

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÖMÜRDEKİ NEMİN YANMAYA ETKİSİNİN
TEORİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yazar : M. Şule Berri n AKYÜZ

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Program : ENERJİ

HAZİRAN 2005

**KÖMÜRDEKİ NEM NİYANMAYA ETKİSİNİN
TEORİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Şule Berri n AKYÜZ
(503001114)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Haziran 2005

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet ARISOY
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasancan OKUTAN
Prof. Dr. Feridun ÖZGÜÇ

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Kömür, günümüzde güncelliğini koruyan temel enerji kaynaklarından biridir. Türkiye’de düşük kaliteli yakıtlar ve kötü yanma koşulları ciddi hava kirliliği problemlerine sebep olmaktadır. Bu problemin kaynaklarından biri yanmadaki rolü sebebiyle nemin etkisidir. Türk kömürleri genelde yüksek nem içeriğine sahiptirler. Nemi içeriği, kömürün yanma verimi ve emisyonlar üzerinde etkili temel faktörlerden biridir.

Bu çalışmada, kömürdeki nemin ve diğer parametrelerin yanmaya olan etkisi araştırılmıştır.

Tez çalışmam boyunca bana yardımlarını esirgemeyen saygın hocam Prof. Dr. Ahmet ARI SOY’a teşekkürlerimi borç bilirim

Haziran 2005

Şule Berrin AKYÜZ

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
1. GİRİŞ	1
2. KÖMÜRDEKİ NEM TÜRLERİ VE DAVRANIMLARI	4
2.1 Kömürde Nem	4
2.2 Kömürde Porozite	7
2.3 Nemin Kömürün Kendiliğinden Yanması Olayı Üzerine Etkisi	8
2.4 Nemin Yanma Sırasında Verim ve Emisyona Etkisi	8
2.5 Kömürün Nemi Belirleme Metodları	9
2.5.1 Fırında kurutma metodu	9
2.5.2 Distilasyon metodu	10
2.5.3 Hızlı nem belirleme tekniği	10
3. MATEMATİK MODELLEME	11
3.1 Genel	11
3.2 Model yaklaşımı ve Yapılan Kabuller	12
3.3 Model Eşitlikleri	13
3.3.1 Ön ısıtma evresi	13
3.3.2 Kuruma evresi	14
3.3.2.1 Enerji denklemleri	14
3.3.2.2 Kütle korunumu denklemi	15
4. ÇÖZÜM YÖNTEMİ	17
4.1 Genel	17
4.2 Diferansiyel Eşitliklerin Sonlu Farklar Denklemlerine Dönüştürülmesi	17
4.2.1 Enerji korunumu denklemleri	17
4.2.2 Kütle korunumu denklemi	19
4.3 Çözüm Yöntemi	20
4.3.1 Gauss eliminasyon metodu	20
4.3.2 Gauss seidel nokta metodu	21
5. SONUÇLAR	23
5.1 Ön Isınma Evresi	23
5.2 Kuruma Evresi	24
5.2.1 Kömürdeki nem oranının sıcaklık ve basınç etkisi	26
5.2.2 Ortamın ısı taşıma katsayısının sıcaklık ve basınç etkisi	31
5.2.3 Kömür geçirgenliğinin basınç etkisi	32

5.3 Sonuçlar	33
KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ	37
EK A Bilgisayar Program (Diskette)	

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Kömür ün ne mi çeri ği	5
Şekil 2.2 : Isıl işle m öncesi ve sonrası kö mür bünyesi ndeki suyun davranım	6
Şekil 2.3 : Kö mür ün poroz yapı sı ndaki çatla klar, Açık ve kapalı porları n gör ünü ş ü	7
Şekil 3.1 : Fizi ksel Model	12
Şekil 4.1 : Düg ü m nokt aları	17
Şekil 5.1 : Ö n ısı n n a evresi boyunca kö mür deki sı caklık da ğ lı m nı n za ma na göre de ğ i ş i m i.....	23
Şekil 5.2 : Ö n ısı n n a süresi ni n orta mısı ta ş ı nı m kat sayı sı na göre de ğ i ş i m i	24
Şekil 5.3 : Çe ş itli za ma nlar iç i n kö mür iç i ndeki sı caklık da ğ lı m nı n	24
Şekil 5.4 : Buharla ş ma cephesi ni n ilerle me si ni n za ma na göre de ğ i ş i m i	25
Şekil 5.5 : t=500s’ deki kö mür iç i ndeki sı caklık da ğ lı m nı na kö mür deki ne m Gra m nı n e t ki si.....	26
Şekil 5.6 : t=500s’ deki kö mür iç i ndeki bası nç da ğ lı m nı na kö mür deki ne m Gra m nı n e t ki si.....	26
Şekil 5.7 : t=1000s’ deki kö mür iç i ndeki sı caklık da ğ lı m nı na kö mür deki ne m Gra m nı n e t ki si.....	27
Şekil 5.8 : t=1000s’ deki kö mür iç i ndeki bası nç da ğ lı m nı na kö mür deki ne m Gra m nı n e t ki si.....	27
Şekil 5.9 : t=1500s’ deki kö mür iç i ndeki sı caklık da ğ lı m nı na kö mür deki ne m Gra m nı n e t ki si.....	28
Şekil 5.10 : t=1500s’ deki kö mür iç i ndeki bası nç da ğ lı m nı na kö mür deki ne m Gra m nı n e t ki si.....	28
Şekil 5.11 : t=2000s’ deki kö mür iç i ndeki sı caklık da ğ lı m nı na kö mür deki ne m Gra m nı n e t ki si.....	29
Şekil 5.12 : t=2000s’ deki kö mür iç i ndeki bası nç da ğ lı m nı na kö mür deki ne m Gra m nı n e t ki si.....	29
Şekil 5.13 : Buharla ş ma cephesi ni n ilerle me hı zı na kö mür deki ne m oranı nı n e t ki si.....	30
Şekil 5.14 : t=1500s’ deki kö mür iç i ndeki sı caklık da ğ lı m nı na kö mür deki ısı ta ş ı nı m kat sayı sı nı n e t ki si.....	31
Şekil 5.15 : t=1500s’ deki kö mür iç i ndeki bası nç da ğ lı m nı na kö mür deki ısı ta ş ı nı m kat sayı sı nı n e t ki si.....	31
Şekil 5.16 : Buharla ş ma cephesi ni n ilerle me hı zı na kö mür deki ısı ta ş ı nı m kat sayı sı nı n e t ki si e t ki si.....	32
Şekil 5.17 : Kö mür iç i ndeki bası nç da ğ lı m na kö mür ge ç i r gen li ğ i ni n e t ki si	32

SEMBOL LİSTESİ

C_{ps}	: Kömür ün özgül ısısı
h	: Yüzeydeki ısı taşıma katsayısı
h_g	: Buharlaştırma entalpisi
K	: Geçirgenlik
k	: Isı iletim katsayısı
P	: Basınç
R	: Gaz sabiti
R	: Kömür yarıçapı
r	: Mesafe
$S(t)$	: Buharlaştırma cephesinin mesafesi
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
V	: Buhar akış hızı
q	: Taşıma ile geçen ısı miktarı
W	: Hacimsel nem oranı
ε	: Porozite
μ	: Viskozite
ρ	: Yoğunluk

Alt indisler

0	: İlk şart
1	: Nemli Bölge
2	: Kuru Bölge
s	: Kömür
v	: Buhar
1	: Nem
∞	: Fırın Ortamı

KÖMÜRDEKİ NEMİN YANMAYA ETKİSİNİN TEORİK İNCELENMESİ

ÖZET

Kömürün yapısında bulunan nem kömürü kimyasal, fiziksel ve ekonomik açıdan etkileyen temel parametrelerden biridir. Kömürleşme derecesi düştükçe kömür içerisindeki nem miktarı artmakta ve bazı genç kömürlerin yapısı ağırlıklı olarak sudan oluşmaktadır.

Bu çalışmada, kömürdeki nemin ve diğer parametrelerin yanmaya olan etkisi teorik olarak incelenmiştir. Bu nedenle matematiksel bir model geliştirilmiştir. Aynı matematiksel modellenmesi, ısı ve kütle transferi olaylarının formülasyonu esasına dayanmaktadır. Buna göre, zamana bağlı ve tek boyutlu olarak geliştirilen matematiksel model enerjinin ve kütlenin korunumu denklemlerinden oluşmuştur.

Model eşitlikleri sonlu farklar metodu uygulanarak iteratif olarak çözülmüştür. Elde edilen sayısal çözüm sonuçları, daha önce aynı konuda kartezyen koordinatlarda yapılan teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında kömürün parçalanmasına yol açarak daha iyi yanmayı sağlayan kritik bir nem değerine saptanmamıştır. Bu çalışmada kömürdeki nem içeriğinin, ısı taşınım katsayısının ve kömürün geçirgenliğinin olaya etkisi incelenmiştir.

THEORETICAL STUDY OF THE EFFECT OF COAL MOISTURE IN COMBUSTION

SUMMARY

The moisture that is found in the structure of the coal is one of the fundamental parameters that affects the coal in terms of chemical, physical and economic means. As the degree of coalification decreases, the level of the moisture in the coal increases and the structure of some of the young coals mainly consist of moisture.

In that study, the effects on the burning of the moisture in the coal and other parameters are investigated. For that reason, a mathematical model has been developed. The mathematical modelling of the case is based on the essence of the formulation of the heat and mass transfer. According to that, the mathematical model that is developed one-dimensionally and dependent on the time comprises of the equations of the protection of the energy and mass.

The model equations are solved algebraically by using the finite differences method. When the algebraic results obtained are compared with the theoretic and experimental results obtained at the cartesian coordinates concerning the same issue, no critical moisture value that causes the coal to break into pieces and to burn better is found. In that study, the effects on the burning of the moisture content of the coal, heat transfer coefficient and the permeability of the coal is investigated.

1. GİRİŞ

Genel olarak kömür bir hidrokarbon olmasına rağmen, bileşiminde C, H, O, N, S, kül ve nem gibi maddeler bulunmaktadır. Kömürün bünyesinde bulunan nemli ve bu nem oranında meydana gelebilecek değişim miktarının, kömürlerin yanması olayı üzerinde son derece önemli bir etkisi olmaktadır. Kömürde bulunan nem kimyasal ve fiziksel karakterde olmak üzere iki sınıfta toplanabilmektedir. Fiziksel nem yanma sırasında daha çok kuruma, uçucu madde çıkışı ve yanma süreçlerini etkilerken, kimyasal nem daha sonraki aşamalarda devreye girmektedir. Kömürdeki nemin kaynakları Cauger [1] tarafından organik moleküllerin bozulması sonucu ortaya çıkan su (combined water), yüzeyde absorblanan su, kapiler yoğunlaşma suyu, çözülmüş su ve inorganik bileşimlerinin hidratasyon suyu olarak belirtilmektedir.

Brown'a göre [2] su üç kaynaktan gelmektedir. Bunlardan ilki yüzeye absorblanmış serbest su olup normal suyun fiziksel özelliklerine sahiptir. Bu kuruma işlemi sırasında kömürü en önce terk eden sudur. İkinci türdeki su, kömürün kılcal yapısı içerisinde absorblanan 'bünye nemidir'. Kimyasal olarak bağlanmış olan hidratasyon suyu üçüncü grubu oluşturmaktadır.

Yüzeyde absorblanmış serbest nemin kömür bünyesinden ayrılması 100⁰C civarında hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Kapiler gözeneklerde kimyasal olarak bağlı bulunan nemin bir kısmı uçucu madde çıkışı başlamadan önce bünyeyi terketse de uçucu madde ile birlikte nemin çıkışı devam etmektedir [3]. Bu nedenle uçucu maddenin çıkış hızı, suyun buharlaşması için absorblanan ısı nedeniyle düşmektedir. Buna bağlı olarak uçucu maddenin yanmaya başladığı sıcaklıkta ve yanma süresi içinde bir artış meydana gelmektedir.

