

**KÖMÜR STOKLARINDA MEYDANA GELEN KENDİLİĞİNDEN
YANMA SÜRECİ İLE İLGİLİ MODELLER VE ALINMASI
GEREKEN TEDBİRLER****Models Related to Spontaneous Combustion of Coal in
Stockpiles and Preventive Measures**

Bahtiyar UNVER^(*)
Ali ÖZÖZEN^(M)

Anahtar Sözcükler : Kömür Stoklanması, Kendiliğinden Yanma

ÖZET

Bu makalede, yerüstünde stoklanan kömürlerin oksidasyon sonucu kendiliğinden yanması ve konu ile ilgili mevcut yanma modelleri ele alınmıştır. Yeraltı ve yerüstü ocaklarından üretilen ve hemen satılamayan kömürler yerüstünde stoklanmak zorundadırlar.

Bu çalışmada, stoklamayla beraber öncelikle ne şekilde bir oksidasyon reaksiyonunun gerçekleştiği ve ardından da bu reaksiyona etki eden kimyasal ve fiziksel parametrelerin üzerinde durulmuştur. Daha sonra oksidasyonun hangi mekanizmalarla, hangi süreçlerde yeraldığı, bu mekanizmaların tanımlandığı modellemeler ve deneysel çalışmalar sunulmuştur. Son olarak kömürde oksidasyon sonucu ne gibi değişimlerin olduğu, güvenli bir stoklamanın nasıl yapılacağı, önceden alınması gerekli tedbirler ve açıkta stoklamanın çevresel etkileri üzerinde bilgiler verilmiştir.

ABSTRACT

Models relating to spontaneous combustion of coal in stockpiles are presented in this paper. Coal produced from surface or underground mines must be stored in stockpiles if not delivered or sold right away. In addition, it is necessary to have a certain amount of coal in the stockpiles of thermal power plants.

In this paper, firstly, the characteristics of oxidation reaction together with the physical and chemical factors affecting oxidation are presented. Then, mechanism and process of oxidation are presented in the light of models explaining spontaneous heating and experimental research results. Lastly, changes in the properties of coal, due to oxidation are given and the methodology for a safe and efficient stockpiling of coal is presented.

^{*)} Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Müh. Böl., Beytepe / Ankara

^{*)} Araş.Gör., Hacettepe Üniversitesi, Maden Müh. Böl., Beytepe / Ankara

1. GİRİŞ

Sıvı ve gaz yakıtlara oranla kömürün stoklarda depolanması daha kolay ve pratik olmasına rağmen, oksidasyon sonucunda kendiliğinden yanma özelliği nedeniyle bazı riskler taşımaktadır. Özellikle büyük miktarlarda kömür ithal edip stoklama yapan, denize yakın ülkelerde stoklama sonucu kömürün kendiliğinden yanması ile kömür kalitesi ve envanteri üzerindeki kayıpların ciddi boyutlarda olduğu fark edilmiş ve bu konu üzerinde ayrıntılı çalışmalar yapılmıştır (Grosman vd., 1991, Schmall vd., 1985).

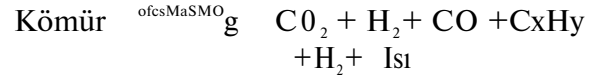
Kömür stoklamasının, piyasadaki talebi zamanında ve kesintisiz karşılama, üretim aksamalarına karşı hazırlıklı olma, uygun zamanlarda üretip kışın tüketme gibi yararlarının yanısıra birtakım sakıncaları da söz konusudur. Bu sakıncalara, öncelikle stoklanmış kömürün ölü bir yatırım olması, kömürlerin koklaşma ve kalorifik değerlerinin azalması, ufalanarak tozlaşmanın olması, okside olmuş kömürün kömür hazırlama devrelerinde problem yaratması, gazlı kömürlerin kapalı yerlerde patlayıcı gaz karışımlarına sebep olmaları ve en tehlikelisi kendiliğinden yanmanın açık alevli yangınlara dönüşmesi örnek olarak verilebilir (Ökten, 1990).

2. KÖMÜRÜN OKSİDASYONU VE KENDİLİĞİNDEN YANMA OLAYI

Kömür içerisinde organik yapıda olmak üzere karbon, hidrojen, kükürt, azot ve oksijenden oluşan hidrokarbon bileşikleri bulunur. Bununla birlikte çoğunlukla kil, şeyi, kumtaşı ve pirit gibi bir çok mineral de kül formunda olmak üzere kömürün yapısında bulunur. Kömür yapısında organik olarak %50-90 karbon, %2-20 oksijen, %2-8 hidrojen ve %2 den az azot bulunur, kükürt ise hem organik hem de mineral yapısında olmak üzere %7-8'e kadar çıkabilir (Duzy ve Land, 1985).

Kömürün yapısında bulunan tüm organik bileşenler hava ile temas sonucunda tepkimeye girerler. Kimyasal tepkimelerin şiddeti ise bileşenlerine göre değişmekte olup, sonuçta bir serbestleşme enerjisi olarak ısı ortaya çıkmaktadır. Konu üzerinde yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre, oksijen moleküllerinin kömür yüzeyine öncelikle fiziksel olarak bağlandığı (adsorpsiyon), daha sonra bu olayın ısı iletimi (conduction), ısı taşınım (convection) ve difüzyon mekanizmalarının bileşkesiyle kömürün gözeneklerine kadar ulaşarak kimyasal bir tepkimeye dönüştüğü bilinmektedir (Nordon 1979; Schmall vd. 1985; Young vd., 1985; Brooks ve Glasser 1986; Brooks vd. 1988; Ökten, 1990).

Genel olarak oksidasyon reaksiyonu aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir:



Temelde oksidasyon ile yanma arasında kimyasal bir farklılık olmamakla birlikte, oksidasyonun hızı yanmaya oranla daha yavaştır. Oksidasyon daha uzun süreli bir tepkimedir ve enerji yayılım hızı da sıcaklık artışına bağlıdır. Sıcaklık artışı ise kömürün açık alevli yanmasına kadar devam edebilmektedir.

