Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.
Cilt 17, No 1, 77-96, 2002

J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.
Vol 17, No 1, 77-96, 2002

SABİT YATAKTA KÖMÜR YANMA PROSESİNİN MODELLENMESİ

Atilla BIYIKOĞLU
Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlik Fakültesi, Gazi Üniversitesi Maltepe 06570 Ankara, biyik@mmf.gazi.edu.tr

ÖZET

Bir sabit yataktaki kömür yığınının pseudo-kararlı durum yanması incelenmiştir. Kömürün kül, su, sabit karbon ve uçucu maddeden oluştuğu kabul edilmiştir. Bu model, karbonun oksijen ve karbon-dioksit ile heterojen reaksiyonlarını dikkate almaktadır. Sabit yatak içerisindeki ısı ve kütle aktarımını yöneten denklemler, değişken sıcaklık şartlarında, karbon-gaz reaksiyonlarına dayanılarak elde edilmişlerdir. Kömür yarıçap denklemi ile ısı ve kütle aktarımı için elde edilen nonlineer adi diferansiyel denklemler çifti, yarı-açık Üçlü Bant Matris Algoritması kullanılarak eş-zamanlı çözülmüşlerdir. Bunun yanı sıra, kömür tüketimi için geçiş süresi, "Simpson" sayısal integrasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Katı debisinin hem geçiş süresine hem de dönüşüm oranına olan etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kömür yanması, sabit yatak, pseudo kararlı-durum, piroliz.

MODELING OF COAL COMBUSTION PROCESS IN A FIXED BED

ABSTRACT

The pseudo-steady state combustion of coal lump in a fixed bed is investigated. Coal is assumed to be consists of volatile matter, fixed carbon, water and ash. The model considers the heterogeneous reactions of carbon with oxygen and carbon dioxide. Equations governing heat and mass transfer in the fixed bed are derived based on carbon-gas reactions under non-isothermal conditions. The coal radius equation and coupled-nonlinear ordinary differential equations obtained for heat and mass transfer in the bed are solved simultaneously using semi-implicit Tri-diagonal Matrix Algorithm (TDMA). A conversion time for the consumption of coal is also computed by Simpson's rule of numerical integration technique. Effects of solid flow rate on both the conversion time and the conversion ratio are investigated.

Keywords: Coal combustion, fixed bed, pseudo steady state, pyrolysis.

1. GİRİŞ

Petrol ve doğal gaza alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanıldığı için, kömür birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Özellikle, karbon içerikli yakıtların yanma sürecinde daha etkin performans elde edilebilmesi için duyulan gereksinim, deneysel ve teorik çalışmaların kömür yanması üzerine yoğunlaşmasına sebeb olmuştur. Bu çalışmalardan bazıları Caram ve Amundson [1] tarafından özetlenmiştir.

Sabit yatak kömür yanması ile ilgili araştırmalardan bazıları şunlardır: Küçük boyutlu ısı üreticilerdeki sabit yatak yanmasına örnek teşkil eden derin bir yanma kabı içerisinde, Arısoy ve Böke [2] deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. İdeal alttan beslemeli durum için kömür yanma modeli oluşturmuşlar ve kömür tabakası sabit hızda yukarı doğru hareket ederken yanmanın olduğu yeri sabit kabul etmişlerdir. Deneylerde, kömür tabakası sabit tutularak yanmanın ilerleme hızı gözlenmiştir. Bu çalışmada, hem deneysel hem de teorik sonuçlar sunulmuştur.

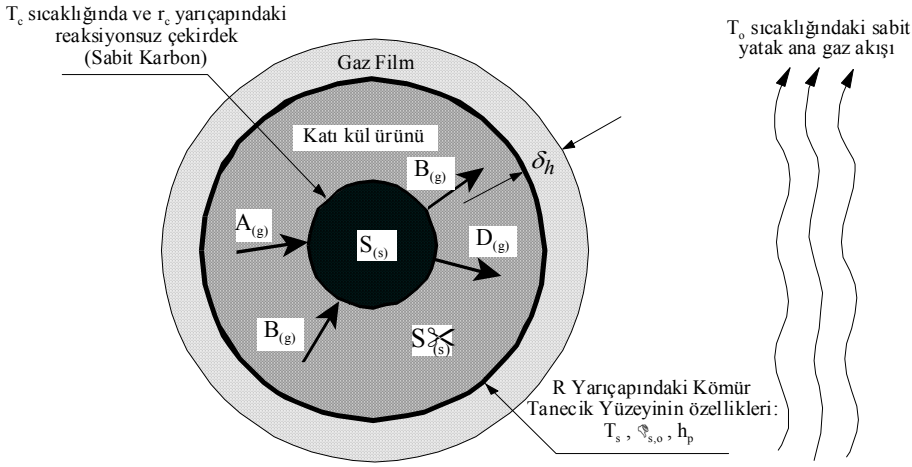
Böke ve Arısoy [3] kararlı durumda, alttan beslemeli sabit yatak kömür yanması için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Kütle, bileşenler ve enerji korunum denklemleri yardımıyla sabit yatak yanmasının 1-Boyutlu modeli matematiksel olarak kurulmuştur. Sabit yatak duvarından olan ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Bu model kullanılarak, kömür tipinin etkileri, tanecik boyutu ve hava fazlalık katsayısı araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen kömür ve hava besleme debileri girdi verisi olarak alınmıştır. Bilgisayar simulasyonu kullanılarak yanma ürünlerinin konsantrasyon değerleri, sıcaklık ve sabit karbon dağılımları tahmin edilebilmiştir. Ayrıca, tüm yanıcı maddelerin tükendiği maksimum yakıt yatağının yüksekliği belirlenmiştir.

Ford, Cooke ve Sage [4] yakıt yatağı içerisinde bilgisayar tabanlı yanma modeli geliştirmişlerdir. Bu model mevcut kömür yanma modeli üzerine kurulmuş ve hareketli ızgara üzerindeki yakıt yatağı şartlarının oluşturulabilmesi için geliştirilmiştir. Bu model yakıtın uçuculaşma, yanma ve kül oluşumu ile soğuma safhalarını dikkate almaktadır. Isı ve kütle korunum denklemleri, seçilen zaman aralıklarında çözülmüştür. Bu sayede, yatak içerisinde herhangi bir noktada, yanma ürünü gaz bileşimleri ve sıcaklık tahmin edilebilmiştir. Modelde girdi verisi olarak kömür bileşiminin yanı sıra, ızgara hızı, hava fazlalık oranı ve yakıt yanma hızı gibi temel santral işletim parametreleri kullanılmıştır. Bu model yakıt yatağı yanma gaz bileşimini ve sıcaklık dağılımını tahmin etmek için kullanılmıştır. Sabit ızgara ve santraldan elde edilen verilerin model tahminleri ile karşılaştırılması iyi uyum sağlamıştır ve model tahminlerine olan güveni artırmıştır.

Bu çalışmada ise, tek tanecik üzerine yapılan çalışmalardan kazanılan bilgiler yardımıyla oluşturulan sabit yataktaki kömür yanmasının non-isotermal kararlı durum analizi sunulmuştur. Yakıt yatağı içerisinde kömür tanecikleri tükenirken kömür parçacığının reaksiyonsuz büzülen çekirdek modelini [9] izlediği kabul edilmiştir. Yakıt yatağının duvarlarından olan ısı kaybı ihmal edilmiştir.

2. SABİT YATAĞIN TANIMI VE KABULLER

Şekil 1'de görüldüğü üzere, analizi yapılan sabit yatak, katı fazdaki küresel kömür tanecikleri ile etrafını çevreleyen gaz fazındaki akışkan akımından oluşmaktadır. Kömür, sabit yatağın üzerinden beslenirken buna karşılık sabit yatağın altından hava beslemesi yapılmakta, yanma sonucu açığa çıkan gazlar ana akışkan akımını oluşturan ve kömür taneciklerini çevreleyen havaya dahil olmaktadırlar. Genel olarak değerlendirildiğinde, sabit yataklar gözenekli ortam olarak ele alınabilirler, ancak bu çalışmada, katı ve gaz fazları ayrı ayrı analiz edilmiş ve katı fazı oluşturan kömür taneciklerinin yanması sonucu açığa çıkan enerji ve yanma ürünü gazlar, gaz fazı analiz edilirken hesaba katılmıştır. Kömür yanması, kömürün pirolizi ve yanması olarak iki safhada incelenmiştir.

