

TUNÇBİLEK LİNYİT KÖMÜRÜNÜN YAĞ AGLOMERASYONU İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

BENEFICATION OF TUNCBİLEK LIGNITES BY OIL AGGLOMERATION

S. Düzyol, C. A. Ö. Aksu, H. S. Erişir, K. Aspir
Selçuk Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya

C. Şensöğüt
Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya

ÖZET: İnce boyuttaki mineral tanelerinin kazanımında uygulanan yöntemlerden birisi de yağ aglomerasyonu yöntemidir. Bu çalışmada Tunçbilek linyit kömürünün yağ aglomerasyonu ile zenginleştirilmesi araştırılmıştır. Gazyağı konsantrasyonu %39.5, pH=10, aglomerasyon süresi 10 dakika ve karıştırma hızı 1,500 dev/dak optimum olarak belirlenmiştir. Kül içeriği %40.67 ve kalorifik değeri 4,240 kcal/kg olan kömür numunesi, optimum şartlarda yağ aglomerasyonu ile %89.9 yanabilir kısım verimi ve %11.95 kül içeriği ile zenginleştirilmiştir. Kalorifik değeri ise 7,122 kcal/kg'a yükseltilmiştir.

ABSTRACT: Oil agglomeration method is one of the methods utilized for the beneficiation of fine mineral particules. In the present work, the enrichment of Tuncbilek lignites by means of oil agglomeration was investigated. Experimental conditions were set up optimally by taking the parameters such as concentration of kerosene, pH, agglomeration time and stirring speed being 39.5%, pH:10, 10 min and 1,500 rpm respectively. Original coal sample with a calorific value of 4,240 kcal/kg and 40.67% ash content was fortified to have an ash content of 11.95% together with a combustible recovery of 89.9%. Additionally, the calorific value was also increased to the value of 7,122 kcal/kg.

1 GİRİŞ

Süspansiyonda dağılmış halde bulunan doğal hidrofobik veya yüzey aktif maddeler ile hidrofobik yapılmış ince tanelerin, bağlayıcı sıvı yardımıyla bir araya getirilmesi işlemi yağ aglomerasyonu yöntemi olarak bilinmektedir (Capes 1980, Laskowski 1992). Bu yöntem ile flotasyonla ayrılamayan ince tanelerin kazanılması mümkündür. Tüvenan durumda ya da atıl durumdaki ince tanelerin kazanılmasına olanak vermesi, seçimlilik ve verimin daha yüksek olması ile iyi susuzlandırma özelliği, yağ aglomerasyonu yönteminin önemli üstünlükleri arasındadır. Yağ aglomerasyonunun flotasyona göre en önemli sakıncası ise, kullanılan toplayıcı ve bağlayıcı miktarının oldukça fazla olmasından dolayı pahalı bir yöntem olmasıdır.

Kömür doğal halde hidrofobik özellik göstermektedir ve beraberinde bulunan inorganik maddelerden yağ ilavesi ile ayrılması mümkündür. Yağ, seçimli olarak kömür yüzeylerini ıslatmakta ve uygun koşullarda taneleri birbirine bağlayarak küresel formdaki aglomerat yapısını oluşturmaktadır. Oluşan bu aglomeratlar, hidrofilik tanelerden boyut farklılığına bağlı olarak eleme veya flotasyon yöntemi ile kolaylıkla ayrılmaktadır.

Başarılı bir yağ aglomerasyonu için tanelerin yeteri kadar hidrofobik olması gereklidir (Laskowski 2000, Düzyol vd. 2012). Kömürün hidrofobitesinin ise karbon oranının artmasıyla arttığı bilinmektedir. Ancak kömürün yüzey özellikleri; kömürleşme derecesi, fonksiyonel grupları ve yapısındaki inorganik maddeler gibi pek çok parametreye göre değişmektedir (Laskowski ve Parfitt 1988).

Literatürde, Türkiye'deki çeşitli kömürlerinin yağ aglomerasyonu ile yapılmış çalışmalar mevcuttur (Hoşten ve Uçbaş 1989, Yamık vd. 1994, Kılınc 2000, Ünal vd. 2000, Cebeci ve Sönmez 2006, Ünal ve Erşan 2007). Bu çalışmada, Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür ocağından temin edilen yüksek kül içerikli kömür numunesinin yağ aglomerasyonu yöntemi ile zenginleştirilmesi incelenmiştir.

2 MALZEME VE YÖNTEM

Deneyel çalışmalarda kullanılmak üzere Tunçbilek Ömerler Yeraltı Ocağından temin edilen linyit kömürü, yağ aglomerasyonu deneyi için boyut küçültme işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu süreçte kömür numunesi, laboratuvarda bulunan çeneli kırıcı ile kırıldıktan sonra çelik bilyalı değirmen ile öğütülmüştür (-38 µm). Ayrıca, yapılan laboratuvar çalışmaları neticesinde kömür numunesinin külünün %40.67 nem içeriğinin %9.14 ve kalorifik değerinin ise havada kuru bazda 4,240 kcal/kg olduğu belirlenmiştir.

Yağ aglomerasyonu deneylerinde bağlayıcı sıvı olarak gazyağı kullanılırken pH ayarlayıcı kimyasal olarak Merck firmasından temin edilen HCl ve NaOH, %5 ve %1'lik çözeltiler halinde hazırlanarak kullanılmıştır. Yine tüm çözeltilerin hazırlanmasında ve aglomerasyon deneylerinde monodistile su kullanılmasına özen gösterilmiştir.

pH ölçümleri JENCO 6230 model bir pH metre ile yapılmıştır. Karıştırıcı olarak HEIDOLPH RZR2021 model manuel ayarlanabilen dijital göstergeli karıştırıcı ve kurutma işlemleri için ise PİRAMİD U-150 model etüv kullanılmıştır. Kalori

ölçümleri, Leco AC-350 model kalorimetre cihazında 4 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir.

2.1 Yağ Aglomerasyonu Deneyleri

Yağ aglomerasyonu deneyleri Şekil 1’de verilen akım şemasına göre, içerisinde 4 adet bariyer bulunan 400 dm³ hacmindeki cam beherde gerçekleştirilmiştir. Bunun için, 100 dm³ su ile birlikte 5 g kömür numunesi behere ilave edilmiştir. Kömürün süspansiyon içinde homojen olarak dağılımının sağlanması için mekanik karıştırıcı ile 500 dev/dak boyunca şartlandırılmış daha sonra behere 200 dm³ daha su eklenmiştir. Karıştırma hızı, 1,500 dev/dak olacak şekilde ayarlanarak 1 dakika daha karıştırılmıştır. pH ayarlaması için verilen 5 dakikanın ardından süspansiyona gazyağı ilave edilerek 10 dakika aglomerasyon süresi verilmiş ve daha sonra sistem durdurulmuştur.