3. KENDİLİĞİNDEN YANMA OLAYINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Günümüze kadar kömürün kendiliğinden yanması üzerine birçok araştırmanın yapılmış olmasına karşın bu olayı etkileyen etmenlerin bazıları üzerinde kesin bir fikir birliği oluşmamıştır. Değişik çalışmalarda farklı parametrelerin ve mekanizmaların yanma üzerinde farklı derecede etkili oldukları iddia edilmiştir. Kömürün kendiliğinden yanmasına etki eden iç ve dış etkenler Çizelge 1'de verildiği şekilde sınıflandırılabilir (Ailen ve

Porry, 1978; Duzy ve Land, 1985; Brooks vd., 1988; Kural, 1990).

3.1. İç Etkenler

Kömürleşme Derecesi: Kömürün bileşiminde bulunan uçucu madde miktarının azalması ve sabit karbon miktarının artmasına neden olan kömürleşme derecesinin oksitlenme niteliğini azalttığı belirlenmiştir. Örneğin, linyitler kendiliğinden yanmaya çok yatkın oldukları halde, antrasit kömüründe yanma olayı nadiren görülür. Bunun nedeni düşük ranklı kömürlerin bünyelerinde daha fazla reaktif O₂ bulundurmaları ve gözeneklerinin genişlemesiyle oksidasyon için daha elverişli şartları içermesidir.

Çizelge 1 .Kendiliğinden Yanmada Etkili Olan İç ve Dış Etkenler(Ökten,1990)

İÇ ETKENLER (Kömürün Kimyasal, Fiziksel ve Petrografik Özellikleri)	DIŞ ETKENLER (Atmosferik ve Harici koşullar)
- Kömürleşme derecesi	- Sıcaklık (bölgenin iklimi)
- Petrografik yapı	- Rutubet (ortam nemliliği)
- Nem içeriği	- Oksijen konsantrasyonu
- Kül içeriği	- Stoklama şekli
- Kükürt içeriği	- Ortam pH'ı
- Tane boyutu	- Hava ile olan etkileşim süresi
- Depolanan kömürün tipi	
- Kömürün kimyasal reaktivitesi	
- Termal iletkenliği	
- Oksijenin kısmi basıncı	
- Kömürün ilk sıcaklığı	

Petrografik Bileşim: Kömürler, yataklanmaya dik kesitlerinde parlak, yarıparlak veya mat, ince bantlar yani litotipler halinde oluşurlar. Kömürün litotiplerinden parlak olan Vitren ve Klaren'in mat olan Düren ve Fügen'e oranla daha hızlı oksitlendikleri belirtilmekle beraber

kesin bir görüş yoktur. Bununla birlikte Fügen'in diğerlerine kıyasla daha geç tutuşan bir bileşen olduğu bilinmektedir (Kroger ve Beier,1973).

Nem İçeriği: Laboratuvar araştırmaları, nemin, özellikle kömürün düşük sıcaklıktaki oksidasyonunda rol oynadığını göstermiştir. Nem konusunda literatürde farklı görüşler mevcuttur. Nemin oksidasyonu ne şekilde etkileyeceği konusunda bünye nemi, ortamdaki su buharı, ortam sıcaklığı, geçirgenlik ve termal iletkenlik parametrelerine bağlı olarak yanma mekanizmasının tanımlanması görüşü yaygındır. Yazarlar tarafından ülkemizde edinilen tecrübelerle göre Zonguldak bölgesinde nemli kömürlerin, Soma bölgesinde ise kuru kömürlerin daha çok yangına sebebiyet verdikleri tespit edilmiştir.

Kül içeriği: Kömürdeki kül miktarı arttıkça karbon miktarı ve dolayısıyla reaksiyona giren malzeme miktarında bir azalma olacağından yanma riskinin de azalması beklenebilir. Ancak kömür içeriği çok düşük olan kömür karışımli paşaların bile yangın açısından yüksek risk taşıyabilecekleri yapılmış olan çalışmaların sonuçlarından anlaşılmaktadır (Ünver ve Demirbilek, 1994; Ünver, 1997). Dolayısıyla kül içeriği ile kendiliğinden yanma arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır.

Tane Boyutu : Kömür ne kadar ince taneli olursa, doğal olarak ortamdaki oksijen ile ilişkide bulunan yüzey alanı da o oranda artacaktır. Örneğin katı küp şeklinde 1 ton kömür yaklaşık olarak 4,46 m² yüzey alanına sahipken, bu kömür ince toz boyutuna indirildiğinde (slack) yüzey alanı 2,8 km² ye kadar çıkabilmektedir. Buradan oksidasyon hızının dış yüzey alanının küp kökü ile orantılı olarak arttığı saptanmıştır (Sondreal ve Ellman, 1974).

Kükürt İçeriği : Kömürdeki kükürt içeriği, organik ve mineral yapısında olmak üzere, %0,2-8 arasında değişir. Mineral yapısındaki

kükürt çoğunlukla piritten kaynaklanmaktadır. Kömürdeki pirit uzunca bir süre kendiliğinden yanmanın temel nedeni olarak kabul edilmiştir. Ancak yanma karakteristiklerinin belirlenmesi, pirit içermeyen kömürlerde de kendiliğinden yanmanın oluşması veya pirit içeriği yüksek kömürlerin kendiliğinden yanma riskinin düşük olarak belirlenmesi nedeniyle kömürün pirit içeriğinin kendiliğinden yanma açısından belirleyici bir etken olmadığı anlaşılmıştır (Singh ve Demirbilek, 1986; Ünver, 1997).

Pirit özellikle rutubetli ortamda kolaylıkla oksitlenebilmekte, çok fazla miktarda ve ince taneli olarak bulunması halinde ise tepkime hız kazanmaktadır. Ayrıca, pirit oksitlendiğinde şişerek kömürün parçalanmasına, başka bir deyimle yüzey alanının artmasına neden olmaktadır (Duzy ve Land, 1985).