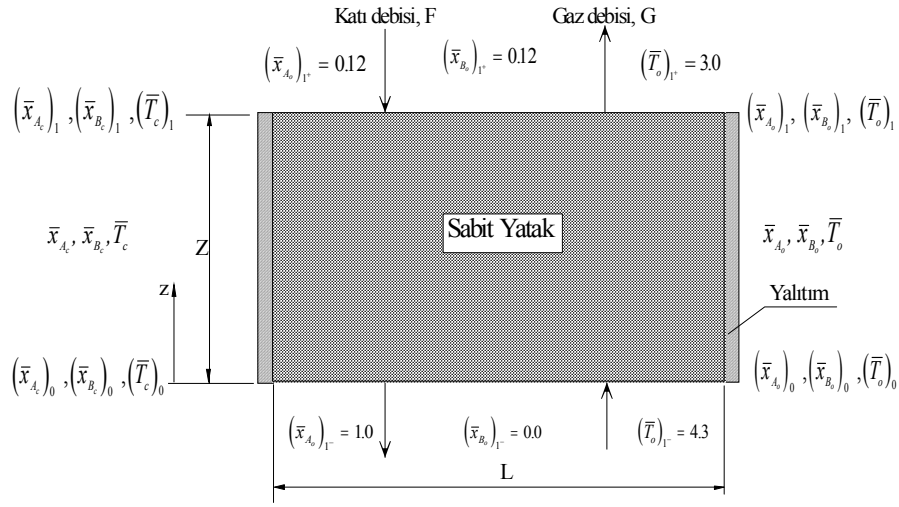


Şekil 1. Kömür taneciğinin şematik görünümü

Şekil 2'de sabit yatağın şematik görünümü ve besleme durumu verilmiştir. G molar debili hava, $T_o\big|_O$ giriş sıcaklığında, sabit yatağın altından beslenmekte ve yatağın üstünden $T_o\big|_Z$ sıcaklığında yatağı terketmektedir. Karşı-akım katı akışını inceleyecek olursak, F molar debili kömür tanecikleri, $T_c\big|_Z$ sıcaklığında, sabit yatağın üzerinden yatağa girer ve $T_c\big|_O$ sıcaklığında yatağı terkederler. Analizde, kömür taneciklerinin küresel formda olduğu ve 'reaksiyonsuz büzülen çekirdek modeli'ne göe hareket ettiği varsayılmıştır. Kömür taneciklerinin kül, su, sabit karbon ve uçucu maddeden oluştuğu kabul edilmiştir. Bu model, karbonun oksijen ve karbon-dioksit ile heterojen reaksiyonlarını dikkate almaktadır. Kömürün pirolizi sonucu açığa çıkan uçucu maddelerin karbon-dioksit, karbon-monoksit, metan,

hidrojen ve su buharından oluştuğu, çeşitli sıcaklık aralıklarında salındığı [3] ve yakıt yatağından çıktıktan sonra yandığı kabul edilmiştir [5]. Piroliz sonucu açığa çıkan uçucu gazlarla birlikte yanma ve eşliğindeki reaksiyonlar sonucu oluşan karbon-monoksit ve karbon-dioksit gazlarının ana gaz akışına katıldığı kabul edilmiştir. Azot ve su buharının sabit yataktan herhangi bir reaksiyona girmeden geçtiği kabul edilmiştir.

Sabit karbonun yanmasında şu iki ana safha dikkate alınmıştır: (1) Ana akıştaki oksijen, karbon-dioksit ($C + O_2 \rightarrow CO_2$) oluşturmak için reaksiyona girdiği kömür taneciğinin yüzeyine difüz eder. (2) Ana gaz akışının karbon-dioksit içeriği safha (1) yardımıyla arttıkça, karbon-dioksit, katı-gaz arayüzeyine difüz eder ve karbon-monoksite indirgenir ($CO_2 + C \rightarrow 2CO$). Kömür taneciğinin yüzeyindeki kimyasal reaksiyonlar yüksek sıcaklıklarda olduğu için karbon, karbon-monoksit, karbon-dioksit ve oksijen arasındaki kimyasal dengeye çabuk ulaşıldığı ve reaksiyonların difüzyon kontrollü olduğu kabul edilmiştir. Sabit karbonun yanma modeli ile elde edilen ürün gazlar karbon-dioksit ve karbon-monoksit gazlarıdır.



Şekil 2. Katı-gaz reaksiyonları içeren karşı akışlı sabit yatağın şematik görünümü

Piroliz sonucu açığa çıkan gazların herhangi bir reaksiyona girmeden ana gaz akımına dahil olduğu kabul edilmiştir. Azot gazının hiç bir reaksiyona girmeden yataktan çıktığı kabul edilmiştir. Ana gaz akımı yataktan geçerken, sabit karbonun yanması ve kömürün pirolizi sonucu açığa çıkan gazların ilavesi ile, bileşiminde meydana gelen değişiklik, havadan gelen azot konsantrasyonunda azalmaya sebep olmaktadır.

3. REAKSİYONSUZ BÜZÜLEN ÇEKİRDEK ETRAFINDA KÜTLENİN KORUNUMU

Reaksiyonsuz büzülen çekirdek [6] etrafında kütlenin korunumu, debi cinsinden aşağıdaki denklem ile ifade edilir [7],

$$\dot{m}''_A + \dot{m}''_B = (a+b)C_{S_o}\left(-\frac{dr_c}{dt}\right) \tag{1}$$

Bu denklemde, A ve B alt indisleri oksijen ve karbondioksit gaz bileşenlerini, a ve b ise bu gazların C/O_2 reaksiyonundaki stokiyometrik katsayılarını göstermektedir. Tanecik çekirdek yarıçapı r_c, zaman ise t sembolü ile gösterilmiştir. C_{S_o} taneciğin başlangıçtaki katı konsantrasyonunu temsil etmektedir. Reaksiyonsuz büzülen çekirdek denklemi, Denklem (1) ile ürün kül tabakası için Bıyıkoğlu [8] tarafından oluşturulan kütle korunum denklemi birleştirilerek katı yarıçap denklemi aşağıdaki formda [5, 7-9] elde edilmiştir,

$$\frac{dr_c}{dt} = -\left(\frac{a}{a+b}\right)k_s\eta_s C_o x_{A_o} - \left(\frac{b}{a+b}\right)k'_s\eta'_s C_o x_{B_o} \tag{2}$$

Bu denklemde, C/O_2 ve C/CO_2 reaksiyonları için kullanılan yüzey reaksiyon hızları, sırasıyle, k_s ve k'_s sembolleri ile ifade edilmişlerdir. Gerçek reaksiyon hızının gözlenen reaksiyon hızına oranı olarak tanımlanan C/O_2 reaksiyonunun etkinlik katsayısı, η_s aşağıdaki denklem [9] ile ifade edilebilir,

$$\eta_s = \frac{1}{1+\varphi_{s_i}\left[1-\psi\left(1-Bi_{m_i}^{-1}\right)\right]\psi\left(k_s/k_{s_o}\right)} \tag{3}$$

Bu denklemde geçen Bi_{m_i} boyutsuz sembolü tanecik için tanımlanmış bölgesel kütle Biot Sayısı'dır ve $Bi_{m_i} = k_{m_i}R/D_{e_i}$ ifadesi ile verilir. Denklem (3)'den açıkça görülmektedir ki; η_s, sabit yataktaki 'A' veya 'B' gazlarının konsantrasyonlarındaki değişiklikten etkilenmemektedir [10]. C/CO_2 reaksiyonunun etkinlik katsayısı, η'_s, k_s ve k_{s_o} yerine k'_s ve k'_{s_o} kullanılarak Denklem (3) ile ifade edilebilir. Tanecik çekirdek yarıçapı, r_c 'nin orjinal tanecik yarıçapı, R'ye oranı ψ ile gösterilir ve $\psi = r_c/R$ olarak tanımlanır. Kimyasal reaksiyon hızının difüzyon hızına oranı $\varphi_{s_i} = Rak_s C_{s_o}/D_{e_i}$ ifadesi ile verilmiştir.