Şekil 1. Yağ aglomerasyonu deneylerinde izlenen akım şeması.

Aglomerasyon deneyleri sonrası cam beherde bulunan süspansiyon, test eleğine (53 µm) alınmış ve su ile yıkanarak aglomera olmayan kısımlardan ayrılmıştır. Filtre kâğıdına aktarılan aglomeratlar, yüzeylerindeki gazyağının uzaklaştırılması amacıyla aseton (1 g kömür için 25 ml aseton) ile yıkanmıştır. Sonrasında, etüvde kurutulup tartılan aglomeratların kazanım yüzdeleri hesaplanmıştır.

2.2 Kül Analizleri

Aglomerasyon sonrası elde edilen aglomeratlar üzerinde kül analizleri yapılmıştır. Kömürün kül analizi, laboratuarda bulunan Gemo marka TT107 model kül fırını ile standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiş ve kül yüzdesi belirlenerek Eşitlik 1’de verilen formül ile yanabilir kısım verimi (YKV) hesaplanmıştır.

$$YKV, \% = \frac{A(100 - A_{k\ddot{u}l})}{B(100 - B_{k\ddot{u}l})} \quad (1)$$

A :Aglomerat yüzdesi

A_{kül} :Aglomeratların kül içeriği

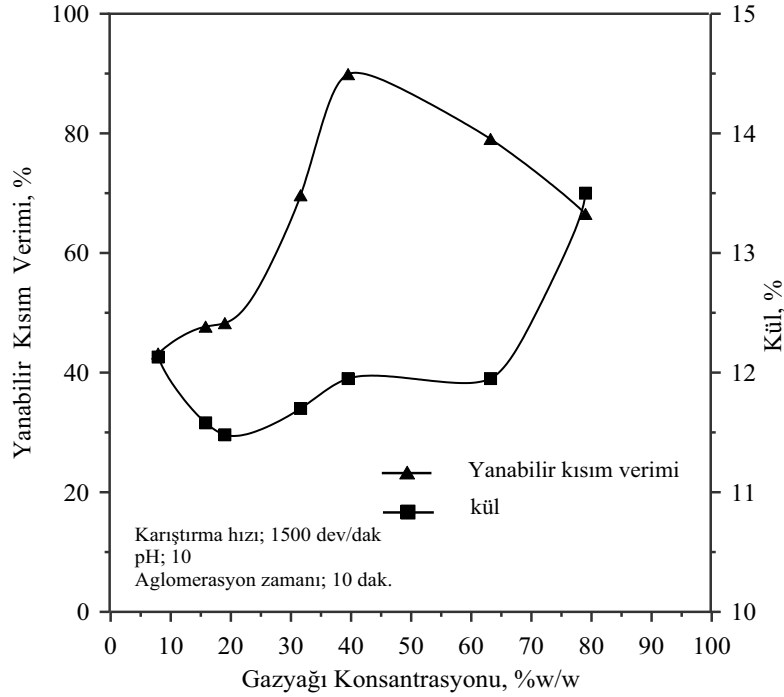
B : Besleme yüzdesi
B_{kül} : Beslemenin kül içeriği

3 BULGULAR

Kütahya Tunçbilek linyit kömürünün yağ aglomerasyonu yöntemiyle zenginleştirilebilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada, gazyağı konsantrasyonu, pH, aglomerasyon süresi ve karıştırma hızı gibi parametrelerin etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

3.1 Gazyağı Konsantrasyonunun Etkisi

Kömürün yağ aglomerasyonuna, gazyağı konsantrasyonunun etkisini belirlemek amacıyla çeşitli konsantrasyonlarda yağ aglomerasyonu deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir.



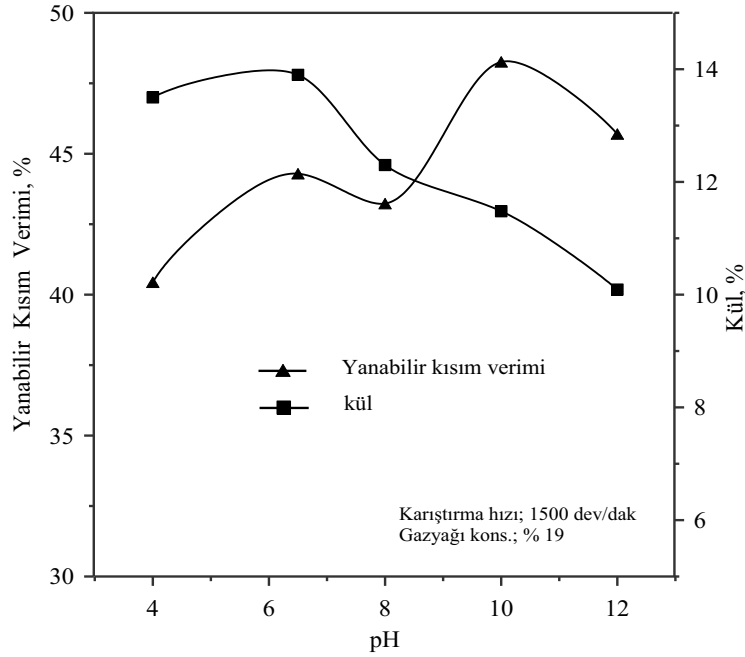
Şekil 2. Gazyağı konsantrasyonunun kömürün yağ aglomerasyonuna etkisi.

Şekil 2’den de gözlemleneceği gibi gazyağı konsantrasyonunun artması ile yanabilir kısım verimi artmıştır. Bu durumun nedeni, bağlayıcı sıvı konsantrasyonunun artmasıyla kömür taneciklerinin gazyağı ile yeterince ıslatılması sonucu aglomera olan kömür miktarının artması ve tanecikler arasında yeterli sıvı köprüsü oluşturulmasına dayandırılmıştır. Literatürde bağlayıcı sıvının konsantrasyonunun belirli bir değere kadar artmasıyla daha büyük boyutlu küresel ve sıkı aglomeratların oluştuğu belirtilmektedir (Nicol vd. 1980, Capes ve Darcovich 1984). Ancak, gazyağının %39.5’lik konsantrasyon değerinden sonra yanabilir kısım veriminde belirgin bir azalma gözlenmiştir. Bu azalış, yüzeyleri gazyağı ile kaplanmış olan kömür taneleri arasındaki bağlanma mekanizmasının azaldığının bir göstergesidir ki oluşan aglomeratların yapısının daha gevşek olduğu da izlenmiştir. Benzer bir durum daha önceki yapılan çalışmalarda da tespit edilmiştir (Düzyol 2009).