Isıl İletkenlik, Başlangıç Sıcaklığı: Kömürün oksidasyona maruz kalmadan önceki sıcaklığı ve kömürün stoklama şartlarına bağlı olarak yığın içerisinde oluşan ısıl iletim mekanizması kömürün oksitlenme süresini daha da kısaltmaktadır.

Oksijenin Kısmi Basıncı: Kömürün oksitlenme hızının ortamdaki oksijenin kısmi basıncına bağlı olarak arttığı yönünde bir görüş olmasına rağmen konu üzerinde kesin bir görüş birliği bulunmamaktadır. (Ökten ve Yazıcı, 1984; Brooks ve Glasser, 1986).

3.2. Dış Etkenler

Ortam Sıcaklığı: Kömür stoğunun bulunduğu ortamın sıcaklığı ile oksidasyon hızının ilişkili olduğu belirlenmiştir. Kuzey Dakota (ABD) linyitleri üzerinde yapılan uzun süreli araştırmalar sonucunda, genelde 30-100 °C arasındaki her 10 °C lik sıcaklık yükselmesi sonucu oksidasyon hızının 2.2 kat arttığı saptanmıştır (Sondreal ve Ellman, 1974).

Havadaki Nem Miktarı: Havadaki nem miktarının yüksek olması, su buharının kömür

tarafından yüzeye tutunumunu kolaylaştırmaktadır. Kömür stoklarında genellikle yağmurlu günlerde daha çok kendiliğinden yanma problemi ile karşılaşıldığı belirtilmektedir (Nordon ve Bainbridge, 1983).

Stoklama Sekli: Stoklamanın geometrisi, boyuttan ve şekline bağlı olarak yığının maruz kalacağı oksijen miktarı, rüzgar, güneş ve tane boyu dağılımı kendiliğinden yanmayı büyük ölçüde etkilemektedir (Erkan, 1964; Duzy ve Land, 1985; Brooks vd., 1988).

Kömürün Sıkıştırılma Derecesi : Kömür stoğunun sıkıştırılması, yığının geçirgenliğini etkilemesi sonucunda kendiliğinden tutuşmayı azaltıcı etkide bulunmaktadır.

4. KENDİLİĞİNDEN YANMA MEKANİZMASI VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

Günümüze kadar . kömürün kendiliğinden yanması konusunda yapılan çalışmalarda değişik faktörlerin etkisi incelenmiştir. Kömürün kendiliğinden yanması konusunda yapılan modelleme çalışmalarında konunun gerek kimyasal, gerekse termodinamik açıdan karmaşıklığından dolayı tek veya iki boyutta modellemeler yapılmıştır. Dolayısıyla, kömürün kendiliğinden yanmasına etki ettiği bilinen bazı etmenlerin gözönüne alınmaması ve hesaplamalar dışında tutulması kaçınılmaz olmuştur.

Genelde yanma mekanizması modellenirken, *ısı taşınım (convection), doğal ısı taşınımı (natural convection), ısı iletimi (conduction), moleküler difüzyon ve termal reaktivite* özelliklerinden biri veya birkaçının kombinasyonu temel alınarak modelleme çalışmaları yapılmış ve incelenen parametrelerin yanma üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir (Sondreal ve Ellman 1974; Nordon 1979; Baukema vd. 1983; Schmall vd. 1985; Brooks ve Glasser 1986; Brooks vd. 1988).

Kömürün kendiliğinden yanması ile ilgili olarak yukarıda verilen mekanizmaların etkileri konusunda farklı görüşler öne sürülmektedir. Örneğin bir araştırmacı moleküler difüzyonun kendiliğinden yanmada başlıca etkin mekanizma olduğunu iddia ederken başka bir araştırmacı aynı parametrenin aslında önemsiz olduğunu iddia edebilmektedir. Benzer şekilde bazı araştırmacılarca nemin etkisi önemli bulunurken bazı araştırmacılar bunun oksidasyona karşı davrandığını savunmaktadır.

Kendiliğinden yanma fiziksel ve kimyasal açıdan oldukça karmaşık bir süreçtir. Modellerin daha basit ve gerçeğe yakın olabilmesi açısından nispeten düşük sıcaklıklarda (< 100 °C), basit, tek veya iki boyutlu modeller geliştirilmiştir. Yerinde yapılan ölçümler ile model hesaplamaları karşılaştırıldığında ise, özellikle 50 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ve nem içeriğinin hesaplamalara dahil edildiği şartlarda modellemelerin iyi sonuç vereceği görülmüştür (Schmall vd.,1985).

Kendiliğinden yanma ile ilgili bir model türetilmeden önce bir kömür yığını içerisinde yer alan önemli fiziksel ve kimyasal süreçlerin, hem kömürün karakteristiği, hem de stoklanacağı ortam göz önüne alınarak tanımlanması gereklidir. Bunlar, kömür ve gaz reaktifler arasındaki reaksiyon, yığının içerisindeki ısı transferi ve gaz reaktiflerin yığın içerisine transferidir (Brooks vd.,1988).

Şimdiye kadar oksidasyon mekanizmaları üzerine farklı araştırmacılarca yapılan modelleme çalışmalarının temel ayrıntıları, incelenen model parametreleri ve sonuçlar üzerindeki baskın kriterler açısından derlenmiş ve aşağıda alt başlıklar halinde sunulmuştur.

4.1. Van Doornum Modeli

Tek boyutlu bir model olan Van Doornum Modeli 1954 yılında geliştirilmiştir. En yüksek

sıcaklığın zamanın bir fonksiyonu olarak incelendiği önemli bir teoridir. Bazı sınırlamaları söz konusudur. Oksidasyon oranı tam olarak bilinmemektedir ve ısı transferinin sadece ısı iletimi ile gerçekleştiği kabul edilmiştir. Ancak, birçok durumda ısı taşınım da önemli rol oynamaktadır.

4.2. Sondreal ve Ellman Modeli

1974 yılında geliştirilen bu model Van Doornum modelinin bir üst modelidir. Model sadece en yüksek sıcaklığı hesaplamakla kalmayıp, ayrıca bir yığın içerisindeki sıcaklık profillerinin de hesaplanabileceğini göstermektedir. Bu model oksijen tüketimi ve transferinin konveksiyon ile gerçekleştiğini, bunun yanında oksijen difüzyonunun ihmal edilebileceğini göstermektedir.