Kömürleşme derecesi düştükçe kömür içerisindeki nem miktarı artmakta ve bazı genç kömürlerin yapısı ağırlıklı olarak sudan oluşmaktadır. 1995-1996 kışında İstanbul'da hava kirliliğini kontrol altına alabilmek için kente giren kömürlerin ısı değerleri, kül miktarı, parçacık boyutu, kükürt ve nem değerleri için bazı sınırlamalar getirilmiştir. Son 10-15 yılda İstanbul'da ağırlıklı olarak kullanılan ağaçlı kömürün

ne mi içeri ği nin yüksek ol ması nedeni ile, kö mür ne mi nin hava kirlili ği ne etkisi konusunda bu kö mür ün üreticileri ile yerel ve merkezi yöneticiler arasında bazı anlaşmazlıklar söz konusu ol muştur. Bu anlaşmazlıkların çöz ümlenebil mesi için kö mür ün i çer di ği ne mi n yan maya ve e mi syonlara olan etkisi konusunda bili sel veri ve yorumlara gerek duyul muştur. Buradan kaynaklanarak bu konuda bir di zi deneysel çalış malar ve buna dayanan yayınlar yapı l mıştır [4, 6, 7, 9, 10, 11, 18, 19, 32].

Genel olarak, çok düşük veya çok yüksek ne moranı na sahi p kö mür ler de ısı nın ha zı düşüktür. Bu sonuç, ne mi n olay üzeri nde he mfi ziksel he mde ki myasal yönden et ki n ol du ğu nu ve kö mür bünyesi ndeki ne m mi kta rı nın belli bir değeri için oksidasyon ha zı nın ma ksi mu m ol du ğu nu göster me ktedir.

Sabit yataklı yan ma sistemleri nde ne mi n yan ma veri mi ve e mi syonlar üzeri ne etkisi ile ilgili yapılan deneysel çalış mada [18, 19]., üç farklı kö mür ve bunların karış mı har man kö mür ün iki farklı yan ma sisteminde yakıl ması yla ol uş an toz ve gaz e mi syonları ile birçok yan ma parametreleri incelenmiştir. Bu çalış mada tüm parametrelerle ve otomatik yüklemeli sıcak su kazanlarında karşılaştırıl mıştır. Yan ma deneyleri, her biri ISO standartlarına denk olan kazanlarda, TS 4040 ve 4041 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Her iki kazan nısı l kapasitesi 93 kW dır. Bu çalış mada İstanbul'un Yeniköy bölgesinde çıkarılan genç ağaçlı kö mür ü, güney Afrika kö mür ü, bunların karış mı ve soma kö mür ü kullanıl mıştır. Orijinal Yeniköy Ağaçlı kö mür ü %8.70 nem orijinal kö mür ün kurutul ması ile ol uş tur ul an farklı ne m i çer kli kö mür ler ise %21.40 ve %15.33 oranı nda ne mi çer me ktedir. Ayrıca Y. Ağaçlı ve G. Afrika kö mür ünün karış tırıl ması ile hazırlanan har man kö mür ün ne mi ise %19.9' dur. Toz numuneleri, baca gazı ne mi, yan ma gazı nın ha zı, baca sıcaklı ğı ile ilgili tüm ölç ümlerde Amerikan USEPA onaylı Andersen Universal Toz Örnekle me Sistemi kullanıl mıştır. Toz e mi syon sonuçları tüm yan ma sistemlerinde paralellik göster me ktedir. Toz e mi syonu, ne mi içeri ği %21.40 olan kö mür de ma ksi mu m değeri al maktadır. Bu davranı mı Beypazarı linyitlerinin sadece iki ne mi içeri ği için literatürde bulunan değerlerle benzerlik göster me ktedir [4].

Kö mürdeki ne mi n ve di ğer parametrelerin yan maya ve e mi syonlara olan etkisi kartezyen koordinatlar da teorik olarak da incelenmiştir. Bunun için, matematiksel bir model geliştirilmiştir. Belirli kabuller altında geliştirilen matematiksel model e ilişkin sistem eşitlikleri verilmiştir. Model eşitlikleri sonlu farklar me todu uygulanarak

sayısal olarak çözülmüştür. Sıcaklık ve basınç dağılımlarına etki eden parametreler için yazılan bilgisayar program yardımı ile elde edilen sayısal çözüm sonuçlarının genel olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Kartezyen koordinatlarda yapılan bu teorik çalışma sonucunda kömürün parçalanmasına yol açarak daha iyi yanmayı sağlayan kritik bir nem oranı değeri bulunamıştır. Elde edilen sayısal çözüm sonuçlarına göre kömürün geçirgenlik değeri ve ortamın ısı taşınım katsayısı basınçlara nem oranından daha fazla etkili olmaktadır [5].

Yukarıdaki tez çalışması esas alınarak sunulan bu çalışmada çözüm silindirik koordinatlarda tekrarlanmıştır. Böylece kömür geometrisinin olaya etkisi olup olmadığı araştırılmıştır. Toplam 5 bölüm halinde sunulan bu çalışmada, diğer bölümlerini içeren aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Bölüm 2’de kömür bünyesinde bulunan nem ve türleri hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’de matematiksel model tanımlanmıştır. Belirli kabuller altında zamana bağlı ve tek boyutlu olarak geliştirilen bu model enerjinin ve kütlenin korunum denklemlerini içermektedir.

Bölüm 4’de modelin çözümünde kullanılan sayısal yöntem ve çözümde izlenen adımlar açıklanmıştır.

Bölüm 5’de teorik model sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada Ek 1’de disket halinde verilen C# program yardımı ile elde edilen sonuçlar üzerinde genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. KÖMÜRDEKİ NEM TÜRLERİ VE DAVRANIŞLARI

2.1 Kömürde Nem

Kömürler, kömürleşme derecelerine göre farklı oranlarda rutubet içerirler. Ocak çıkışında taş kömürü %1-3, sert linyitler %20-30, yumuşak linyitler %40-60, turballar ise %60'ın üzerinde nem içerirler. Cörüldüğü üzere kömürleşme derecesi arttıkça kömürlerin rutubeti azalmaktadır.

Kömürün yapısında bulunan nem kömürün kullanımı, kimyası ve fiziksel özellikleri açısından kömürü karakterize eden parametreler (uçucu madde, kül, sabit karbon ve nem) arasında yer almaktadır. Özellikle kömürün nem oranı, bünye neminin altına düşürüldüğü durumlarda artan parçalanma ve tozlaşma eğilimi kömürün kalitesini belirleyen önemli bir parametre haline gelmektedir [6].

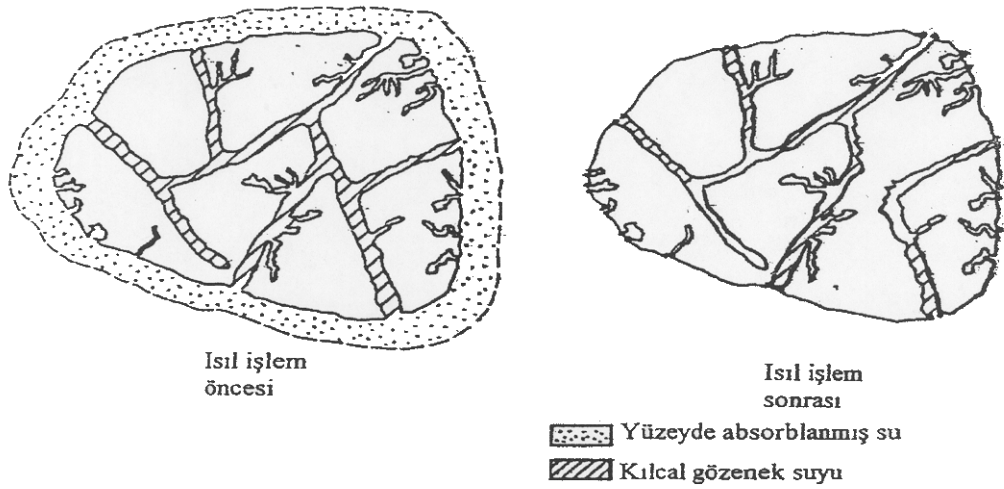
Kömür bünyesinde bulunan nemin çok değişik şekillerde bulunması ve bunları birbirinden kesin olarak ayırmakta karşılaşılan zorluklar nedeniyle net bir değerlendirme yapmak oldukça güçtür [8].

Kömürde bulunan nem kimyasal olarak bağlı nem adsorbe edilen nem ve mekanik kuvvetler sonucu tutulan nem olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [12]. Kimyasal olarak bağlı nem kömürün ana bileşenlerinden olup kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşmaktadır ve göreceli olarak güçlü bağlara sahiptir. Adsorbe edilen nem su molekülleri ile gözenek yüzeyleri arasındaki etkileşim sonucu yüzeyleri ince bir film halinde kaplamaktadır. Bu film kalınlığı yüzeyin özelliğine bağlı olarak değişmekte ve bu halde tutulan nem maksimum nemin yarısına ulaşabilmektedir. Mekanik kuvvetler sonucu kömürde tutulan nem nispeten daha serbesttir. Bu haldeki nem büyük boyutlu çatlaklar, yüzey gerilim kuvvetleri ve kılcalık etkisiyle kömür bünyesinde tutulan sıvıdan oluşmaktadır.

Brown' a göre suyun üç kaynaktan geldiğini birinci bölümde özet olarak anlatılmıştı. Bunlardan ilki yüzey nemi olup kömürde serbest halde bulunan sudan, kömürün su

gösterebileceği anlaşılmaktadır. Linyit ve genç kömürlerde su yüzeyde çok gevşek bir şekilde bağlanırken, büyük ve mikro gözeneklerde hidrojen bağları vasıtasıyla kuvvetli bir şekilde bağlandığına işaret edilmiştir [13].

Genç kömürlerde normal şartlarda ve ısıtma işlemi sonunda nem veya nemin uzaklaştırma durumunun şekli ifade şekli 2.2’de gösterilmiştir [14].



Şekil 2.2: Isıl İşlem Öncesi ve Sonrası Kömür Bünyesinde Suyun Davranımı

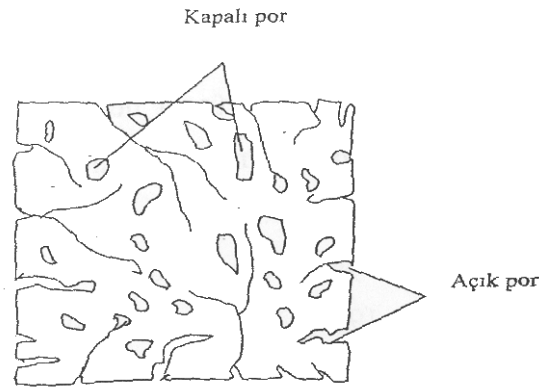
Böylesine karmaşık etkileşimler nedeniyle, ısıtma işlemi sırasında kömürden nem buharlaşması olayında farklı mekanizmaların ve dolayısıyla farklı buharlaşma süreçlerinin meydana geleceği açıktır. Vorres ve diğ. [15], buharlaşma sürecini iki aşamalı olarak gerçekleştirdiğini gözlemlemiştir. Birinci aşamada kömür nemini yaklaşık %80-85’i belli bir hızla buharlaştırdıktan sonra, daha yavaş buharlaşmanın olduğu ikinci buharlaşma sürecini oluşturduğunu ifade etmektedirler.

Akgün ve diğ. [16], yaptıkları çalışmada kömürdeki nem buharlaşmasının kinetiğini incelemiştir. Kömürde nem buharlaşma hızı, genel olarak kömürün bulunduğu ortamın sıcaklığına, bağıl nemine ve ortamdaki gaz hızı ile birlikte kömürün parçacık çapına, nemine ve ortamda bulunan kömür kütlesine bağlıdır. Bu çalışmada, sözü edilen bu değişkenlerden sıcaklık ve bağıl nem kömürdeki nem kaybı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2.2 Kömürde Porozite

Kömür içerisindeki porozite doğal nemin tutulmasını sağlar. Bu porozitenin yapısı, toplam içerisindeki miktarı (bölümü), boyut dağılımı ve şekli kömürün gözenek nemini belirler. Ancak, tam olarak ölçümü mümkün değildir. Por boyut dağılımı ve yapısını detaylı olarak incelemek amacıyla yukarıda da ifade edildiği gibi çok sayıda metod kullanılmaktadır. Bununla beraber, kömürün porozitesini tam olarak açıklayan, tanımlayabilen bir metod yoktur. Porozite, <1 nm den >10.000 nm çap değerleri arasında birkaç grupta tanımlanabilir [17].

