

# Dolaşımli Akışkan Yataklı Yakıcıların Farklı İşletme Şartlarında İncelenmesi

Afsin GÜNGÖR\*  
Nurdil ESKİN\*\*

## Özet

Bu çalışmada, bir dolaşımli akışkan yataklı yakıcı için bir boyutlu bir model geliştirilmiştir. Modelde, kömür yanması heterojen olup, kok tanecik yüzeyinde yanmanın difüzyon ve kinetik kontrollü gerçekleştiği, kömürün ön -  
ce uçucularına ayrıldığı, bunu takiben uçucu ve kokun yanması kabul edilmiştir. Kok tanecik çapının yatak için -  
de yanarak küçülmesi ve çap dağılımı modelde gözönüne alınmıştır. Modelleme yapılırken yatak sırasıyla; ka -  
barçıklı akışkan yatak olarak ele alınan alt bölge ile üst bölge olmak üzere iki bölgeye ayrılmıştır. Model sonuç -  
ları Gazi Üniversitesi Isıl Güç Laboratuvarı'nda pilot ölçekli bir dolaşımli akışkan yataklı yakıcıdan elde edilen -  
test sonuçları ile mukayese edilerek, modelin geçerliliği irdelenmiş, model sonuçlarının test sonuçları ile uyumlu -  
olduğu görülmüştür. Yakıcıda hava fazlalık katsayısı, kömür çapı ve gaz hızı gibi işletme parametrelerinin etki -  
leri de irdelenmiştir. Bu çalışma, ülkemiz enerji açığının kapatılmasında, yerli kaynaklarımız içerisinde önemli -  
bir yere sahip olan linyit kömürünün, dolaşımli akışkan yataklı yakıcılar ile etkin bir şekilde kullanılabileceği -  
anlaşılmaktadır.

## 1. GİRİŞ

Ülkemizde, gün geçtikçe artan sanayileşme, gelir seviyesinin yükselmesi ve hızlı nüfus artışına paralel olarak artan enerji tüketimi, yerli kaynaklarımızın da ha verimli değerlendirilmesi gereğini tekrar gündeme getirmiştir. Yerli kaynaklarımız arasında, oldukça önemli bir yere sahip olan taşkömürü ve linyit rezervleri sırasıyla 834.5 ve 1718 milyon TEP'e karşılık gelmektedir [1]. Bu kaynaklardan linyitin yıllara göre kullanımı ise sırasıyla 1992'de 10743 ktoe, 1995'de 10605 ktoe, 1999'da ise 12984 ktoe olduğu görülmektedir.

Ülkemizde bulunan linyitlerimizin yüksek oranda kül ve kükürt ihtiva etmesi enerjinin ve çevrenin korunma -

sı açısından, düşük kaliteli kömürleri yüksek verimle yakabilen, ayrıca SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltarak, yanma sonrası baca temizleme (sıyırma) maliyetini düşüren yakma teknolojilerini cazip hale getirmektedir. Bu nedenle temiz yakma teknolojileri içinde önemli bir yere sahip olan akışkan yatakların ülkemiz enerji tüketimine en ciddi cevaplardan biri olacağı açıkça görülmektedir. Dolaşımli akışkan yataklar ise akışkan yatak teknolojisinde önemli bir yere sahip olan yakıcılardır Bu yataklarda, tanecikler yüksek hızlı bir gaz akımı ile düşey olarak yatak içerisinde taşınır, yatağın üst kısmına gelindiğinde burada bulunan siklonlar aracılığı ile baca gazlarından ayrılarak tekrar yatağa dönerler. Genelde hızlı akışkanlaşma (fast-fluidization) rejiminde çalışan dola -

\* Mak. Yük. Müh., İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi

\*\* Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi

fazlı, üst kısımlarında ise seyrek fazlı bir bölge bulun -  
maktadır. Yoğun fazlı bölge türbülanslı yatak karak -  
teri göstermekte, seyrek bölge ise çeperlerde merke -  
ze göre katı madde açısından daha yoğun olan ince -  
bir bölge ile çevrilmektedir. Dolaşımli akışkan ya -  
taklar diğer katı yakıtlı kazanlara göre; yakıt esnekli -  
ği, yüksek yanma verimi, daha düşük kazan kesit -  
alanı, etkili sülfür indirgemesi ve düşük NO<sub>x</sub> emis -  
yonu gibi avantajlara sahiptir.

Dolaşımli bir akışkan yatak yakıcıda, farklı akış -  
kanlaşma rejimlerinde olan beş farklı bölge say -  
mak mümkündür. İkincil havanın altındaki yoğun ya -  
tak bölgesinde türbülanslı veya kabarcıklı rejim, ikin -  
cil havanın üzerindeki bölgede hızlı akışkanlaşma, -  
siklon bölgesinde döngülü akış söz konusu iken, ge -  
ri dönüş bölgesinde kabarcıklı ve yatağa geri bes -  
leme sırasında ise hava ile taşınma sözkonusudur.

