

SİRKÜLASYONLU AKIŞKAN YATAKLI YAKICILARIN MODELLENMESİ: 1 ve 2 BOYUTLU MODELLER

Afşin GÜNGÖR*

Ar. Gör. Dr., Niğde Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Ucuz, kaliteli ve sürekli enerji üretimi, uygun tasarım ve işletme parametrelerine sahip yakma teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanmasını gerektirmektedir. Akışkan yatak teknolojisi, temiz enerji teknolojileri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar ise akışkan yatak teknolojisinde en geliştirilmiş tip yakıcılar olup, diğer katı yakıtlı kazanlara göre yakıt esnekliği, etkili kükürt indirgemesi ve düşük NOx emisyonu gibi avantajlara sahiptir. Bu çalışmada sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların modellenmesinin önemi, detayları daha önce literatürde yayınlanmış çalışmalarda verilen, sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar için geliştirilmiş olan 1 ve 2 boyutlu modeller kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. 1 boyutlu modelden elde edilen sonuçların NOx emisyonu dikkate alındığında, hava fazlalık katsayısının 1.2 değeri için oldukça iyi sonuçlar vermesine karşılık, modelin daha yüksek hava fazlalık katsayısı değerinde iyi tahminler yapamadığı, SO₂ emisyonu dikkate alındığında ise, model sonuçlarının özellikle yatağın alt bölgesinde sapma gösterdiği gözlenmiştir. 2 boyutlu model sonuçlarının deneysel verilerle göstermiş olduğu uyum dikkate alındığında; 1 boyutlu model sonuçlarının, 2 boyutlu model sonuçları kadar net bir tahmin yapamadıkları açıkça görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Akışkan yatak, yanma, emisyon, modelleme, yakıcı

Modeling Circulating Fluidized Bed Combustors: 1 and 2 Dimensional Models

ABSTRACT

Fluidized bed technology plays an important role in the clean energy technologies. The circulating fluidized beds have many advantages over the conventional bubbling or turbulent fluidized beds. The designing of the circulating fluidized bed is very important because it enables burning coal with high efficiency and within acceptable levels of gaseous emissions. The advantages of the circulating fluidized beds are; fuel flexibility, high combustion efficiency, efficient sulfur removal, low NOx emission. In this study, the importance of the modeling of the circulating fluidized beds has been investigated via the comparison of one and two dimensional models which are available in the literature. It is observed that two dimensional model results agree very well with experimental data when compared with one dimensional model for the parameter of excess air value of 1.2. The model predictions show some deviations in the bottom zone when considering the SO₂ emissions. The present study proves that one dimensional models do not make precise predictions when compared with two dimensional models.

GİRİŞ

Ülkemiz düşük kaliteli linyit rezervlerinin yüksek verimlilikle değerlendirilmesi ve ulusal ve uluslararası çevre standartlarında verilen emisyon seviyelerine uygun yakılabilmesi açısından akışkan yatak teknolojisi gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Çevre dostu olan bu teknolojinin ülkemiz linyitlerine adaptasyonu, öz kaynak linyitlerin çevre sorunu yaratmaksızın değerlendirilmesini sağlayacaktır. Kendi öz kaynaklarımızın optimum şartlarda kullanılmasına olanak veren akışkan yatak teknolojisinin yaygın kullanımı ile ülkemizin enerji üretiminde önemli katkı sağlayacağı kaçınılmazdır.

Akışkan yatak teknolojisinde en geliştirilmiş tip yakıcılar olan sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların dizaynı; kömürün yüksek bir verimle yakılması ve baca gazı emisyonlarının kabul edilebilir seviyelerde tutulması için oldukça önemlidir. Bununla beraber, sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespitinde, gerçek boyuttaki yakıcılarla çalışmanın gerek zaman ve ekonomiklik, gerekse uygulama açısından pratik olmayacağı açıktır. Bu nedenle, geliştirilen bir model ile, sirkülasyonlu akışkan yataklı kömür yakıcılarında etkin olan tasarım ve işletme parametrelerinin tespiti ve sistemin optimum çalışmasını sağlayacak gerekli parametrelerin belirlenmesi, mümkün olacaktır. Sirkülasyonlu

* İletişim yazarı

Geliş/Received : 28.08.2008

Kabul/Accepted : 18.11.2008

akışkan yataklı yakıcılarda yanma işleminin iyi bir şekilde gerçekleştirilebilmesi, geliştirilecek modellerin gerçekçi performans tahminleri yapabilmesine bağlıdır. Bu amaçla, bu çalışmada sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların modellenmesinin önemi, detayları daha önce literatürde yayınlanmış çalışmalarda verilen, sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar için geliştirilmiş olan 1 ve 2 boyutlu modeller kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir [1-4]. Sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcının şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.

Yapılan bu çalışma sonucunda; bir boyutlu model sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olmasına rağmen iki boyutlu model sonuçları kadar net bir tahmin yapamadıkları açıkça görülmektedir. Bir ve iki boyutlu model sonuçlarının karşılaştırılmasındaki amaç; akışkan yataklı yakıcılar için geliştirilecek modellerde yatak hidrodinamiğinin detaylı olarak çözülebilmesinin, yataktaki kimyasal reaksiyonların çözümlerinde oldukça etkili olduğunu göstermek ve hidrodinamik modelin doğru tahminlerinin model tahminlerinin doğruluğu üzerindeki etkisini vurgulamaktır.

