c_{\max}} / t_{c_{\min}} \quad (\text{E1.1})$$

Bir adımda geçen zaman, denklik E1.2'den hesaplanabilir:

$$t_{\text{adım}} = t_{c_{\max}} / \text{adım} \quad (\text{E1.2})$$

$t_{\text{adım}}$ zamanında X_1 kesrinde yatağa beslenen kömür miktarı, denklik E1.3'den bulunabilir:

$$m_{X1,\text{adım}} = m_{X1,o} \times t_{\text{adım}} \quad (\text{E1.3})$$

Verilen örnekte yatağın kararlı rejime ulaştığı andaki adım sayısı, adım = 10 kabul edilsin. Tablo E 1.2'de; kararlı rejimde yataktaki tanecik boyut dağılımını bulmak için geliştirilen çözüm yöntemi görülebilir.

Tablo E 1.2 Kararlı Halde Yataкта Mevcut Tanecik Boyut Dağılımının Hesaplanabilmesi İçin Çözüm Yöntemi

adım	d_{1p} için Ağırlık Kesri	d_{2p} için Ağırlık Kesri	d_{3p} için Ağırlık Kesri	d_{4p} için Ağırlık Kesri
1	X_1	X_2	X_3	X_4
2	$2X_1$	$2X_2$	$2X_3$	$2X_4$ $t_{4c}=t_{c_{\min}}$
3	$3X_1$	$3X_2$	$3X_3$	$2X_4$
4	$4X_1$	$4X_2$	$4X_3$	$2X_4$
5	$5X_1$	$5X_2$	$5X_3$ $t_{3c}=t_{c_{\max}-2}$	$2X_4$
6	$6X_1$	$6X_2$ $t_{2c}=t_{c_{\max}-1}$	$5X_3$	$2X_4$
7	$7X_1$	$6X_2$	$5X_3$	$2X_4$
8	$8X_1$	$6X_2$	$5X_3$	$2X_4$
9	$9X_1$	$6X_2$	$5X_3$	$2X_4$
10	$10X_1$ $t_{1c}=t_{c_{\max}}$	$6X_2$	$5X_3$	$2X_4$
11	$10X_1$	$6X_2$	$5X_3$	$2X_4$

Yatağa beslenen toplam kömür miktarı m_o , denklik E1.4'den hesaplanabilir:

$$m_o = m_{X1,o} t_{c_{\max}} + m_{X2,o} t_{c_{\max}} + m_{X3,o} t_{c_{\max}} + m_{X4,o} t_{c_{\max}} \quad (\text{E1.4})$$

d_{1c} boyutunda en büyük kok taneciğinin yanma zamanı t_{cmax} 'tır. En büyük çaplı kok taneciği 10. adımda yanmaya başlar. Bundan sonraki her adımda yatağa beslenen kömürün $m_{X1,adım}$ kadar miktarı yanmaktadır. En küçük boyutlu kok taneciği d_{4c} 'ün yanma zamanı ise t_{cmin} 'dur. 1.adımdan sonraki her adımda yatağa beslenen kömürün $m_{X4,adım}$ kadar miktarı yanmaktadır.

Verilen örnekte yukarıda yapılan varsayımlara göre yatak içerisinde kararlı rejim 11. adımda gerçekleşmektedir.

O halde, kararlı hal koşullarında yataktaki toplam kok miktarı;

$$m_{KHYM} = 10X_1 + 6X_2 + 5X_3 + 2X_4 \quad (E1.5)$$

Kararlı hal koşullarında d_{1c} boyutunda yatakta mevcut kok miktarı;

$$m_{1,KHYM} = \frac{10X_1}{m_{KHYM}} \quad (E1.6)$$

Kararlı halde yatakta mevcut d_{1c} boyutundaki kok taneciklerinin kütle kesri;

$$X_{1,KHYM} = \frac{m_{1,KHYM}}{m_{KHYM}} \quad (E1.7)$$

Yatak kararlı rejime ulaştığında m_{1c} ağırlığındaki mevcut kok tanecik sayısı;

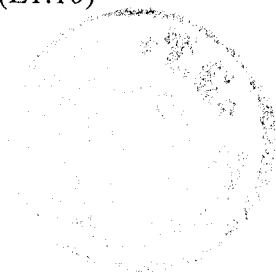
$$N_{1,KHYM} = \frac{m_{1,KHYM}}{m_{1c}} \quad (E1.8)$$

Kararlı hal koşullarında yatakta d_{2c} boyutundaki kok miktarı;

$$m_{2,KHYM} = \frac{6X_2}{m_{KHYM}} \quad (E1.9)$$

Kararlı halde yatakta mevcut d_{2c} boyutundaki kok taneciklerinin kütle kesri;

$$X_{2,KHYM} = \frac{m_{2,KHYM}}{m_{KHYM}} \quad (E1.10)$$



Yatak kararlı rejime ulaştığında m_{2c} ağırlığındaki kok tanecik sayısı;

$$N_{2,KHYM} = \frac{m_{2,KHYM}}{m_{2c}} \quad (E1.11)$$

Kararlı hal koşullarında yatakta d_{3c} boyutundaki kok miktarı;

$$m_{3,KHYM} = \frac{5X_3}{m_{KHYM}} \quad (E1.12)$$

Kararlı halde yatakta mevcut d_{3c} boyutundaki kok taneciklerinin kütle kesri;

$$X_{3,KHYM} = \frac{m_{3,KHYM}}{m_{KHYM}} \quad (E1.13)$$

Yatak kararlı rejime ulaştığında m_{3c} ağırlığındaki mevcut kok tanecik sayısı;

$$N_{3,KHYM} = \frac{m_{3,KHYM}}{m_{3c}} \quad (E1.14)$$

Kararlı hal koşullarında yatakta d_{4c} boyutundaki kok miktarı;

$$m_{4,KHYM} = \frac{2X_4}{m_{KHYM}} \quad (E1.15)$$

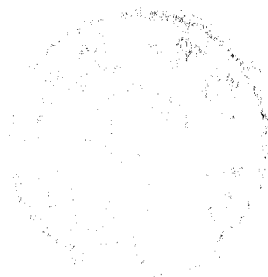
Kararlı halde yatakta mevcut d_{4c} boyutundaki kok taneciklerinin kütle kesri;

$$X_{4,KHYM} = \frac{m_{4,KHYM}}{m_{KHYM}} \quad (E1.16)$$

Yatak kararlı rejime ulaştığında m_{4c} ağırlığındaki mevcut kok tanecik sayısı;

$$N_{4,KHYM} = \frac{m_{4,KHYM}}{m_{4c}} \quad (E1.17)$$

olarak hesaplanabilir.