Sabit yatak için makro kütle korunumu kurularak,

$$F = u_s\left(1-\varepsilon_T\right)C_{S_o} \tag{4}$$

ifadesi elde edilir [9]. Bu denklemde, u_s, katı akış hızını gösterir ve $u_s = -dz/dt$ olarak tanımlanabilir. ε_T yatağın boşluk oranıdır. F ise katıların toplam molar debisini temsil etmektedir. Denklem (2) ve (4) kullanılarak boyutsuz katı yarıçap denklemi z-koordinatına bağlı olarak,

$$\frac{d\psi}{d\bar{z}} = \left[\Pi_5 \frac{a}{a+b}\eta_s\left(\frac{k_s}{k_{s_o}}\right)\bar{x}_{A_o} + \Pi_5' \frac{b}{a+b}\eta_s'\left(\frac{k_s'}{k_{s_o}'}\right)\bar{x}_{B_o}\right] \qquad \psi = 1 \quad at \quad \bar{z} = 1 \tag{5}$$

elde edilir. Bu denklemde 'A' ve 'B' gaz bileşenleri için boyutsuz mol kesirleri ve z koordinatı, sırasıyla, $\bar{x}_{A_o} = x_{A_o}/\left(x_{A_o}\right)_{0^-}$, $\bar{x}_{B_o} = x_{B_o}/\left(x_{A_o}\right)_{0^-}$ ve $\bar{z} = z/Z$ olarak tanımlanmıştır. Şekil 2'de görüldüğü üzere, 0^- alt indisi sabit yatağa tam girmeden önceki hava bölgesini, Z ise yatak yüksekliğini temsil etmek için kullanılmıştır. Π_5 ve Π_5' boyutsuz gurupları $\Pi_5 = \left(n/\gamma f_k\right)Da_{2,A}/Bi_{m,A}$ ve $\Pi_5' = \left(n/\gamma f_k\right)Da_{2,B}/Bi_{m,B}$ olarak tanımlanmıştır. n ve γ parametreleri, sırasıyla, z-yönündeki şekil faktörü, $n = Z/R$ ve katı S taneciğinin başlangıç konsantrasyonununun 'A' gaz bileşeninin yatağa giriş konsantrasyonuna oranıdır ve $\gamma = C_{S_o}/\left(C_{A_o}\right)_{0^-}$ olarak tanımlanmışlardır. İkinci Damköhler (Da_2) sayısı reaksiyon hızının difüzyon hızına oranını yansıtmaktadır ve $Da_{2,i} = k_{s_o}C_{S_o}R/D_{e_i}$ olarak tanımlanmıştır.

4. SABİT YATAKTA KÜTLE VE ENERJİNİN KORUNUMU

Sabit yataktaki eksenel kütle aktarımı incelenirken reaktif gazların konsantrasyon ve sıcaklık profillerinin düz olduğu ve katı taneciklerin birbiriyle karışmadığı kabul edilmiştir.

Konveksiyon ve difüzyon aktarım terimleri dikkate alınarak, sabit yatak içerisinde, 'A' gaz bileşeni ve katı için kütle korunumu,

$$-\frac{dN_{A_o}}{dz} + a\frac{dF_s}{dz} + \left(1-\varepsilon_T\right)\cdot \dot{m}'''_{VM_A} = 0 \tag{6}$$

elde edilir. Bu denklemde N_{A_o} ana akıştaki 'A' gaz bileşeni için konvektif ve difüzif molar akıyı temsil etmektedir ve $N_{A_o} = Gx_{A_o} - C_oE_m\left(dx_{A_o}/dz\right)$ olarak tanımlanmıştır. G ana akışın toplam molar debisidir. F_s katı akısını göstermektedir ve $F_s = F\left(r_c/R\right)^3$

olarak tanımlanmıştır. E_m sabit yatağın eksenel dağılım katsayısıdır. $\dot{m}'''_{VM_A}$ 'A' gaz bileşenine ait uçucu maddelerin birim hacimdeki molar debisini göstermektedir.

Sabit yatak alt sınır şartı,

$$N_{A_o} = G x_{A_o}\Big|_{0^-} \tag{6a}$$

ile verilmiştir. Sabit yatak üst sınır şartı ise,

$$-E_m \frac{dx_{A_o}}{dz}\bigg|_{Z^-} = K_m \left(x_{A_o}\Big|_{Z^-} - x_{A_o}\Big|_{Z^+} \right) \tag{6b}$$

olarak tanımlanmıştır. Bu sınır şartında geçen K_m sembolü sabit yatağın kütle aktarım katsayısını göstermektedir. $Z^-ve\,Z^+$ alt indisleri ise üst sınırdaki sabit yatak iç ve dış bölgelerini göstermektedir.

Katı ve 'B' gaz fazı için sabit yataktaki kütle korunumu aşağıdaki formu alır,

$$-\frac{dN_{B_o}}{dz} + b\frac{dF_s}{dz} + \left(1-\varepsilon_T\right)\cdot \dot{m}'''_{VM_B} = 0 \tag{7}$$

Bu denklemde N_{B_o} ana akıştaki 'B' gaz akışı için konvektif ve difüzif molar akıyı temsil etmektedir ve $N_{B_o} = G x_{B_o} - C_o E_m \left(dx_{B_o}/dz \right)$ olarak tanımlanmıştır. $\dot{m}'''_{VM_B}$ 'B' gaz bileşenine ait uçucu maddelerin birim hacimdeki molar debisini göstermektedir. 'B' bileşeni için sabit yatak alt sınır şartı,

$$N_{B_o}\Big|_{0^+} = 0 \tag{7a}$$

sabit yatak üst sınır şartı ise,

$$-E_m \frac{dx_{B_o}}{dz}\bigg|_{Z^-} = K_m \left(x_{B_o}\Big|_{Z^-} - x_{B_o}\Big|_{Z^+} \right) \tag{7b}$$

olarak tanımlanmışlardır. Sabit yatak içerisinde katı ve gaz fazları için enerjinin korunumu diferansiyel formda ifade edilecek olursa,

$$\frac{dq}{dz} + q_s - \left(1-\varepsilon_T\right)\cdot \dot{m}'''_{VM_i} \cdot h_i = 0 \tag{8}$$

denklemine ulaşılır. Bu denklemde q gaz fazı için geçerli konvektif ve difüzif terimleri içeren ısı akısını göstermektedir ve $q = c_p G T_o - E_h \left(dT_o / dz\right)$ ile tariflenmiştir. Fazlar arasındaki ısı akısı q_s ile gösterilmiş ve $q_s = \left(3/R\right)\left(1-\varepsilon_T\right) h_p \left(T_s - T_o\right)$ ile tanımlanmıştır. T_s katı parçacığın dış yüzeyindeki sıcaklıktır ve $\left(T_s - T_c\right)/\left(T_o - T_c\right) = \left(1/r_c - 1/R\right)/\left[1/r_c - 1/\left(R+\delta_h\right)\right]$ ile verilir [9]. T_o sabit yatak içerisindeki gaz karışımının sıcaklığıdır (bkz: Şekil 1). h_i 'i' gaz bileşeninin entalpisini göstermektedir.