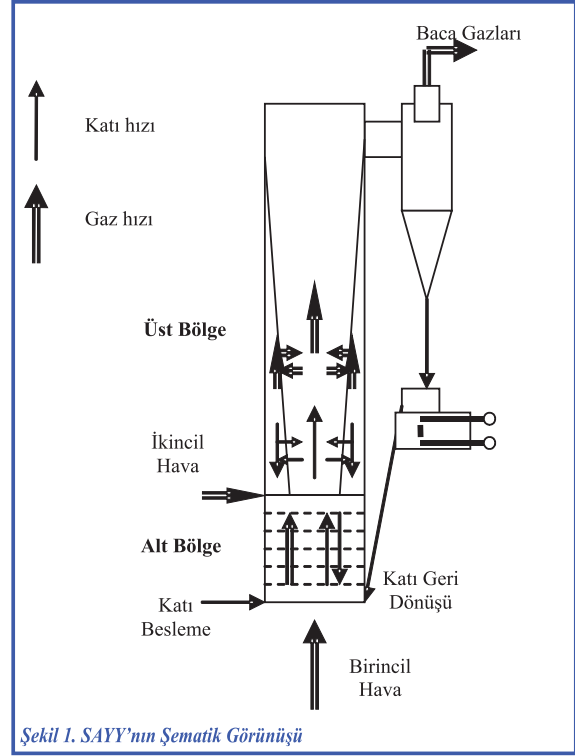
TEORİK MODEL

Bu çalışmada incelenen 1 ve 2 boyutlu modellerin detayları literatürde mevcut olup, modellerde kullanılan kabuller ve model detayları aşağıda kısaca özetlenmiştir [1-4].

Sirkülasyonlu akışkan yatağın yanma ve emisyon davranışı doğrudan yatak akışkanlaşma özelliği ile ilgili olup yatak hidrodinamiğine bağlıdır. Bu nedenle, yatak içerisindeki gaz-katı akış yapısını doğru bir şekilde tahmin edebilecek modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilecek iyi bir hidrodinamik model ile yatak içerisinde; gaz ve katılar için boşluk oranı, gaz ve katı hızları, katı kütle akışı ve yatak basıncının aksel ve radyal yöndeki dağılımlarının bilinmesi, sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar için optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespit edilmesini sağlayacaktır.

Geliştirilen bir boyutlu modelde; alt bölge kabarcıklı akışkan yatak olarak ele alınmıştır. Alt bölge; hareketli katı tanecikleri içeren yoğun faz ve kabarcık faz olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Alt bölge için yatak yüksekliği deneysel verilere göre tespit edilmiştir.

Gaz hareketinin yukarı doğru olduğu kabul edilmiş ve gazın geri dönüşü ihmal edilmiştir. Alt bölge türbülanslı akışkan yatak rejiminde olup, katı madde hareketinin incelenmesinde geri dönüşlü karışma modeli gözönüne alınmıştır. Kabarcık faz ve yoğun faz arasındaki katı madde geçişi, yataкта aksel olarak değişim gösteren kabarcık çapının fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 1. S.AYY'nın Şematik Görünüşü

Üst bölge yukarı doğru hareket eden seyrek faz ve onu çevreleyen ve aşağı doğru hareket eden tane kümelerinin bulunduğu yoğun fazdan oluşmaktadır. Seyrek fazın, kolon boyunca merkezden yatak duvarlarına doğru genişleyen bir yapı gösterdiği ve bu fazda geri dönüş olmadığı kabul edilmiştir.

Yatak bir dizi kompartımana bölünmüş ve bu kompartımanların termodinamik özelliklerin üniform olduğu kabul edilmiştir.

Yatak içerisindeki hareketi esnasında kömür yanmakta ve ufalanmaktadır. Yatak malzemesi başlangıçta; kömür, kum ve kireçtaşından oluşmakta, yanma işlemi esnasında oluşan kül de yatak malzemesi olarak ele alınmaktadır. Gaz-katı reaksiyonları sırasında kömür tanecikleri için tanecik çapının sabit kalmadığı büzülen tanecik modeli uygulanmıştır. Uçucu maddelerin sadece alt bölgede açığa çıktığı ve yatak içindeki dağılımının katı madde karışımına bağlı olduğu kabul edilmiştir. Uçucu azot ve kükürt yatak sıcaklığının bir fonksiyonu olarak çıkmaktadır. Kömürün yanması sırasında, azot ve kükürt, SO₂ ve NO olarak açığa çıkmaktadır.

Modelde SO₂ kireçtaşı ile tutulmakta, NO indirgemesi de kok ile gerçekleşmektedir. Bir boyutlu modelde dikkate alınan kimyasal reaksiyonlar ve reaksiyon hızları Tablo 1'de verilmiştir.

Bir boyutlu modelde radyal yöndeki etkileşimler kütle transfer katsayısı ile dikkate alınmakta olup, aksel yöndeki değişimler hesaplanmaktadır.

Tablo 1. Bir Boyutlu Modelde Dikkate Alınan Kimyasal Reaksiyonlar ve Reaksiyon Hızları [1,2].