4.3. Nordon Modeli

1979 yılında geliştirilen Nordon Modeli, en kapsamlı modellerden biridir. Kömür-oksijen reaksiyon oranı, kütle (oksijen) miktarı ve ısı korunumu için net diferansiyel eşitlikler veren bir modeldir. Transfer mekanizması olarak doğal ısı taşınım ihmal edilebilmektedir. Çünkü, bir yığın içerisinde gaz ve katı sıcaklıkları dengeye getirilirse doğal konveksiyonun yer almayacağı iddia edilmiştir. Kütle transferinde hem ısı taşınım, hem de difüzyon beraber bulunmakta, ısı transferinde ise ısı iletimi ve ısı taşınım beraber rol oynamaktadır.

Kritik değer olarak en yüksek güvenlik sıcaklığı ve en yüksek stoklama süreleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Nordon'a göre reaksiyonların deneysel olarak tanımlanması çoğu zaman zordur. Çünkü ortamda bulunan değişken ölçümler çok uzun sürmektedir ve stoklanan malzemenin geniş hacimli olması çözümü daha da zorlaştırmaktadır.

Oksidasyonun ivmelenmesi Arrhenius eşitliğine göre tanımlanmaktadır. Sabit ve

mobil fazlar arasında bir sıcaklık dengesinin varolduğu kabul edilmektedir. Reaksiyon kinetikleri üç değişken (stok yığını içindeki pozisyon, zaman ve yerel oksijen konsantrasyonları) üzerine dayanmaktadır.

4.4. Schmall ve Diğerleri Modeli

Model 1984 yılında geliştirilmiş olup bu modele göre kömürün kendiliğinden yanmasında üç tip süreç ve parametre rol oynamaktadır;

Havadaki oksijen vasıtasıyla oluşan oksidasyon ve diğer bileşiklerin muhtemel katalitik etkisi (suyun adsorpsiyon ve desorpsiyonu ile oluşan buharlaşma ve yoğunlaşma süreçleri)

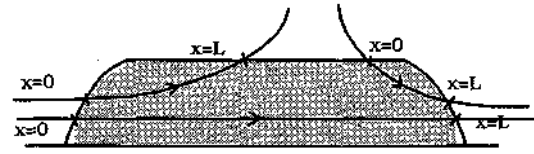
Difüzyon ve ısı iletimi vasıtasıyla oluşan kütle transfer prosesleri, rüzgar basıncı ve yığın içerisindeki sıcaklık değişimleri.

Isı iletimi ve ısıl taşınım ile olan ısı transfer süreci.

Bu üç mekanizmayı, kömürün oksijene karşı olan kimyasal reaktivitesi, fiziksel özellikleri (yoğunluk, özgül ısı kapasitesi, ısıl iletkenlik, tane boyut dağılımı, nem içeriği), stoklama yöntemi (yığın geometrisi, yığın boyutları ve yoğunluğu) ve iklimatik etkiler gibi bir çok parametre etkilemektedir.

Model, ısı korunumu, oksijen kütle korunumu ve adsorplanan oksijenin kütle korunumu eşitlikleri üzerinde yürütülmüştür. Bu modelin deneyleri ve hesaplamaları hem kuru, hem de nemli kömür için ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Değerlendirme sonuçlarına göre ;

a) Kuru Kömür Modeli: Bu modelde ısı taşınım ve ısı iletim transfer mekanizmalarının oranı boyutsuz Peclet sayısı ile ifade edilir. Peclet sayısına göre ısı transferinin hangi mekanizmayla gerçekleşeceği bulunur. Ayrıca bir kömür yığını içerisinde Şekil 1'deki gibi akış profilleri oluşmaktadır.



Şekil 1. Kömür yığını içerisinde oluşan akış profilleri.

Hava yığın içerisinde ilerledikçe sürekli daha düşük bir sıcaklık alanına girerek yerel yoğunlaşmalara ve ısı gelişimine sebep olacaktır. Bu durum çok etkin bir transfer mekanizması olup, yığın içerisinde sıcaklık seviyelerinin oluşmasına sebep olmaktadır ve hatta, kömürün kuru olmadığı durumlarda uzun süre yığın içinde muhafaza edilen yüksek sıcaklıklara sebep olmaktadır.

b) Nemli Kömür Modeli : Saha ve model çalışmalarının sonuçları arasında buharlaşma ve yoğunlaşma süreçlerinden kaynaklanan farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılığın nedeni ise yaklaşık 40-50 °C'ye kadar kömür neminin sıcaklık artışı üzerinde net bir etkisinin olmayışıdır. Ancak, yüksek sıcaklıklarda nemli ve kuru kömür sonuçları arasında belirgin bir farklılık gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda nemli kömür için olan sıcaklık profili kuru kömür için olandan oldukça farklı olmuştur. Bu farklılığın nedeni ise şunlardır ;

Eğer kömür nemli ise, en yüksek sıcaklık mesafesinin bulunma derinliği artmaktadır.

Nemli kömürdeki en yüksek sıcaklık, kuru kömüre göre daha derinlerde bulunmaktadır.

Bu iki görüşe temelde buharlaşma ve yoğunlaşma etkileri sebep olmaktadır. Bunların en önemli sonuçları, kömür yığınında kendiliğinden yanmaya ulaşmak için gerekli olan sürenin (sıcaklık ~ 100 °C'ye ulaştıktan sonra yeralan) kuru kömüre nazaran nemli kömürde çok uzun olmasıdır. Schmall vd.'nin modellemesinden çıkan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır ;

Yığın içerisinde ardışık noktalar arasındaki sıcaklık ve oksijen konsantrasyon farklılıkları nispeten gözeneklilikteki farklılıklar ile açıklanabilir. Kütle ve ısı transferinde, gözenekliliğin çok düşük olduğu durumlarda, ısı iletimi ve difüzyon, çok yüksek olduğu durumlarda ise sadece ısı taşınım en önemli mekanizma olmaktadır. Sıcaklık üzerinde kömürün reaktivitesinin etkisi, gözeneklilik etkisine göre daha düşüktür. Dolayısıyla iyi bir sıkıştırma (yığının titreşim veya silindirle katmanlar halinde serilmesi) reaktif kömürlerin açık havada stoklanabilmesi mümkündür.