Kömür yapısındaki porlar, diğer katılarda olduğu gibi iki grupta incelenmiştir. Şekil 2.3’de görüldüğü üzere açık boşluklar veya katı yüzeyi ile bağlantılı kanallar ve kapalı boşluklar veya katı yüzeyi ile bağlantısı olmayan kanallardır. Gözenekler ve kömür partikülleri ile kayaların bağlandığı yapılar; çatlaklar, açık ve kapalı porlar ve aynı zamanda düzensiz yönlendirilmiş kısmi aromatik tabakalar arasındaki boşlukları içermektedir [20].



Şekil 2.3: Kömürün Poroz Yapısındaki Çatlaklar, Açık ve Kapalı Porların Görünüşü [21]

Bir başka çalışmada, porlar genel olarak açık ve kapalı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Porların birçoğunda gaz moleküllerinin difüzyon katsayısı (D_g) 10^{-4} cm^2/s civarında değişirken, katılardaki difüzyon katsayısı $D \sim 10^{-9} \dots 10^{-8}$ cm^2/s mertebelerindedir. Porların genel olarak iki gruba ayrılması bu farktan dolayı hata oluşturmamaktadır. Kapalı porların gaz ile dolması prosesini tanımlayabilecek doğru ve kesin görüşler yoktur ve kömürdeki kapalı porlarda metan gazı ve nemin bulunuşu kontrol edilememektedir. Bu sebeplerden dolayı kömürdeki kapalı poroziteyi kesin olarak belirleyen metod bulunmamaktadır [21].

Toplam por hacimleri ile yapılan bir çalışmada ise, [22] kömürleşme derecesinin (rank) artmasıyla beraber, toplam por hacminde azalma olduğu görülmüştür.

2.3 Nemin Kömürün Kendiliğinden Yanması Olayı Üzerine Etkisi

Kömür bünyesindeki nemin ve bu nem oranında meydana gelebilecek değişimin miktarının, kömürlerin kendiliğinden yanması olayı üzerinde son derece önemli ve kompleks bir etkisi olmaktadır.

Kömürdeki nem oranının belli bir değerden yüksek olması halinde kömürün kendiliğinden tutuşma eğilimi azalmaktadır. Bu olay kömür bünyesinde nemin buharlaşması esnasında kömürden çekilen ısıyı, oksidasyon sonucu üretilen ısıya yakın bir değere ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla buharlaşma olayı oksidasyon nedeniyle kömürde oluşabilecek sıcaklık artışını yavaşlatmakta veya tamamen önlemektedir. Kömür nem fazla ise buharlaşma etkisi de artmaktadır.

Eğer nisbeten az nem içeren bir kömür nemli bir ortamda bulunuyor ise, ortam nemli bir kısmı faktörlere bağlı olarak kömür tarafından adsorbe edilecektir. Eğer adsorbe edilen nem yalnızca sıvı fazda ise kömür yüzeyleri ile ortamdan kazanılan sıvı arasında bir etkileşim olmakta ve bu olaya ıslatma reaksiyonu (wetting reaction) adı verilmektedir. Adsorpsiyon işlemi ısı veren bir reaksiyon olup ıslatma reaksiyonu ve fiziksel anlamda yoğunlaşma olaylarını içermektedir. Bu olaylar sonucu açığa çıkan ısı, kömür sıcaklığının ve dolayısıyla kendiliğinden yanma hızının artmasına neden olmaktadır [23].

Ülkemizde üretilen kömürlerin çoğu düşük ranklı (kömürleşme sürecini henüz tamamlamamış) kömürlerdir. Su miktarının değişmesi kömürleşme prosesinin önemli bir bölümüdür ve bundan da anlaşıldığı gibi kömürün nem içeriği karakteristik ve önemli özelliklerinden biridir [24].

2.4 Nemin Yanma Sırasında Verim ve Emisyona Etkisi

Kömürün nem içeriğinin yanmaya olan etkisi, kullanılan yanma sistemine doğrudan bağlıdır. Akışkan yataklarla ilgili olarak yapılan deneysel ve modellenme çalışmalarında nemin yanmaya etkisi, nemin uçucu maddeler öncesi ve uçucu maddelerle birlikte çıkış süreçleri göz önüne alınarak irdelenmiştir.

Nemli ızgaralı yakma sistemlerinde yanma açısından gösterdiği olumlu etki, daha önce anlatılan fiziksel etkilerin yanı sıra gazlaştırma reaksiyonları gibi kimyasal olaylardan da kaynaklanmaktadır. Ancak nemli yanmaya olan etkisi pek çok araştırmacı tarafından ısrarla uçucu madde çıkışı ve yanması olaylarıyla sınırlandırılmıştır. Pulverize ateşleme ve stoker ızgaralı sistemlerde, ısı transferinin etkisinin önemli olmadığı kararlı yanma süreçlerinde bu varsayımın moran düşük bitümlü kömürler için geçerli olabilir. Ancak özellikle nem içeriği yüksek olan düşük kaliteli kömürlerin yakıldığı düşük verimli soba ve kazanlarda, yanmanın kararlı duruma ulaşmadığı aşamalarda nem hava kirliliğini önemli ölçüde artıran bir parametre olmaktadır. Tanecik yayılım nemlişikisi ile ilgili olarak yapılan deneysel bir çalışmada nem oranının %18' den %27' e çıkması sonucunda tanecik yayılımının sobalarda %50 kazanlarda ise %3.5 oranında arttığı görülmüştür [25].

Nemli yanma sürecine olan etkisi konusundaki en ayrıntılı irdelenmeler akışkan yataklı sistemler için yapılmıştır [26]. Nemli etkisinin en fazla görüldüğü aşamanın yanmanın başlanmadan önceki süreç olduğu, nemli yapıyı terk etmesi sonucu geri kalan kuru kütlenin ısınmasıyla uçucu madde çıkışı ve yanmasının başladığı belirtilmektedir. Uçucu madde yanmasını sabit karbon yanması izlemektedir.

2.5 Kömürün Nemini Belirleme Metodları

Kömürün nem içeriği yanma prosesleri verimi ve fiyatlandırma, ayrıca taşıma, depolama ve kullanma maliyetlerine etkisi açısından önemli bir parametredir. Kömür nem içeriği miktarı istenen çalışma aralıkları dışında veya belirlenmemişse yanma prosesinde beklenmeyen değişikliklere ve kayıplara sebep olabilecektir [28]. Kömürün verimli kullanımı için gerekli olan nem içeriğinin belirlenmesi özellikle yüksek nemli düşük ranklı kömürler için gereklidir.

2.5.1 Fırında kurutma metodu

Fırınlarda, ASTM D 3302 ve D 3173, DIN 51718, UNE 3200181, BS 1016 v.b. standart yöntemlerle kömür kurutulması çok yaygın nem belirleme teknikleridir. Bu analiz metodunda kömür numuneleri suyun kaynama sıcaklığı üzerinde yaklaşık 105-110° C sıcaklıkta bir fırında kurutulmaktadır. Kurutma işlemi vakum altında yada hava veya inert bir gaz (O_2 , N_2) akım ortamında gerçekleşmektedir. Standartların çoğu özellikle fırın metodunda hava kullanımı, reaktif ve düşük ranklı kömürler

kurutma süresince oksidasyona uğradıkları için hariç tutmuşlardır. Bu termal kurutma tekniğinde, nem içeriği kömür örneğindeki ağırlık kaybından veya çıkış akımındaki su miktarının tespit edilmesi ile hesaplanabilir [29].

2.5.2 Distilasyon metodu

Kömürdeki nem içeriğinin belirlenmesinde kullanılan diğer bir yöntem azeotropik distilasyondur. Kömürdeki su, organik bir çözücü ile riflaks şartlarında distile edilerek ayrılır. Nem miktarı distilasyon sonucu toplanan su miktarından direkt olarak hesaplanır. Bu yöntem nem içeriğine bağlı olmaksızın tüm kömürler için uygundur. Çünkü, kömür atmosfer ile temas halinde olmadığından oksidasyona uğramaktadır. Nem içeriği, yavaş ilerleyen standart test metodlarını içeren analiz teknikleri kullanılarak, genelde kömür yandıktan sonra belirlenmiştir. Ayrıca, bu yöntem briket, sıvılaştırılmış kömür gibi kömür türevi maddelerin nem içeriğinin belirlenmesi için de kullanılabilir [29].

2.5.3 Hızlı nem belirleme tekniği

1970'lerin başında mikrodalgalarda absorpsiyonu temel alan yeni teknikler geliştirilmeye başlanmıştır. Önce yapı malzemelerinin nem içeriğinin belirlenmesinde kullanılan bu yöntem daha sonra kömüre uygulanmıştır. Bunlar çok hızlı tekniklerdir ve nem oranı sadece birkaç dakikada belirlenebilmektedir. Mikrodalga yöntemi ile yapılan birçok çalışmalar bu yöntemin uygunluğunu onaylamaktadır [29].

3. MATEMATİK MODELLEME

3.1 Genel

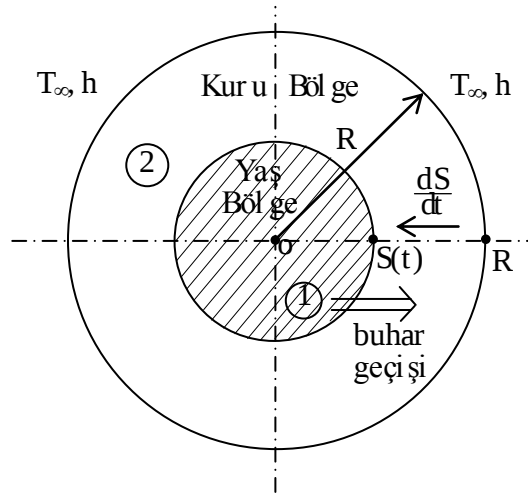
1950' li yıllardan itibaren bu konu üzerinde model çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Literatürdeki ilk model çalışmaları son derece basit ve yalnızca analitik çözümlerin mümkün olduğu sistemler üzerine kuruludur. Bilgisayar kullanımının yaygınlaşması ile birlikte 1970' li yılların sonlarından itibaren çok daha kapsamlı model çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Ancak yine de, bugün için bazı parametrelerin olay üzerindeki etkisi formüle edilemediği gibi, olayın kinematik yönü ve bunun ısı etkileri de tam olarak anlaşılamamıştır.

Bu yüzden literatürde son zamanlarda yer alan çalışmalar sistemi daha sınırlı yapıda tanımlamaya yöneliktir. Yapılan çalışmalar kolaylık açısından gruplayacak olursak üç ana grup karşımıza çıkmaktadır. Bunlar ıslak yüzey modeli, ilerleyen buharlaşma cephesi modeli ve difüzyon modelidir. Bu üç sınıflanmış model arasında yapılan karşılaştırmalar, ilerleyen cephe modelinin poroz malzemelerin zamanla bağlı kuruma problemi için daha uygun olduğunu söylemektedir [30]. İlerleyen buharlaşma cephesi modeli sistemi kuru ve yaş bölge olmak üzere ikiye ayıran bir cephenin varlığını kabul etmektedir.

Bu konudaki matematiksel model, ısı ve kütle transferi olaylarının formülasyonu esasına dayanmaktadır. Böyle bir modelin çözümünde, sayısal yöntemler kullanılmaktadır.

3.2 Model Yaklaşım ve Yapılan Kabuller

Kömürdeki nemli yanmaya olan etkisinin incelenmesi için öncelikle fiziksel modelin oluşturulması gerekmektedir. R yarıçapında silindirik bir kömür tanesi ele alınmaktadır. Ocakta yanmaya maruz bırakılan bu kömür tanesinin 2 yüzeyinden T_{∞} sıcaklığında gaz geçmekte ve kömür yüzeylerinde taşınma, kömür içerisinde ise sadece iletimle ısı geçişi olmaktadır.