Reaksiyon	Reaksiyon Hızı	
$C + \frac{1}{\Phi} O_2 \rightarrow \left(2 - \frac{2}{\Phi}\right) CO + \left(\frac{2}{\Phi} - 1\right) CO_2$	$r_c = \pi d_c^2 k_c C_{O_2} \left(\frac{mol}{s}\right)$	$k_{cr} = 8710 \cdot \exp\left(\frac{-1.4947 \cdot 10^8}{R_u \cdot T}\right) \left(\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot kPa}\right)$
	$k_c = \frac{R_u T / M_c}{\frac{1}{k_{cr}} + \frac{1}{k_{cd}}} \left(\frac{kg}{s}\right)$	$k_{cd} = \frac{12 \cdot Sh \cdot \Phi \cdot D_g}{d_p \cdot R_g \cdot T} \left(\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot kPa}\right)$
	$Sh = \frac{k_g d_p}{D_g} = 2\varepsilon + 0.69 \left(\frac{Re_p}{\varepsilon}\right)^{1/2} Sc^{1/3}$	
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$r_{CO} = 3 \cdot 10^{10} \exp\left(\frac{-6.699 \cdot 10^7}{R_u T}\right) y_{CO} y_{H_2O}^{0.5} \frac{17.5 \cdot y_{O_2}}{1 + 24 \cdot y_{O_2}} \left(\frac{P}{R_u T}\right)^{1.8} \left(\frac{mol}{cm^2 \cdot s}\right)$	
$NO + \frac{1}{2} C \rightarrow \frac{1}{2} N_2 + \frac{1}{2} CO_2$	$r_N = \pi d_c^2 k_N C_{NO} \left(\frac{mol}{s}\right)$	$k_N = 1.3 \times 10^5 \exp\left(-17111/T\right) \left(\frac{m}{s}\right)$
$CaO + SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CaSO_4$	$k_L = \frac{\pi}{6} d_s^3 k_{vL} C_{SO_2} \left(\frac{1}{s}\right)$	$k_{vL} = 490 \exp\left(\frac{-17500}{R_g T}\right) S_g \lambda_s \left(\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right)$ $S_g = -384 T_g + 5.6 \times 10^4 \quad T_g \geq 1253 \text{ K}$ $S_g = 35.9 T_g - 3.67 \times 10^4 \quad T_g < 1253 \text{ K}$

Tablo 2. İki Boyutlu Modelde Kullanılan Süreklilik, Momentum ve Enerji Denklemleri [3,4].

Gaz Fazı	Süreklilik Denklemi	Katı Fazı
$\frac{d(C_j \varepsilon_i)}{dt} = \sum_{in} \dot{n}_j \varepsilon_i - \sum_{out} \dot{n}_j \varepsilon_i + \dot{R}_{g,j} + \dot{J}_{g,j}$ (j = O ₂ , CO, CO ₂ , NO, N ₂ O, N ₂ , HCN, CNO, NH ₃ , H ₂ O, SO ₂ , CH ₄)	$\frac{d(\rho_j \varepsilon_{p,j})}{dt} = \sum_{in} \dot{m}_j \varepsilon_{p,j} - \sum_{out} \dot{m}_j \varepsilon_{p,j} + \dot{R}_{s,j} + \dot{J}_{s,j}$ (j = Kok, Kireçtaşı, Yatak Malzemesi)	
Momentum Denklemi		
$\frac{\partial(Cu \varepsilon_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Cu \varepsilon_i u)}{\partial r} = -\frac{\partial(P \varepsilon_i)}{\partial r} - \frac{\partial(\tau_{rr} \varepsilon_i)}{\partial r} - \frac{\partial(\tau_{rz} \varepsilon_i)}{\partial z} - \beta(u-v)$ $\frac{\partial(Cu \varepsilon_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Cu \varepsilon_i u)}{\partial z} = -\frac{\partial(P \varepsilon_i)}{\partial z} - \frac{\partial(\tau_{zz} \varepsilon_i)}{\partial z} - \frac{\partial(\tau_{rz} \varepsilon_i)}{\partial r} - \beta(u-v)$	$\frac{\partial(\rho v \varepsilon_{p,j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon_{p,j} v)}{\partial r} = -\frac{\partial(\tau_{rr} \varepsilon_{p,j})}{\partial r} - \frac{\partial(\tau_{rz} \varepsilon_{p,j})}{\partial z} + \beta(u-v) - \frac{\partial(G(\varepsilon) \varepsilon_{p,j})}{\partial r}$ $\frac{\partial(\rho v \varepsilon_{p,j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon_{p,j} v)}{\partial z} = -\frac{\partial(\tau_{zz} \varepsilon_{p,j})}{\partial z} - \frac{\partial(\tau_{rz} \varepsilon_{p,j})}{\partial r} + \beta(u-v) - \frac{\partial(G(\varepsilon) \varepsilon_{p,j})}{\partial z} + \rho g \varepsilon_{p,j}$	
İdeal Gaz Denklemi $\tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)$ $\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r}\right)$ $\tau_{rz} = \tau_{zr} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r}\right)$ $C = \frac{1}{R_u T}$	Katı Gerilme Modülü $\tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)$ $\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r}\right)$ $\tau_{rz} = \tau_{zr} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r}\right)$ $G(\varepsilon) = \frac{\partial \tau}{\partial(1-\varepsilon)} = 10^{-8.76 \cdot \varepsilon + 5.43}$	
Gaz-katı Sürüklenme Katsayısı $\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{C \varepsilon_i (1-\varepsilon_i)}{\varepsilon_i^{2.65}} \frac{1}{d_p} u-v $	$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad Re_p < 1000$ $C_D = 0.44 \quad Re_p \geq 1000$	