Nemli kömür modeline göre, nemin rolü oldukça önemlidir. Ortamdaki nemden dolayı kendiliğinden yanma süresi nem içeriğine bağlı olarak geciktirilebilir. Suyun buharlaşması ve yoğunlaşmasından kaynaklanan ısı etkileri, kendiliğinden ısınan kömür yığınlarında rastlanan 80-90 °C lik sabit en yüksek sıcaklık değerlerinden sorumludur. Burada önemli olan ölçümlerle sıcak nokta profillerinin belirlenmesi ve yerel nem içeriklerinin tespit edilmesidir.

4.5. Young ve Willis Modeli

1985 Yılında geliştirilen bu modelde sıcak nokta içeren kapalı bir model yığını içerisinde, iki boyutlu ortamda, doğal ısı taşınım ve ısı iletimi akımları ve bunların bir kömür yığını içerisine ne şekilde ısı transferi yaptıkları incelenmiştir. Bu amaçla deneysel olarak, gözenekli bir ortamda doğrusal bir ısı kaynağı ile ısı oluşumu ve iletimi incelenmiş olup, ayrıca, deneysel olarak sıcaklık profilleri çıkarılmıştır. Modelde kömürün reaktivitesi önemli bir parametredir. Benzer durum yeraltı stoklan, nükleer atık stoklan, kapalı silolar ve tahıl yığınlarında da görülmektedir.

Bu modellemenin kullanılmasıyla yığın içine giren hava hacmini hesaplamak mümkündür. Yeterli bir reaksiyonun varlığı ile sıcak nokta

oluşumuna sebep olan yığınlarda doğal ısı taşınım kömür yığını içerisindeki oksijen transferi için önemli bir mekanizmadır.

4.6. Brooks ve Glasser Modeli

Model üzerinde çalışmalara 1986 yılında başlanmıştır. Bir kömür yığnında ısı transferi; iletkenlik, ısı taşınım, nem buharlaşması ve yeniden yoğunlaşma faktörlerinin kombinasyonu ile yeralmaktadır. Bu iletkenlik mekanizması etkin ısı iletkenlik ile modellenmiştir. Aşağıda sıralanan süreçler reaktiflerin yığın içerisine taşındığı muhtemel mekanizmalar olarak tanımlanmaktadır ;

Kendiliğinden ısınmayla oluşan doğal ısı taşınım (baca etkisi),
Yığının yüzeyinde diferansiyel rüzgar basıncının sebep olduğu akım,
Moleküler difüzyon,
Sıcaklıklardaki günlük değişimlerden kaynaklanan ısı solunum,
Barometrik basınçtaki değişimlerden dolayı barometrik solunum,

Basitleştirilmiş tek boyutlu bir modeldir. Bu model daha önceki çalışmalarda bir oksijen transfer mekanizması olarak kabul edilerek hesaplanan doğal ısı taşınım yaklaşımından farklıdır. Bu model oluşturulurken birtakım kabullenmeler yapılmıştır. Kömür yığını tamamen izole edilmiş, her iki ucu da açık ve dik duran bir tüp şeklinde düşünülmüştür. Yığının içine doğru olan akım, doğal ısı taşınım ve rüzgar basıncının sonucu olarak yeralmaktadır. Moleküler difüzyon ihmal edilmekte ve yığından ısı kaybının radyasyon ve akım yoluyla oluştuğu kabul edilmektedir. Kömür yığını sürekli bir ortam şeklinde düşünülerek gaz ve katı sıcaklıkları eşit kabul edilmiştir. Yığının içine doğru azalan basınç kayıplan söz konusudur. Model çözümlerinde tane boyutu değişken parametre olarak seçilmiştir. Modelde tane boyutu fiziksel olarak önemli bir değer olup, saha çalışmalardaki değişimler üzerinde önemli etkileri gözlemlenmiştir.

Bu modelde kömür yığınları güvenli, güvensiz ve koşullu güvenli şeklinde sınıflandırılmaktadır. Güvenli kömür yığınlarında hem oksijen, hem de ısı transferi sınırlıdır. Ortamdaki oksijenin ince taneli reaktif kömürün içine transferi gerçekleşinceye kadar yığın güvenli kabul edilir ve bu reaktif kömür enerji dağılımının olduğu yüzeye yakın yerdedir. Diğer bir yığın tipi ise, iri taneden dolayı düşük reaksiyon oranına sahip, düşük reaktiviteli kömür olup, güvenlidir.

Bir kömür yığınının güvenliği söz konusu olduğunda, yığının oksijen veya ısı transferi bakımından limitli olup olmadığı bilinmesi kritiktir. Oksijen limitli yığınlarda ince tane katkısı hem boşlukluluğu azaltarak, hem de, oksijen tüketim oranını artırarak yığının güvenli olmasına yardımcı olmaktadır. Isı transferinin sınırlı olması gerekli olan yığınlarda ise, ince tanelerin ortamdaki uzaklaştırılması ile reaksiyon oranı düşürülerek yığının güvenli olması sağlanmaktadır.

4.7. Brooks vd. Modeli

Baca etkisinin önemini vurgulandığı bir model olup 1988 yılında geliştirilmiştir. Araştırmacıların yapmış oldukları ilk modele göre tek boyutlu yatağın bazı sakıncaları söz konusudur. Kömür-gaz reaktifleri arasındaki reaksiyon, yığının içerisindeki ısı transferi ve gaz reaktiflerin yığın içerisine olan transferi baca etkisi ile açıklanmaktadır.