Yine Şekil 2’den artan gazyağı konsantrasyonu ile kül oranının çok fazla değişmediği ancak çok yüksek konsantrasyon değerlerinde artış gösterdiği ve optimum gazyağı konsantrasyon değerinin %39.5 olduğu belirlenmiştir.

3.2 pH’ın Etkisi

Farklı pH değerlerinde gerçekleştirilen aglomerasyon testleri sonucunda elde edilen sonuçlar, Şekil 3’de sunulmuştur. Süspansiyonun doğal pH değeri 6.5 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. pH’ın kömürün yağ aglomerasyonuna etkisi.

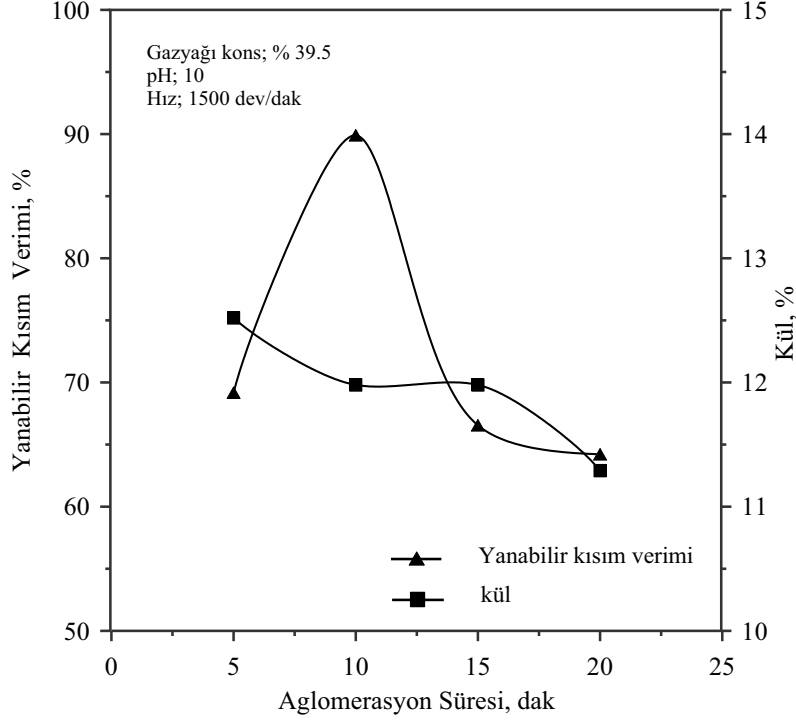
pH değeri yükseldikçe kömürün yanabilir kısım verimi değeri, çok fazla değişiklik göstermemiş ancak pH=10 değerinde en yüksek değeri olan %48.26’ya ulaşmıştır. pH’ın kömür taneciklerinin yüzey şarjını kontrol eden en önemli parametre olduğu bilinmektedir. (Leong ve Boger 1990). Kül yüzdesi ise artan pH ile azalmıştır. Bu durum, süspansiyonda bulunan farklı katyonların hidroksil komplekslerinin çökelerek kömür aglomeratlarından ayrılması ile açıklanabilir. Buna bağlı olarak yanabilir kısım veriminin de yüksek olduğu Şekil 3’den görülmektedir. Yüksek pH değerlerinde kömür ve inorganik maddeler arasında iyi bir ayırımın sağlandığı söylenebilir.

3.3 Aglomerasyon Süresinin Etkisi

Farklı aglomerasyon sürelerinde elde edilen yanabilir kısım verimi ve kül yüzdeleri değerleri Şekil 4’de verilmiştir.

Şekil 4’den görüldüğü gibi düşük aglomerasyon sürelerinde tanecik-tanecik ve tanecik-aglomerat temas olasılığı düşük olduğundan elde edilen aglomeratların miktarının az olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, aglomerat çapının küçük olmasından kaynaklanmıştır. Süre artırıldığında, tanecikler birbirleriyle ve aglomeratlarla daha fazla temas şansı bulabilmiş ve neticede yanabilir kısım verimi

artmıştır. Ancak, 10 dakikadan sonra ciddi bir azalış gözlenmiştir. Bu durum, aglomeratların uzun süre çarpışmaları neticesinde beherin cidarlarına ve birbirlerine sürtünerek kısmen parçalanmasına dayandırılabilir. Kül yüzdesi ise aglomerasyon süresinin artmasıyla azalmıştır. Neticede 10 dakikalık bir karıştırma süresinin optimum olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. Aglomerasyon süresinin kömürün yağ aglomerasyonuna etkisi.

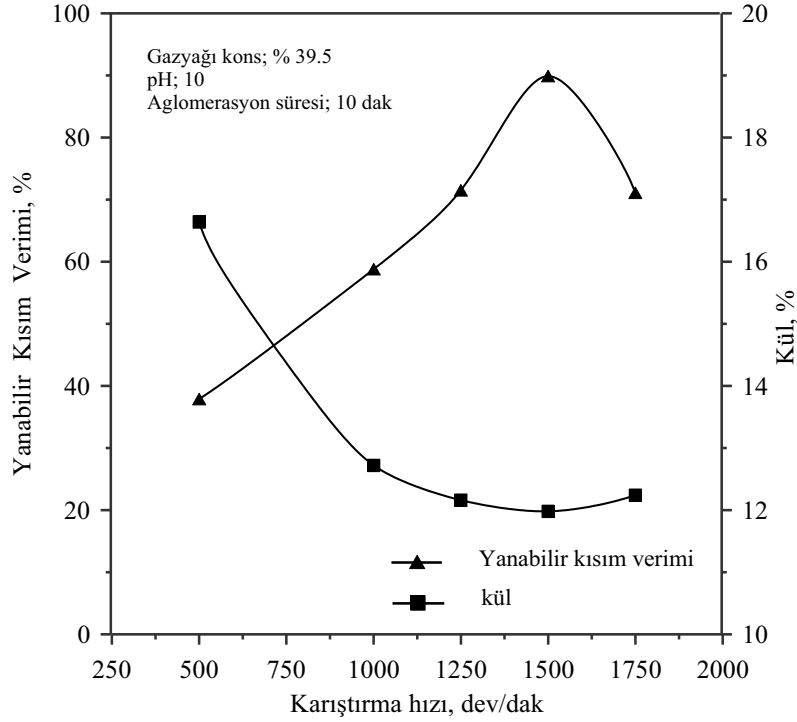
3.4 Karıştırma Hızının Etkisi

Kömürün yağ aglomerasyonuna karıştırma hızının etkisi incelenmiş ve Şekil 5’de elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Düşük karıştırma hızlarında, aglomerat kazanımı az olduğu dolayısıyla yanabilir kısım veriminin de düşük olduğu belirlenmiştir. Yüzeyleri yağ ile ıslatılmış olan kömür tanelerinin arasındaki çarpışma olasılığı ve tanecik-tanecik arası çarpışma enerjisi, karıştırma hızının artmasıyla artmaktadır. Bu durum ise, aglomera olan kömür miktarının da artmasına sebep olmaktadır. Karıştırma hızının artmasıyla yanabilir kısım verimindeki artış, bu durumun oluştuğunu göstermektedir. Çok yüksek karıştırma hızlarında, oluşan aglomeratlar arası bağların kopması neticesinde yanabilir kısım veriminde bir azalış gözlenmiştir. Kül yüzdesi ise karıştırma hızının artmasıyla azalmıştır. Neticede, 1,500 dev/dk’lık karıştırma hızı düşük kül oranı ve yüksek verimden dolayı optimum hız olarak belirlenmiştir.