İki boyutlu modelde alt bölge için yapılan kabuller bir boyutlu model ile aynı olmakla beraber dikkate alınan kimyasal reaksiyonlar farklılık göstermekte, ayrıca taneciklerin yatağa girişleri esnasında yatak sıcaklığı nedeniyle uğradıkları parçalanma dikkate alınmaktadır. Hidrodinamik yapı dikkate alındığında da iki boyutlu modelde gaz ve tane hızları radyal

yönde ayrı ayrı hesap edilebilmekte, ayrıca yatak boyunca basınç dağılımının da radyal yönde hesaplanabilmesi; momentum ve enerji denklemlerinin daha detaylı yazılabilesine olanak sağlamaktadır. İki boyutlu modelde kullanılan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 3. İki Boyutlu Modelde Dikkate Alınan Kimyasal Reaksiyonlar ve Reaksiyon Hızları [3].

Reaksiyon	Reaksiyon Hızı	
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$R_{CO} = 3 \cdot 10^{10} \exp\left(\frac{-6.699 \cdot 10^7}{R_u T}\right) y_{CO} y_{H_2O}^{0.5} \frac{17.5 \cdot y_{O_2}}{1 + 24 \cdot y_{O_2}} \left(\frac{P}{R_u T}\right)^{1.8} \left(\frac{mol}{cm^3 s}\right)$	
$CO_2 + C \rightarrow 2CO$	$R_{CO_2C} = N\pi d_p^2 k C_{CO_2} \left(\frac{mol}{s}\right)$	$k = 4.1 \cdot 10^6 \exp\left(\frac{-29787}{T}\right)$
$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + H_2O$	$R_{CH_4} = k C_{O_2}^{0.8} C_{CH_4}^{0.7} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$k = 1.585 \cdot 10^{10} \exp\left(\frac{-24157}{T}\right)$
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	$R_{H_2} = k C_{O_2} C_{H_2}^{1.5} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$k = 1.63 \cdot 10^9 T^{1.5} \exp\left(\frac{-3420}{T}\right)$
$HCN + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CNO$	$R_{HCN} = k C_{O_2} C_{HCN} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$k = 2.14 \cdot 10^5 \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$
$CNO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO + CO$	$R_{CNO-O_2} = k C_{O_2} C_{HCN} \left(\frac{k_1}{k_1 + k_2 C_{NO}}\right) \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$\frac{k_2}{k_1} = 1.02 \cdot 10^9 \exp\left(\frac{-25460}{T}\right)$
$CNO + NO \rightarrow N_2O + CO$	$R_{CNO-NO} = k C_{O_2} C_{HCN} \left(\frac{k_2 C_{NO}}{k_1 + k_2 C_{NO}}\right) \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$k = 2.14 \cdot 10^5 \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$
$N_2O + C \rightarrow N_2 + CO$	$R_{N_2OC} = k N \pi d_c^2 C_{N_2O} \left(\frac{mol}{s}\right)$	$k = 2.9 \cdot 10^9 \exp\left(\frac{-16983}{T}\right)$
$N_2O + CO \rightarrow N_2 + CO_2$	$R_{N_2O-CO} = k C_{N_2O} C_{CO} \left(\frac{mol}{cm^3 s}\right)$	$k = 5.01 \cdot 10^{13} \exp\left(\frac{-4.40 \cdot 10^4}{R_u T}\right)$
$N_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow N_2 + O_2$	$R_{N_2O-O_2} = k C_{N_2O} C_{O_2} \left(\frac{mol}{cm^3 s}\right)$	$k = 1.00 \cdot 10^{14} \exp\left(\frac{-2.80 \cdot 10^4}{R_u T}\right)$
$NO + C \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + CO$	$R_{NOC} = k N \pi d_c^2 C_{NO} \left(\frac{mol}{s}\right)$	$k = 5.85 \cdot 10^7 \exp\left(\frac{-12000}{T}\right)$
$NO + \frac{1}{2}C \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + \frac{1}{2}CO_2$	$R_{2NOC} = k N \pi d_c^2 C_{NO} \left(\frac{mol}{s}\right)$	$k = 1.3 \cdot 10^5 \exp\left(\frac{-17111}{T}\right)$
$NO + CO \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + CO_2$	$R_{NOCO} = KT \frac{(k_1 C_{NO} (k_2 C_{CO} + k_3))}{(k_1 C_{NO} + k_2 C_{CO} + k_3)} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$KT = 1.952 \cdot 10^{10} \exp\left(\frac{-19000}{T}\right)$ $k_1 = 0.1826$, $k_2 = 0.00786$ $k_3 = 0.002531$
$NH_3 + \frac{5}{4}O_2 \rightarrow NO + \frac{3}{2}H_2O$	$R_{NH_3NO} = k C_{NH_3} C_{O_2} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$k = 2.73 \cdot 10^{14} \exp\left(\frac{-38160}{T}\right)$
$NH_3 + \frac{3}{4}O_2 \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2O$	$R_{NH_3N_2} = \frac{k C_{NH_3} C_{O_2}}{C_{O_2} + k'} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$k = 3.38 \cdot 10^7 \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$ $k' = 0.054$
$NO + NH_3 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow N_2 + \frac{3}{2}H_2O$	$R_{NONH_3} = k \sqrt{C_{O_2}} \sqrt{C_{NH_3}} \sqrt{C_{NO}} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$k = 1.1 \cdot 10^{12} \exp\left(\frac{-27680}{T}\right)$

Kok yanması esnasında kok içerisindeki kükürt SO_2 'ye indirgenmektedir. Yatak malzemesi içerisindeki kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) kalsinasyon sonucu CaO 'ya dönüşmektedir. CaO , ortamdaki SO_2 ile reaksiyona girmekte ve $CaSO_4$ oluşmaktadır.