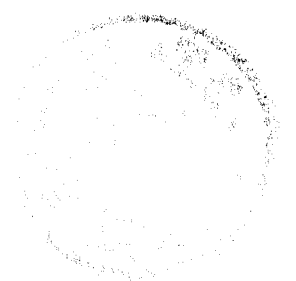


Ek 2

Yanma Havaasının Modellenmesi

Yakıt içerisindeki yanabilir bileşenlerin; havanın oksijeni ile reaksiyona girmesine yanma denir. Bu sırada ısı açığa çıkar. Yakıtlar genellikle yanabilir bileşen olarak karbon hidrojen ve az miktarda kükürt ile yanmayan bileşen olarak azot, su ve kül içerirler. Yanma sürecinde yakıt içerisindeki yanabilir bileşenler tam olarak oksitlenir ve CO_2 , H_2O , SO_2 v.b. ürünlere dönüşürse ve yanma ürünleri içerisinde reaksiyona girmemiş O_2 bulunmazsa yanma tamdır. Yaklaşık 1600°C nin altındaki sıcaklıklarda azot aktif değildir ve yanma süreçlerinde reaksiyona katılmaz.

Bir yanma probleminde, yanma ürünleri ile birlikte teorik hava ve fazla hava miktarının bilinmesi denkliğin sağlıklı kurulmasını sağlayacaktır. Yakıtı yakabilmek için minimum miktarda hava kullanılmışsa bu şekilde gerçekleşen yanmaya “**stokiometrik yanma**” veya “**teorik yanma**” denir. Uygulamalarda eksik yanma enerji kaybını ifade ettiği için teorik hava miktarından daha fazla hava kullanımı gerekir. Oksijenin hidrojene karşı olan afinitesinin karbona karşı olan afinitesinden daha büyük olması; teorik hava miktarından çok az farkeden hava miktarları ile gerçekleşen süreçlerde hidrojenin tam olarak yandığı ve bir miktar karbonun CO_2 yerine CO dönüştüğü varsayılabilir. Teorik hava miktarından çok daha az hava miktarları ile gerçekleştirilen yanma süreçlerinde yanma ürünleri içerisinde CO , H_2 , bazı karbonlu hidrojenler ve karbon bulunur.



E 2.1 Yanma İçin Gerekli Hava Miktarının Hesaplanması

Bölüm 4’de detayları anlatılan enerji dengesinin gerçekçi olabilmesi için kütle dengesinin kurulması gerekmektedir. Kütlenin korunumuna dayanan reaksiyon deklemleri kullanılarak; yakıt içerisindeki yanabilir bileşenler, yakma havası özellikleri ve baca gazı miktarları arasında bazı bağıntılar çıkarılabilmektedir. Element analizi bilinen bir kömürün yanması için gerekli gerçek hava miktarı hesaplanırken kullanılan bağıntılar, Tablo E 2.1’de görülebilir.

Tablo E 2.1 Yanma ile İlgili Bağıntılar

Gerekli O ₂ (kg _{O2} /kg _Y)	$G_{O_2} = \left[\gamma_C/M_C + \gamma_H/(2M_{H_2}) + \gamma_S/M_S - \gamma_O/M_{O_2} \right] M_{O_2}$
Gerekli teorik hava (kg _H /kg _Y)	$m_{th} = G_{O_2}/0.233$
Gerekli gerçek hava (kg _H /kg _Y)	$m_{gh} = m_{th} \lambda$
Baca gazı (kg _{gaz} /kg _Y)	$n_{CO_2} = \gamma_C (M_{CO_2}/M_C)$ $n_{H_2O} = \gamma_{H_2} \left[1 + M_{O_2}/(2M_{H_2}) \right] + \gamma_{H_2O}$ $n_{N_2} = (1 - 0.233) m_{gh} + \gamma_N$ $n_{O_2} = G_{O_2} (\lambda - 1)$ $n_{SO_2} = \gamma_S (M_{SO_2}/M_S)$ $M_{bg} = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} + n_{O_2} + n_{SO_2}$
Yanma ürünlerinin ort. mol ağırlığı (kg/kmol)	$M_{ort} = \frac{[n_{CO_2} M_{CO_2} + n_{H_2O} M_{H_2O} + n_{N_2} M_{N_2} + n_{O_2} M_{O_2} + n_{SO_2} M_{SO_2}]}{M_{dm}}$
Yanma ürünlerinin ort. yoğunluğu (kg/m ³)	$\rho_y = M_{ort} \cdot 1.293 \times 273.15 / (M_h T_y)$

E 2.2 Yanma Havaasının Yatak İçerisinde Modellenmesi

Bir yanma probleminde; yanma ürünleri ile birlikte teorik hava ve fazla O_2 miktarının bilinmesi gerekmektedir.

$$\text{Fazla hava oranı} = \lambda = 100 \frac{\text{fazla hava}}{\text{gerekli hava}} = 100 \frac{\text{fazla } O_2 / 0.21}{\text{gerekli } O_2 / 0.21} \quad (E2.1)$$

Yanma süreçlerinin büyük bir bölümünde gerekli oksijen havadan alınır ve havanın hacımsal olarak %79 azot ve %21 oksijenden oluştuğu varsayılır. Yukarıdaki denklik aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir:

$$\lambda = 100 \frac{\text{Yatağa giren } O_2 - \text{Gerekli } O_2}{\text{Gerekli } O_2} \quad (E2.2)$$

Sonuç olarak;

$$\text{Yatağa giren } O_2 = \text{Yanmanın tamamlanması için gerekli } O_2 + \text{fazla } O_2 \quad (E2.3)$$

ifade E2.3'den oksijen ve buna bağlı olarak havanın kütle dengesi çıkarılabilir.