4 SONUÇLAR

Bu çalışmada ince boyuttaki Tunçbilek linyit kömürünün yağ aglomerasyonu ile zenginleştirilmesi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde;



Şekil 5. Karıştırma hızının kömürün yağ aglomerasyonuna etkisi.

- Gazyağı konsantrasyonunun artmasıyla yanabilir kısım veriminin arttığı ancak belirli bir değerden sonra azaldığı belirlenmiştir. Kül yüzdesinin ise artan konsantrasyonla çok fazla değişmediği ancak gazyağının yüksek konsantrasyon değerlerinde arttığı tespit edilmiştir. Bu bilgiler ışığında optimum gazyağı miktarının %39.5 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Yüksek pH değerlerinde kül yüzdesinin azaldığı, yanabilir kısım veriminin ise en yüksek olduğu pH=10 değeri uygun olarak tespit edilmiştir.
- Aglomerasyon süresinin etkisi incelenmiş ve yanabilir kısım veriminin %89.9 olduğu 10 dakikalık bir sürenin optimum olduğu belirlenmiştir.
- Karıştırma hızının artmasıyla yanabilir kısım veriminin de arttığı, buna bağlı olarak kül yüzdesinin azaldığı görülmüştür. 1,500 dev/dk'lık karıştırma hızında kömür numunesi, yaklaşık %90'lık yanabilir kısım verimi ve %12 kül içeriği ile kazanılmıştır.

4 KAYNAKLAR

- Capes, C. E. 1980. Principles and Applications of Size Enlargement in Liquid Systems, *Fine Particles Processing*, AIME, 2, pp. 1442-1462.
- Capes, C. E., Darcovich, K. 1984. A Survey of Oil Agglomeration in Wet Fine Coal Processing, *Powder Technology*, 40, pp. 43-52.
- Cebeci, Y., Sonmez, I. 2006. Application of the Box-Wilson Experimental Design Method for the Spherical Oil Agglomeration of Coal, *Fuel*, 85, pp. 289-297.
- Duzyol, S., Ozkan, A., Yekeler, M. 2012. Critical Oil-Liquid Interfacial Tension for Some Oil-Assisted Fine Particle Processing Methods, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 398, pp. 32-36.

- Düzyol, S. 2009. *Cevher Hazırlamada Islanabilirliğe Dayanan İşlemlerde Hidrofobisite ve Yüzeysel Geriliminin Etkisi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 158 s.
- Hoşten, C., Uçbaş, Y. 1989. Zonguldak Taşkömürleri Üzerinde Yağ Aglomerasyonu Çalışmaları, *Türkiye 11. Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi*, s. 355-364.
- Kılınç, E. 2000. *Toz Kömürlerin Yağ Aglomerasyonu ile Zenginleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Laskowski, J. S., Parfitt, G. D. 1988. Elektrokinetics of Coal-Water Suspensions, *Interfacial Phenomena in Coal Technology, Surfactant Science Series*, 32, pp. 280-323.
- Laskowski, J. S. 1992. Oil Assisted Fine Particle Processing, *Colloid Chemistry in Mineral Processing*, Elsevier, pp. 361-394, New York.
- Laskowski, J. S. 2000. Aggregation of Fine Particles in Mineral Processing Circuits, *Proceedings of the 8th International Mineral Processing Symposium*, pp. 139-147, Antalya,
- Leong, Y. K., Boger, D. V. 1990. Surface Chemistry Effects on Concentrated Suspension Rheology, *Journal of Colloid Interface Science*, 136, pp. 249-258.
- Nicol, S. K., Day, J. C., Swanson, A. R. 1980. Oil Assisted Dewatering of Fine Coal, *Proc. International Symposium*, 2, AIME, New York.
- Unal, I., Ersan, G. M. 2007. Factors Affecting the Oil Agglomeration of Sivas-Divriği-Uluçayır Lignite, *Energy Sources*, 29, Part A, pp. 983-993.
- Ünal, İ., Aktaş, Z., Olcay, A. 2000. Bitümlü Kömür ve Linyitin Yağ Aglomerasyonu, *Türkiye 12. Kömür Kongresi*, Zonguldak.
- Yamık, A., Tosun, Y. I., Güneş, N. 1994. Kömürden Külün ve Kükürdün Arındırılması, *Türkiye 9. Kömür Kongresi*, s. 201-210, Zonguldak.

**BALIKESİR-İSAALAN KÖMÜRLERİNİN
YIKANABİLİRLİK ÖZELLİKLERİ VE ÜÇ ÜRÜNLÜ
SİKLOK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**
*INVESTIGATION OF WASHABILITY PROPERTIES OF
BALIKESİR-ISAALAN COAL AND USABILITY OF
THREE PRODUCT WASHING CYCLONE*

S. Kantarcı

Şırnak Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Şırnak

İ. Alp

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

S. Şahin, T. Dinç

Grup İdeal Madencilik Enerji Nak. Tur. İnş. San. ve Dış. Tic. Ltd. Şti, Balıkesir

ÖZET: Kömür zenginleştirme tesislerinde yaygın olarak ağır ortam zenginleştirme yöntemi kullanılmaktadır. Ağır ortam zenginleştirmede, santrifüj kuvvetinin uygulandığı ayırıcılardan en yaygın olarak ağır ortam siklonları kullanılmaktadır. Bir kömür işletmesinde lavvar ölçeğinde yıkama işlemine geçmeden önce, kömürün yıkanabilme durumu ve karakteristiğini laboratuvarında yüzdürme-batırma deneyleri ile saptanması gerekmektedir. Bu çalışmada Balıkesir - İsaalan kömürlerinin değerlendirilmesi için kurulması planlanan kömür yıkama tesisi için maden arama işlemleri esnasında alınan karot numunesi üzerinde ağır ortam ayırımı ile ilgili testler yapılarak kömürün yıkanabilme durumu ve karakterizasyonu araştırılmıştır. Ayrıca yüzdürme-batırma testleri sonucunda kömürün zor yıkanabilir özelliğe sahip olduğu belirlenmiş olup bu doğrultuda tesis kurulmuştur. Sonuç olarak, bu tür kömürlerin yıkanması için üretilmiş üç ürünlü ağır ortam siklonunun kullanıldığı tesiste elde edilen sonuçlar ile yüzdürme-batırma testi sonuçları karşılaştırılarak uyumluluğu incelenmiştir.