Bu konuda yapılmış çeşitli model çalışmaları lite -  
ratürde yer almaktadır [2-11]. Yerli ve yabancı araş -  
tırmacılar tarafından yapılan modellenme ve deneysel ça -  
lışmalar incelendiğinde, çalışmaların genel olarak -  
yatağın üst bölgesi üzerinde yoğunlaştığı görülür. -  
Bu çalışmaların bazılarında alt bölge gözönüne alın -  
makla beraber, modellemelerde genellikle alt bölge, -  
yığın kütle yaklaşımı ile tek bir kontrol hacmi olarak -  
ele alınmakta ve işletme parametrelerinin ortalama -  
değerleri, üst bölge girişi değeri olarak kullanılı -  
maktadır. Svensson ve ç.a. [2] ile Werther ve Wein [3] -  
tarafından yapılan deneyler ise, alt bölgenin kabarcıklı -  
akışkan yatak özellikleri gösterdiğini ortaya -  
koymuştur. Bu çalışma, alt ve üst bölge ile siklonu -  
da kapsayan dolaşımli bir akışkan yataklı yakıcının -  
tek boyutlu modelini kapsamaktadır. Modelde alt böl -  
ge de iki fazlı olarak modellenmiş ve yanma kalitesi -  
üzerinde işletme parametrelerinin etkisi irdelenmiş -  
tir. Model sonuçları Gazi Üniversitesi Isıl Güç Labara -  
tuvarı'nda pilot ölçekli bir dolaşımli akışkan yataklı -  
yakıcıdan elde edilen test sonuçları ile karşılaştırıla -  
rak modelin geçerliliği de irdelenmiştir[12].

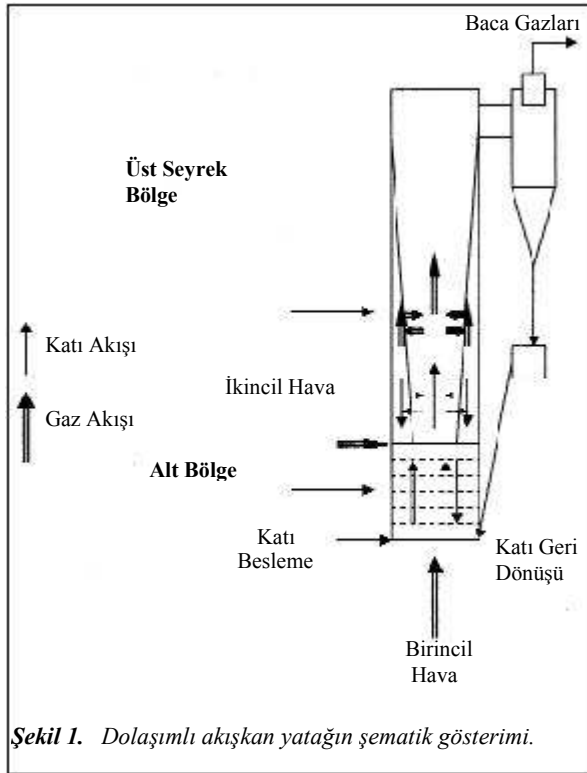
## 2. SİSTEM ANALİZİ

Modellenmede gözönüne alınan dolaşımli akışkan -  
yatağın şematik gösterimi Şekil 1'de görülmekte

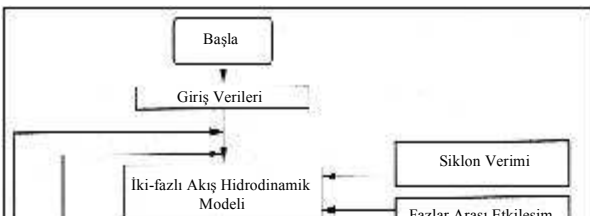
**Hidrodinamik Model:** Modelde önceki araştırmacı -  
ların [2-5] çalışmalarına dayanan halkasal akış ya -  
pısı kullanılmıştır.