Kömür stokları yine güvenli, güvensiz ve koşullu güvenli olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca kötü derinlik kavramı ile belirli bir tane boyuna karşılık gelen ve en yüksek sıcaklığı içeren derinlik, stoklama derinliği olarak ele alınmıştır. Kömürün güvenli stoklamasında tane boyutu, yatak boşlukluğu ve reaksiyon oranı en önemli parametrelerdir. Bu amaçla daha gerçekçi çözümler sunabilen üç boyutlu bir model tanımlanmıştır. Bu modelde stok boyutu ile ısı kaybı arasındaki ilişkiler

araştırılmış ve tane boyu kritik parametre olarak incelenmiştir.

5. STOKLAMAMANIN KÖMÜR ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE YAPACAĞI OLASI ETKİLER

Stoklamamanın farklı kömürler üzerinde farklı etkileri olacaktır. Özellikle sıkıştırılmamış kömürler üzerinde aşağıda sıralandığı gibi olumsuz etkiler gerçekleşir;

- Tane boyunun küçülmesi ve tozlaşma,
- Yanma karakteristiklerindeki değişiklikler,
- Oksidasyondan dolayı kalorifik değerlerde kayıplar,
- Asidik akışkan (su) oluşumu,
- Kendiliğinden yanma,
- Silo, bunker gibi kapalı alanlarda patlama tehlikesi,

Bunlardan, bozunma süreci kömür içerisindeki nemin yavaş yavaş buharlaşmasıyla oluşmaktadır ve bunu kömürün ufalanması takip etmektedir. Dolayısıyla, ufalanmayla oksidasyon için daha fazla yüzey alanı oluşmaktadır.

Oksidasyon sonucu stokta bekletilen kömürün kalorifik değerinde düşme meydana gelebilir. Ekonomik açıdan kömürün kalorifik değerinde meydana gelebilecek % 5-10 oranında düşme bile çok büyük parasal değerlere karşılık gelmektedir.

Okside olan kömürün yanma karakteristikleri ve öğütülebilirlik endeksleri de değişmektedir ve bu da sonuçta kömürün koklaşma karakteristiklerini etkileyecektir. Ancak, bu endeksin artacağı veya azalacağı konusunda bir kesinlik yoktur (Kuchta vd. 1980).

Tüm kömürler, kömürün yavaş oksidasyonundan dolayı mutlaka bir kalorifik değer kaybına uğrayacaktır.

Stoklarda biriken veya sızan sular asidik karakterli olup nakliye araçlarında korozif

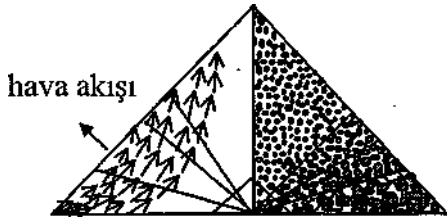
etkiye ve ortam sıcaklığının artmasına neden olacaktır.

Gaz içeriğinin fazla olduğu kömürlerden ufalanma sırasında büyük miktarlarda patlama tehlikesi doğurabilen metan gazı çıkışı meydana gelebilir.

6. KÖMÜRSTOKLAMAPRENSİPLERİ

Kömürün kendiliğinden yanmasında hava ve sıcaklık faktörlerinden birisinin mümkün olduğunca ortamdaki uzaklaştırılması gerekmektedir. Dolayısıyla stoklama yapılırken bu iki parametre sürekli olarak gözlemlenmelidir.

Pratikte dökümle yığın oluşturulduğunda genellikle konik model kullanılır ve bu model boyut açısından doğal bir ayrışmaya sebep olur ki, bu durum, kendiliğinden yanma için ideal bir ortam demektir. Bu tür bir stoklamada yerçekiminden dolayı büyük parçacıklar kenara, küçük ve ince tanecikler ise koninin merkezine doğru bir yığılma gösterecektir ve sonuçta Şekil 1'de görüldüğü gibi bir baca etkisi oluşacaktır. Merkezdeki ince tanecikler büyük parçacıklara oranla daha fazla okside olarak daha fazla ısı oluşturacaktır.



Şekil 2. Konik bir yığılda tane boyuna göre dağılım ve havanın takip ettiği yol (Erkan, 1964).

İdealde en iyi stoklama kapalı yerlerde olmaktadır ancak bu pratikte zor olan bir yöntemdir. Açıkta stoklamada kömür,

yağmur, kar, tuzlu su, gün ışığı ve rüzgar etkisine maruz kalır. Dolayısıyla kömür stoklamada yer seçimi büyük önem taşır. Stoklama zemini durağan, düzgün ve molozsuz olmalıdır. Yağmur veya başka etkilerden oluşacak akıntıları gidermek için sahada drenaj sistemi kurulmalıdır. Stok sahasının yüzeyi çimento, kireç vb. geçirimsiz malzeme ile kaplanmalıdır ve bu kaplama işlemi mobil ekipmanların hareket mesafelerine kadar uzanmalıdır (~6m). Genel olarak asfalt ve asfaltik kaplayıcı maddelerden kaçınılmalıdır (Ökten ve Yazıcı, 1984).

Stoklama esnasında tane boyutu mümkün olduğunca korunmalıdır ve bunun için yüksekte döküm yapmaktan kaçınılmalıdır.

Bir ölçüm şebekesi kurularak kömürün tipine göre farklı derinlik ve lokasyonlarda stoktan periyodik olarak ölçüm yapılmalıdır. Kritik sıcaklık olan -70 °C ye gelindiğinde ise mutlaka koruyucu tedbirler alınmalıdır (Duzy ve Land, 1985).

6.1. Stoklama Süreleri

a) Kısa Vadeli Stoklama

- Bitümlü kömürler (30 güne kadar) : Yığın yüksekliği en fazla 6 metre olmalıdır. Mümkün olduğunca ayrışmayı azaltmak için basamaklar (seviyeler) şeklinde yığın yapılmalıdır.
- Linyit kömürü (15 güne kadar): Yığın yüksekliği en fazla 4 metre olmalı, yine ayrışmayı azaltmak için basamaklara ayrılmalıdır (Duzy ve Land, 1985).

b) Uzun Vadeli Stoklama

- Bitümlü kömürler : 0,5-0,6 m kalınlıkta tabakalar halinde ve 1 ton/m³ yığın yoğunluğunda stoklanmalıdır. Mümkünse tabakalar arasında etkileşimi en aza indirecek izole sergi malzemesi kullanılmalıdır. Eğim yataydan en fazla 20°

olarak korunmalıdır. Kömür stoklarında en fazla ısınma problemleri yığının eğimli kenarlarında meydana gelmektedir ve tecrübelerle göre 20° ye kadar olan açılarda hem ekipmanlar rahat çalışmakta hem de stabil durum sağlanabilmektedir.