Yatağa giren toplam hava miktarı denklik E2.4'den hesaplanabilir:

$$m_{h_o} = m_{gh} \times m_o \quad (E2.4)$$

Denklem E2.4'de görülen m_{gh} ; birim miktarda yakıtın yanması için gerekli gerçek hava miktarı olup Tablo E2.1'deki denklikler kullanılarak hesaplanabilir. Kararlı rejime ulaşmış bir yatağa beslenen kömür miktarı ise m_o 'dır.

Yanmanın sağlanması için yatağa giren gerekli miktarda hava iki ana akıma ayrılır. Birincisi taneciklerden serbest kabarcık akımı, diğeri yoğun fazda katı tanecikler arasında yükselen intersitial gaz akımıdır ve denklik E2.5 ile ifade edilebilir:

$$m_{h_o} = m_{h_{o,b}} + m_{h_{o,e}} \quad (E2.5)$$

Kararlı rejimde yatakta mevcut külsüz kok miktarı;

$$\dot{m}_{KHYM} = m_{KHYM} - (m_{KHYM} \times \gamma_A) \quad (E2.6)$$

denklik E2.6'den hesaplanabilir.

Akışkanlaştırıcı gaz olarak gönderilen havanın bir kısmı aktif yataktaki kompartmanlarda homojen dağılmış kok tanecikleri tarafından tüketilirken bir kısmında tüm yatağa homojen olarak dağılmış olan UM tarafından tüketilmektedir. Yanma sırasında açığa çıkan baca gazları yataktan ısı taşıyacaktır.

Kararlı halde yatakta mevcut kok tarafından tüketilen hava miktarı denklem E2.7'den hesaplanabilir:

$$m_{hC} = \left\{ \left(3.76 \frac{\dot{m}_{KHYM}}{M_C} \right) + \frac{\dot{m}_{KHYM}}{M_C} \right\} M_H \quad (E2.7)$$

Uçucu madde tarafından tüketilen toplam hava miktarı;

$$m_{hUM} = (m_{ho} - m_{hC}) \quad (E2.8)$$

denklem E2.8'den bulunabilir

Aktif yatakta UM tarafından tüketilen hava;

$$m_{hAY} = m_{hUM} \times X_{UM} \quad (E2.9)$$

denklem E2.9'dan bulunabilir. Denklik E2.9'da görülen X_{UM} ; UM'nin aktif yatakta açığa çıkma kesridir. Geliştirilen modelde işletme parametresi olarak kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir.

Serbest bölgede UM tarafından tüketilen hava:

$$m_{hSB} = m_{hUM} - m_{hAY} \quad (E2.10)$$

Aktif yatakta hem kok hemde UM tarafından tüketilen toplam hava;

$$m_{tAY} = m_{hkok} + m_{hAY} \quad (E2.11)$$

denklik E2.11'den hesaplanabilir.

Aktif yatakta mevcut kompartman sayısı; Bölüm 4'de 4.28 nolu denklemden bulunarak n ile ifade edilmişti. Aktif yatakta herhangi bir kompartmanda KHYM kok tanecikleri ve UM tarafından tüketilen hava miktarı:

$$m_{h(n)} = \frac{m_{tAY}}{n} \quad (E2.12)$$

Aktif yataktaki her bir kompartmanda eşit miktarda hava tüketildiği varsayımına dayanarak;

$$m_{h(1)} = m_{h(n)} = m_{h(n+1)} \quad (E2.13)$$

denklem E2.13 yazılabilir.

Bir kompartmandan diğerine giren net hava miktarı; her bir kompartmanda tüketilen hava miktarı $m_{h(n)}$ ile yatağa beslenen toplam hava miktarının farkı alınarak bulunabilir:

$$m_{hNET(n)} = m_{ho} - m_{h(n)} \quad (E2.14)$$

Ek 3

Termodinamik Özellikler

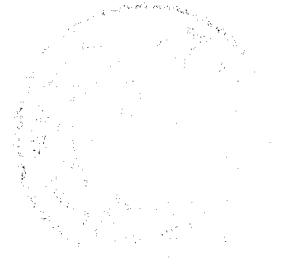
Kükürt içerikleri dünya ortalamalarının çok üzerinde olan linyitlerimizin, konvansiyonel yakıcı ve kazanlarda yakılması SO₂ emisyonu açısından hava kirliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Linyitlerin hava kirliliği meydana getirmeksizin yüksek verimle yakılmasını sağlayan AYY'lerin bütün tiplerinin en önemli avantajlarından birisi, yanma sonucu çıkan SO₂ gazının yanma esnasında yatağa kireçtaşı veya dolomit ekleyerek önemli ölçüde tutulmasının sağlanabilmesidir. Kazana toz halinde enjekte edilen kireçtaşı ve/veya dolomit yanma gazları içinde kalsiyum oksite (CaO) ve magnezyum oksite (MgO) dönüşür ve SO₂ ile reaksiyona girerek sülfatlı birleşikleri meydana getirirler.

Akışkan yataklı yakıcıda kömürün yanması sonucu oluşan SO₂'nin tutulmasında kalsinasyon ve sülfatlaşma reaksiyonları önemli bir rol oynamaktadır. Termodinamik açıdan düşük sıcaklıklar, CaSO₄ oluşmasını olumlu yönde etkilemektedir. Deneysel veriler; bu reaksiyon için optimum sıcaklığın 825°C civarında olduğunu, 900°C'den yüksek sıcaklıklarda ise SO₂'nin tutulma verimliliğinin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir.

Kömürdeki kükürt, akışkanlaştırıcı gazın O₂'si ile birleşerek SO₂ oluşturur:



Yatakta üretilen SO₂'yi tutmak için yatağa CaCO₃ ilave edilir. İlave edilen CaCO₃ yatakta aşağıdaki reaksiyonu takip ederek kalsine olur.





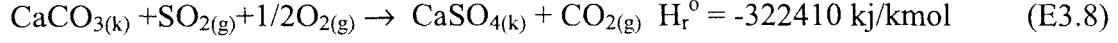
Yataktaki kalsiyum oksit SO_2 'yi absorbe ederek kalsiyum sülfata dönüşür. Akışkan yataklı yakıcıda; CaO ile SO_2 reaksiyonu ve kömür yanması oldukça kompleks bir işlemdir. Yatakta SO_2 tutumunu etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar; Ca/S oranı, yatak sıcaklığı, işletme hızı, minimum akışkanlaştırma hızı, kireçtaşı-dolomit özellikleri, yatak derinliği, kömürün özellikleri, taneciklerin çapı, yatağın oksidasyon ve redüksiyon özellikleri olarak sıralanabilir.