Alt bölge türbülanslı akış rejiminde olup, katı madde -  
hareketinin incelenmesinde geri dönüşlü karışma -  
modeli gözönüne alınmıştır. Kabarcık faz ve yoğun -  
faz arasındaki katı madde geçişi, yatakta eksene -  
olarak değişim gösteren kabarcık çapının fonksiyo -  
nu olarak dikkate alınmıştır. Yatağa yapılan besle -  
menin her bir kompartımandan eşit miktarda oldu -  
ğu, yanma sonu ürünlerinin (kül ve yatak malzemesi) -  
yine her bir kompartımandan eşit miktarda atıldığı, -  
siklondan gelen kütle (yatak malzemesi ve karbon) -  
belli bir sıcaklıkta olduğu, siklondan gelen kütle -  
besleme ile birlikte yatağa girdiği, yatak duvarların -  
dan çevreye ısı kaybı olmadığı kabul edilmiştir.

Üst bölge yukarı doğru hareket eden seyrek faz ve -  
onu çevreleyen ve aşağı doğru hareket eden tane -  
kümelerinin bulunduğu yoğun fazdan oluşmakta -  
dır. Seyrek fazın, kolon boyunca merkezden yatak du -

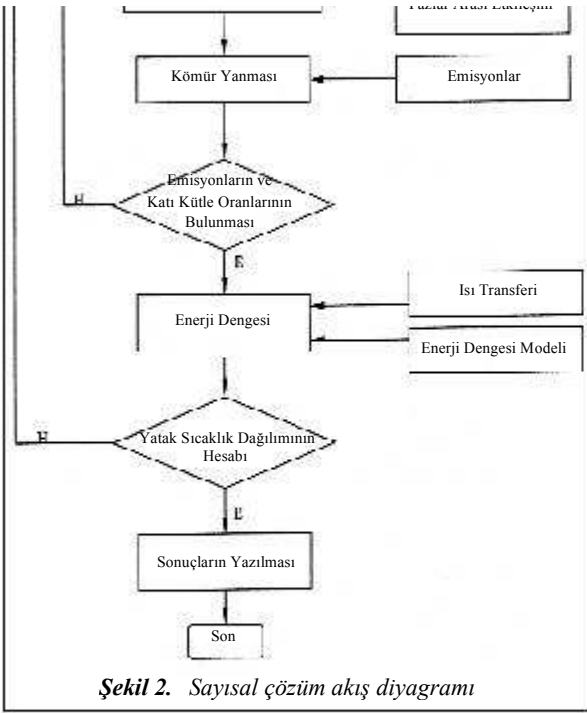


Şekil 1. Dolaşımli akışkan yatağın şematik gösterimi.



## 4. SONUÇLAR VE İRDELEME

Model sonuçları; Gazi Üniversitesi Isıl Güç Labaratu -  
varı'nda, 0.125 m çapında ve 1.80 m yüksekliğin -  
de, 50 kW ısı gücündeki labaratuvar ölçekli bir dolaşım -  
lı akışkan yataklı yakıcıdan elde edilen test sonuçla -  
rı [12] ile mukayese edilmiştir (Şekil 3). Bu akışkan



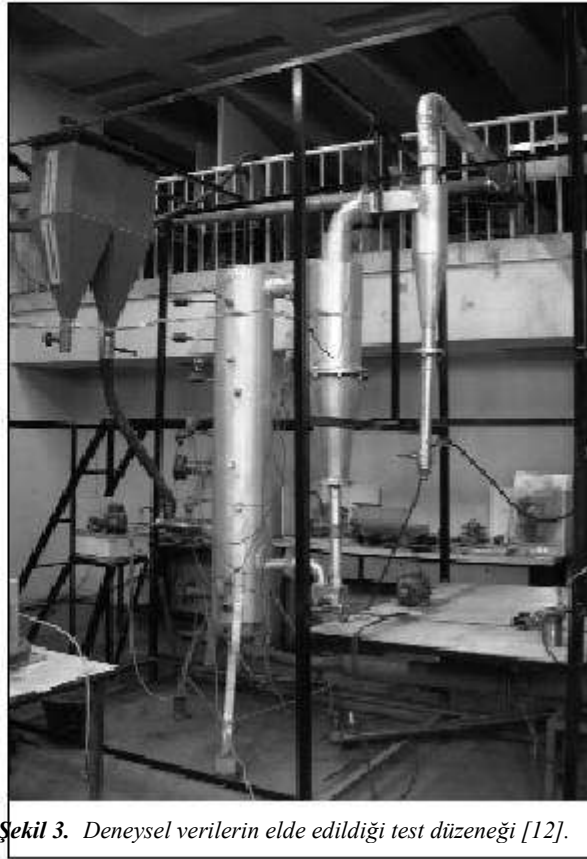
varlarına doğru genişleyen bir yapı gösterdiği ve bu fazda geri dönüş olmadığı kabul edilmiştir.