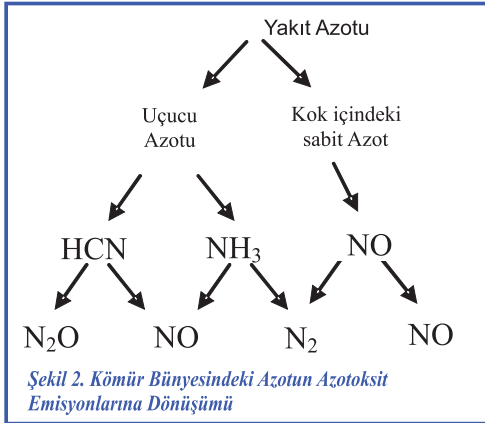
Böylelikle yatak içerisindeki zararlı baca emisyonlarından biri olan SO_2 , katı atık olarak yataktan atılmaktadır. Akışkan

yataklarda kükürt indirgemesi; yatak işletme hızı, Ca/S oranı, kireçtaşı tane özellikleri, yatak yüksekliği, yatağa verilen katı madde beslemesi gibi birçok faktöre bağlıdır.

Yatak içine beslenen kömür, uçucularına ayrıldıktan sonra geriye gözenekli yapıda kok kalır. Kokun yanma modelinde, tanelerin kimyasal ve kinetik kontrollü olarak yandığı, meydana gelen külün yatak malzemesine karıştığı ve tane çapının sabit

kalmayarak giderek küçüldüğü bir tanecik modeli gözönüne alınmıştır.

Kömür bünyesindeki azotun, azotoksit emisyonlarına dönüşümü Şekil 2'de verilmiştir. Sirkülasyonlu akışkan yataklar 800-900°C gibi düşük işletme sıcaklıklarına sahip olduklarından, besleme havası içerisindeki azot ısıl olarak azotoksit dönüşümüne de yakıt azotu kok taneciğinin yanması esnasında açığa çıkan yüksek ısı nedeniyle ısıl olarak azotoksit dönüşmektedir. Tablo 3'de iki boyutlu modelde dikkate alınan reaksiyonlar ve reaksiyon sabitleri verilmiştir (kok yanması ve SO₂ indirgenmesi reaksiyonları bir boyutlu modelle aynı olduğu için tabloda yer almamıştır).



Yatak sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, birincil havanın ikincil havaya oranı gibi işletme şartları ve yakıt bünyesindeki uçucu madde miktarı, yakıt içerisindeki azot miktarı gibi yakıt özellikleri akışkan yataklardaki azotoksit emisyonlarının oluşumunu etkilemektedir.

Bir boyutlu model simülasyon sonuçlarının elde edilmesinde; iteratif Newton-Raphson Metodu ve F90 Fortran Programlama dili kullanılmıştır [1,2]. İki boyutlu modelde; yatak için geliştirilen denklemler, öncelikle ayrıklaştırma metodu kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Denklemlerin ayrıklaştırılması işleminde, geriye-ayrıklaştırma (backward-difference) metodu kullanılmıştır. Denklemler ayrıklaştırıldıktan sonra model sonuçlarının elde edilmesinde; süreklilik ve momentum denklemlerinin sayısal çözümü için iteratif Gauss-Seidel metodu, enerji denkleminin sayısal çözümü için iteratif Newton-Raphson metodu ve F90 Fortran Programlama dili kullanılmıştır [3,4]. Çözüm metodu ile ilgili detaylar literatürde mevcuttur [1-4].

BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Model sonuçları Gazi Üniversitesi Isıl Güç Laboratuvarı'nda 50 kW ısıl kapasiteli pilot sirkülasyonlu akışkan yatak yakıcıda Tunçbilek linyiti yakılarak yapılmış deney sonuçları ile