Şekil 3.1: Fiziksel Model

Bu nedenle teorik incelemeğe uygun bir sistem şematik olarak şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Başlangıçta kömür homojen bir nem dağılımına sahiptir. Kömür içerisindeki ısı transferi nedeni ile zamana bağlı olarak nem buharlaşmakta ve ortam terk etmektedir.

Ol u ş t u r d u ğ u m u z f i z i k s e l m o d e l i ç e r i s i n d e k i d e ğ i ş i k l i k l e r t e k b o y u t l u v e z a m a n a b a ğ l ı o l a r a k i n c e l e n e c e k t i r . K ö m ü r i ç e r i s i n d e f a z d e ğ i ş i m i b a ş l a d ı ğ n d a s i s t e m k u r u v e y a ş b ö l g e o l m a k ü z e r e i k i a y r ı k ı s ı m d a n m e y d a n a g e l d i ğ i d ü ş ü n ü l e r e k i n c e l e n e c e k t i r . Z a m a n l a y a ş b ö l g e a z a l d ı k ç a , k u r u b ö l g e a r t m a k t a v e k ö m ü r t a n e s i t a n a m e n k u r u y a n a k a d a r b u s ü r e ç d e v a m e t m e k t e d i r .

Fiziksel modelin matematiksel olarak ifade edilmesinde tüm etkileri göz önüne alarak, çözüm eseri oldukça güç bir modelin ortaya çıkmasına sebep olur. Bu yüzden sunulan çalışmada bazı kabuller ışığında bir matematiksel model kurulmuştur.

Problemi basitleştirmek için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. Kütle ve enerji transferinin bir boyutlu olduğu kabul edilmektedir.
2. Buharlaşma 373 K'de olmaktadır. Buharlaşma esnasında basınç artışından dolayı buharlaşma sıcaklığında meydana gelecek artış ihmal edilmiştir.
3. Kömür içerisinde yalnızca iletimle ısı geçişi olmaktadır.
4. Su buharının kuru bölgede akışı sırasında sistemden çektiği ısı ihmal edilmiştir.
5. Denklemler buharlaşma cephesinin $S(t)$ mesafesinde olduğu düşünülerek yazılmaktadır. Buna göre $S(t)$ mesafesine kadar yaş bölge (1), $S(t)$ ile R arası kuru bölgedir (2).
6. Poröz ortamın homojen olduğu kabul edilmektedir.
7. Su buharının kütle akışının Darcy kanununa uygun olduğu kabul edilmiştir.
8. Yaş bölgedeki buhar basıncı $R=S(t)$ 'deki buhar basıncına eşit olduğu kabul edilmektedir.

3.3 Model Eşitlikleri

Bölüm 3.2' de yapılan kabuller altında, zamana bağlı ve tek boyutlu olarak geliştirilen matematiksel model enerjinin ve kütlelerin korunumu denklemlerini içermektedir. Bu denklemler ön ısınnma ve kuruma evresi olmak üzere iki bölümde kömürün yarıçapı R için yazılır.

3.3.1 Ön ısınnma evresi

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_1}{\partial t} = k_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad 0 < r < R, \quad T_1 < T_s, \quad t < t_{pr} \quad (3.1)$$

(3.1) denkleminde, T_s , buharlaşma sıcaklığını, t_{pr} ise tabakanın içindeki max. Sıcaklığın T_s olması için gerekli zamanı göstermektedir. Ön ısınnma evresinde kömür tabakasının sıcaklığı buharlaşma sıcaklığının (T_s) altındadır. Kömürün yüzey sıcaklığı T_s değerine eşit olduğu anda faz değişimi başlanmakta ve ön ısınnma evresi bitmektedir.

(3.1) denkleminde, birinci terim birim zaman ve hacimdeki kömürdeki sıcaklık artışını, ikinci terim katı ortamdaki ısı iletimini göstermektedir.

$$T_1|_{t=0} = T_0 \quad 0 < r < R \quad (3.2)$$

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \bigg|_{r=R} = h [T_1(R, t) - T_\infty] \quad t > 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} \bigg|_{r=0} = 0 \quad t > 0 \quad (3.4)$$

Başlangıçta $t=0$ anında kömür homojen bir sıcaklığa sahip olup $T_0=293\text{ K}$ dir. Zaman ilerledikçe yüzeyden taşınan ısı geçişi olmaktadır ve yüzeyden içeriye doğru sıcaklık artışı sağlanmaktadır. $r=0$ kömürün simetri merkezi olması nedeni ile adyabatik sınır şartı kabul edilmiştir.

3.3.2 Kuruma evresi

Kömür yüzey sıcaklığı 373 K e ulaştığında kömür tabakası zamanla yüzeyden itibaren kurumaya başlamaktadır. $r=0$ buharlaşma sıcaklığına eriştiğinde ise kuruma evresi tamamlanmaktadır. Kuruma esnasında, kömürün kuru ve yaş bölge olmak üzere iki bölgeden oluştuğu düşünülmüştür. Şekil 3.1' den de görüldüğü gibi $0 < r < S(t)$ arası yaş bölgeyi (1 bölge), $S(t) < r < R$ arası kuru bölgeyi (2 bölge) oluşturmaktadır. Kuru bölge, zamana bağlı olarak artmakta ve kuruma evresi kömür tabakası tamamının kuruyana kadar sürmektedir.

3.3.2.1 Enerji denklemleri

Kömür için kuru ve yaş bölge olmak üzere iki adet enerji korunum denklemi ve bunlara ait başlangıç ve sınır şartları yazılmalıdır. Kömürün yoğunluğunun (ρ_s) ve kömürün özgül ısısının (c_{ps}) sabit olduğu kabul edilerek eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Kuru Bölge İçin

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_2}{\partial t} = k_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) \quad S(t) < r < R, \quad t > t_{pr} \quad (3.5)$$

$$-k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \bigg|_{r=R} = h [T_2(R, t) - T_\infty] \quad t > t_{pr} \quad (3.6)$$

Yaş Bölge için

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_1}{\partial t} = k_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad r < S(t), \quad t > t_{pr} \quad (3.7)$$

$$T_1|_{t=t_{pr}} = T_{10}(r) \quad 0 < r < R \quad (3.8)$$

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad t > t_{pr} \quad (3.9)$$

$T_{10}(r)$ t_{pr} anında kömür içindeki sıcaklık dağılımıdır. Buharlaşma cephesinin oluştuğu $r=S(t)$ ' de aşağıdaki enerji dengesi denklemi ara yüzey sınır şartı olarak yazılmalıdır.

$$-k_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=S(t)} = -k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=S(t)} + \rho_1 w h_{fg} \frac{dS(t)}{dt} \quad (3.10)$$

(3.10) denkleminde, birinci terim buharlaşma cephesine iletilen gelen ısı miktarını; ikinci terim 2. bölgeye iletilen geçen ısı miktarını; üçüncü terim ise buharlaşma cephesindeki nemin buharlaşması için harcanan enerji miktarını göstermektedir.

Ara yüzey sınır şartı olarak sıcaklıkların sürekliliği yazılırsa;

$$T_1|_{r=S(t)} = T_2|_{r=S(t)} = T_s \quad t \geq t_{pr} \quad (3.11)$$

elde edilir.

3.3.2.2 Kütle korunum denklemi

Su buharı için kuru bölgede yazılacak olan kütle korunum denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_v V_r)}{\partial r} = 0 \quad S(t) < r < R, \quad t \geq t_{pr} \quad (3.12)$$

Birinci terim buhardaki kütle değişimini, ikinci terim ise buharın kütle akısını ifade etmektedir. Buharın kuru bölgedeki akışı Darcy kanunu yardımı ile ifade edilebilir,

$$V = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P_t}{\partial r} \quad (3.13)$$

Su buharı ideal gaz olarak kabul edilirse,

$$\rho_v = \frac{P}{R T_s} \quad (3.14)$$

olarak yazılabilir. Burada buharın sıcaklığı n buharlaşma sıcaklığı n da (T_s) olduğu ve akış boyunca buhar ile katı yüzey arasında bir ısı geçişi olmadığı kabul edilmiştir.

Kuru bölgedeki su buharının süreklilik denklemi aşağıdaki gibi bulunur:

$$\frac{\varepsilon \mu}{K} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0 \quad S(t) < r < R \quad t > t_{pr} \quad (3.15)$$

$$P(R, t) = p \quad r = R \quad t > t_{pr} \quad (3.16)$$

Buharlaşma cephesinin olduğu $r=S(t)$ 'de buhar akış hızı için Darcy kanunu ve buhar için ideal gaz kabulü ile aşağıdaki ara yüzey sınır şartı yazılmalıdır.

$$(\rho_l W) \frac{dS}{dt} = -\rho_v \cdot V = \rho_v \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (3.17)$$

(3.17) denklemi düzenlenecek olursa,

$$P \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\mu}{K} \frac{dS}{dt} \rho_l \cdot W \cdot R \cdot T_s \quad (3.18)$$

elde edilir.

Yaş bölgedeki buhar basıncı $r=S(t)$ 'deki buhar basıncına eşit ve sabit alınmıştır.

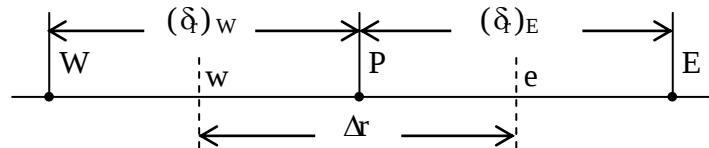
4. ÇÖZÜM YÖNTE Mİ

4.1 Genel

Kütle ve enerji korunum eşitlikleri sonlu farklar implicit yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür [20]. Bu amaçla EK 1’de verilen bir C# program yazılmıştır.

4.2 Diferansiyel Eşitliklerin Sonlu Farklar Denklemlerine Dönüştürülmesi

Ayrı klastırlanmış denklemleri elde etmek için kullanılacak olan düğüm noktaları grubu şekil 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre P ile gösterilen nokta hesaplanmanın yapılacağı düğüm noktası olup W ve E noktaları ise ona komşu olan düğüm noktalarını göstermektedir. Kesikli çizgilerle gösterilen e ve w harfleri ise bahsedilen kontrol hacminin kontrol yüzeylerini göstermektedir. Bir boyutlu olarak ele alınan problemler için y ve z yönlerinde birim kalınlık farz edilmiştir. Burada Δr alınan kontrol hacminin mesafesidir.



Şekil 4 1: D i ğ ü m N o k t a l a r ı

4.2.1 Enerji korunumu denklemi

Enerji korunumu na ilişkin diferansiyel eşitlikler şekil 4.1.' de verilen kontrol hac mi üzer inden konum ve t ile $t + \Delta t$ arasındaki zaman aralığı için zama na göre i ntegre edilirse,

$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dr = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dt \quad (41)$$

halini alır. Düşüm noktasındaki sıcaklık değerinin bütün kontrol hacmi boyunca sabit kaldığı farz edilirse (4.1) denkleminin sol tarafı aşağıdaki gibi açılır.

$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dr = \rho c \Delta r (T_p^1 - T_p^0) \quad (4.2)$$

burada T^0 , t anındaki eski sıcaklık değerlerini, T^1 ise t+ Δt anındaki yeni sıcaklık değerlerini göstermektedir.