Linyit kömürü: 1 ton/m³ yoğunlukta ve 0,3 metrelik tabakalar halinde sıkıştırılarak yığılmalıdır, bitümlü kömür için olan şartlar genelde linyit için de geçerlidir (Duzy ve Land, 1985).

Kömür stoklaması ve stok geometrisi ile ilgili tecrübelerin ışığında, genel olarak aşağıda sıralanan prensipler ve tedbirler bir stoklama işlemi süresince göz önüne alınmalıdır (Duzy ve Land 1985; Singh ve Demirbilek 1986; Ökten 1990):

Harici ısı kaynakları stok sahasından geçmemelidir.

Stoklama esnasında mümkün olduğunca ayrışma önlenmelidir. Boyut küçülmesini önlemek için yüksekte döküm yapılmamalıdır. Katmanlı yapılan stoklama baca etkisini en aza indirecektir.

Konik veya piramit yığın şeklinden kaçınılmalıdır. Prizma, yamuk veya kesik koni şeklinde yığın yapılarak baca etkisi en aza indirilmelidir.

Silo ve kompartman gibi kapalı alanlarda ıslak ve kuru kömürlerin karıştırılmaması gerekmektedir.

- Yüksekliği 6 metreyi aşan geçici stoklamalar yapılmamalıdır.
- Ocaktan yeni çıkarılan kömür, eski stoklar üzerine, ancak eski stokta üç ay içerisinde bir kızışma meydana gelmemişse ilave edilmelidir.

Stoğun bulunduğu bölgede aşırı sıcaklık yükselmeleri söz konusu ise, hassas sıcaklık gözlemleri yapılmalı ve önleyici tedbirler alınmalıdır.

- Sıcaklığın 70 °C ve üzerinde olduğu noktalar gözleniyorsa acil yığın dağıtma çalışmaları başlatılmalıdır. Stok ince tabakalara bölünerek soğumaya bırakılmalıdır.

- Kendiliğinden yanma olup olmadığını kontrol etmek ve gözlemlenmek için sürekli yığın yüzeyinden buhar çıkışı ve koku oluşumu izlenmelidir.

Sıcaklık değişimlerini kontrol etmek için, yığın içinde 3-4 metre aralıklarla, tabandan 30 cm.'ye kadar termometre ile ölçüm alınmalıdır. Sıcaklığın linyitlerde 50 °C, taşkömürlerinde 70 °C 'yi aşmaması gereklidir.

Eğer yığının farklı yerlerinde kızışma olmuş ise, yığın bozularak yeniden oluşturulmalı ve öncelikle kullanıma sunulmalıdır.

7. AÇIKTA KÖMÜR STOKLAMANIN ÇEVRESEL AÇIDAN GETİRECEĞİ ETKİLER VE BİR İSRAİL ÖRNEĞİ

Hava ile temas halinde olan kömürlerde meydana gelen ısıveren tepkimeler sonucu CO₂, H₂ ve CO gibi gazların emisyonu gerçekleşir. Uzun süre bekleyecek şekilde stoklanan, geniş yığılı, bitümlü kömür stoklarında otojen ısınma nedeniyle sıcak noktalar oluşabilir. Bu süreçler sonucunda büyük miktarlarda kömür stoklayan ve taşıyan üreticiler ve tüketiciler için hem çevresel, hem de ekonomik sorunlar ortaya çıkmaktadır.

İsrail'de deniz kıyısına yakın yerlerde büyük miktarlarda kömür stoklanması (yıllık 5 milyon tondan fazla) sonucunda sık sık kendiliğinden yanma problemleri ile karşılaşmaktadır (Grossman vd.,1991). Bu bölgede kömür stokları içerisinde gazların incelenmesi sonucunda (6 metre derinliğe kadar yapılmış ve 12 aydan fazla bir süre almıştır) en yüksek sıcaklık değeri 172 °C olarak stok yüzeyinden 1,2 metre derinlikte ölçülmüştür. Karbon monoksit, düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar (C₅'e kadar) ve bunlara ek olarak moleküler hidrojen tespit edilmiştir.

Özellikle İsrail gibi uzun süreli, sıcak ve nemli deniz iklimine sahip bölgelerde kendiliğinden

yanma problemleri ve doğuracağı olumsuz etkilerin daha hassas ele alınması gerekmektedir. İsrail'de Hadera Termik Santrali stok sahası ve Ashdod'dan gelen sonuçların karşılaştırılması sonucu, her iki stok sahasında da yüksek sıcaklıkların oluştuğu (>70 °C) gözlemlenmiştir. Ashdod'da yapılan ölçümler sonucunda stok yüzeyinden 1,5 metre derinliklerde çok yüksek konsantrasyonlarda (~%6) CO bulunmuştur. Ayrıca stok yüzeyinden yaklaşık 1 metre yukarıda da tehlikeli CO seviyeleri (400-600 ppmv) bulunmuştur. Ölçüm sonuçlarına göre bu bölgede 15 dakikadan fazla bulunan bir işçi tehlike sınırları içinde çalışıyor demektir. Yine başka bir sonuca göre, stok yüzeyine yakın seviyede (0,2 m de) 11 ppmv hidrojen ölçülürken, 1,5 m derinlikte bu değer 9281 ppmv gibi yüksek bir rakama ulaşmıştır (Schmall vd., 1994).

Bu saha sonuçları endüstriyel ölçekli stok yığınlarında hidrojen emisyonunun var olacağını göstermektedir ve hidrojen emisyonundan sorumlu olan mekanizmayı tanımlamak da oldukça zordur. Bununla beraber, hidrokarbon kömür moleküllerinin tespit edildiği bölgelerde hidrojen emisyonunun oksidasyonla ilişkili bir süreç olduğu açıkça görülmektedir (Schmall vd,1994).