Enerji denklemi için sabit yatak alt sınır şartı,

$$q = c_p G T_o\big|_{0^-} \tag{8a}$$

ve üst sınır şartı

$$-E_h \left.\frac{dT_o}{dz}\right|_{Z^-} = h_g \left(T_o\big|_{Z^+} - T_o\big|_{Z^-}\right) \tag{8b}$$

ile verilmiştir. Bu denklemdeki h_g sabit yataktaki gaz karışımının ısı transfer katsayısını göstermektedir. Boyutsuz değişkenler tanımlanarak 'A' bileşeni için kütle korunumunun boyutsuz formu aşağıdaki şekilde elde edilir,

$$\frac{1}{Bo}\frac{d^2 \bar{x}_{A_o}}{d\bar{z}^2} - \frac{d\bar{x}_{A_o}}{d\bar{z}} = -\frac{d}{dz}\left(\frac{\psi}{k}\right)^3 - \Pi_{6_A} \cdot \exp\left(-\frac{Ar_A}{\bar{T}_o}\right) \tag{9}$$

Bu denklemde geçen Bo boyutsuz ifadesi Bodenstein Sayısıdır ve $Bo = u_{0^-} Z / E_m$ ile tanımlanır. k boyutsuz parametresi ise $k = -\left[G x_{A_o}\big|_{0^-} / aF\right]^{1/3}$ olarak tanımlanmıştır. Boyutsuz grup Π_{6_A} ise $\Pi_{6_A} = (1-\varepsilon_T) \cdot Bo \cdot K_A$ olarak tanımlanmıştır. Bu grubun içerdiği K_A sadece 'A' bileşenine ait katsayıları içermektedir ve $K_A = \frac{\rho_p Z}{h_p} \cdot St_A \cdot w_A$ ile temsil edilmiştir. St_A, 'A' bileşeni için Stanton Sayısıdır ve $St_A = \frac{h_p}{c_{p_A} G_A\big|_{0^-}}$ ile tanımlanmıştır. w_A, 'A' bileşeni için kullanılan katsayıları bir arada bulunduran ifadedir ve $w_A = \frac{k_{o_A} m^*_{v\,A} c_{p_A}}{M_A}$ olarak tanımlanmıştır. k_{o_A}, 'A' uçucu bileşeni için reaksiyon hız sabitidir ve aldığı değerler [5,11] nolu

kaynaklardan alınmıştır. $m^*_{v_A}$, 'A' uçucu bileşen için kömür taneciği etkin kütlesel uçucu içeriğinin orjinal kömür tanecik kütlesine oranı şeklinde tanımlanır [5] ve aldığı değerler [11] nolu kaynaktan alınmıştır. M_A, A bileşeninin molekül ağırlığıdır. Ar, 'A' uçucu bileşeni için kullanılan Arhenius Sayısı'dır ve $Ar_A = \dfrac{E_A}{\Re T_a}$ olarak tanımlanır. E_A, 'A' bileşeninin aktivasyon enerjisidir. $\Re$ evrensel gaz sabiti, T_a ise atmosfer sıcaklığıdır.

'A' bileşeninin korunum denklemi için sabit yatak alt sınır şartı,

$$\frac{1}{Bo}\frac{d\bar{x}_{A_o}}{d\bar{z}}\bigg|_{0^+} - \bar{x}_{A_o}\big|_{0^+} = -1 \tag{9a}$$

olarak alınmıştır. 0^- *ve* 0^+ alt indisleri sabit yatağın alt sınırı civarındaki, sırasıyla, hava ve sabit yatak içeren bölgeleri temsil etmek için kullanılmışlardır. Katı ve gaz fazları arasındaki kütle aktarım katsayısını ve üst sınırdaki kömürden olan gaz salınımını dikkate alarak elde edilen üst sınır şartı için kütlenin korunumu

$$\frac{1}{Bo}\frac{d\bar{x}_{A_o}}{d\bar{z}}\bigg|_{1^-} - \bar{x}_{A_o}\big|_{1^-} = \frac{1}{Bo^+}\frac{d\bar{x}_{A_o}}{d\bar{z}}\bigg|_{1^+} - \bar{x}_{A_o}\big|_{1^+} \tag{9b}$$

denklemini verir. Sabit yatağın üst sınırının üzerindeki ortamda 'A' gaz bileşeninin konsantrasyonu $\bar{x}_{A_o}\big|_{1^+}$ ile gösterilmiştir. Bo^+, sabit yatak üzerindeki akış için tanımlanmış Bodenstein Sayısı'dır.

Sabit yataktaki 'B' gaz bileşeni için kütle korunumunun boyutsuz ifadesi ile,

$$\frac{1}{Bo}\frac{d^2\bar{x}_{B_o}}{d\bar{z}^2} - \frac{d\bar{x}_{B_o}}{d\bar{z}} = -\frac{d}{d\bar{z}}\left(\frac{\psi}{k'}\right)^3 - \Pi_{6_B}\cdot\exp\left(-\frac{Ar_B}{\bar{T}_o}\right) \tag{10}$$

denklemine ulaşılır. Bu denklemde geçen k' boyutsuz bir parametredir ve $k' = \left[Gx_{B_o}\big|_{0^-} / aF\right]^{1/3}$ olarak tanımlanmıştır.

'B' bileşeninin korunum denklemi için sabit yatak alt sınır şartı,

$$\frac{1}{Bo}\frac{d\overline{x}_{B_o}}{d\overline{z}}\bigg|_{0^+} - \overline{x}_{B_o}\big|_{0^+} = 0 \tag{10a}$$

ve üst sınır şartı için Denklem (9b) elde edilirken uygulanan yol takip edilerek,

$$\frac{1}{Bo}\frac{d\overline{x}_{B_o}}{d\overline{z}}\bigg|_{1^-} - \overline{x}_{B_o}\big|_{1^-} = \frac{1}{Bo^+}\frac{d\overline{x}_{B_o}}{d\overline{z}}\bigg|_{1^+} - \overline{x}_{B_o}\big|_{1^+} \tag{10b}$$

denklemlerine ulaşılır. Sabit yatağın üst sınırının üzerindeki ortamda 'B' gaz bileşeninin konsantrasyonu $\overline{x}_{B_o}\big|_{1^+}$ ile gösterilmiştir.

Sabit yatak içerisinde enerjinin korunumu prensibi uygulanarak aşağıdaki diferansiyel denkleme ulaşılır,

$$\frac{d^2\overline{T}_o}{d\overline{z}^2} - \Pi_1\frac{d\overline{T}_o}{d\overline{z}} - \Pi_2\overline{T}_o = -\Pi_9\left(-\Delta H_A\cdot\dot{m}_A + \Delta H_B\cdot\dot{m}_B\right) - \Pi_2 - \left(\sum_{i=1}^{5}\Pi_{VM_i}\dot{m}'''_{VM_i}\right)\overline{T}_o \tag{11}$$

Bu denklemde, Π_2, Π_9 ve Π_{VM_i} sembolleri boyutsuz grupları temsil eder ve sırasıyle, $\Pi_2 = 2(n/m)^2\,Nu_L$, $\Pi_9 = 3n(1-\varepsilon_T)\left(\frac{R}{E_h T_a}\right)$, $\Pi_{VM_i} = \left(\frac{w_i}{w_A}\right)\left(\frac{\overline{St}}{St_A}\right)\Pi_{6_A}$, ifadeleri ile tanımlanırlar. 'A' gaz bileşeninin bir molü için gereken reaksiyon ısısı $-\Delta H_i$ ile gösterilmiştir. $\dot{m}_{VM_i}$, 'i' uçucu bileşeni için molar debiyi ifade etmek için kullanılmıştır.