ABSTRACT: Heavy medium separation is the most common method used in the coal beneficiation plants. Heavy media cyclones which are one of the separators having centrifugal force are used most widely. Characteristics and situation of coal washability can be determined by experiments in the laboratory via float-sink analysis before moving to launder scale at coal beneficiation. In this study, washability situation and characterization of coal which is found in Balıkesir-Isaalan region are investigated by conducting float-sink on core sample taken during mining exploration for coal washing plant which is planned to establish. As a result of float-sink test, having bad washing capability of coal was determined and the plant was established. This plant has three product washing cyclones which can be used for the type of coal. Consequently, compatibility of the actual values obtained from the plant was examined by comparing with the data obtained from float-sink test.

1 GİRİŞ

Ülkemizde enerji üretiminde vazgeçilmez enerji kaynaklarından biri olan kömür; yaygın, emniyetli, güvenilir ve ucuz olmasından dolayı önemlidir. Kömürün ülkemiz için önemli bir öz kaynak varlığı olması, dışa bağımlılığın azaltılmasında ve enerji güvenliğimizin artırılmasında daha fazla önem kazanmasına neden olmaktadır (Arslan, 2006). Kömür gerek yapısı gereği ve gerekse üretim sırasında içine karışan yan kayaçlardan dolayı çoğu durumda yüksek kül ve düşük kalori değerleri nedeniyle ocaktan üretildiği şekilde kullanılamamaktadır. Bu nedenle kömür üretiminde zenginleştirme işlemlerinin uygulanması olması gereken bir uygulama haline gelmiştir (Üzülmez ve Yeldan 1990a, b, Arslan ve Kemal 2004, Kural 1991).

Kömür zenginleştirmede kuru ve yaş yöntemler kullanılmaktadır (Önal 1994). Kuru zenginleştirme ayıklama ve akışkan yatak sistemleri ile gerçekleştirilirken yaş zenginleştirmede; jig ve spiral gibi gravite ayırma yöntemleri, flotasyon, manyetik ayırma yöntemi ve ağır ortam ayırma yöntemleri kullanılmaktadır (Arslan 2006). Bu yöntemler içinden ucuz, kesin, etkili, ayırma kontrolü kolay ve yüksek kalitede temiz kömür üretiminde başarılı olmasından dolayı ağır ortam ayırma yöntemi diğer yöntemlere tercih edilmektedir. Bu yöntemde su ile ağır bir katının karışımından oluşan bir ortam kullanılmaktadır (Çelik 2006). Ağır ortam ayırmada kömürün yapısına göre, yoğunluğu 1.3-2.0 gr/cm³ arasında olan bir ağır ortamda kömürün yüzdürülebilmesi ve safsızlıkların batırılması sağlanmaktadır. Bu amaçla kullanılan ayırıcıların çalışma prensipleri aynı olup temel farklılıklar, tüvenan kömürün makineye beslenmesi, temizlenmiş kömürün ve batan safsızlıkların ortamdaki alınma mekanizmalarında görülmektedir. Ayırıcılardan ara üründe de elde edilebilmektedir (Yıldız 2007). Ağır ortam zenginleştirme yönteminde ağır ortam tamburları, tekneleri ve ağır ortam siklonları kullanılmaktadır.

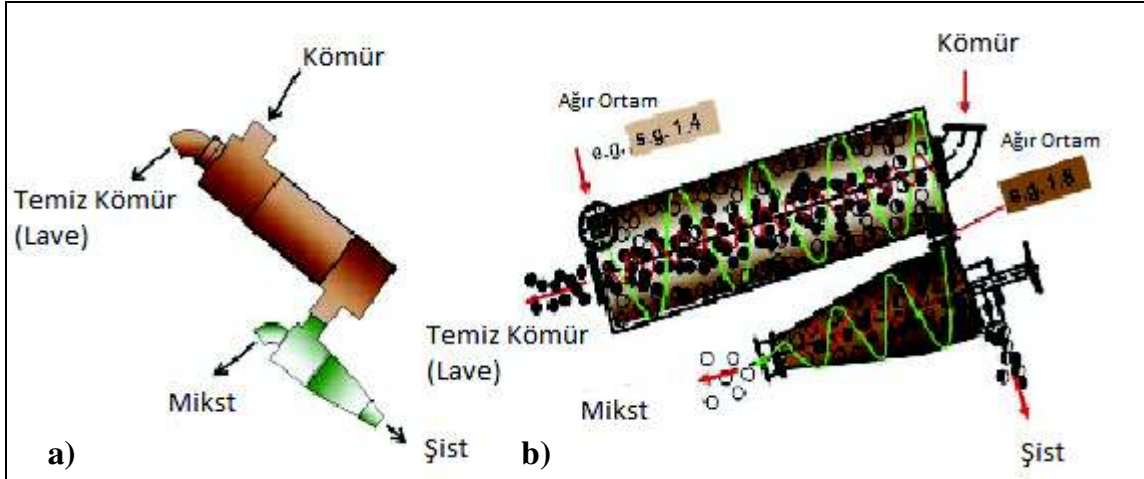
1.1 Üç Ürünlü Ağır Ortam Siklonları

Ağır ortam zenginleştirmede, santrifüj kuvvetinin uygulandığı ayırıcılardan en yaygın olarak orta basınçlı ve eğik konumlu ağır ortam siklonları kullanılmaktadır. Bu ağır ortam ayırıcılarında ağır ortam olarak manyetit kullanılmaktadır. Genellikle kömürün kalitesi bağlı olarak 1.45-1.60 özgül ağırlığında çalışmakta ve iki ürün (lave ve şist) elde edilmektedir (Pathak 2012). Fakat talepler doğrultusunda gerek işletme maliyetini azaltmak gerekse basit ve otomasyona daha uygun yıkama devrelerini oluşturmak için üç ürünlü yıkama siklonları geliştirilmiştir.