Tablo E 3.1'de bazı maddelerin 25°C 'de yanma ve oluşum entalpileri görülmektedir. Akışkan yataklı yakıcıda meydana geldiği kabul edilen diğer temel reaksiyonlar ve oluşum entalpileri, Tablo E 3.1 yardımıyla hesaplanmış olup aşağıda verilmektedir.

Tablo E3.1 Bazı Maddelerin 25°C 'de Yanma ve Oluşum Entalpileri (Himmelblau 1989)

Madde	Formül	Mol ağırlığı (kg/kmol)	Durum	Oluşum entalpisi (kJ/kmol)	Yanma entalpisi (kJ/kmol)
Karbonmonoksit	CO	28.01	Gaz	110510	283000
Karbondioksit	CO_2	44.01	Gaz	393510	-
Karbon	C	12.01	Katı	0	393510
Hidrojen	H_2	2.016	Gaz	0	285840
Azotmonoksit	NO	30.01	Gaz	-90374	-
Azotdioksit	NO_2	46.01	Gaz	-33850	-
Azotoksit	N_2O	44.02	Gaz	-81550	-
Metan	CH_4	16.041	Gaz	74840	890400
Kalsiyum karbonat	CaCO_3	100.09	Katı	1206900	-
Kalsiyum oksit	CaO	56.08	Katı	635600	-
Kalsiyum sülfat	CaSO_4	136.15	katı	1432700	-
Kükürtdioksit	SO_2	64.066	gaz	296900	-
Su	H_2O	18.016	sıvı	285840	-
Subuharı	H_2O	18.016	gaz	241826	-



Kireçtaşı ile yataktaki SO_2 'nin önlenmesinde, denklem E3.2 ve E3.3 ile gösterilen kimyasal tepkimelerin meydana geldiği kabul edilmiştir. Kireçtaşının kalsinasyonu için 177790 kJ/kmol ısıya gereksinimi olduğu denklem E3.2'de görülmektedir. Ortamdaki SO_2 'nin CaO ile birleşerek $CaSO_4$ 'e dönüşmesi ise ısı açığa çıkaran bir kimyasal reaksiyon olup ortam sıcaklığında gerçekleşen tepkimede 500200 kJ/kmol ısı enerji açığa çıkmaktadır.

Denklem E3.9'da, genel olarak reaksiyon ısısının hesaplanması; maddenin özgül ısısı ve oluşum entalpisi kullanılarak gösterilmiştir:

$$\Delta H = \Delta H_r^0 + \sum_{i=1}^{Ty} \int_{T_0}^{T_y} n_i C_{p_i} dt \quad (E3.9)$$

Yatak sıcaklığında kalsinasyon için gereksinim duyulan ısı, denklem E3.10'dan hesaplanabilir:

$$\Delta H = 177790 + \sum_{i=1}^{Ty} \int_{T_0}^{T_y} n_i C_{p_i} dt \quad (E3.10)$$

Denklem E3.10'daki i indisi sırasıyla CaO, CO_2 ve $CaCO_3$ 'ü ifade etmekte ve açık olarak yazıldığında;

$$\Delta H_{CaCO_3} = 177790 + \int_{T_0}^{T_y} (n_{CaO} C_{p_{CaO}} + n_{CO_2} C_{p_{CO_2}} - n_{CaCO_3} C_{p_{CaCO_3}}) dt \quad (E3.11)$$

denklik E3.11 elde edilmektedir.

Yatak sıcaklığında sülfatlaşma sonucu ortaya çıkan ısı genel olarak;

$$\Delta H = -500200 + \sum_{i=1}^{Ty} \int_{T_0}^{T_y} n_i C_{p_i} dt \quad (E3.12)$$

denklik E3.12'de ifade edilebilir.

Denklem E3.12'de i indisi CaSO_4 , CaO , SO_2 , ve O_2 'yi göstermektedir ve denklik E3.13'de daha açık olarak ifade edilmiştir:

$$\Delta H_{\text{CaSO}_4} = -500200 + \int_{T_0}^{T_y} (n_{\text{CaSO}_4} C_{p_{\text{CaSO}_4}} - n_{\text{CaO}} C_{p_{\text{CaO}}} - n_{\text{SO}_2} C_{p_{\text{SO}_2}} - \frac{1}{2} n_{\text{O}_2} C_{p_{\text{O}_2}}) dt \quad (E3.13)$$

Tablo E.3.2'de sabit basınçta bazı gazların özgül ısılarını hesaplamada kullanılan korelasyonlar görülebilir.

Tablo E 3.2 Bazı Maddelerin Özgül Isıları (Van Ness et al. 1987)

Madde	Sabit basınçta özgül ısı denklemi (kJ/kmol K)	Sıcaklık aralığı K
Karbonmonoksit	$C_p = R(3.376 + 5.570 \cdot 10^{-4}T - 3.100 \cdot 10^{-3}T^2)$	298 - 2500
Karbondioksit	$C_p = R(5.457 + 1.045 \cdot 10^{-3}T - 1.157 \cdot 10^{-5}T^2)$	298 - 2000
Oksijen	$C_p = R(3.639 + 5.060 \cdot 10^{-4}T - 2.270 \cdot 10^{-4}T^2)$	298 - 2000
Hidrojen	$C_p = R(3.249 + 4.220 \cdot 10^{-4}T + 8.300 \cdot 10^{-3}T^2)$	298 - 3000
Azot	$C_p = R(3.280 + 5.930 \cdot 10^{-4}T + 4.000 \cdot 10^{-3}T^2)$	298 - 2000
Azotmonoksit	$C_p = R(3.387 + 6.290 \cdot 10^{-4}T + 1.400 \cdot 10^{-3}T^2)$	298 - 2000
Su buharı	$C_p = R(3.470 + 1.450 \cdot 10^{-3}T + 1.210 \cdot 10^{-4}T^2)$	298 - 2000
Kükürtdioksit	$C_p = R(5.699 + 8.010 \cdot 10^{-4}T - 1.015 \cdot 10^{-5}T^2)$	298 - 2000
Metan	$C_p = R(1.702 + 9.081 \cdot 10^{-3}T - 2.164 \cdot 10^{-6}T^2)$	298 - 1500
Kalsiyum karbonat	$C_p = R(12.572 + 2.637 \cdot 10^{-3}T - 3.120 \cdot 10^{-5}T^2)$	298 - 1200
Kalsiyum monoksit	$C_p = R(6.104 + 4.430 \cdot 10^{-4}T - 1.047 \cdot 10^{-5}T^2)$	298 - 2000