Tablo 4. Pilot Akışkan Yatak İşletme Şartları

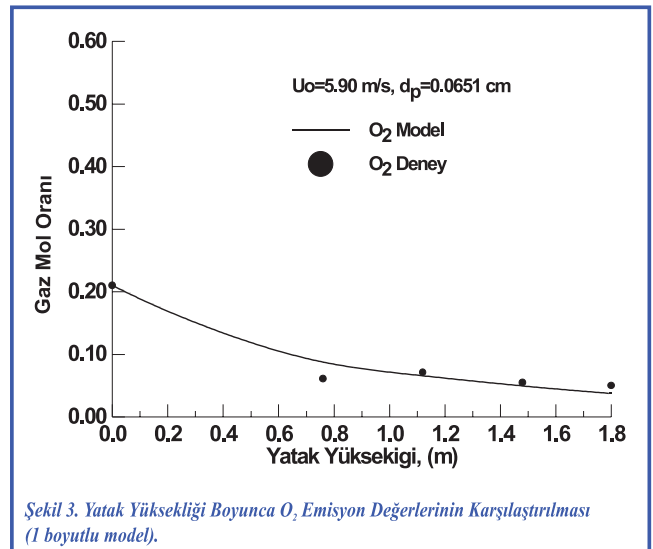
İşletme Parametreleri	
Yakıt türü	Tunçbilek linyiti
Kömür besleme aralığı	6-7,7 kg/h
İşletme hızı aralığı	3,60-9,23 m/s
Yatak sıcaklığı	860-900°C
Birincil/ikincil hava oranı	2/3
Ca/S oranı	1,5
Yatak yüksekliği	1,8 m
Yatak çapı	0,125 m
Kömür tane boyutu	0,03-0,9 mm
Kireçtaşı tane boyutu	0,071 mm

Tablo 5. Tunçbilek Linyitine Ait Elementer Analiz Sonuçları (kütleisel).

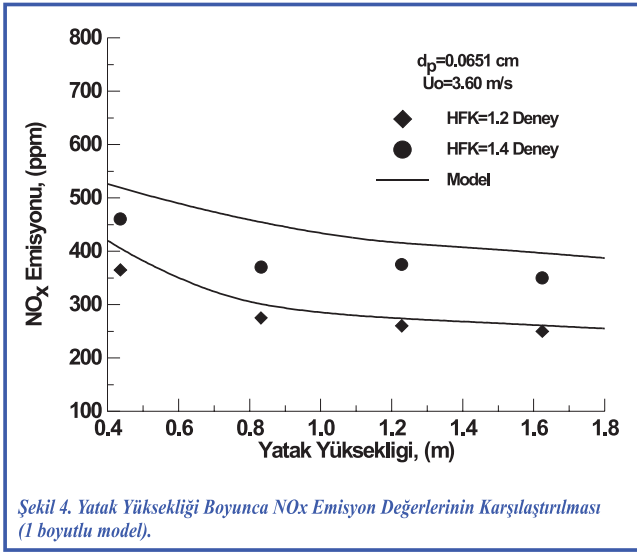
Yakıt Analizi	Yaş	Kuru
C (%)	54.85	59.29
H (%)	4.26	4.61
O (%)	10.64	11.50
N (%)	1.94	2.10
S (%)	1.67	1.81
Kül (%)	19.14	20.60
Nem (%)	7.5	0.0
Üst ısıl değer (kcal/kg)	5553	-
Alt ısıl değer (kcal/kg)	5278	-

karşılaştırılmıştır [1-4]. Pilot yatağa ait işletme şartları ve Tunçbilek linyitine ait elementer analiz sonuçları sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'de verilmiştir. Bu karşılaştırma kapsamında, yatak yüksekliği boyunca O₂, SO₂ ve NO_x emisyonlarının değişimi 1 ve 2 boyutlu model sonuçları ile mukayese edilmiştir (Şekil 3-8).

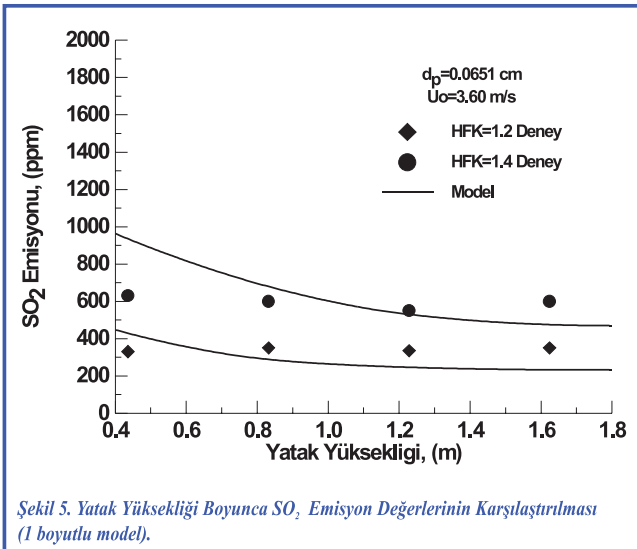
Şekil 3'de, yatak yüksekliği boyunca 1 boyutlu model O₂ mol oranı değerinin, deneysel verilerle karşılaştırılması verilmiştir. Modelde, yatak boyunca yoğun fazdaki oksijen oranının değişiminin oldukça mantıklı olduğu şekilden görülmektedir.



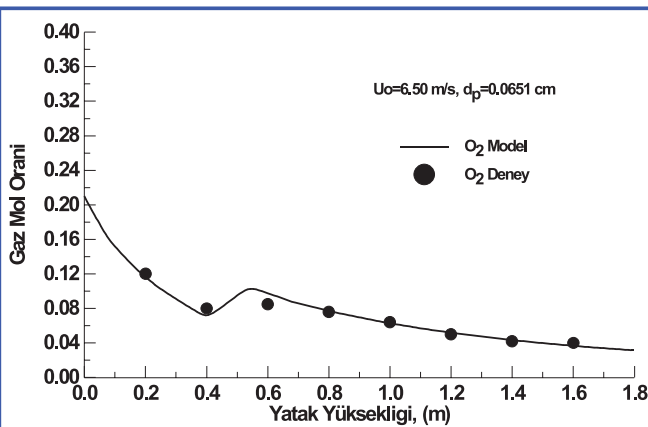
Şekil 4'de, yatak yüksekliği boyunca 1 boyutlu model NO_x emisyon değerinin, farklı hava fazlalık katsayısı değerleri için deneysel verilerle karşılaştırılması verilmiştir. Model



Şekil 4. Yatak Yüksekliği Boyunca NO_x Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması (1 boyutlu model).