**Kinetik Model:** Modelde, uçucu maddelerin alt bölgede açığa çıktığı ve yatak içindeki dağılımının katı madde karışımına bağlı olduğu kabul edilmiştir. Uçucu madde içindeki azot ve kükürdün yatak sıcaklığının bir fonksiyonu olarak çıktığı kabul edilmiştir. Kok içindeki azot ve kükürt ise kok yanması esnasında  $SO_2$  ve  $NO$ 'ya kadar indirgenmektedir. Modelde  $SO_2$ 'nin kireçtaşı ile tutulduğu ve  $NO$  indirgenmesinin de kok ile gerçekleştiği kabul edilmiştir. Modelin detaylı açıklaması ve ilgili denklemler alt bölge ve tüm yatak için sırasıyla [13] ve [14-15] de verilmektedir.

### 3. ÇÖZÜM METODU

Simülasyon sonuçlarının elde edilmesinde; iteratif Newton-Raphson Metodu ve F90 Fortran Programlama dili kullanılmıştır. Sayısal çözüm için kullanılan akış diyagramı Şekil 2.'de verilmiştir.

yatak test ünitesine ait deney şartları Tablo 1'de verilmektedir.

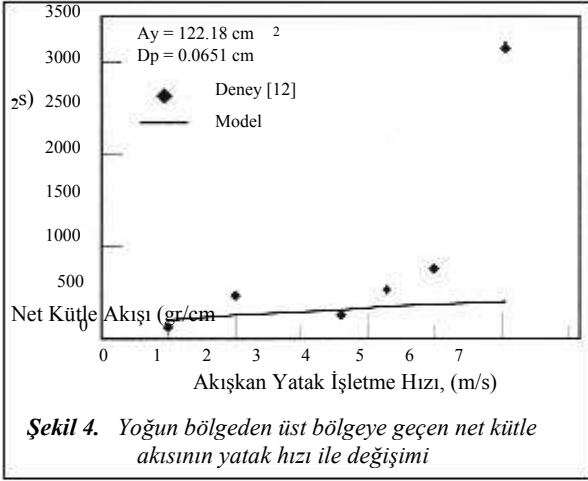


Bu deneysel çalışmada, yatak boyunca  $O_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  emisyonları ile net kütle akısı ölçülmüştür. Bu nedenle, modelin geçerliliği, net kütle akısı, yoğun fazdaki oksijen mol oranı, azotoksit ve kükürtdioksit emisyonları ile araştırılmıştır. Simülasyon programı, deneysel verilerin elde edildiği laboratuvar ölçekli dolaşimli akışkan yataklı yakıcının boyutları ve çalışma şartları giriş verileri olarak kullanılmak suretiyle çalıştırılmış ve bu sonuçlar deneysel değerlerle mukayese edilmiştir (Şekil 4-7).

Şekil 4'de yoğun bölgeden seyrek bölgeye geçen net katı kütle akısının işletme hızına göre değişimi

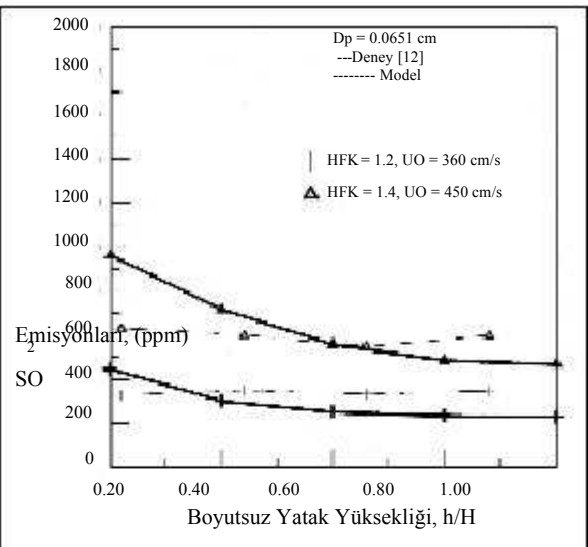
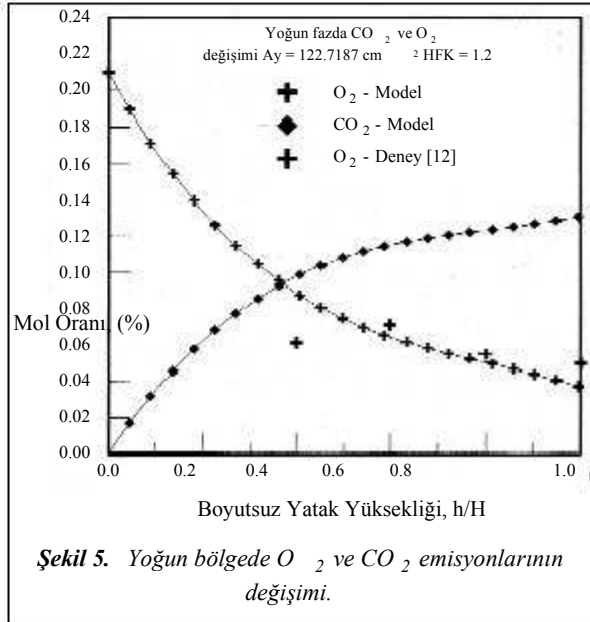
Tablo 1. Dolaşimli Akışkan Yatak Test Parametreleri		
	Sıcak Model (850 °C)	Soğuk Model (25 °C)
Yakıt Türü	Tunçbilek linyiti	
Yatak Malzemesi	Silis kumu, kireçtaşı, kömür külü	Şist, kireçtaşı, dolomit, silis kumu, demir tozu, demir bilyeler
Tanecik Çapı	0.30-1.38 mm	80-600 $\mu$ m
Şekil Faktörü	0.86	0.25-1.0
Ortalama Tanecik Yoğunluğu	1740-2400 kg/m <sup>3</sup>	2400-8250 kg/m <sup>3</sup>
İşletme hızı	3.0-9.28 m/s	1.5-6.0 m/s