Üç ürünlü ağır ortam siklonları ise benzer mekanizma ile çalışmakta olup ayırıcıya farklı olarak ikinci bir yıkama ünitesi daha ilave edilmiştir. Temel çalışma prensibi Larcodems'e benzeyen bu cihazdan; temiz kömür, ara ürün ve şist olmak üzere 3 farklı ürün alınabilmektedir. Aygıt, biri silindirik diğeri de siklon olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Klasik ağır ortam kömür yıkama tesislerinde bulunan iri ve ince devre yıkaması, bu sistemde tek devre olarak uygulanmaktadır. Bu bakımdan iki farklı yoğunluklu manyetit süspansiyonu hazırlamaya gerek kalmamakta, sisteme beslenen düşük bir yoğunlukla 2 farklı yoğunluk elde edilebilmektedir. Dolayısıyla sistemdeki manyetit tüketimi oldukça azdır. Üç Ürünlü Ağır Ortam Yıkama Siklonları, ilk olarak Rusya'da geliştirilmiş olmakla birlikte 1979 yılından itibaren Çin'de yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. 1992'de gravite beslemeli modelinin patenti alınmıştır (CWP 2005, Jacobs ve de Korte 2013).

Üç ürünlü siklonlar tek yoğunluk devresi kullanarak iki yoğunlukta ayırımı tek bir cihazda yapabilmelerinden dolayı ara ürün alınmasını gerektiren kömürlerin yıkanmasında son yıllarda daha fazla tercih edilmektedir. Zhao vd. (2010) boyut sınıflarına ayrılmadan ve şlam atılmaksızın çok zor yıkanabilir özellikler gösteren Mengxi Qipanjing kömürlerinin 600 t/h kapasiteli bu siklonlar ile yıkanmasında başarılı sonuçları elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Aynı çalışmada Çin’de 310 kömür yıkama tesisinde bu teknolojinin kullanıldığı bilgisi verilmiştir.

Besleme boyutları; pompa beslemeli için +0.5 mm – 50 mm arasında iken gravite beslemeli için +0.5 mm – 120 mm boyut aralığındadır (Şekil 1). Besleme 0.65-0.95 bar arası basınç altında belirli bir yoğunlukta hazırlanan ağır ortam ile birlikte siklonun ilk kısmında yapılır. Temiz kömür siklonun ilk bölümünün üst kısmından alınır. İlk bölümde batan ürün ile birlikte yoğunlaşmış ağır ortam merkez kaç kuvvetinin de etkisi ile ikinci bölüme aktarılır. İkinci bölümdeki siklon içinde oluşan daha yoğun ağır ortamda tekrar bir ayırım gerçekleşmekte ve siklonun üst kısmından mikst ürün alınırken ve alttaki çıkıştan şist alınmaktadır (CWP 2005).



Şekil 1. Üç ürünlü ağır ortam siklonlarının iki farklı çalışma tipi a) pompa beslemeli ve b) gravite beslemeli üç ürünlü siklon (Jacobs ve de Korte 2013).

Üç ürünlü ağır ortam siklonlarının avantajları şu şekilde sıralanabilir (CWP 2005):

- Farklı yoğunluklarda ağır ortam hazırlamaya gerek yoktur.
- İki farklı siklon mekanizması yerine sadece bir siklon mekanizması kullanılır.
- İki ayrı karışım tankı yerine bir karışım tankı yeterlidir.
- Daha az pompa gereksinimi vardır.
- Daha düşük enerji tüketimi (%40 - %50) sağlar.
- Daha düşük işletme maliyetlerine sahiptir.
- Daha düşük kurulum maliyetlerine sahiptir.
- Daha az manyetit kaybına neden olur.
- Sistemde daha düşük ağır ortam sirkülasyonu gerektirir.

Bu çalışmada İsaalan kömürlerinin değerlendirilmesi için kurulması planlanan kömür yıkama tesisi için maden arama işlemleri esnasında alınan karot numunesi üzerinde yıkanabilirlik testleri yapılarak kömürün karakterizasyonu ve yıkanabilme durumu araştırılmıştır. Ayrıca kurulmuş olan tesisteki gerçek veriler ile yüzdürme batırma testi sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılarak uyumlulukları irdelenmiştir.

2 YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1 Malzeme ve Yöntem

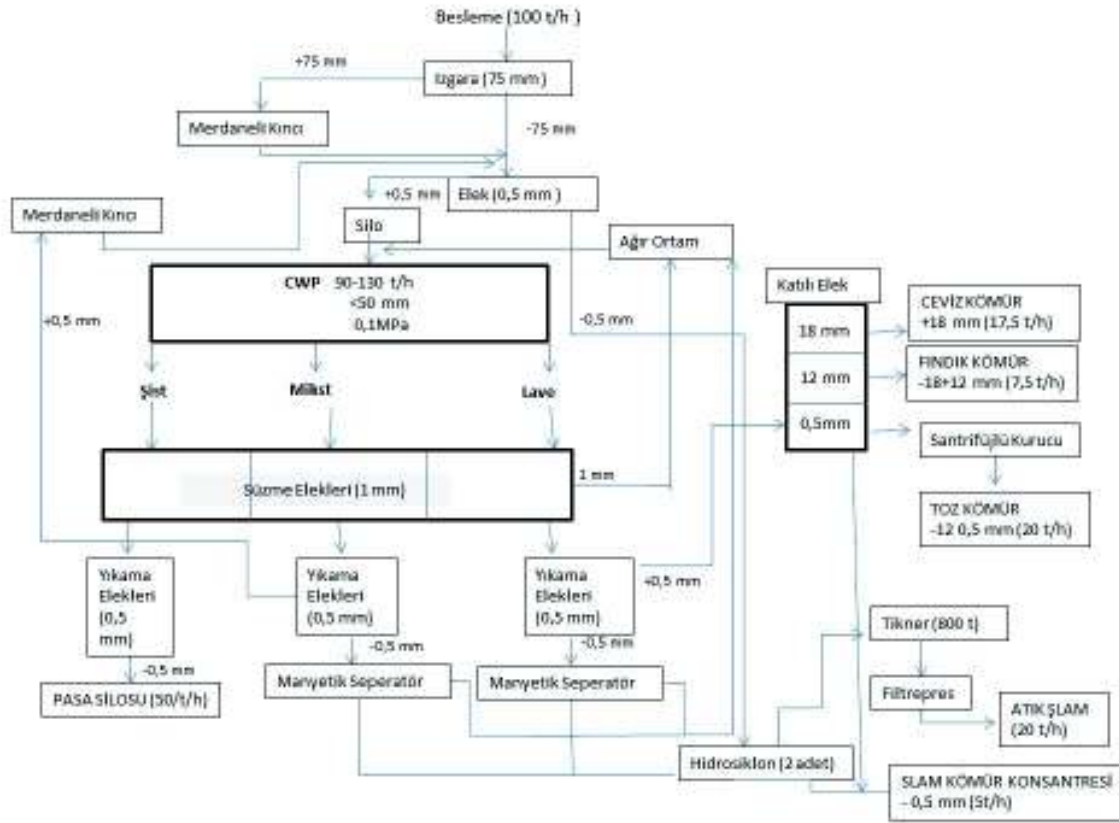
Sahanın temsili olarak seçilen sondaj karotu incelenerek formasyonların görünüşlerine göre tanımlamaları, yüzdürme-batırma testine tabi tutulup tutulmayacakları formasyon tanımlamaları, kül ve kalori dağılımlarına göre belirlenmiştir. Elde edilen yoğunluk fraksiyonlarının kurutma sonrası tartımları alındıktan sonra nem, kül ve kalori analizleri yapılmıştır. Yüzdürme-batırma testine esas örnek harmanlanarak hazırlanmıştır. Boyut dağılımı yaş elek analizi ile (TS 1726) belirlendikten sonra tesiste genel olarak uygulanan zenginleştirme yöntem/cihazlarının boyut aralıkları, TS 3037 talimatları ile malzemenin boyutuna göre dağılım özellikleri dikkate alınarak yüzdürme-batırma testleri için iri (+16 mm), orta (-16+4 mm), ince (-4+0.5 mm) ve toz (-0.5 mm) boyut sınıfları ayrılarak her bir boyutun kül ve kalorilik değerleri belirlenmiştir.