Genel denklemin sağ tarafındaki $k \frac{\Delta T}{\Delta r}$ terisinde sonlu farklar yöntemi ne göre sıcaklıkların lineer olarak değiştiği kabulü ile açılırsa genel denklem

$$\rho c r_p \Delta r (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e r_e (T_E - T_p)}{(\delta r)_e} - \frac{k_w r_w (T_p - T_w)}{(\delta r)_w} \right] dt \quad (4.3)$$

halini alır. Isı denklemlerinin ayrıştırmaması örtülü (implicit) yaklaşım veya açık (explicit) yaklaşımı yapılarak bulunabilir. Hesaplama süresini kısaltma çogu kez açık yerine örtülü yaklaşım kullanarak gerçekleştirilebilir. Örtülü yaklaşımın açık yaklaşım göre koşulsuz olarak yakınsak olması önemli bir üstünlüktür. Bu, Δr ve Δt üzerinde herhangi bir sınırlama olmaksızın tüm uzunluk ve zaman aralıklarında çözümyakınsak olur anlamına gelir. Bu nedenle Fully implicit kabulü ile yukarıdaki denklemi düzenlersek,

$$\rho c r_p \Delta r (T_p^1 - T_p^0) = \frac{k_e r_e (T_E^1 - T_p^1)}{(\delta r)_e} - \frac{k_w r_w (T_p^1 - T_w^1)}{(\delta r)_w} \quad (4.4)$$

halini alır.

t+ Δt anındaki genel denklem

$$\left(\frac{k_e r_e}{(\delta r)_e} + \frac{k_w r_w}{(\delta r)_w} + \frac{\rho c r_p \Delta r}{\Delta t} \right) T_p^1 = \frac{k_e r_e}{(\delta r)_e} T_E^1 + \frac{k_w r_w}{(\delta r)_w} T_w^1 + \frac{\rho c r_p \Delta r}{\Delta t} T_p^0 \quad (4.5)$$

olarak yazılabilir. (4.5) denklemini genel ayrıştırmış cebirsel denklem şeklinde yazılırsa ve $(\delta r)_e = (\delta r)_w = \Delta r$ olduğu kabul edilirse,

$$a_p T_p^1 = a_E T_E^1 + a_w T_w^1 + b \quad (4.6)$$

katsayılar aşağıdaki gibi bulunur.

$$a_E = \frac{k_e r_e}{(\delta r)_e} \quad (4.7)$$

$$a_W = \frac{k_w r_w}{(\delta r)_w} \quad (4.8)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho c r_p \Delta r}{\Delta t} \quad (4.9)$$

$$b = a_P^0 \cdot T_P^0 \quad (4.10)$$

$$a_P = a_e + a_w + a_P^0 \quad (4.11)$$

4.2.2 Kütle korunum denklemi

$$\frac{\varepsilon \mu}{K} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0$$

Yukarıdaki kütle korunum denklemi lineer olmayan bir diferansiyel denklem olduğundan sonlu farklar denklemine dönüştürülmesi için bazı kabuller yapılması gerekmektedir.

(3.15) eşitliğinin sol tarafı sonlu farklar denklemine aşağıdaki şekilde çevrilebilir.

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial P}{\partial t} dt dr = (P_P^1 - P_P^0) \Delta r \quad (4.12)$$

Genel denklemin sağ tarafı ise aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p \frac{\partial p}{\partial r} \right) dr dt = \frac{1}{r_p} \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\frac{P_E - P_P}{(\delta r)_e} \right) \left(\frac{P_E + P_P}{2} \right)^* \cdot r_e - \left(\frac{P_P - P_W}{\delta r_w} \right) \left(\frac{P_W + P_P}{2} \right)^* \cdot r_w \right] dt \quad (4.13)$$

Full yimplisit kabulü ile yukarıdaki denklemi düzenlersek,

$t + \Delta t$ anındaki genel denklem

$$\frac{\mu \varepsilon}{K} r_p \frac{\Delta r}{\Delta t} (P_P^1 - P_P^0) = \left(\frac{P_E^1 - P_P^1}{(\delta r)_e} \right) \cdot \left(\frac{P_E + P_P}{2} \right)^* \cdot r_e - \left(\frac{P_P^1 - P_w^1}{(\delta r)_w} \right) \cdot \left(\frac{P_w + P_P}{2} \right)^* \cdot r_w \quad (4.14)$$

$(\delta r)_e = (\delta r)_w = \Delta r$ olduğu kabul edilirse,

Katsayılar aşağıdaki gibi oluşur.

$$a_E = \frac{r_e}{(\delta r)_e} \cdot \left(\frac{P_E + P_P}{2} \right)^* \quad (4.15)$$

$$a_W = \frac{r_w}{(\delta r)_w} \cdot \left(\frac{P_W + P_P}{2} \right)^* \quad (4.16)$$

$$a_P^0 = \frac{\mu \varepsilon}{K} \cdot r_p \cdot \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (4.17)$$

$$b = a_P^0 \cdot P_P^0 \quad (4.18)$$

$$a_P = a_e + a_w + a_P^0 \quad (4.19)$$

4.3 Çözüm Yöntemi

Model için verilen diferansiyel eşitlikler sonlu farklar denklemlerine dönüştürüldükten sonra kullanılacak olan çözüm yöntemi enerji ve kütle korunum denklemlerinde farklılık göstermektedir. Enerji denkleminin çözümünde Gauss Eliminasyon yöntemi, kütle korunum denkleminin çözümünde ise Gauss Seidel Nokta Metodu kullanılacaktır. Kütle korunum denklemlerinin çözümü, enerji korunum denklemlerinin çözümüne bağlıdır. Enerji korunum denklemlerinde bulunan $S(t)$ noktasına göre kütle korunum denklemlerinin çözümü yapılır.

4.3.1 Gauss eliminasyon metodu

Lineer diferansiyel denklemlerin çözümü Gauss eliminasyon metodu kullanılarak elde edilebilir.

Gauss eliminasyon metoduna göre Şekil 4.1' deki düğüm noktalarının 1 ve N yüzeydeki noktaları göstermek üzere 1, 2, 3,.... N'e kadar aşağıdaki gibi yazılır.

$$a_i \cdot T_i = b_i \cdot T_{i+1} + c_i \cdot T_{i-1} + d_i \quad (4.20)$$

Düğüm noktasındaki T_i sıcaklık değeri komşu düğüm noktalarındaki T_{i+1} ve T_{i-1} sıcaklık değerlerine bağlı olmaktadır. Sıcaklık için Patankar tarafından verilen bağıntılar yazılırsa,

$$T_i = P_i \cdot T_{i+1} + Q_i \quad (4.21)$$

$$T_{i-1} = P_{i-1} \cdot T_i + Q_{i-1} \quad (4.22)$$

elde edilir. (4.22) eşitliği (4.20) eşitliğinde yerine konulup düzenlenirse,

$$a_i \cdot T_i = b_i \cdot T_{i+1} + c_i \cdot (P_{i-1} T_i + Q_{i-1}) + d_i \quad (4.23)$$

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (4.24)$$

$$Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (4.25)$$

Birinci kontrol hacmi için katsayılar aşağıdaki gibi çıkar:

$$P_1 = \frac{b_1}{a_1}, \quad Q_1 = \frac{d_1}{a_1} \quad (4.26)$$

Diğer taraftan son düğüm noktası için $b_N = 0$ olduğundan $P_N = 0$ dır. Bu nedenle (4.21) eşitliğinden aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$T_N = Q_N \quad (4.27)$$

Bu noktadan sonra (4.21) eşitliğine göre geri çevrim yapılır. $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_3, T_2, T_1$ Sıcaklık değerleri bulunur.

4.3.2 Gauss-Seidel nokta metodu

Gauss-Seidel Yöntemi çok sık kullanılan iteratif bir yöntemdir. Aşağıdaki açıklanan işlemlerine göre yapılır.

1- Tüm düğüm noktaları için tahmini basınç değerleri atanır.

2- Tahmini değerlerle ayrılaştırıl mş denklemdaki katsayıların geğici değerleri hesaplanır.

3- Her düğüm noktası için hesaplanan katsayı değerlerine bağlı olarak yeni basınç değerleri bulunur.

4- Elde edilen yeni değerlerle 2. adıma dönölüp aynı adımlar iki iterasyon adımları arasında bulunan değerlerin farkı belirlenen yakınsama kriterini sağlayana kadar uygulanır.

Tüm düğüm noktaları sıra ile tektek ziyaret edil diğinde iterasyon tamamlanmış olur.

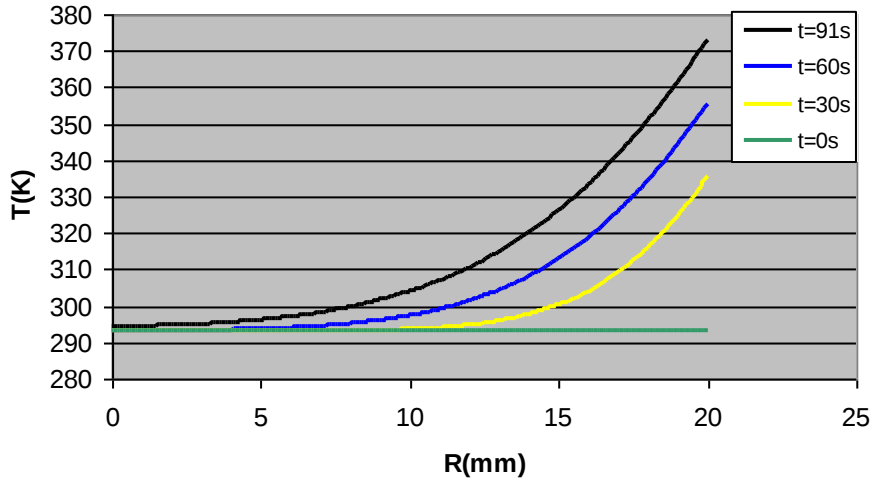
Ayrılaştırıl mş denklemini genel olarak aşığı da yazacak olursak,

$$a_p \cdot P_p = b_p \cdot P_{p+1} + c_p \cdot P_{p-1} + d \quad (4.28)$$

5. SONUÇLAR VE İRDELEME

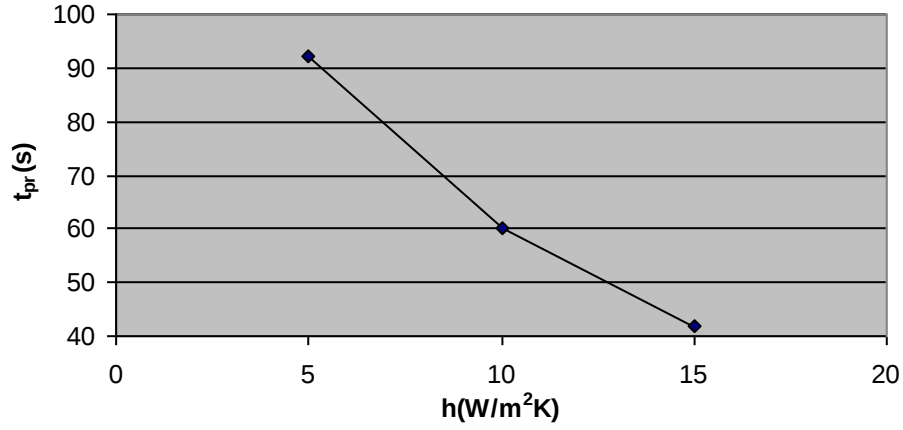
Ek1’de verilen C# Program yardımı ile yapılan parametrik incelemelerin sonuçları aşağıda ön ısınma ve kuruma evresi için verilmiştir. Bu bölümde kömürdeki nem ve diğer parametrelerin yanma öncesi evresinde kömürün içinde oluşan basınç ve sıcaklık dağılımlarına etkisi incelenmiştir.

5.1 Ön Isınma Evresi



Şekil 5.1: Ön ısınma evresi süresince kömürdeki sıcaklık dağılımının zamanla göre değişimi

Şekil 5.1’de ise ön ısınma evresinde kömür içindeki sıcaklık dağılımı belli zaman aralıkları için verilmiştir. $t=91s$ ön ısınma evresinin bitiş zamanıdır aynı zamanda yüzey sıcaklığının T_s sıcaklığına geldiği zamandır.