Şekil 5. Yatak Yüksekliği Boyunca SO₂ Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması (1 boyutlu model).



Şekil 6. Yatak Yüksekliği Boyunca O₂ Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması (2 boyutlu model).

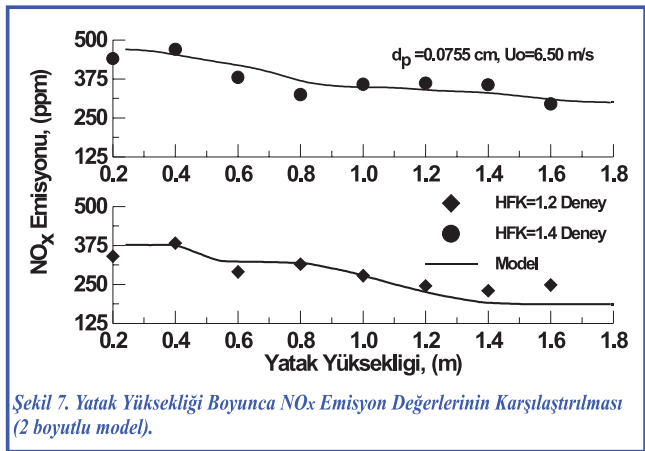
sonuçları, hava fazlalık katsayısının 1.2 değeri için oldukça iyi sonuçlar vermesine karşılık, modelin daha yüksek hava fazlalık katsayısı değerinde iyi tahminler yapamadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 5'de, yatak yüksekliği boyunca 1 boyutlu model SO₂ mol oranı değerinin, deneysel verilerle karşılaştırılması verilmiştir. Model sonuçları deneysel verilerle uyumlu olmasına rağmen, deneysel verilerle özellikle yatağın alt bölgesinde sapmalar olduğu şekilden açıkça görülmektedir.

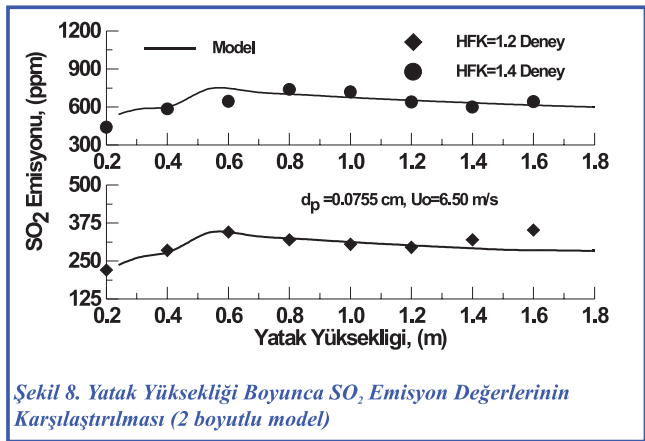
O₂ mol oranı değerinin, yatak yüksekliği boyunca değişimi için 2 boyutlu model ve deneysel verilerin karşılaştırılması Şekil 6'da verilmiştir. Dağıtıcı elekten 0.4 m yukarıda O₂ mol oranında görülen artış ikincil havanın yatağa bu noktadan verilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

NO_x emisyonu değerinin, yatak yüksekliği boyunca değişimi için 2 boyutlu model ve deneysel verilerin karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Uçucu maddelerin alt bölgede açığa çıkması, bu bölgede NO_x emisyonunun yatak yüksekliği boyunca artmasına sebep olmaktadır. Yatak yüksekliği boyunca NO_x emisyonu simulasyon sonuçlarının küçük ölçekli sirkülasyonlu akışkan yatak test ünitesi ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

SO₂ emisyonu değerinin, yatak yüksekliği boyunca değişiminin karşılaştırılması Şekil 8'de verilmiştir. NO_x



Şekil 7. Yatak Yüksekliği Boyunca NO_x Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması (2 boyutlu model).



Şekil 8. Yatak Yüksekliği Boyunca SO₂ Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması (2 boyutlu model).

emisyonunda olduğu gibi uçucuların alt bölgede açığa çıkması SO₂ emisyonlarının da bu bölge boyunca artmasına sebep olmakta, ikincil hava besleme noktasından sonra yatakta yeterli oksijen varlığı, kireçtaşı ile SO₂ tutulmasını arttırmakta ve model sonuçlarının, beklendiği gibi deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 8).

SONUÇLAR

Akışkan yatak teknolojisinde en geliştirilmiş tip yakıcılar olan sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların dizaynı; kömürün yüksek bir verimle yakılması ve baca gazı emisyonlarının kabul edilebilir seviyelerde tutulması için oldukça önemlidir. Genel olarak bakıldığında, 1 boyutlu modelden elde edilen sonuçların;

NO_x emisyonu dikkate alındığında, hava fazlalık katsayısının 1.2 değeri için oldukça iyi sonuçlar vermesine karşılık, modelin daha yüksek hava fazlalık katsayısı değerinde iyi tahminler yapamadığı anlaşılmaktadır.