Yatağa beslenen kömürün kimyasal özelliklerine bağlı olarak açığa çıkan SO_2 'nin giderilmesi yatağa ilave edilen CaCO_3 miktarının (m_{CaCO_3}) belirlenmesini gerektirir. Bunun için öncelikle Ca/S mol oranı ve kullanılan kireçtaşı'nın kompozisyonu bilinmelidir. Yanma sonunda açığa çıkan SO_2 miktarı; **Ek 2**'de tablo E2.1'de verilen denkliğin yardımıyla $\text{kmol}_{\text{SO}_2}/\text{kg}_y$ bazında hesaplanabilir:

$$n_{\text{SO}_2} = \frac{\gamma_s \eta_s}{M_s} \quad (\text{E 3.14})$$

O halde, birim miktarda kömür için yatağa beslenmesi gereken m_{CaCO_3} miktarı; denklik E3.15'den hesaplanabilir:

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{\text{Ca}}{S} n_{\text{SO}_2} \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{\gamma_{\text{CaCO}_3}} \quad (\text{E 3.15})$$

Yukarıdaki denklikte görülen γ_{CaCO_3} ; kireçtaşı'ndaki kalsiyum karbonat kesridir ve kireçtaşı'nın kompozisyonuna bağlı olarak değişir.

n. kompartmanda mevcut kireçtaşı miktarı, yatağa beslenen kömür miktarına bağlı olarak aşağıdaki ifadede bulunabilir:

$$m_{\text{CaCO}_3(n)} = \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{n} m_{o(n)} \quad (\text{E 3.16})$$

Yatağa birim zamanda beslenen kireçtaşı miktarı, denklem E3.17'den hesaplanabilir:

$$\dot{m}_{\text{CaCO}_3(n)} = m_{\text{CaCO}_3(n)} \dot{m}_{o(n)} \quad (\text{E3.17})$$

Yukarıda E3.3'de ki reaksiyonda görüldüğü gibi; SO_2 gazının mol oranına bağlı olarak açığa çıkan kalsiyum sülfat miktarı mol bazında, denklik E3.18'de ifade edilmektedir:

$$n_{\text{SO}_2} = n_{\text{CaSO}_4} \quad (\text{E3.18})$$

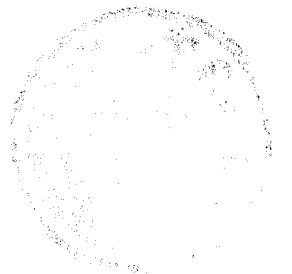
Sülfatlaşma reaksiyonu ile yatakta açığa çıkan kalsiyum sülfat miktarı m_{CaSO_4} miktarı ise denklik E3.19'dan hesaplanabilir:

$$m_{\text{CaSO}_4} = n_{\text{CaSO}_4} M_{\text{CaSO}_4} \quad (\text{E3.19})$$

n. kompartmanda sülfatlaşma reaksiyonu ile açığa çıkan kalsiyum sülfat miktarı yatağa beslenen kömür miktarına bağlı olarak;

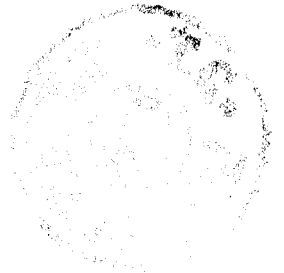
$$m_{\text{CaSO}_4(n)} = \frac{m_{\text{CaSO}_4}}{n} m_{o(n)} \quad (\text{E3.20})$$

denklem E3.20'dan hesaplanabilir.

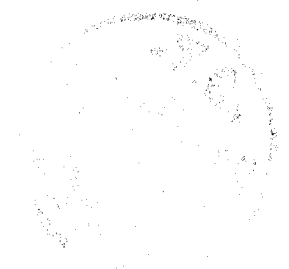


Kaynaklar

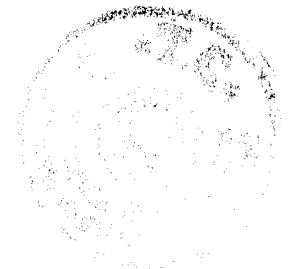
- 1) **Adanez, J., Abanades, J.C., Labiano, F.G., de Diego, L.F.**, 1992. Carbon Efficiency in Atmospheric Fluidized Bed Combustion of Lignites, *Fuel*: 417-424.
- 2) **Agarwal, P.K., Wildegger-Gaissmaier, A.E.**, 1987. Combustion of Coal Volatiles in Gas Fluidized Beds, *Chem. Eng. Research and Design*: 431-441.
- 3) **Agarwal, P.K., El-Mitchell, M.A.**, 1988. Transport Phenomena in Multi-Particle Systems III. Active Particle Mass Transfer in Fluidized Beds of Inert Particles, *Chemical Eng. Science*: 2511-2521.
- 4) **Akçura, F., Gerger, M.**, 1982. Başlıca Türk Kömürlerinin Özellikleri, Maden Tetkik Araştırma Enstitüsü Yayını, Ankara.
- 5) **Arıkol, M., Kınayyigit, G., Özdoğan, S., Uygur, T. S., Vural, H.**, 1984. Coal Transportation And Utilization Technologies, MAE Yayını, Gebze, Kocaeli.
- 6) **Arıkol, M., Özdoğan, S.**, 1991. Physical Properties of Coal, Coal, Edited by Kural, O., Türkiye : 75-89.
- 7) **Arısoy, U., Onat, K., Genceli, O.F.**, 1988. Buhar Kazanlarının Isı Hesapları, *Denklem Matbaası*.
- 8) **Arısoy, U.**, 1991. Kömürlerin Yakılması, Kömür, Editör Kural, O., İstanbul: 357-401.
- 9) **Atakül, H.**, 1985. Çan Bölgesi Linyitlerinin Akışkan Yatakta Yanma Sürecindeki Davranımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- 10) **Atakül, H., Tolay, M., Ekinci, E., Teoman, Y.**, 1986. Akışkan Yataklı Yakıcılarda Kimyasal Ortam Olarak Serbest Bölge, *Isı Bilimi Ve Tekniği Dergisi*, Cilt 9, sayı 1: 21-29.
- 11) **Atakül, H.**, 1994. Fluidized Bed Combustion Research in Turkey, *Energy Sources*, vol 15:1-15.