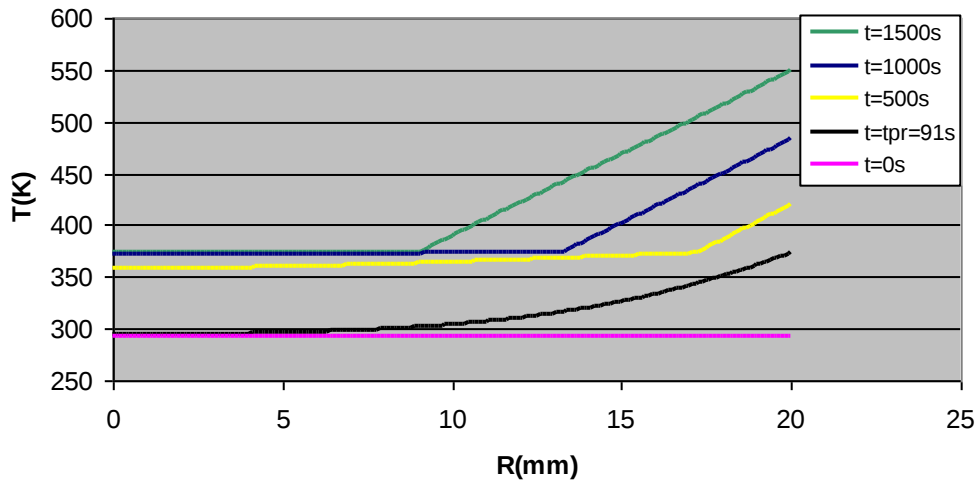


Şekil 5.2: Ön ısıtma süresi nin ortam ısı taşıma katsayısına göre değişimi

Ön ısıtma süresi ısı taşıma katsayısının (h) bir fonksiyonudur. Şekilden de görüldüğü gibi ortam ısı taşıma katsayısı arttıkça ön ısıtma süresi hızla azalmaktadır.

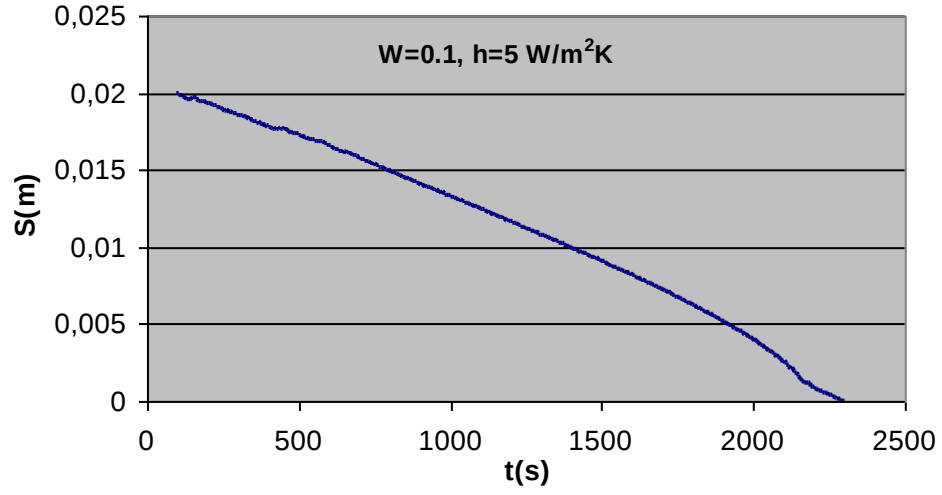
5.2 Kuruma Evresi

Kuruma evresi kömür tabakasının yüzey sıcaklığı T_s sıcaklığına geldiğinde başlanmaktadır. Bu bölümde kömür tabakasının içindeki sıcaklık ve basınç dağılımlarına etki eden parametreler incelenecektir.



Şekil 5.3: Çeşitli zamanlar için kömür içindeki sıcaklık dağılımları

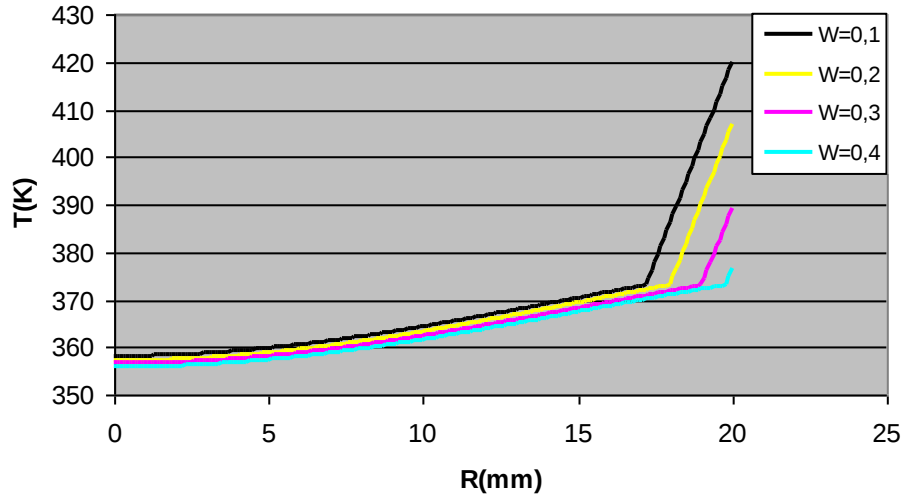
Şekil 5.3 kuruma evresindeki çeşitli zaman adımları için tabakadaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekilden zamana ve konuma bağlı olarak kayan bir buharlaşma cephesinin varlığı görülmektedir.



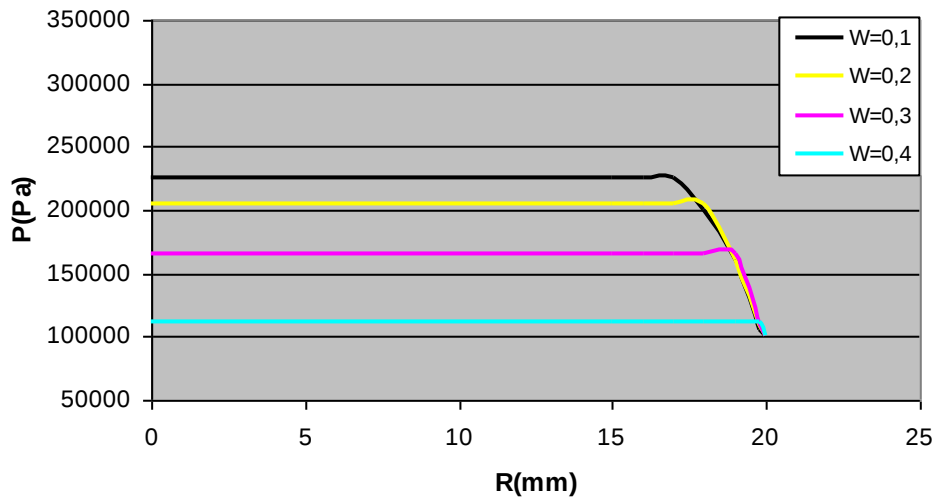
Şekil 5.4: Buharlaşma cephesinin ilerlemesinin zamana göre değişimi

Şekil 5.4 buharlaşma cephesinin ilerleme hızının zamana göre azalan bir eğilime gittiğini göstermektedir.

5.2.1 Kömürdeki nem oranının sıcaklık ve basınç etkisi



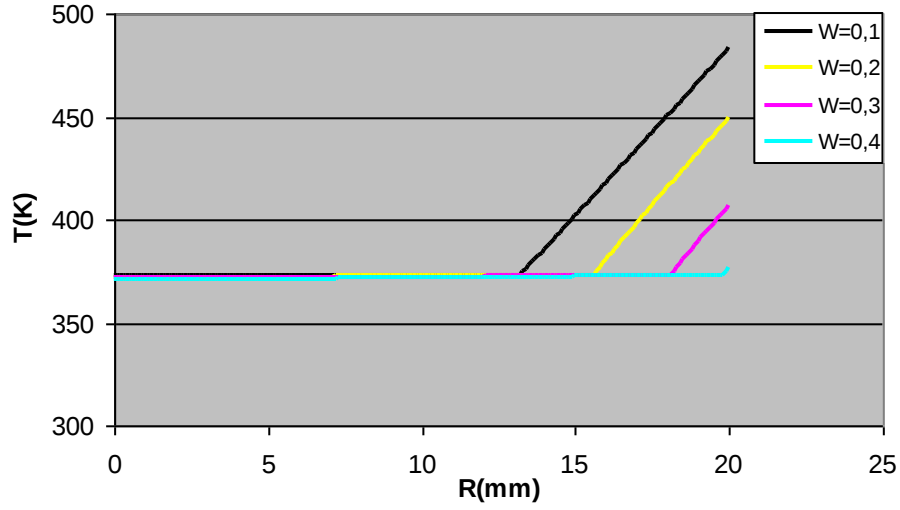
Şekil 5.5: t=500s' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi



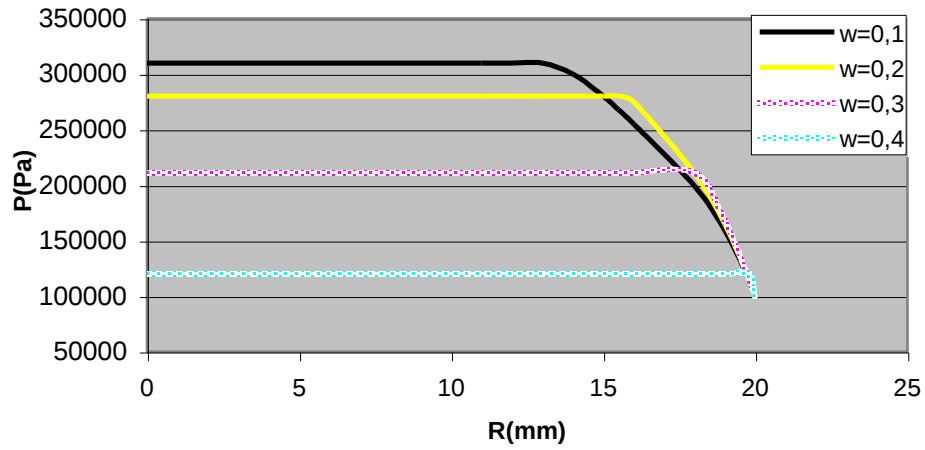
Şekil 5.6: t=500s' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi

Şekil 5.5 t=500s' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı azaldıkça sıcaklık cephesinin ilerleme hızı artmaktadır.

Şekil 5.6 t=500s' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı arttıkça içeride oluşan basınç artmaktadır. Buharlaşan nem miktarının artması basınç artışına neden olmaktadır.



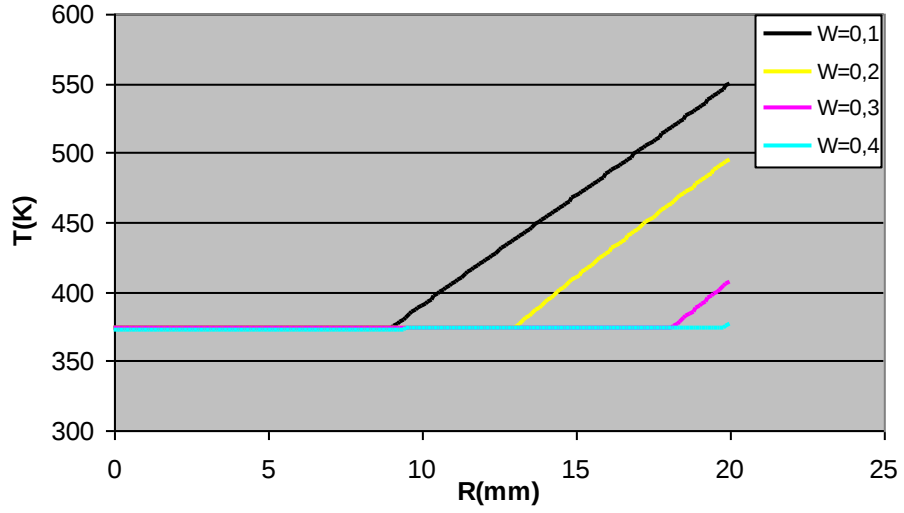
Şekil 5.7: $t=1000s$ ' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi



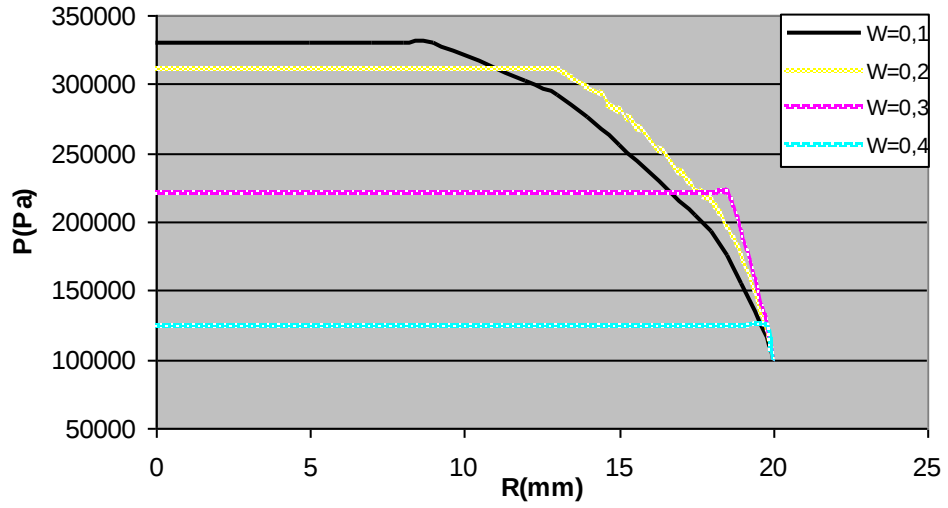
Şekil 5.8: $t=1000s$ ' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi

Şekil 5.7 $t=1000s$ ' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı azaldıkça sıcaklık cephesinin ilerleme hızı artmaktadır. Zaman ilerledikçe buharlaşma cephesi ilerlemekte ve kuruyan bölge artmaktadır.