Kömürün yıkanabilme durumu ve karakteristiğinin belirlenmesi için her boyut sınıfı yüzdürme-batırma testine tabi tutulmuştur (TS 3037). Elde edilen veriler kullanılarak her boyut için ve hesaplanarak bulunan toplam kömür için yüzdürme-batırma eğrileri çizilerek kömürün yüzebilirlik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Daha sonra üç ürünlü bir yıkama işleminde elde edilebilecek lave, mikst ve şistin miktarlarının, küllerinin ve ayırma yoğunluklarının belirlenmesinde kullanılan Mayer eğrisi oluşturularak genel yıkama özellikleri belirlenmiştir. Kül analizleri TS ISO 1171'e, kalori analizleri ise TS ISO 1928'e göre havada kuru baza göre yapılmıştır. Tesisten elde edilen ürünle, belli bir zaman aralığında örneklenerek analizleri gerçekleştirilen araştırma sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Yüzdürme-Batırma testi sonrasında elde edilen en düşük küllü ve yüksek kalorili yoğunluk fraksiyonundan temsili örnek seçilerek komple kimyasal analizi yapılmıştır. Bu analiz verilerinden faydalanılarak kömür özelliklerinin karakterize edilmesi amaçlanmıştır.

2.2 Balıkesir – İsaalan Kömür Yıkama Tesisi

Balıkesir-Kepsut-İsaalan bölgesinde yer alan 100 ton/s kapasiteli yıkama tesisinde kömür 75 mm boyut altına dişli merdaneli kırıcı ile kırıldıktan sonra yıkama eleği (0.5 mm) üzerinde ön yıkamadan geçirilmektedir. Yıkanan besleme 1.55 gr/cm^3 yoğunluklarında çalışan gravite beslemeli üç ürünlü yıkama siklonuna beslenmektedir. Siklondan alınan 1.55 gr/cm^3 yoğunluğundan hafif lave; üç katlı elekten geçirilerek ceviz (+18 mm) , fındık (-18+12 mm) ve toz kömür (12+0.5 mm) olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Sistemden ağır ürün olarak çıkan şist pasa sahasına gönderilirken, ara yoğunluk değerlerinde kalan mikst ürün ise dişli merdaneli kırıcıda 12 mm altına kırılarak sisteme geri beslenmektedir (Şekil 2).

Tesiste ağır ortam malzemesi olarak manyetit kullanılmaktadır. Ayırıcıdan elde edilen ürünler süzme (1 mm) ve yıkama (0.5 mm) elekleri ile ortam ayrımı sağlanmakta, yıkama sonrasında oluşan seyrelmiş ve kirlenmiş ortamdan manyetit kazanımı manyetik seperatörler ile gerçekleştirilmektedir. Ön yıkama eleği altı ile manyetik seperatör taşanları birleştirilerek şlam kömür kazanım siklonlarına gönderilmektedir. Siklon alt akışından elde edilen şlam kömür susuzlandırma sonrasında lave tasnif eleklerinden gelen 0.5 mm altı kömürle birleştirilerek şlam kömür ürünü elde edilmektedir.



Şekil 2. Tesisin genel akım şeması.

Siklon üst akışı ise tikner yardımı ile koyulaştırıldıktan sonra filtrepresler yardımı ile susuzlandırıldıktan sonra atık sahasına gönderilmektedir. Tesiste kullanılan cihazların özellikleri Çizelge 1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Tesiste bulunan ağır ortam devrelerini oluşturan cihazlar ve özellikleri.

CİHAZ	ÖZELLİKLER
Ana kırıcı	Merdaneli, 30-45 t/h, > 75 mm, < 200 MPa, 15 KW x 2 – 730 D/D, Ø50 mm, Dişli
Ön yıkama eleği	0.5 mm
Üç ürünlü ağır ortam siklonu	Ayırma yoğ: 1.55-1.8 gr/cm ³ , 0.1 MPa, 90-130 ton/saat < 50 mm besleme, gravite beslemeli, besleme boyutu < 120 mm, Tüvenan girişi Ø230 mm, kömür çıkış Ø230 mm, ara ürün girişi Ø110 mm, ara ürün çıkış Ø110 mm, Atık çıkış Ø130 mm)
Süzme-duşlama eleği	1 mm açıklık, kömür (2,540 mm x 1,960 mm) Ara ürün (765 mm x 1,960 mm), Atık (1,738 mm x 1,960 mm)
Yıkama eleklere	0.5 mm açıklık, kömür (4,616 mm x 1960 mm), Ara ürün (1657 mm x 1960 mm), Atık (2693 mm x 1960 mm ve 1,036 mm x 1960 mm)
Manyetik seperatör	D.A.S., Ø 1050 mm, L: 3,600 mm, 2,500 Gauss, 350-400 m ³ /s,
Ara ürün kırıcı	Merdaneli, 11 KW x 2 - 1,400 D/D, 5 mm - 20 mm, Dişli
Tasrif eleklere	Toz Kömür (Açıklık: 18-12-0.5 mm, (65 mm x 58 mm)
Santrifüj kurutucu	Toz Kömür, 18.5 KW – 970 D/D, 1 mm, 10-15 t/s, 0,3 mm, Ø720 mm
Şlam siklonları	5 Adet,
Susuzlandırma eleği	0.2 mm, ters eğim, 37 kW, 16.3 Hz, 4.5 mm
Tikiner	800 t, köprülü, Anyonik poliakrilamid
Filtrepres	91 plaka, 20 MPa

3 BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Sondaj Karotunun Ön Değerlendirilmesi

Seçilen sondaj karotu incelendiğinde farklı özelliklere sahip formasyonlardan geçtiği belirlenmiştir. Çizelge 2’de bu formasyonların sondaj başlangıç kotuna göre başlangıç ve bitiş mesafeleri, görünüşlerine göre tanımlamaları, yoğunluk analizine girip girmedikleri gibi bilgiler özetlenmiştir. Bu farklı birimlerin harmanlanması sonucunda oluşan malzemenin kül ve kalorisi ise %52 kül ve 1,760 cal/gr kaloridir. Kömürlü birimlerin tamamının optimum şekilde değerlendirileceği ve açık işletme ile üretim sırasında bu birimlerin ayrılmasının zorluklar içerdiği düşünülerek bu birimlerin karıştırılarak yüzdürme-batırma testi yapılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 2. Karot derinliğine göre farklı zonlarda kül ve kalori dağılımı/değişimi.