Hava Yoğunluğu	0.315 kg/m <sup>3</sup>	1.16 kg/m <sup>3</sup>
Hava Viskozitesi	4.39 x 10 <sup>-5</sup> N s/m <sup>2</sup>	1.83 x 10 <sup>-5</sup> N s/m <sup>2</sup>



gösterilmektedir. Deneysel katı kütle akısı, izokinetik örnek alma yöntemi kullanılarak ölçülen, gaz ve katı toplam kütle miktarının bazı ampirik ifadeler vasıtasıyla net katı madde kütlesine dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Bu dönüştürmede kullanılan B fonksiyonu partikül büyüklüğüne göre değişken alınmış ve Hermann tarafından önerilen katsayı kullanılmıştır. Yine gaz debisi açısından da, gaz debisinin sürekli olarak yukarı doğru olduğu kabul edilmiş, gaz debisinin radyal yöndeki geri dönüşleri ölçümlerde ihmal edilmiştir. Bu sonuçlarla model sonuçları mukayese edildiğinde, U=6.1 m/s hız dışındaki işletme hızlarında modelin, deney sonuçları ile aynı trend içinde olduğu gözlenmektedir. Meydana gelen sapmaların ise bir kısmı yukarıda izah edilen ölçüm değerlerinin dönüştürülmesi esnasında yapılan hatadan, bir kısmı ise yoğun bölge için kabul edilen ikifazlı modelde, fazlar arasındaki gaz kütle geçiş kat sayısından kaynaklanmaktadır.

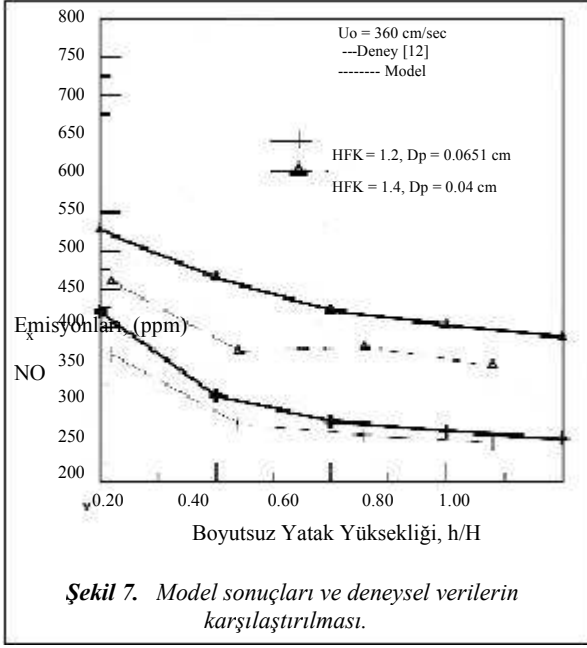
Yoğun fazdaki hesaplanan emisyon değerlerinin, deneysel verilerle mukayesesi karbondioksit emisyonlarının yoğun faz boyunca olan değişimi verilmediği için sadece oksijen emisyonlarının mukayesesi ile sınırlı kalmıştır (Şekil 5). Görüldüğü gibi model sonuçları deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum göstermektedir. Yatak boyunca meydana gelen yanma sonucunda, oksijen emisyonları azalırken, karbondioksit emisyonları artış göstermektedir. Yataktaki eksik yanma yüzdesi değişimi ise Şekil 5’de görülmektedir. Yoğun faz içinde katı maddenin fazla olduğu emisyon fazında mevcut oksijen, önce uçucuların indirgenmesinde kullanıldığı için karbonmonoksit yüzdesinde bir artış gözlenmekte ve bir maksimum değerden sonra oksijen miktarının yeterli olması nede-



sapma ise, modelde uçucu maddenin kömürün beslendiği ve kömür miktarının diğer kompartmanlara nazaran en üst seviyede olduğu ilk kompartmanda daha fazla oranda açığa çıkmasından kaynaklanmaktadır.