Şekil 5.8 $t=1000s$ ' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı arttıkça ve zaman ilerledikçe içeride oluşan basınç artmaktadır.



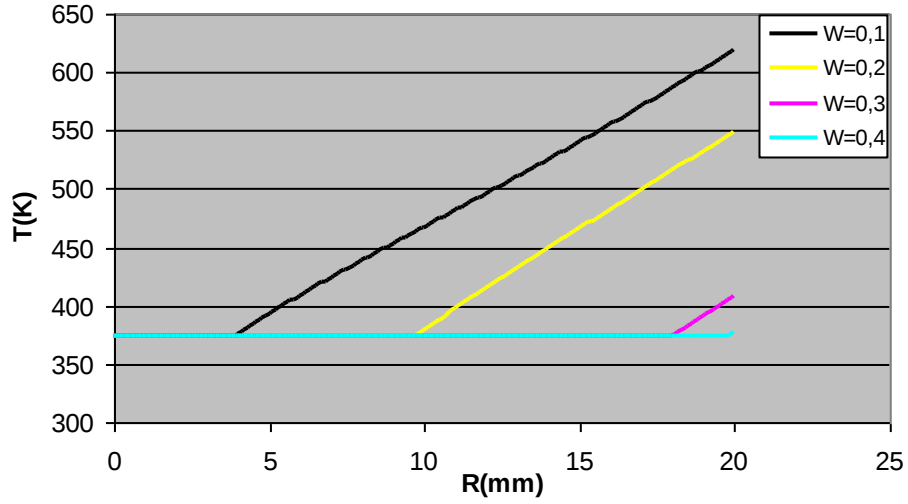
Şekil 5.9: $t=1500s$ ' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi



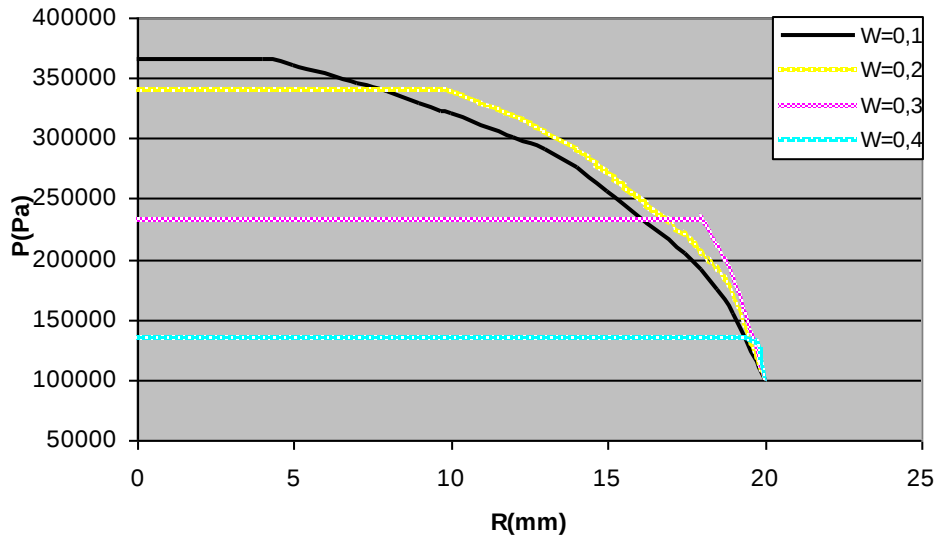
Şekil 5.10: $t=1500s$ ' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi

Şekil 5.9 $t=1500s$ ' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı azaldıkça sıcaklık cephesinin ilerleme hızı artmaktadır. $w=0,3$ ve $w=0,4$ ' ün kuruma süreleri $w=0,1$ ve $w=0,2$ ' den çok büyük olduğu için bu sürelerde $w=0,3$ ve $w=0,4$ ' ün ilerlemesi çok yavaş olmaktadır.

Şekil 5.10 $t=1500s$ ' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı arttıkça ve zaman ilerledikçe içeride oluşan basınç artmaktadır.



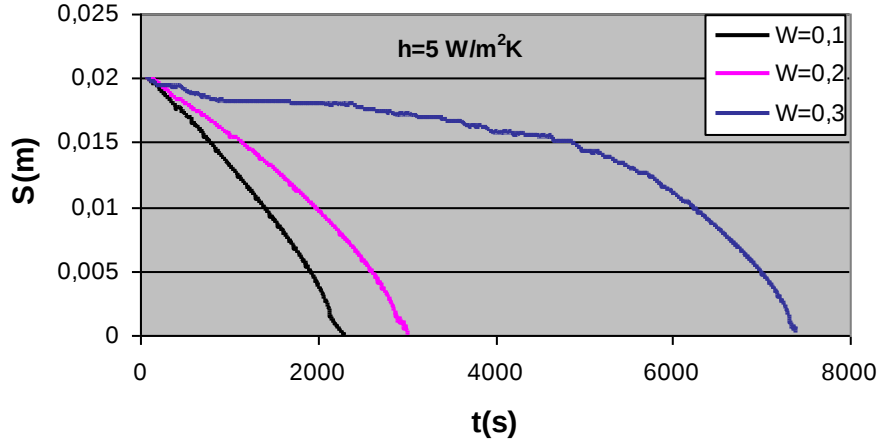
Şekil 5.11: $t=2000s$ ' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi



Şekil 5.12: $t=2000s$ ' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi

Şekil 5.11 $t=2000s$ ' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı azaldıkça sıcaklık cephesinin ilerleme hızı artmaktadır.

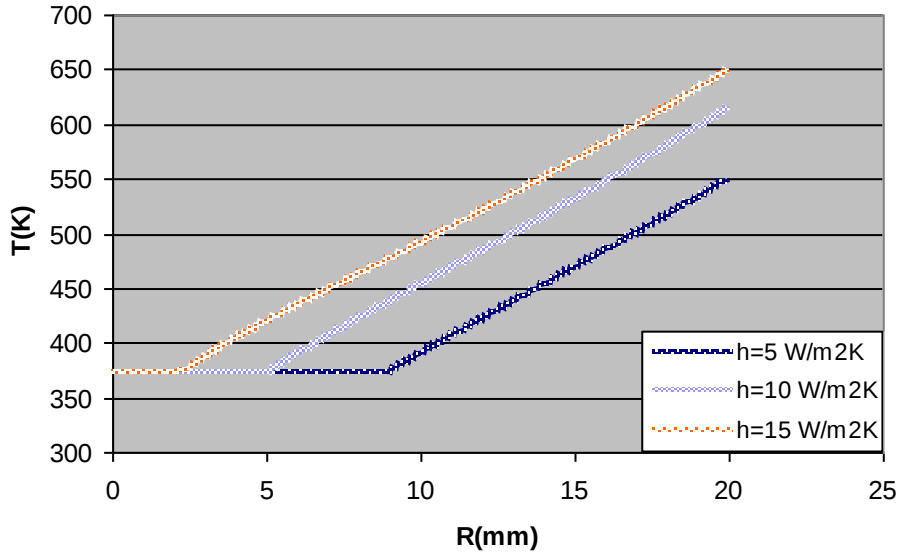
Şekil 5.12 $t=2000s$ ' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı arttıkça ve zaman ilerledikçe içeride oluşan basınç artmaktadır.



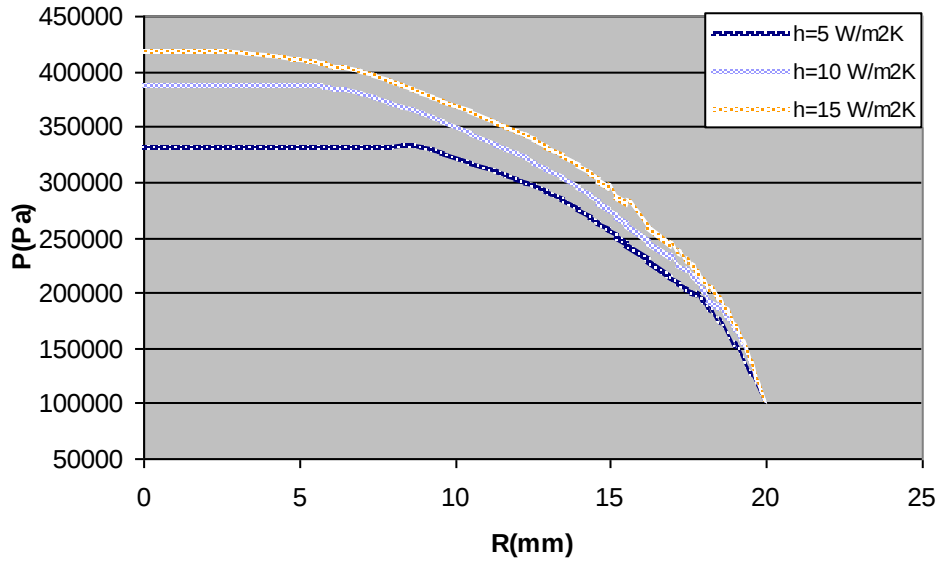
Şekil 5.13: Buharlaşma cephesi nin ilerleme hızı na kömürdeki nem oranının etkisi

Şekil 5.13' de nem oranı arttıkça buharlaşma cephesi nin ilerleme hızı azalmakta ve kuruma süreleri artmaktadır. Özellikle $w=0,3$ için kuruma süresi, $w=0,1$ ve $w=0,2$ 'ye göre çok uzun sürmektedir.

5.2.2 Ortam ısı taşıma katsayısının sıcaklık ve basınç etkisi



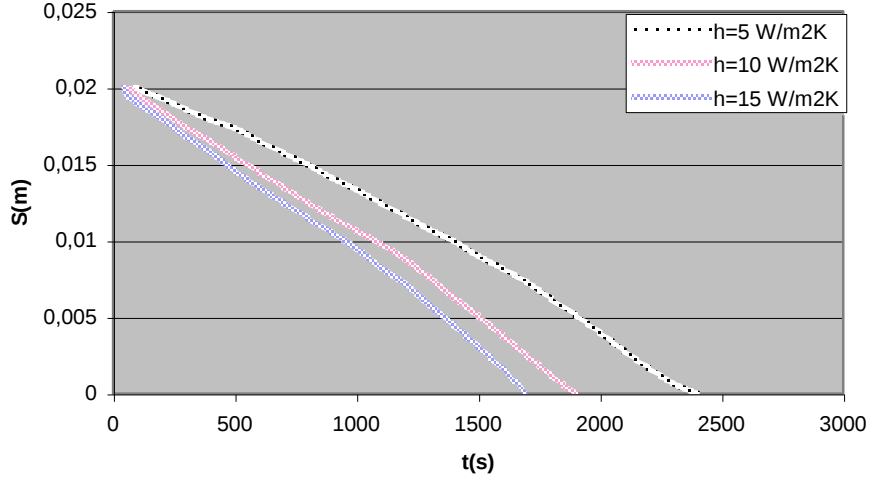
Şekil 5.14: $t=1500s$ ' deki kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına ısı taşıma katsayısının etkisi



Şekil 5.15: $t=1500s$ ' deki kömür içindeki basınç dağılımlarına ısı taşıma katsayısının etkisi

Şekil 5.14 $t=1500s$ ' deki kömür içindeki çeşitli h değerlerine karşılık sıcaklık dağılımlarını vermektedir. Isı taşıma katsayısının değeri arttıkça kömüre gelen toplam ısı miktarı arttığından, sıcaklık değerleri daha hızlı artmaktadır.