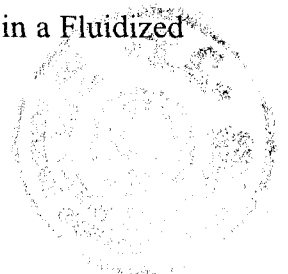
- 12) **Avedesian, M.M., Davidson, J.F.**, 1973. Combustion of Carbon Particles in A Fluidized Bed, Trans. Instn. Chem. Engineering: 121-131.
- 13) **Baron, R.E., Beer, J.M., Borghi, G., Hodges, J.C., Sarofim, A.F.**, 1977. A Model of Coal Combustion in Fluidized Bed Combustors, The Proc. of the 5th Int. Conf. on FBC.: 437-453.
- 14) **Baron, R.E., Hodges, J.L., Sarofim, A.F.**, 1978. Mathematical Model for Predicting Efficiency of Fluidized Bed Steam Generators, AIChE Symp. Serisi: 120-125.
- 15) **Bartok, W. et al.**, 1988, Combustion: Applications and Design Considerations, Chemical Engineering Progress: 54-71.
- 16) **Bilge, D.**, 1988. Akışkan Yatakta Uçucu Madde Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Y.T.Ü.
- 17) **Borghi, G.**, 1985. A Model of Coal Devolatilization And Combustion in Fluidized Beds, Combustion and Flame: 1-16.
- 18) **Botterill, J.S.M.**, 1975. Fluid-Bed Heat Transfer, Academic Press. New York.
- 19) **Bukur, D.B., Amundson, N.R.**, 1981. Fluidized Bed Char Combustion Diffusion Limited Models, Chem. Eng. Science: 1239-1256.
- 20) **Campbell, E.K., Davidson, J.F.**, 1975. The Combustion of Coal in Fluidized Beds, Institute of Fuel Symp. Series 1. Fluidized Combustion: Vol 1, A2.1-A2.9.
- 21) **Chen, L.H., Tan-Ping., Saxena, S.C.**, 1977. Mathematical Modelling of Coal Combustion in Fluidized Beds with Sulfur Emission Control by Limestone or Dolomite, Fuel: 401-413.
- 22) **Congalidis, J.P., Georgakis, C.**, 1981. Multiplicity Patterns in Atmospheric FB Coal Combustors, Chem. Eng. Science: 1529-1546.
- 23) **Cranfield, R.R., Geldart, D.**, 1974. Large Particle Fluidization, Chem Eng. Sci.: 935-947.
- 24) **Davidson, J.F., Harrison, D.**, 1963. Fluidized Particles, Cambridge University Press.
- 25) **Davidson, J.F., Clift, R., Harrison, D.**, 1985. Fluidization (second edition), Academic Press, London, UK.



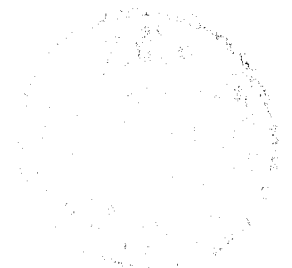
- 26) **De Souza-Santos, M.L.**, 1989. Comprehensive Modelling And Simulation of Fluidized Bed Boilers And Gasifiers, Fuel: 1507-1521.
- 27) **Dry, R.J., La Nauze, R.D.**, 1990. Combustion in Fluidized Bed, Chem. Eng. Progress: 31-47.
- 28) **El-Halwagi, M.M., El-Rifai, M.A.**, 1988. Mathematical Modeling of Catalytic FB Reactors, 1. The Multistage Three-Phase Model, Chemical Engineering Science: 2477-2486.
- 29) **Ekinci, E.**, 1981. Akışkan Yatakta Avgamasya Asfaltinin Yakılması, Doçentlik Tezi, İ.T.Ü.
- 30) **Ekinci, E., Tolay, M., Kadioğlu, E.**, 1983. Akışkan Yatkta Uçucu Davranımı. 1. Yanma Sempozyumu Bildiri Kitabı, Uludağ Üniversitesi Basımevi: 63-73.
- 31) **Enerji Raporu**, 1993. Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara.
- 32) **Eskin, N.**, 1990. Akışkan Yataklı Kömür Yakıcısı Modeli ve İkinci Kanun Analizi, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- 33) **Fee, D.C., Myles, K.M.**, 1984. An Analytical Model for Freeboard and in-bed Limestone Sulfation in Fluidized Bed Coal Combustor, Powder Technology: 731-737.
- 34) **Fung, A.S., Hamdullahpur, F.**, 1993a. Effect of Bubble Coalescence on Entrainment in Gas Fluidized Beds, Powder Technology: 251-265.
- 35) **Fung, A.S., Hamdullahpur, F.**, 1993b. A Gas And Particle Flow Model in The Freeboard of A Fluidized Bed Based on Bubble Coalescence, Powder Technology: 121-133.
- 36) **Geldart, D.**, 1986. Gas Fluidization Technology, John Willey & Sons Ltd.
- 37) **Gilcksmann, L.R., Decker, N.A.**, 1980. Design Relationships for Predicting Heat Transfer to The Bundles in Fluidized Bed Combustors, Proc. 6th Int. Conf. On FBC: 1115-1130.
- 38) **Gordon, A.L., Amundson, N.R.**, 1976. Modelling of Fluidized Bed Reactors-IV Combustion of Carbon Particles, Chem. Eng. Science: 1163-1178.