Net kütle akılarının işletme parametrelerine göre değişimi Şekil 8’de görülmektedir. Net kütle akısı yatak boyunca yükseklik arttıkça artmaktadır. Simülasyon sonuçlarından tane çapı ve işletme hızının, net kütle akısı üzerinde etkin rol oynadığı, bunun yanında hava fazlalık katsayısının değişiminin etkili olduğu görülmektedir. Sabit bir işletme hızı için tane çapı küçüldükçe, taneciklerin yatakta hareketlerini sağlayan akışkanlaşma hızının tane çapına bağlı

**Şekil 6.** Model sonuçları ve deneysel verileri karşılaştırılması.

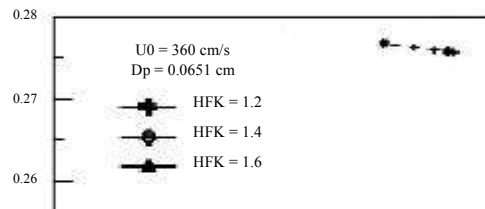
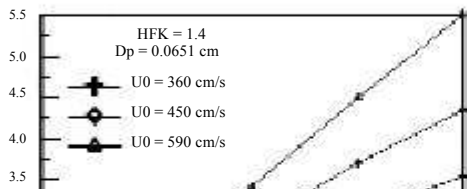
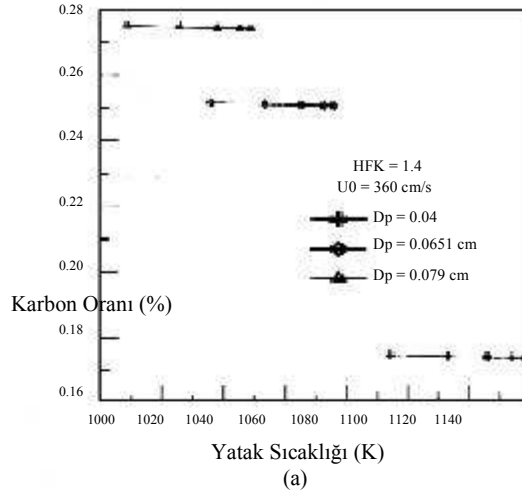
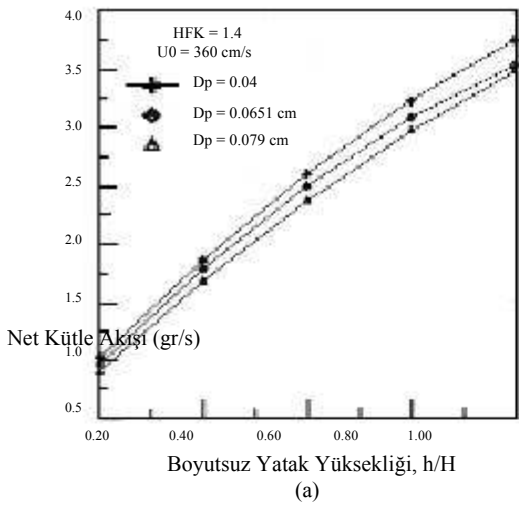