Enerji denklemi için alt sınır şartı aşağıdaki gibi verilmiştir,

$$\frac{1}{\Pi_1}\frac{d\overline{T}_o}{d\overline{z}}\bigg|_{0^+} - \overline{T}_o\big|_{0^+} = -4.3 \tag{11a}$$

Bu sınır şartında geçen Π_1 boyutsuz grubu $\Pi_1 = Nu_Z/St$ olarak tanımlanmıştır. Stanton Sayısı ise $St = h_p\Big/\sum_i c_{p_i}G_i\big|_{0^-}$ olarak tanımlanmıştır. Burada geçen "i" indisi sabit yatak içerisindeki gaz karışımının bir bileşenini temsil etmektedir. h_p ise parçacığın dış yüzeyindeki ışıma ve taşıma ısı aktarım türlerini içeren gaz film ısı aktarım katsayısıdır. Nusselt Sayısı ise karakteristik uzunluk Z alınarak $Nu_Z = UZ/E_h$ şeklinde tanımlanmıştır.

Hem sabit yatak içerisinde hemde sabit yatak üzerindeki ortamda konvektif ve difüzif ısı transferini dikkate aldığımızda üst sınır için enerji korunumu,

$$\frac{1}{\Pi_1}\left.\frac{d\overline{T}_o}{d\bar{z}}\right|_{1^-} - \left.\overline{T}_o\right|_{1^-} = \frac{1}{\Pi_1^+}\left.\frac{d\overline{T}_o}{d\bar{z}}\right|_{1^+} - \left.\overline{T}_o\right|_{1^+} \tag{11b}$$

denklemini verir. Bu denklemde, sabit yatak üst sınırının üzerindeki ortamın sıcaklığı $\left.\overline{T}_o\right|_{1^+}$ ile gösterilmiştir. Π_1^+ ise sabit yatak üzerindeki ortam için tanımlanmış boyutsuz gruptur.

5. GEÇİŞ SÜRESİ

Geçiş süresi, Z yüksekliğindeki sabit yataktaki char taneciklerinin tamamının katı fazdan gaz faza geçişi için gerekli zamandır. Denklem (4) kullanılarak,

$$\frac{d\bar{z}}{d\tau} = -\frac{kBo}{30n^2} \tag{12}$$

yazılabilir. Bu denklemdeki τ boyutsuz zamanı göstermektedir ve

$$\tau = \left[\frac{3D_{e_A}C_{A_o}\Big|_{0^-}}{akR^2C_{S_o}}\right]t \tag{13}$$

olarak tanımlanmıştır. D_{e_A} ürün kül tabakasındaki 'A' gaz bileşeninin etkin difüzivitesidir. Boyutsuz geçiş süresi aşağıdaki integral ile ifade edilebilir,

$$\tau = \int_0^{\psi}\frac{d\tau}{d\psi}d\psi \tag{14}$$

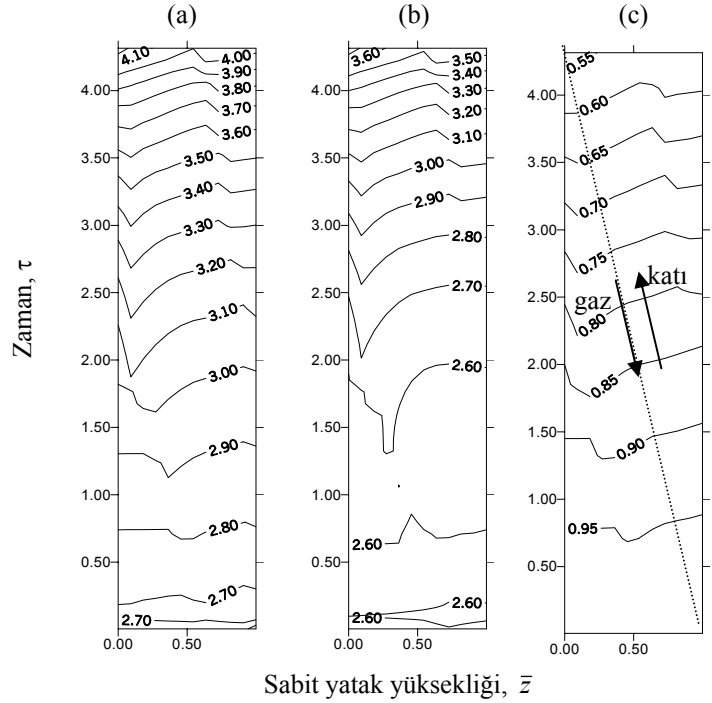
Denklem (5) ve (12)'nin ışığında, Simpson sayısal integrasyon tekniği kullanılarak Denklem (14)'ün çözülmesiyle geçiş süresi hesaplanabilir. Toplam geçiş süresi integrasyon sınırının 0 ile 1 arasında alınmasıyla hesaplanır.

Tek tanecik içerisinde yer alan katı-gaz reaksiyon modeli kullanılarak Pseudo kararlı-durum kabulu altında bir çözüm elde edilmiştir. Bu model, reaksiyonların çekirdek yüzeyinde olduğu kabulü üzerine kurulmuştur. Reaksiyon sırasında etkin difüzivite, D_{e_A} sabit kabul edilmiştir. Katı-gaz reaksiyonları için etkinlik faktörleri tanımlanmıştır. Daha sonra, bu çözüm, hem katı hem de gaz fazlarını içeren sabit

yatak için uyarlanmıştır. Sabit yatak için gaz karışımının transport denklemleri, katı ve gaz arasındaki ısı ve kütle aktarımı dikkate alınarak elde edilmiştir. Katı-yarıçap denklemi ile sabit yatak için elde edilen diferansiyel denklem çifti, boyutsuzlaştırıldıktan sonra, yarı-açık Üçlü Bant Matris Algoritması kullanılarak çözülmüşlerdir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın sonuçları Şekil 3-8 ile Tablo 1'de sunulmuştur. Katı geçiş süresi ve dönüşüm oranı Tablo 1'de sunulmuştur. Boyutsuz gaz sıcaklığı, $\overline{T}_o$ ve çekirdek sıcaklığı, $\overline{T}_c$ 'nin boyutsuz zaman, τ 'ya ve sabit yatak yüksekliği, $\bar{z}$ 'e göre değişimi Şekil 3a ve 3b'de verilmiştir. $\tau = 0$ zamanında sabit yatağın altında çekirdek ve gaz sıcaklıkları, sırasıyla, 2.5 ve 2.8 değerleri civarındadır. Sabit yataktaki gaz sıcaklığı zaman ilerledikçe yatak altında 4.2 değerine ulaşmakta ve çekirdek sıcaklığı ise 3.6 değerine yaklaşmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü üzere, gaz sıcaklığı daima kömür çekirdek sıcaklığından yüksektir ve yatağın altından üst kısmına doğru gidildikçe lineer olarak azalmaktadır. Zaman ilerledikçe,

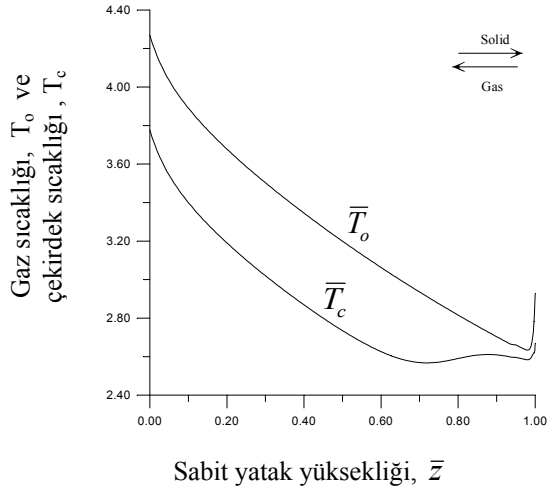


Şekil 3. Sabit yatak içerisindeki (a) Gaz sıcaklığı, $\overline{T}_o$ (b) çekirdek sıcaklığı, $\overline{T}_c$ ve (c) tanecik çekirdek yarıçapı, ψ dağılımlarının sabit yatak yüksekliği, $\bar{z}$ ve zamana, τ göre değişimi