- 39) **Gordon, A.L., Caram, H.S., Amundson, N.R.**, 1978. Modelling of Fluidized Bed Reactors-V; Combustion of Carbon Particles An Extension, Chem. Eng. Science: 713-722.
- 40) **Hamdullahpur, F., Uğursal, V.,I., Guangxi, Y.**, 1994. Fluidized Bed Combustion, Coal, Edited O., Kural, Türkiye: 279-290.
- 41) **Himmelblau, D.M.**, 1989. Basic Principles And Calculations in Chemical Engineering, Prentice-Hall International Inc. 5th Edition.
- 42) **Ho, T.C., Kirkpatrick, M., Hopper, J.R.**, 1989. Mixing And Combustion in A Shallow Coal Limestone Fluidized Bed Combustor, The Can. J. of Chem. Engineering: 207-217.
- 43) **Horio, M., Wen, C.Y.**, 1978. Simulation of Fluidized Bed Combustors Part I. Combustion Efficiency and Temperature Profiles, AIChE Symp. Series.:101-111.
- 44) **Howard, J.R.**, Editor, 1983. Fluidized Bed Combustion and Applications, London.
- 45) **Kırmızıgül, Ü.**, 1989. Experimental Investigation of An Atmospheric Fluidized Bed Coal Combustors, MS in Chemical Eng., ODTÜ.
- 46) **Köse, R.**, 1995. Akışkan Yatakta Yanmanın Modellenmesi Ve Türk Linyitlerine Uygulanması, Doktora tezi, Y.T.Ü.
- 47) **Köse, R., Mançuhan, E., Özil, E.**, 1995. Akışkan Yatakta Yanma Verimini Etkileyen Parametreler. 4. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Bursa.
- 48) **Kunii, D., Levenspiel, O.**, 1977. Fluidization Engineering, Huntington, New York
- 49) **La Nauze, R.D.**, 1982, Fluidized Bed Combustors, Fuel: 771-774
- 50) **La Nauze, R.D.**, 1985. Fundamentals of Coal Combustion in Fluidized Beds, Chemical Engineering Research and Design: 3-33
- 51) **Lee, Y.Y.**, 1989. A Coal Combustion Model for Circulating Fluidized Bed Boilers, Proc. 10th Int. Conf. on Fluidized Bed, San Francisco: 753-764.
- 52) **Martens, F.J.A.**, 1984. Freeboard Phenomena in A Fluidized Bed Coal Combustor, Technische Hogeschool, Delft, The Netherlands.
- 53) **Meadcroft, D.,B.**, 1983, Fluidized Bed Combustion, England.
- 54) **Merrick, D., Highley.**, 1974. Particles Size Reduction and Elutriation in a Fluidized Bed Process, AIChE Symposium Series. 366-374



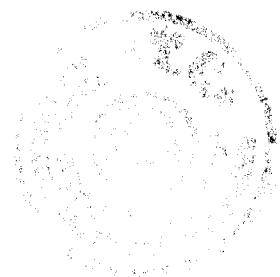
- 55) **Mori, S., Wen, C.Y.**, 1975. Estimation of Bubble Diameter in Gaseous Fluidized Beds, *AIChE Journal*: 109-115.
- 56) **Neogi, D., et.al.**, 1986. Study of Coal Gasification in an Experimental Fluidized Bed Reactor, *AIChE Journal (Chem. Eng. Res. and Development)*: 17-28
- 57) **Oymak, O.**, 1991. Simulation of Atmospheric Fluidized Bed Combustion Including In-situ Desulfurization, M. S. in Chemical Eng. O.D.T.Ü
- 58) **Park, D., Levenpiel, O., Fitzgerald, T.J.**, 1980. A Comparison of The Plume Model with Currently Used Models for AFBC, *Chem. Eng. Science*: 295-301
- 59) **Park, D., Levenspiel, O., Fitzgerald, T.J.**, 1981. Plume Model for Large Particle Fluidized Bed Combustors, *Fuel*: 295-306.
- 60) **Pemberton, S.T., Davidson, J.F.**, 1986a. Elutriation from Fluidized Beds-I Particle Ejection from The Dense Bed into The Freeboard, *Chem. Eng. Science*: 243-251.
- 61) **Pemberton, S.T., Davidson, J.F.**, 1986b. Elutriation From Fluidized Beds-II Disengagement of Particles from The Gas Into The Freeboard, *Chem. Eng. Science*: 253-262.
- 62) **Prins, W.**, 1989. Devolutions and Ignition of Coal Particles in a Two-Dimensional Fluidized Bed, *Combustion and Flame*: 57-79.
- 63) **Rajan, R., Kristian R., Wen C.Y.**, 1978. Simulation of Fluidized Bed Combustors, part 2 Coal Devolatilization and Sulfur Oxides Retention, *AIChE Sym. Series*: 112-119.
- 64) **Rajan, R.R., Wen, C.Y.**, 1980. A Comprehensive Model for Fluidized Bed Coal Combustors, *AIChE Journal*: 642-655
- 65) **Roostaazat, R., Selçuk, N., Onal, I.**, 1989. A Literature Review on Mathematical Modelling of Atmospheric Fluidized Bed Combustion Including Freeboard Section, *Isı Bilimi Ve Tekniği Dergisi, Cilt 12, Sayı 3*: 17-24.
- 66) **Ross, I.B., Davidson, J.F.**, 1982. The Combustion of Carbon Particles in A Fluidized Bed, *Trans IChemE*: 108-114
- 67) **Türk Kömürlerinin Enerji Planlamasındaki Yeri ve Uygun Enerji Üretim Teknolojilerinin Belirlenmesi**, 1983: MESAB Raporu: 19-21