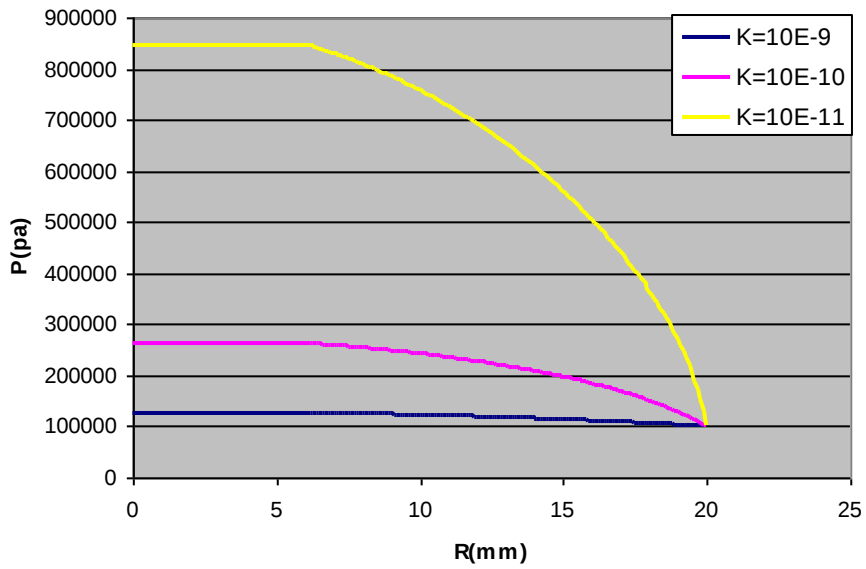
Şekil 5.15 t=1500s’ deki kömür içindeki çeşitli h değerlerine karşılık basınç dağılımı vermektedir. Isı taşıma katsayısının değeri arttıkça sıcaklık daha hızlı artmakta ve kömür içerisindeki nem daha hızlı buharlaşmaktadır. Buharlaşan nem miktarı ise kömür içerisindeki basıncı artırmaktadır.



Şekil 5.16: Buharlaşma cephesinin ilerleme hızına kömürdeki ısı taşıma katsayısının etkisi

Şekil 5.16’ de ortamın ısı taşıma katsayısı arttıkça buharlaşma cephesinin ilerleme hızı artmaktadır.

5.2.3 Kömür geçirgenliğinin basıncı etkisi



Şekil 5.17: Kömür içindeki basınç dağılımına kömür geçirgenliğinin etkisi

Şekil 5.17 kömür içindeki basınç dağılımına kömür geçirgenliğinin etkisini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kömür geçirgenliğinin azalması basıncın artmasına neden olur. Kömür geçirgenliği azaldıkça buhar daha çok dirence maruz kaldığından oluşan basınçlar artmaktadır.

5.3 Sonuçlar

Literatürde, aynı amaca yönelik olarak çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda CO emisyonlarının, nem oranı %21,4 civarında bir minimumdan geçtiği, verimin ve toz emisyonlarının ise bu noktada bir maksimumdan geçtiği görülmüştür. Kömürdeki toplam porozite hacmi kömürleşme derecesi azaldıkça artmaktadır ve bu porozite oluşumu toz konsantrasyonunu etkilemektedir. Yanma sırasında porozite ortamında bulunan su ani sıcaklık yükselmesiyle beraber por ortamından çıkarken yüzeye basınç uygulamaktadır. Bunun sonucunda kömür yapısında kırılma, parçalanmalar meydana gelmekte, toz konsantrasyonu yükselmektedir [4].

Sunulan bu çalışmada, kömür neminin yanmaya olan etkisi teorik olarak incelenmiştir. Modelin sayısal çözüm sonuçlarına göre yapılan kabuller altında sistem içerisinde oluşan basınçları maksimum yapan kritik bir nem oranı saptanmıştır. Nem oranı arttıkça basınçlar artmaktadır.

Kömürün içindeki sıcaklık dağılımları, ortamın ısı taşınım katsayısı ve kömürdeki nem oranı, basınç dağılımları ise ortamın ısı taşınım katsayısı, kömürdeki nem oranı ve kömürün geçirgenlik değeri göz önüne alınarak incelenmiştir.

Sıcaklık ve basınç dağılımlarına ilişkin elde edilen grafiklerin sonuçlarına göre kömürün nem içeriği arttıkça basınç artmaktadır, nem oranı azaldıkça sıcaklık cephesinin ilerleme hızı artmaktadır. Diğer parametrelere göre ise, ısı taşınım katsayısı arttıkça sıcaklık ve basınç değerleri artmakta ve kömür geçirgenliği azaldıkça basınç artmaktadır.

Bu çalışmanın dayandığı Kartezyen koordinatlarda yapılan çalışma sonuçları[5], silindirik koordinatlarda yaptığıımız çalışma sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Gauger, A W**, 1932 Condition of Water in Coal of Various Rank, *Trans. of TAI MA*, **102**, 148-164.
- [2] **Brown, G M**, 1953. The Determination of Moisture in Coals, *Nat. Gas. Bul. NAGBA Australia*, **17**, 14-21.
- [3] **Agarwal, P K and Pedler, L**, 1986. Drying Devolatilization and Volatile Combustion for single Coal Particals : A Pseudo - Steady State Approach, *Fuel*, **65**, 5 640-645.
- [4] **Erdöl, N, Çalı, L, Okutan, H, Ekin, E**, 1999. Effect of Coal Moisture on Particulate Emission in a Fixed Bed Combustion Appliance, *Fuel Processing Technology*, **58**, 109-117.
- [5] **Akbaba, N**, 2002. Kömürdeki Nem'in Verim ve Emisyona Etkisi, *Etirme Tezi*, İTÜ
- [6] **Atakül, H, Okutan, H, Arısoy, A ve Ekin, E**, 1996. Kömür Neminin Yanma ve Emisyona Etkisi, 2. *Uusal Kımya Mühendisliği Kongresi*, Bildiri Kitabı, İTÜ İstanbul, 9-13 Eylül.
- [7] **Arısoy, A, Doğan, E, Okutan, H, Ekin, E**, 1999. The Effect of Moisture Content on Coal Combustion, 16. *International Symposium on Combustion Processes*, Kazi mierz Dolny, Poland
- [8] **ASTM D-3302-74**, 1976. Standart Test Method for Total Moisture in Coal.
- [9] **Böke, E, Erdöl, N, Öztürk, A, Okutan, H, Ekin, E, Arısoy, A**, 2000. Kömür Nem İçeriğinin Emisyonlara ve Verime etkisinin İncelenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği 12. Kongresi*, Sakarya.
- [10] **Böke, E, Erdöl, N, Öztürk, A, Okutan, H, Ekin, E, Arısoy, A**, 1999. Effect of Moisture on Emission of Boiler Combustion, *Tenth Int. Conf. On Coal Science*, 12-17.
- [11] **Ekin, M**, 2000. Kömürdeki Nem'in Verim ve Emisyona Etkisi, *Etirme Tezi*, İTÜ
- [12] **Evseev, V.S and Voroshilov, S.P**, 1986. Modeling the Process of Self-Ignition Taking Into Account the Influence of Moisture on Oxidative Processes in Coal, *Soviet Mining Sci.*, **22**, 140-146.

- [13] **Sondreal, E A, Mann, M D, Weber, G W, Young B C**, 1995. Matching Lignites with Clean Coal Technologies, *Coal Technology and Utilization Workshop*, 45-53, Beypazarı, Turkey.
- [14] **J. E sinor consultants, Inc.**, 1992 Market Assessment for North Dakota Lignite, *Final Report*, 289-296, April 9
- [15] **Vorres, K S, Wertz, D L**, 1992 Drying of Beulah - Zap Lignite, *Fuel*, **71**, 1047-1053
- [16] **Akgün, E, Erkmen, Ö, Arısoy, A**, 1993. Kömürdeki Nem Buharlaşmasının Kinetiği, *3. Yanma Sempozyumu, Bildiri Kitabı*, Kırzlıyayla Tesisleri, Bursa, 85-92
- [17] **Unsworth, J. E, Barratt, D J, Roberts, P. T**, 1991. Coal Quality and Combustion Performance, *Coal Science and Technology 19, An International Perspective*, 13-93
- [18] **Okutan, H, Arısoy, A**, 21' nci Yüzyılın Enerjisi, Kömür, *Gemad Yayınları*.
- [19] **Erdöl, N, Ötörk, A, Okutan, H, Ekin, E, Arısoy, A**, 1998. *Proceeding 2th Trabzon Int. Energy and Environment Symp. (TI ESS)* Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon
- [20] **Harpalani, P D, Schraufnagel, R A**, 1990 Shrinkage of Coal Matrix with Release of Gas and Its Impact on Permeability of Coal, *Fuel*, **69**, 551-556
- [21] **Alexeev, A D, Vsilenko, T A**, 1999. Closed Porosity in Fossil Coals, *Fuel*, **78**, 635-638
- [22] **Walker, P. L JR, Verma, S K**, 1988 Density, Porosities and Surface Areas of Coal Minerals as Measured by Their Interaction With Gases, Vapours and Liquids, *Fuel*, **67**, 1615-1623
- [23] **Akgün, E**, 1994. Kömürlerin Kendiliğinden Yanmasının Teorik ve Deneysel İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] **Akgün, E, ve Arısoy, A**, 1993. Kömürlerin Kendiliğinden Yanmaya Karşı Yatkınlıklarının İncelenmesi, *3. Yanma Sempozyumu, Bildiri Kitabı*, Kırzlıyayla Tesisleri, Bursa, 19-21 Temmuz, 143-152
- [25] *Dumanlı Kazan Emisyonu Ölçüm Raporu*, 1994. Gazi Üniversitesi, Ankara
- [26] **Prins, W**, 1987. Fluidized Bed Combustion of a single Carbon Particle, *PhD Thesis*, University of Twente
- [27] **Incropera, F P and De Witt, D P**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons Inc.
- [28] **Ponte, D G, Prieto, I. E**, 1996. Determination of Moisture Content in Power Station Coal Using Microwaves, *Fuel*, **75**, 133-138

- [29] **Alaridge, D.J. and Evans, D.G.**, 1978. Analytical Methods for Coal and Coal Product, 247-265.
- [30] **Van Brakel, J.**, 1980. Mass Transfer in Convective Drying Advances in Drying Vol 1, Ed. Mujumdar, A.S., Hemisphere Publishing Corporation, New York, 212-245.
- [31] **Clemens, A.H., Matheson, T.W.**, 1996. The Role of Moisture in the Self-Heating of Low Rank Coals, *Fuel*, 891-895.
- [32] **Okutan, H., Ekinçi, E., Arısoy, A.**, 2000. Sabit Yataklı Yakıcılar da Kömürün Yanması ve Kömür Rutubetinin Emisyonlara Etkisinin Araştırılması, 5. Kömür Teknolojisi ve Kullanım Semineri, Ankara.
- [33] **Patankar, S.V.**, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow Hemisphere Publishing Corporation, New York

ÖZGEÇMİŞ

Şule Berrin Akyüz, 1978 yılında İstanbul’ da doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini İstanbul’ da tamamladı. 1996 yılında Y. T. Ü Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’ ne girdi ve 2000 yılında mezun oldu. 2000 yılında İ. T. Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Program’ nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve aynı zamanda 2002 yılından itibaren özel bir şirkette çalışmaktadır.