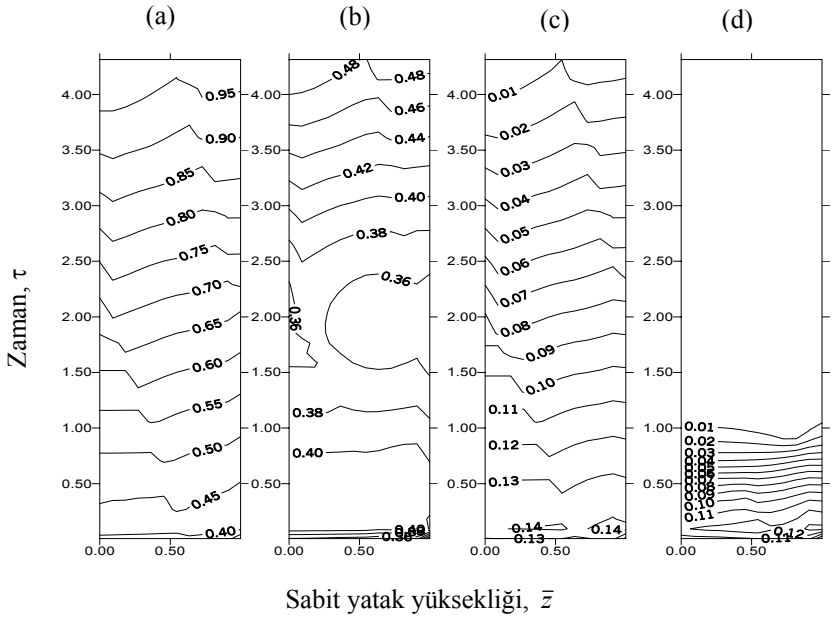
kömür tanecikleri yerçekiminin etkisiyle ve yanma reaksiyonları sonucu boyutu ufalarak aşağı doğru hareket ederler. Sabit yatağın alt kısmında ($\bar{z} = 0$), $\tau = 4.314$ zamanında kömür taneciklerinin boyutsuz büyüklüğü, ψ, 0.48 değerine kadar indirgenir (bkz. Tablo 1 ve Şekil 3c). τ=4.314 zamanında sabit yatağın üzerinde boyutsuz tanecik çekirdek büyüklüğü 0.50 civarındadır (bkz. Şekil 3c).

Tablo 1. Yatak yüksekliğine karşılık gelen katı yarıçapı ve geçiş süresi

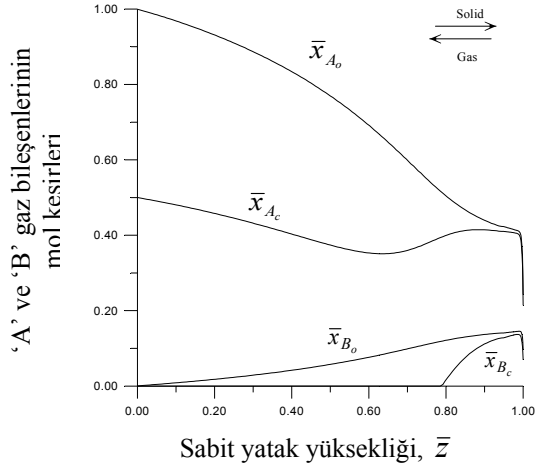
$\bar{z}$	$\Pi_5 = 0.0005$		$\Pi_5 = 0.0004$		$\Pi_5 = 0.0003$	
	ψ	τ	ψ	τ	ψ	τ
0.000	0.52814	4.314	0.59246	4.260	0.65927	4.245
0.101	0.57758	4.024	0.63353	3.982	0.69248	3.976
0.203	0.62710	3.721	0.67532	3.690	0.72673	3.691
0.304	0.67741	3.397	0.71834	3.373	0.76245	3.378
0.405	0.72932	3.036	0.76328	3.017	0.80021	3.024
0.500	0.78026	2.645	0.80787	2.628	0.83812	2.631
0.602	0.83775	2.140	0.85867	2.119	0.88171	2.110
0.703	0.89734	1.514	0.91148	1.485	0.92705	1.459
0.804	0.95041	0.833	0.95783	0.804	0.96590	0.778
0.906	0.98332	0.315	0.98589	0.303	0.98867	0.291
1.000	1.00000	0.000	1.00000	0.000	1.00000	0.000



Şekil 4. Sabit yatak içerisindeki gaz sıcaklığı, $\overline{T}_o$ ve tanecik çekirdek sıcaklığının, $\overline{T}_c$ yatak yüksekliği ile değişimi

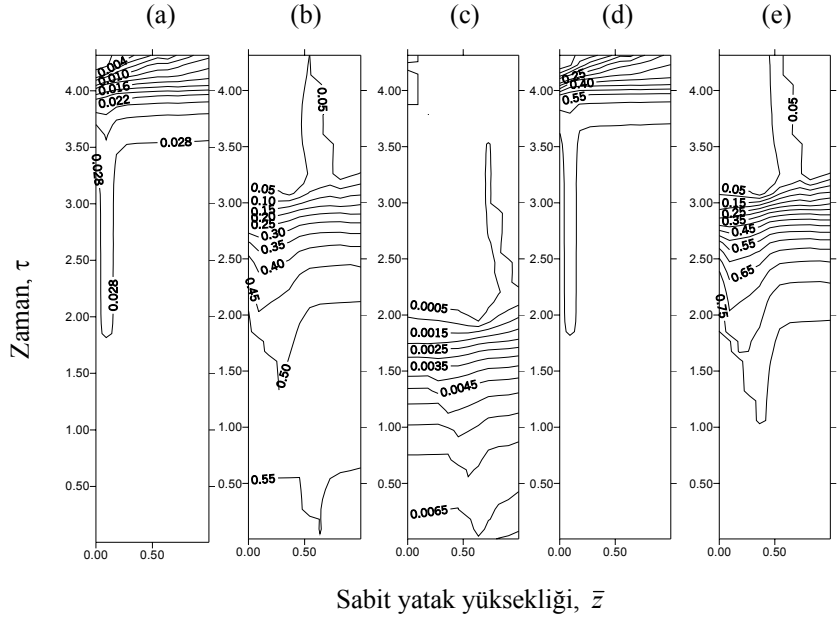


Şekil 5. Sabit yatak içerisindeki (a) oksijen konsantrasyonu, $\bar{x}_{A_O}$, (b) oksijen çekirdek konsantrasyonu, $\bar{x}_{A_c}$, (c) karbon-dioksit konsantrasyonu, $\bar{x}_{B_o}$, (d) karbon-dioksit çekirdek konsantrasyonunun, $\bar{x}_{B_c}$ yatak yüksekliği, $\bar{z}$ ve zamana, τ göre değişimi

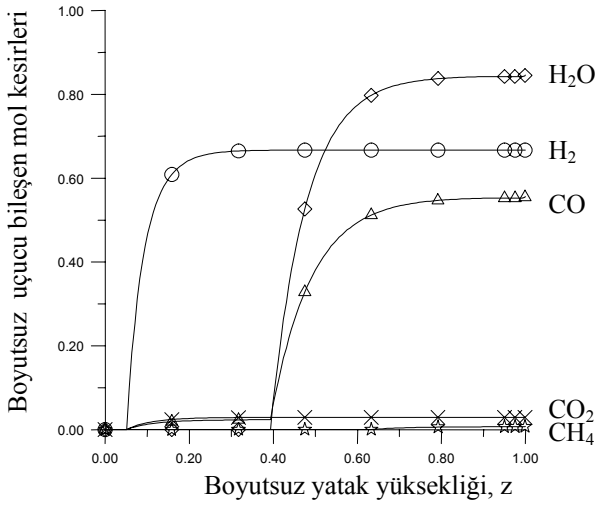


Şekil 6. 'A' ve 'B' gaz bileşenleri mol kesirlerinin sabit yatak yüksekliği ile değişimi