- 68) **Sarofim, A.F., Beer, J.M.**, 1978. Modelling of Fluidized Bed Combustion, Proc. 17th Sym.(Int) on combustion/The combustion Institute, Pittsburg: 189-204
- 69) **Saxena, S.C., Rehmat, A.**, 1980. A Mathematical Model for Char Combustion in A Fluidized Bed, Proc. 6th Int. Conf. Fluidized bed combustion: 1138-1149
- 70) **Saxena, S.,C.**, 1988. Mathematics Models For Fluidized Bed Coal Combustion And Sulphur Retention, Energy (Oxford): 557-607
- 71) **Selçuk, N., Pekyılmaz, A.**, 1982. Akışkan Yataklı Kömür Yakıcılarının Modellenmesi, Isı bilimi ve tekniği dergisi, Cilt 5, sayı 2: 35-41
- 72) **Selçuk, N., Pekyılmaz, A.**, 1983. Akışkan Yataklı Kömür Yakıcılarının Modellenmesi, Reaksiyon Hız Ifadesinin Etkisi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt 6, sayı 3: 39-43.
- 73) **Smith, J.M., Van Ness, H.C.**, 1987. Introduction To Chemical Engineering Thermodynamics, McGraw-Hill International Editions.
- 74) **Stubington, J.F., Sumaryono**, 1994. Release of Volatiles From Large Coal Particles In A Hot Fluidized Bed, Fuel: 1013-1019.
- 75) **Stubington, J.B., Chan, S.W.**, 1990. A Model For Volatiles Release Into A Bubbling Fluidized Bed Combustor, AIChE Journal: 75-85
- 76) **Tabis, B., Essekkat, A.**, 1992. Three-Phase Multi-Compartment Model For Fluidized Bed Catalytic Reactors; Autothermicity And Multiplicity of Steady States, Chem.Eng.Science: 407-419
- 77) **Teoman, Y., Tolay, M., Atakül, H., Ekinçi, E.**, 1986. Akışkan Yataklarda Isı Aktarımı Açısından Serbest Bölgenin Önemi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt 9, Sayı: 33-37
- 78) **Tung, S.E., Chaung, T.Z., Sharma, P.K., Hodges, J., Louis, J.F.**, 1980. Char Combustion In The Freeboard Region, Proc. 6th Int. Conf. on FBC : 1131-1137
- 79) **Urkan M.K., Arıkol, M., Vural H.**, 1985. Akışkan Yatakta Uçucu Madde Davranışının İncelenmesi, Isı Bilimi Ve Tekniği 5. Kongresi Bildiri Kitabı, Cilt 2: 669-678



- 80) **Urkan, K.**, 1990. Akışkan Yatakta Türk Kömürlerinin Yakılması Ve Uçucu Madde Yanma Davranışlarının Mevcut Modellerle Karşılaştırılarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Y.T.Ü.
- 81) **Uysal, B., Z.**, 1991. Akışkan Yataklı Yakma Sistemleri, Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü, 1. Ulusal Sempozyumu, Ankara: 100-126
- 82) **Vural, H.**, 1989. Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisindeki Gelişmeler, İkinci Yanma Sempozyumu, İTÜ, İstanbul: 33-42
- 83) **Walsh, P., Chaung, T.Z., Dutta, A., Beer, J.M., Sarofim, A.F.**, 1984. Nitric Oxide Reduction in the Freeboard of A Fluidized Bed Combustion, 19th Int. Conf. on Combustion, The Combustion Institute: 1281-1289.
- 84) **Wen, C.Y., Chen, L.H.**, 1980. A Fluidized Bed Combustor Freeboard Model. Proc. 6th Int. Conf. On FBC: 1115-1130.
- 85) **Yagi, S., Kunii, D.**, 1955. Combustion of Solids ,5th Sym. (Int.) On Combustion: 231-244
- 86) **Yates, J.G.**, 1983. Fundamentals Of Fluidized Bed Chemical Processes, UK.



Özgeçmiş

Adı Soyadı : Ebru MANÇUHAN
Doğum Tarihi : 14 temmuz 1960
Doğum Yeri : Balıkesir
Medeni Hali : Evli, tek çocuklu
Yabancı Dili : İngilizce
Adres : Marmara Üniversitesi, Yeni Teknolojileri Ar-Ge Merkezi
Göztepe-İSTANBUL

Öğrenim Durumu

1989 - :Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora
1984 -1986 :Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans
1977 - 1981 :Uludağ Üniversitesi Balıkesir Mühendislik Fakültesi Makina
Bölümü
1974 -1977 :Muharrem Hasbi Koray Lisesi, BALIKESİR

İş Durumu

1989 - :Marmara Üniversitesi Yeni Teknolojileri Ar-Ge Merkezinde
Araştırma Görevlisi
1986-1988 :T.E.K Şebeke Tesis Grup Müdürlüğü, İSTANBUL
1982 - 1986 :Uludağ Üniversitesi Balıkesir Mühendislik Fakültesi, Araştırma
görevlisi

Çalıştığı Projeler

1994 :Asil Çelik A.Ş Orhangazi Tesislerinin Enerji Optimizasyonu
1993 :Marmara Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenen
“Akışkan Yataklı Yakıcı Dizaynı” isimli araştırma projesi

1989

Marmara Üniversitesi Göztepe Kampüsünde “Marsol Güneş Santrali” araştırma projesi

Yayınları

- 1.) **MANÇUHAN (CANBULAT), E.**, Gaz Yakıtlı Motorların Özellikleri, Klasik Motorlarla Performans ve Ekonomik Açıdan Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi
- 2.) **ÖZİL, E., BİLGE, M., MANÇUHAN, E.**, Makina Mühendisliğinin Türkiye’nin İnsan Gücü Planlamasındaki Yeri ve Önemi, Birinci Ulusal Makina Mühendisliği Eğitimi Sempozyumu, 25-27 Ekim, 1989, İSTANBUL
- 3.) **ÖZİL, E., MANÇUHAN, E., GÖK, G.**, Bir Akü Kuruluşunda Üretim ve Emisyon İlişkileri Üzerinde Çalışmalar, Mutlu Akü, Rapor, 1990
- 4.) **ÖZİL, E., MANÇUHAN, E., GÖK, G.**, Kapalı Bir Üretim Mahalin de Hava Kalitesi Standartlarının Belirlenmesi ve Ölçüm Metodolojisi Geliştirilmesi, Eternit A.Ş., Rapor, 1990
- 5.) **ÖZİL, E., MANÇUHAN, E., GÖK, G.**, Çimento Fabrikalarında Emisyon Kaynaklarının Belirlenmesi Ölçüm ve Analizler, Anadolu Çimentoları T.A.Ş. Yunus Tesisleri, Rapor, 1990
- 6.) **KÖSE, R., MANÇUHAN, E., ÖZİL, E.**, Akışkan Yatakta Yanma Verimini Etkileyen Parametreler, Dördüncü Uluslararası Yanma Sempozyumu, 19-21 Temmuz, 1995, BURSA
- 7.) **KÖSE, R., MANÇUHAN, E., ÖZİL, E.**, Akışkan Yataklı Yakıcıların Matematik Modellerine Bakış, Dördüncü Uluslararası Yanma Sempozyumu, 19-21 Temmuz, 1995, BURSA