Hadera ve Ashdod'da derinlik, sıcaklık ve hidrokarbon konsantrasyonu arasında kesin bir korelasyon bulunamamıştır. Tahminen bu gazların otojen ısınmaya yakın yerlerde oluşabileceği kanısına varılmıştır.

Uzun süreli ölçme ve gözlemler sonucunda ise şu sonuçlara ulaşılmıştır:

Sıkıştırılmamış stok yığınları (-850 kg/m³), kısmen sıkıştırılmış (-950 kg/m³) veya daha iyi sıkıştırılmış (-1250 kg/m³) stok yığınlarına oranla daha fazla hidrokarbon ve karbonmonoksit konsantrasyonuna sahiptirler.

- Tehlikeli derecedeki (400-600 ppmv) CO konsantrasyonları, sıkıştırılmamış stok yığın yüzeyinin 1 metre üzerinde bulunmaktadır. 25 ppmv ve üzerindeki CO konsantrasyonlarını veren tehlikeli durumlar, otojen olarak ısınan stok yığınlarının tabanından 3-4 metre yükseklikte oluşmaktadır.
- Sıkıştırılmamış bir kömür yığını içerisinde yüksek konsantrasyonlu (%1) moleküler hidrojen yaklaşık 1.5 metre derinlikte bulunmuştur.

8. SONUÇ

Büyük miktarlarda kömür stoklarda oksitlenmeye uygun bir ortamda stoklanmaktadır. Oksidasyon sonucu kömür stoklarında meydana gelebilecek düşük oranlardaki değişiklikler bile kömürün kalorifik değeri ve envanteri açısından göz ardı edilemeyecek kayıplar doğurmaktadır. Kömür zaman içerisinde hem değerini kaybetmekte, hem de çevresel açıdan olumsuz sonuçlara sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, bir stoklama işlemi yapılırken kömürün en az oksidasyona maruz kalacağı veya hiç kalmayacağı şekilde stoklanması gerekmektedir. Bu amaçla iyi bir stoklama için kömürün fiziksel ve kimyasal karakteristikleri, maruz kalacağı iklimatik şartlar, rüzgar yönü, mevsim, tane boyutu, harmanlama evreleri ve harmanlama karışım oranları gibi faktörler dikkatli bir şekilde incelenmelidir. Bu sayede en uygun stok geometrisi belirlenerek zaman faktörünün de göz önüne alınması ile optimum bir stoklama süreci oluşturulmalıdır.

KAYNAKLAR.

Ailen R.R ve Porry. V.F., 1978; "Storage of Low-Rank Coal". Bureau of Mines Report , 8269.

Baukema K.J., Brum S. ve Scheme J. 1983;

"Three Dimensional Natural Convection In A Confined Porous Medium With Internal Heat Generation." Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 26, s. 451-458

Brooks K., Svanas N. ve Glasser D. 1988; "Evaluating The Risk of Spontaneous Combustion In Coal Stockpiles" Fuel, Vol 67, May, s. 651-656.

Brooks K. ve Glasser D., 1986; "A Simplified Model Of Spontaneous Combustion In Coal Stockpiles" Fuel, Vol. 65, August, s. 1035-1041.

Duzy A.F. ve Land G.W., 1985; "Hot Coal-Bulk Transport and Storage", Mining Engineering, February, 1985, s. 139-143.

Erkan, H. 1964; "Kömür Depolanması". Madencilik Dergisi..

Grossman S.L., David S. ve Cohen H., 1991"; Evolution Of Molecular Hydrogen During The Atmospheric Oxidation Of Coal." Fuel, Vol 70 July , s 897-898.

Kroger C, ve Beier E. 1973; "Die Werwitterung Von Steinkohlen, Brennstoff-Chemie, Nr. 11, Band 43.

Kuchta J.M., Rowe V.R. ve Burgess S., 1980; "Spontaneous Combustion Susceptibility of U.S. Coals", U.S. Bureau of Mines RI 8474.

Kural O., 1990; Kömür, İTÜ.

Nordon P., ve Bambridge N.W., 1983; "Heat Of Wetting Of A Bituminous Coal." Fuel, Vol. 62, s. 619-621.

Nordon P., 1979; "A Model For The Self-Heating Reaction of Coal And Char." Fuel, Vol 58, june, s 456-464.

Ökten G., 1990; " Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Önlenmesi İçin Alınacak Tedbirler." İ.T.Ü.

Ökten G. ve Yazıcı S., 1984; "Kömür Depolanmasında Karşılaşılacak Sorunlar ve Alınacak Tedbirler" Madencilik Dergisi. Haz.

Schmall D., Duyzer J.H. ve Heuven J.V., 1985; "A Model for The Spontaneous Heating of Coal." Fuel, Vol 64 July, s. 963-972.

Schmall S., Grossman L., David S. ve Cohen H., 1994; "Emission of Toxic and Fire Hazardous Gases from Open Air Coal Stockpiles." Fuel, Vol.73, s. 1184-1188.

Sondreal E.A. ve Ellman R.C., 1974; "Laboratory Determination of Factors Affecting Storage of North Dakota Lignite", U.S.Bureau of Mines RI7887 , 83 s.

Ünver B. ve Demirbilek S., 1994; "Kömür Karışımı Paşaların Kendiliğinden Yanma Riski Potansiyelinin Analizi". 9. Kömür Kongresi, Mayıs Zonguldak,

Ünver B., 1997; "Determination of Spontaneous Combustion Risk Potential of Colliery Wastes For The Environmental Impact Assessment" Mineral Resources Engineering Vol. 5, No:3

Vandornum G.A.W., 1954; J. of Inst. Fuel, 27 482.

Young B.D., Williams D.F. ve Bryson A.W. 1985; "Two-Dimensional Natural Convection and Conduction In A Packed Bed Containing A Hot Spot and Its Relevance to The Transport of Air In A Coal Dump." Int. J.Heat. Mass. Transfer, Vol 29, No.2, s. 331-336.