Gaz karışımı içerisindeki ve kömür çekirdeğindeki oksijen konsantrasyonunun zaman ve yatak yüksekliği ile değişimi Şekil 5a ve b'de görülmektedir. Sabit yatağın alt girişindeki oksijen miktarı atmosferik değerdedir. Bu yüzden, Şekil 5a'da görüldüğü üzere boyutsuz oksijen konsantrasyonu 1 civarındadır. Sabit yatağın alt kısmından üst kısmına doğru ilerledikçe, yanma prosesindeki tüketimle ilgili olarak gaz karışımı içerisindeki oksijen konsantrasyonu azalır ve yatağın üst kısmında minimum değeri olan 0.4'e ulaşır. Aynı şekilde, Şekil 6'da görüldüğü üzere, çekirdekteki oksijen konsantrasyonu yatak yüksekliği ile azalmakta ve aynı zamanda çekirdek ve gaz karışımı içerisindeki oksijen ve karbon-dioksit konsantrasyonları arasındaki fark da, yatağın üst kısmına gidildikçe azalmaktadır. Şekil 5a'da görüldüğü üzere, $\tau = 4.314$ zamanında, sabit yatağın altında, gaz karışımı içerisindeki oksijen konsantrasyonu 0.4'e ulaşmaktadır. Gaz karışımı içerisindeki karbon-dioksit konsantrasyonunun yatak yüksekliği ile değişimi Şekil 6'da görülmektedir. Şekil 5c ve d'de görüldüğü üzere, başlangıçta, yatağın alt kısmında karbon-dioksit mevcut değildir, yatağın üst kısmına doğru gidildikçe karbon-dioksit konsantrasyonu artmakta ve maksimum değeri olan 0.14'e ulaşmaktadır. Şekil 8'de, kömür taneciğinin pirolizi sonucunda açığa çıkan uçucu bileşenlerin sabit yatak içerisinde dağılımı görülmektedir. CO_2, CO, CH_4, H_2, H_2O uçucu bileşenlerinin yatak çıkışında aldığı değerler, sırasıyla, 0.02890, 0.55615, 0.00754, 0.66652, 0.84647 olmuştur. Şekil 7'de ise uçucu bileşenlerin sabit yatak yüksekliği ile yatakta



Şekil 7. (a) Karbon-dioksit, (b) Karbon-monoksit, (c) Metan, (d) Hidrojen ve (e) Su-buharı konsantrasyonlarının zamana ve sabit yatak yüksekliğine göre değişimi



Şekil 8. Piroliz sonucu sabit yatak içerisinde açığa çıkan Karbon-dioksit, karbon-monoksit, metan, hidrojen ve su buharı mol kesirlerinin yatak yüksekliği ile değişimi

kalma zamanına göre değişimi sunulmuştur.

Modelde kullanılan boyutsuz parametrelerin değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Partiküler bazdaki veriler Ishida [9], Sotirchos [12] ve Kumplnsky [13], makro düzeydeki veriler Kumplnsky[13], Yalçın[14], Piroliz verileri Arısoy [2,3], kinetik veriler ise Ishida [9] ve Arısoy [2]'dan alınmıştır. Boyutsuz zamana karşı boyutsuz tanecik yarıçapının yatak yüksekliğine göre aldığı değerler Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 1'e göre, boyutsuz gurup $\Pi_5 = 0.0005$ için yatağın altında, katı taneciklerin hemen hemen yarısının ($\bar{z} = 0$ için $\psi = 0.52$) tükendiği gözlenmektedir. Π_5 azaldıkça sabit yatağın altındaki katı taneciklerin dönüşüm oranı, ψ artmaktadır; $\Pi_5 = 0.0004$ için $\psi = 0.59$ ve $\Pi_5 = 0.0003$ için $\psi = 0.65$ değerlerini alır. Bu demektir ki, kömür debisindeki bir artış dönüşüm oranını sınırlar ve kömürün yatakta kalma zamanının azalmasına sebep olur. Tablo 2'de sunulan çalışma şartları için Π_5'in 0.0005 seçilmesi uygun olur.

Sabit yatakta kömür yanması, ardışık karbon-oksijen ve karbon-karbon dioksit reaksiyonları kullanılarak modellenmiştir. Kömür taneciğinin yüzeyindeki ve gaz karışımı içerisindeki gazların konsantrasyonları elde edilmiş ve bunların sabit yatak içerisindeki dağılımları sunulmuştur. Kömür taneciğinin ve gaz karışımının sabit yatak içerisindeki sıcaklık dağılımları tek boyutlu sabit yatak kömür yanma modeli

Tablo 2. Boyutsuz Parametrelerin Değerleri [2, 3, 5, 9, 11-14]			
$\Pi_0 = 3.63$	$\Pi_1 = 211$	$\Pi_2 = 135$	$\Pi_3 = 0.00451$
$\Pi_4 = 1.0$	$\Pi_5 = \Pi'_5 = 0.0005$	$\Pi_9 = 103.3$	$\Pi_{10} = -38.5$
$\Pi_{11} = 16.44$	$\Pi_{VM_1} = 0.2$ E 06	$\Pi_{VM_2} = 0.103$ E 07	$\Pi_{VM_3} = 0.6$ E07
$\Pi_{VM_4} = 0.82$ E 11	$\Pi_{VM_5} = 0.588$ E 06	$Ar_1 = 108.5$	$Ar_2 = 100.4$
$Ar_3 = 117.1$	$Ar_4 = 150.0$	$Ar_5 = 86.0$	
n = 9.2	M = 28.0	$Nu_z = 0.01$	$Nu_L = 1.0$
Sh = 1.0	St = 0.5	$Da_2 = 4.003E8$	$Da_4 = -0.00665$
Bo = 494	Ar = 61.2	$Bi_h = 10.0$	$Bi_m = 100.0$
$(x_{Ao})_1^+ = 0.12$	$(x_{Bo})_1^+ = 0.30$	$(x_{Ao})_1^- = 1.00$	$(x_{Bo})_1^- = 0.00$
$(T_o)_1^+ = 3.0$	$(T_o)_1^+ = 4.3$	$k' = 1.826$	k = -1.126

geliştirilerek elde edilmiştir. Kömür taneciğinin pirolizi sonucunda açığa çıkan bileşenler hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, kömür taneciğinin yatak içerisinden geçiş süresi hesaplanmıştır. Sabit yatak içerisinde açığa çıkan uçucu bileşenlerin dağılımı Şekil 8'de görüldüğü gibidir. Şekil 6'da kömürün yanması sonucu oluşan karbondioksit ve oksijen dağılımı ile Şekil 8'deki uçucu bileşen dağılımı birleştirildiğinde sabit yatak içerisindeki toplam bileşen dağılımı elde edilir. Bu dağılıma göre yatağın üst kısmına doğru gidildikçe, yanma sonucu, oksijen konsantrasyonunda bir azalma ve karbondioksit konsantrasyonunda 0.14'e varan bir artış gözlenmektedir.

İleride yapılması düşünülen çalışmalar arasında, tanecikler arası ısı ve kütle etkileşimini, ve ışıma etkilerini dikkate alan modellerin geliştirilmesi vardır.