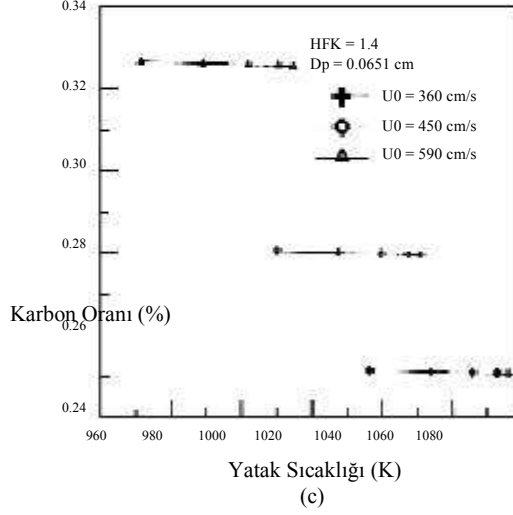
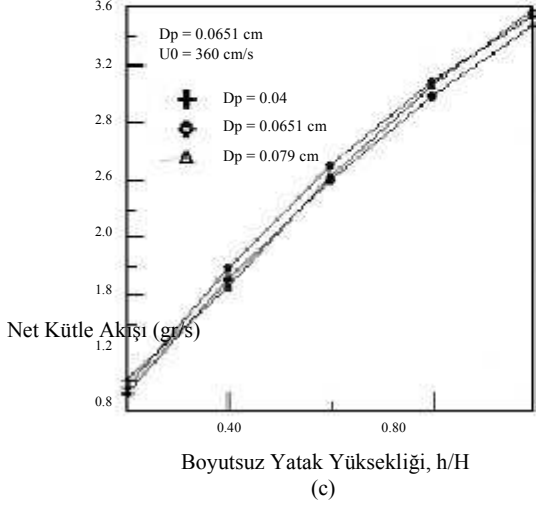
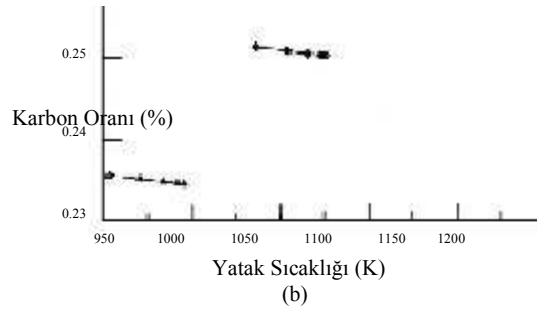
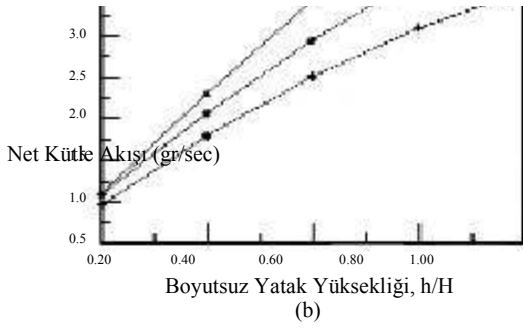
**Şekil 7.** Model sonuçları ve deneysel verilerin karşılaştırılması.

niyle karbonmonoksit, karbondioksit indirgenerek azalmaktadır. Modelde gaz emisyon oranlarının hesaplanmasında fazlar arasındaki değiş-tokuş edilen miktarın gözönüne alınması simülasyon sonuçları ve deneysel verilerin birbirleriyle uyumlu olmasını sağlamıştır. Benzer şekilde SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının yatak boyunca değişimi, geliştirilen bu model ile oldukça doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir (Şekil 6-7). SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında, dağıtıcı elekten 20 cm yukarıdaki maksimum %5'lik

olması nedeniyle, net kütle akısının yatak boyunca arttığı görülmektedir. İşletme hızının artırılması durumunda ise kütle akıları arasındaki fark, yatak yük şekliği arttıkça daha da belirginleşmektedir. Bu ise işletme hızının artmasıyla, taneciklerin yatakta kalış sürelerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Net kütle akısının değişiminde en belirleyici rolü işletme hızının oynadığı Şekil 8-b'de görülmektedir.

Dolaşımli akışkan yatak yakıcılarında yatak sıcaklığının etkisinin incelenmesi yatakta yerleştirilecek ısı geçiş yüzeylerinin belirlenmesi açısından önemlidir (Şekil 9). Şekil 9-a'da yatak boyunca, farklı kömür tane besleme çaplarında yataktaki karbon yüzdesi ve ortalama sıcaklığın değişimi görülmektedir. Tane çapı küçüldükçe, yataktaki karbon oranının azaldığı ve yatak sıcaklığının arttığı görülmektedir. Bu durum yanma hızının, tane çapının bir fonksiyonu olmasından kaynaklanmaktadır, tane çapı küçüldükçe yanma hızı artmakta, bu da yatak içerisindeki karbon oranının azalmasına ve yanma hızının artmasıyla açığa çıkan ısı miktarının ve bağlı olarak yatak sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır. Hava fazlalık katsayısı arttıkça karbon oranının düşmesi, hava fazlalık katsayısının yanma üzerine olumlu etkisi olduğunu göstermektedir (Şekil 9-b). Bununla beraber, hava fazlalık katsayısının artması, yatağa daha fazla hava girmesine sebep olmakta, dolayısıyla da çıkan baca gazı oranını arttırmakta ve yatak sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Yatak işletme hızının artması





**Şekil 8.** İşletme parametrelerinin net kütle akısına etkisi.

**Şekil 9.** İşletme parametrelerinin karbon oranı ve yatak sıcaklığına etkisi.

ise yatakta ters bir etki yaratarak taneciklerin yatak içerisindeki kalış sürelerini kısaltmakta, bu da yanmayı olumsuz yönde etkilediğinden yataktaki karbon oranını arttırmaktadır. Yatakta kalış süresinin azalması, karbon oranının artmasına ve dolayısıyla da yatak sıcaklığının düşmesine sebep olmaktadır. Siklonlardan dönen yüksek karbon yüzdeli katı madde yatağa tekrar beslenerek yatakta daha uzun sürede ancak düşük yatak hızlarında yanma gerçekleşmektedir.