SO₂ emisyonu dikkate alındığında, model sonuçları deneysel verilerle uyumlu olmasına rağmen, deneysel verilerle özellikle yatağın alt bölgesinde sapmalar olduğu gözlenmiştir.

2 boyutlu model sonuçlarının deneysel verilerle göstermiş olduğu uyum dikkate alındığında; bir boyutlu model sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olmasına rağmen iki boyutlu model sonuçları kadar net bir tahmin yapamadıkları açıkça görülmektedir. Bunun sebebi, 2 boyutlu modelin yataktaki radyal yöndeki değişimleri de dikkate alabilmesi ve detaylı bir çözüm yapabilmemesinden kaynaklanmaktadır. Yatak hidrodinamiğinin detaylı olarak çözülebilmesi, yataktaki kimyasal reaksiyonların çözümlerinde oldukça etkili olmakta ve hidrodinamik modelin doğru tahminleri model tahminlerinin doğruluğu üzerinde etkili bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların modellenmesinin önemi, detayları daha önce literatürde yayınlanmış çalışmalarda verilen, sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar için geliştirilmiş olan 1 ve 2 boyutlu modeller kullanılarak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, bir boyutlu model akışkan yatağın simulasyonunda genel bir fikir vermekle beraber, geliştirilen detaylı iki boyutlu bir modelin akışkan yatağın simulasyonunda çok daha başarılı olabildiği anlaşılmıştır.

Yaklaşık %99'u yatak malzemesi, %1'i kömürden oluşan akışkan yatak; yatak malzemesinin yüksek ısı kapasitesi nedeniyle büyük bir ısı deposu, yüksek türbülans etkisi ile tutuşma stabilizörü, kömür taneciklerini birbirinden ayırarak ergime önleyici, kömür taneciklerinin yatakta kalma süresini arttırarak kok filtresi vb. işlevleri görmekte, bu da her türlü düşük kaliteli yakıtın verimli yanmasını sağlamaktadır.

Tipik bir sirkülasyonlu akışkan yataklı kazanda %90 oranında

SO₂ tutulması gerçekleştirilebilir. Uygulamalarda, sirkülasyonlu sistemde %95, derin yatakta %85 ve sıg yatakta %60 dolaylarında SO₂ giderimi sağlanmaktadır.

Düşük NO_x emisyonu değerleri akışkan yataklı yakıcıların en büyük avantajlarından biridir. Bu yataklar üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen verilere göre NO_x emisyonları 20-150 mg/MJ mertebelerindedir. Bu seviyelerin elde edilmesinde en önemli etken bu tip yakıcıların çalıştıkları sıcaklıkların yakma havası içindeki azotun NO_x oksitlenmesine izin vermeyecek düşük sıcaklıklarda (800-900°C) olmasıdır. NO_x oluşumunu engelleyen ikinci bir avantaj ise bu yakıcıların yakıtın uçucularına ayrıştığı ve yanmanın başladığı alt kesimlerinde stokiyometrik oranda hava beslenerek yanmanın sağlanmasıdır. Bu nedenle yakıttan kaynaklanan azot oksitlerine dönüşmesi için yeterli oksijeni ortamda bulamamaktadır.

Akışkan yatak teknolojisi toz kömürlü (pulverize) kömür yakma sistemleri ile kıyaslandığında, yakıtın hazırlanması çok daha basit ve ekonomiktir. Akışkan yataklı yakma sistemlerinin düşük kaliteli ve toz kömürleri yakması nedeniyle, parça kömür ve fuel-oil yakan sistemlere göre işletme giderleri düşüktür. Akışkan yataklı sistemlerde, fuel-oilli sistemlere göre ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasına karşın, işletme giderlerinin düşüklüğünden bu fark ilk bir-iki yılda kapatılmakta ve enerji üretim maliyeti düşmektedir. Klasik yakma sistemleri için gereken baca gazı desülfürizasyon tesislerine gerek kalmaması, maliyeti klasik yakma sistemlerine yaklaştırmaktadır.

Bu çalışma sonucunda, ülkemiz düşük kaliteli linyit rezervlerinin yüksek verimlilikle değerlendirilmesi ve ulusal ve uluslararası çevre standartlarında verilen emisyon seviyelerine uygun yakılabilmesi açısından en uygun çözümün iyi dizayn edilmiş sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar olduğu anlaşılmıştır. Çevre dostu olan bu teknolojinin ülkemiz linyitlerine adaptasyonu, öz kaynak linyitlerin çevre sorunu yaratmaksızın değerlendirilmesini sağlayacaktır. Kendi öz kaynaklarımızın optimum şartlarda kullanılmasına olanak veren sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların yaygın kullanımının ülkemizin enerji üretiminde önemli katkı sağlayacağı kaçınılmazdır.

KAYNAKÇA

1. **Güngör A. Eskin N.**, Bir Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı Yakıcı İçin Üst Bölgenin Modellenmesi, 14. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı, Isparta, Türkiye, 2003, p.25-35.
2. **Güngör A. Eskin N.**, Analysis of Environmental Benefits of CFB Combustors Via One Dimensional Model, Chemical Engineering Journal, 131/(1-3), 301-317, 2007.
3. **Güngör A. Eskin N.**, Hydrodynamic Modelling of a Circulating Fluidized Bed, Powder Technology, 172, 1-13, 2007.