SEMBOLLER

a,b C/O_2 reaksiyonundaki, sırasıyla, O_2 ve CO_2 için stokiyometrik katsayılar
C_o Ana gaz akışının toplam molar konsantrasyonu, mol/m^3
C_{S_o} Katı karbon taneciğinin başlangıç molar konsantrasyonu, mol/m^3
c_p Gaz ısı kapasitesi, J/kgK
D_{e_A} Kül tabakasındaki 'A' gaz bileşeninin etkin difüzivitesi, m^2/s
E_h Sabit yatağın eksenel ısıl iletkenliği, J/m s K
E_k Reaksiyon hız sabiti k_s'nin aktivasyon enerjisi, J/mol
E_m Sabit yatağın eksenel saçılma katsayısı, m^2/s
F_s Katı taneciğin toplam molar debisi, mol/m^{2}s
G Ana gaz akışının toplam molar debisi, mol/m^{2}s
$-H_i$ 'i' gazının bir molüne düşen reaksiyon ısısı, J/mol
h_p Parçacığın dış yüzeyindeki gaz film ısı transfer katsayısı, J/m^2 s K

h_g Ana akışkan akımının ısı aktarım katsayısı, J/m^{2}s K
K_m Sabit yatak kütle aktarım katsayısı, m/s
k_e Kül tabakasının etkin ısıl iletkenliği, J/m s K
k_{mA} Parçacığın dış yüzeyindeki 'A' bileşeni için gaz film kütle aktarım katsayısı, m/s
$k_{o,i}$ Uçucular için reaksiyon hız sabiti, 1/s
k_s Yüzey reaksiyon hız sabiti, m^4/mol s
k_{so} Hız sabitinin frekans faktörü, m^4/mol s
$\dot{m}_A$ Birim reaksiyon çekirdek yüzeyi başına 'A' bileşeninin reaksiyon hızı, mol/m^{2}s
$m^*_{v_i}$ Kömür taneciği etkin kütlesel uçucu içeriğinin orjinal kömür tanecik kütlesine oranı, kg$_i$/kg$_{kömür}$
N_A 'A' bileşeninin konvektif ve difüzif molar akısı, mol/m^{2}s
q Konvective ve difüzif ısı akısı, J/mol K
q_s Fazlar arası ısı akısı, J/mol K
R Küresel karbon taneciğinin orjinal yarıçapı, m
R Gaz sabiti, J/mol K
r,r_c Yarıçap, reaksiyonun olduğu çekirdek yüzeyindeki yarıçap, m
T, T_c, Sıcaklık, çekirdek yüzeyindeki sıcaklık, K
T_o, T_a Sabit yatak içerisindeki ana akış gaz sıcaklığı, ortam sıcaklığı, K
T_s Katı parçacığın dış yüzeyindeki sıcaklık, K
t Zaman, s
x_A 'A' gaz bileşeninin kütle kesri
z Koordinat ekseni, m
Z Sabit yatağın yüksekliği, m

Grek Harfleri

δ_h Isı aktarımı gaz filminin eşlenik kalınlığı, m
δ_m Kütle aktarımı gaz filminin eşlenik kalınlığı, m
ε_T Sabit yatak boşluk kesri
η_s Yüzey reaksiyonu için etkinlik faktörü
τ Boyutsuz zaman
φ_{s_i} Kimyasal reaksiyon hızının difüzyon hızına oranı, $Rak_s C_{s_o} / D_{e_i}$
ψ Boyutsuz yarıçap, r_c/R

Boyutsuz Parametreler

f_k Katı akış hızının taneciğin dış yüzeyindeki "A" gaz bileşeninin gaz film kütle aktarım katsayısına oranı, u_s / k_{m_A}
k bir parametre, $\left[(G_A)_0 / aF\right]^{1/3}$
m y-yönündeki şekil faktörü, L/R
n z-yönündeki şekil faktörü, Z/R

γ "S" katı reaktifin başlangıç konsantrasyonunun "A" gaz reaktifin başlangıç konsantrasyonuna oranı, $C_{S_o}/\left(C_{A_o}\right)_{0^-}$

$\overline{T_o}$ Yatak içerisindeki gazın boyutsuz sıcaklığı, T_o/T_a

$\overline{x_{A_o}}$ "A" gazının boyutsuz mol kesri, $x_{A_o}/\left(x_{A_o}\right)_{0^-}$

$\overline{x_{B_o}}$ "B" gazının boyutsuz mol kesri, $x_{B_o}/\left(x_{A_o}\right)_{0^-}$

$\bar{z}$ Boyutsuz z-koordinatı, z/Z

Boyutsuz Sayılar

Ar Arrhenius Sayısı, $\frac{E_k}{\mathrm{R\,T_a}}$

$\mathrm{Bi_h}$ Tanecik için Bölgesel Isıl Biot Sayısı, $\frac{h_p R}{k_e}$

$\mathrm{Bi_m}$ Tanecik için Bölgesel Kütle Biot Sayısı, $\frac{k_{m_A} R}{D_{e_A}}$

Bo Bodenstein Sayısı, $\frac{u_{0^-} Z}{E_m}$

$Da_{2,i}$ İkinci Damköhler Sayısı, $k_{s_o} C_{S_o} R/D_{e_i}$

$\mathrm{Nu_L}$ L tabanlı Nusselt Sayısı, $\frac{UL}{E_h}$

$\mathrm{Nu_Z}$ Z tabanlı Nusselt Sayısı, $\frac{h_p Z}{E_h}$

Sh Sherwood Sayısı, $\frac{k_{m_A} Z}{E_m}$

St Stanton Sayısı, $\frac{h_p}{\sum c_{p_i} G_i}$

KAYNAKLAR

1. Caram, H.S. ve Amundson, N.R., Diffusion and Reaction in a Stagnant Boundary Layer about a Carbon Particle, ***Ind. Eng. Chem., Fundam***., Cilt 16, Sayı: 2, sayfa: 171-181, 1977.
2. Arısoy A. ve Böke E., "A Comparison of Prediction and Experiment in the Combustion of Coal in a Bottom Feed Fixed Bed," ***11th Int. Symp. On Combustion Processes***, Miedzyzdroje, Poland, 1989.

3. Böke E ve Arısoy A, "Mathematical Modeling of Fixed Bed Coal Combustion," ***13th Int. Symp. On Combustion Process***, Cracow, Poland, 1993.
4. Ford, N.W.J., Cooke, M.J. ve Sage, P.W., "Modelling of fixed bed combustion," ***Fuel Processing Technology***, Cilt 36, sayfa: 55-63, 1993.
5. A.Bıyıkoğlu, " Sabit Yataklı Bir Kazandaki Yanmanın Matematiksel Modellenmesi", *Doktora Tezi* (Türkçe), Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 196 sayfa, Ekim 1998.
6. Gavalas, G., **Noncatalytic Gas-Solid Reactions with Applications to Char Combustion and Gas Desulfurization, Concepts and Design of Chemical Reactors**, Editörler: Whitaker, E. ve Cassano, A.E., Gordon and Breach Science Publishers, Cilt 3, Bölüm 3, Montreux, Switzerland, 1986.
7. Bıyıkoğlu, A., "Modeling of Fixed Bed Char Combustion Process," **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, basılacak.
8. Bıyıkoğlu, A., "Modeling of a Fixed Bed Reactor for Non-catalytic Solid-gas Reactions," **Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Gazi Üniversitesi**, Cilt 14, Sayı: 3, sayfa: 829-840, 2001.
9. Ishida, M. and Wen, C.Y., "Analysis of Nonisothermal Moving Bed for Noncatalytic Solid-Gas Reactions," **Ind. Eng. Chem. Process. Des. Develop.**, Cilt 10, Sayı: 2, Sayfa: 164-172, 1971.
10. Ishida, M. and Wen, C.Y., "Effectiveness Factors and Instability in Solid-Gas Reactions," **Chemical Engineering Science**, Cilt 23, sayfa: 125-137, 1968.
11. Gavalas, G.R., **Coal Pyrolysis**, Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam, Netherlands, Chapter 6, 1982.
12. Sotirchos, S.V. ve Yu, H-C., "Mathematical Modelling of Gas Solid Reactions with Solid Product," Chem. Eng. Science, Cilt: 11, Sayfa: 2039-2052, 1985.
13. Kumplnsky, E. ve Amundson, N.R., "Diffusion and Reaction in a Stagnant Boundary Layer About a Carbon Particle. 8. Comparison of Lumped and Distributed Chemical Kinetics," Ind. Eng. Chem. Fundam., Cilt: 22, Sayfa: 62-71, 1983.
14. Yalçın, H., Sınai Stokiyometri, Gazi Üniversitesi, Yayın No: 110, Müh. Mim. Fak. Yayın No: 8, Sayfa: 842, 1988.