Bu çalışma dolaşimli bir akışkan yataklı yakıcının tek boyutlu modellemesini kapsamaktadır. Model sonuçlarının deneysel verilerle mukayesesi tatminkar sonuçlar vermekle beraber, yapılacak iki boyutlu bir modelin, dolaşimli akışkan yataklı yakıcılar için; yanmanın iyileştirilmesi ve ısı geçiş yüzeylerinin konum ve yakıcı verimi açısından optimizasyonuna olanak sağlayacak tasarım parametrelerinin tesbitinde daha faydalı olabileceği görülmektedir. Bu çalışma ile ülkemiz enerji açığının kapatılmasında, yerli kaynaklarımız içerisinde önemli bir yere sahip olan linyit kömürünün, dolaşimli akışkan yataklı yakıcılar ile etkin bir şekilde kullanılabilmesi anlaşılmaktadır.

bustors", Chemical Engineering Science, 50/14, 2235-2242, 1993.

- [6] Q. Wang, Z. Luo, X. Li, M. Fang, M. Ni, K. Cen, A Mathematical Model for a Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler, Energy; 24, 633-653, 1999.
- [7] R. C. Senior, and C. Brereton, "Modelling of Circulating Fluidized-Bed Solids Flow and Distribution", Chemical Engineering Science, 47/2, 281-296, 1992.
- [8] D. Kunii, O. Levenspiel, "Fluidization Engineering", Butterworth-Heinemann Stoneham, MA., 201-206, 1991.
- [9] U. Arena, A. Malandrino, and L. Massimilia, "Modeling of Circulating Fluidized Bed Combustion of Char", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 69, 860-868, 1991.
- [10] H. Schoenfelder, J. Werther, J. Hinderer and F. Keil, "A Multi-Stage Model for the Circulating Fluidized Bed Reactor", A.I.ChE Symp. Ser., 301 (90), 92-104, 1994.
- [11] N. Eskin and A. Kılıç, "Calculation of Steady-State Operation Characteristics of Fluidized Bed Coal Combustors", Bulletin of Istanbul Technical University, 48, 11-36, 1995.

## KAYNAKLAR

- [1] "Dünya Enerji Komisyonu Türkiye Ulusal Komitesi 1998 Enerji raporu", WECTNC (World Energy Council Turkish National Committee), Ankara, Türkiye, 2000.
- [2] A.Svensson, F. Johnsson and B. Leckner, "Fluid-dynamics of the Bottom Bed of Circulating Fluidized Bed Boilers", Proc. XII. International Conference on Fluidized Bed Combustion, 887-897, San Diego, CA., 1993.
- [3] J. Werther and J. Wein, "Expansion Behavior of Gas Fluidized Beds in the Turbulent Regime", A.I.ChE Symp. Ser., 301 (90), 31-44, 1994.
- [4] J. Zhou, J. R. Grace, S. Qin, C. M. H. Brereton, C. J. Lim, and J. Zhu, "Voidage Profiles in a Circulating Fluidized Bed of a Square Cross-Section", Chemical Engineering Science, 49/19, 3217-3226, 1994.
- [5] X. Li, Z. Luo, M. Ni, And K. Cen, "Modeling Sulfur Retention in Circulating Fluidized Bed Combustion", Energy Conversion and Management, 44/11, 1111-1120, 2003.
- [6] H. Topal, "Dolaşımli Akışkan Yatağın Hidrodinamik, Yanma ve Emisyon Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999.
- [7] A. Güngör, N. Eskin, "Sirkülasyonlu Akışkan Yataklarda Yoğun Bölgenin Simülasyonu", I. Ege Enerji Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 22-24 Mayıs, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Editörler: H. K. Öztürk, M. Atılgan, A. Yılcıncı, Ö. Atalay, 211-217, 2003.
- [8] A. Güngör, N. Eskin, "Bir Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı Yakıcı için Alt ve Üst Bölgenin Modellenmesi", ULIBTK'03, 14. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı, 3-5 Eylül, Isparta, Editörler: İ. Üçgül, B. Z. Uysal, 25-34, 2003.
- [9] A. Güngör, N. Eskin, "A Model for Circulating Fluidized Bed Combustors", IEEEES-1, The First International Exergy, Energy and Environment Symposium Proceedings, 13-17 July, İzmir, Turkey, Editörler: İ. Dinçer, A. Hepbaşlı, 911-918, 2003.