Karot kotu		Tanım	YB Test	Uzunluk	Kül	Kalori
Başlangıç	Bitiş	Formasyon	Girdi	(m)	(%)	(cal/gr)
16.00	16.70	Sarı-Tavantaşı	-	0.70	-	-
16.70	24.65	Kömür	+	7.95	60.36	1,580
24.65	28.50	Karışık kömür	+	3.85	37.68	4,080
28.50	31.95	Karışık kömür	+	3.45	54.85	1,100
31.95	33.75	Taş-Ara kesme	-	1.80	-	-
33.75	36.17	Karışık kömür	+	2.42	42.72	3,280
36.17	38.70	Karışık kömür	+	2.53	47.93	2,225
38.70	43.35	Karışık kömür	+	4.65	57.48	410
43.35	48.00	Karışık kömür	+	4.65	46.82	2,680
48.00	50.00	Toz kömür	+	2.00	55.70	100
50.00	52.00	Kil-Taban taşı	-	2.00	-	-
				Toplam	52.41	1,762

3.2 Deneylere Esas Örneğin Boyut Dağılımı ve Sınıflandırılması

Yüzdürme-Batırma analizine esas örneğin boyut dağılım sonuçları Çizelge 3’de özetlenmiştir. Elde edilen bulgular; söz konusu harman örnek içerisinde kırılma olmayan iri boyutlu yüksek küllü malzeme ve çok ince boyuta dağılabilen yüksek küllü malzemenin birlikte bulunduğunu göstermektedir. Bu sondaj karotu gözlemlerinde belirlenen bulgularla benzerlikler göstermektedir. Farklı özelliğe sahip birimlerin karıştırılmış olmasının doğal bir sonucudur. Ancak her iki malzemenin farklı olarak orta boyutlu malzemenin düşük kül içeriği (%37) ve yüksek kalorili (4,000 cal/gr) olduğu görülmektedir. Boyuta göre seçimliliği arttıracak kırıcıların seçilmesi ile iri boyutta daha düşük kalorili malzemenin ayrılması mümkün olabilecektir. Aynı zamanda yıkama/dağıtma ile önemli oranda yüksek küllü ve düşük kalorili malzemenin ayrılması mümkün olabilecektir.

Yapılan sınıflama sonrasında boyut gruplarının %kül ve kalorifik değerleri Çizelge 4’de özetlenmiştir. Bu sınıflama sonrası malzeme, kömür zenginleştirmede genel olarak kabul gören iri tane boyutlu (+16 mm), orta tane boyutlu (-16+4 mm) ince tane boyutlu (-4+0.5 mm) ve toz boyutu (-0.5 mm) sınıflarına ayrılmaktadır.

Çizelge 3. Boyut aralıklarına göre kül ve kalori değerlerinin değişimi/dağılımı.

Boyut (mm)	Miktar (%)	ΣMiktar↑ (%)	ΣMiktar↓ (%)	Kül (%)	Kül Dağılım (%)	Kalori (cal/gr)	Kalori Dağılım (%)
+ 32	45.30	100.00	45.30	50.57	49.27	1,885	36.03
- 32 +16	17.00	54.70	62.31	39.76	14.54	2,640	18.94
- 16 + 8	9.00	37.69	71.31	36.32	7.03	3,790	14.40
- 8 + 4	5.63	28.69	76.94	37.67	4.56	4,020	9.54
- 4 + 2	4.94	23.06	81.87	37.74	4.01	4,070	8.48
- 2 + 1	2.79	18.13	84.66	38.49	2.31	3,720	4.37
- 1 + 0.5	2.69	15.34	87.35	38.18	2.21	1,355	1.54
- 0.5 + 0.063	5.04	12.65	92.39	47.78	5.18	1,170	2.49
- 0.063	7.61	7.61	100.00	66.67	10.91	1,315	4.22
Toplam	100.00			46.50	100.00	2,370	100.00

Çizelge 4. Boyut sınıflarına göre kül ve kalori değerlerinin değişimi/dağılımı.

Boyut (mm)	Miktar (%)	Kül (%)	Kül Dağılım (%)	Kalori (cal/gr)	Kalori Dağılım (%)
+ 16	64.10	51.17	66.03	1,582	48.26
- 16 +4	12.67	43.56	11.11	3,429	20.68
- 4 + 0.5	13.21	42.79	11.38	2,895	18.20
- 0.5	10.01	56.93	11.47	2,700	12.86
Toplam	100.00	49.68	100.0	2,101	100.0

3.3 Yüzdürme-Batırma Dağılım Analizleri

Yüzdürme-batırma değerlendirme verileri (Çizelge 5) ve kömür yıkanabilirlik grafikleri (Şekil 3) değerlendirildiğinde genel olarak şu sonuçlar çıkarılmıştır. Kül karakteristik eğrileri az küllü kömür, ara ürün ve gangin kesin çizgilerle birbirinden ayrılamamasını yani kömürün yıkanabilmesinin zor olduğunu göstermektedir. İnce ve toz boyutlarda durum nispeten daha iyi olsa da malzeme içindeki oranının az olması toplamda çok büyük bir iyileşmeyi sağlamamaktadır. Yüzen (lave) eğrileri iyi yıkanma özelliğinin olmadığını göstermektedir. İnce ve toz boyutunda kül karakteristik eğrisindeki benzer durum söz konusudur. Yoğunluk eğrileri yıkanabilirliğin düşük olduğunu göstermektedir. 0.1 yoğunluk ayırma eğrilerinden diğer yoğunluklara göre en kolay ayırmanın 1.6 – 1.7 yoğunluk aralığında gerçekleşebileceği görülmektedir. 1 ton malzeme 1.7 gr/cm³ yoğunluğunda yıkandığında; 0.32 ton %25 küllü 4,400 cal/gr kalorili lave elde edilebilecektir. Bu durumda atık şistin kalorisi 800 cal/gr ve külü %52.2 değerinde olacaktır.

Ancak bu yoğunlukta ayırmada da %10 değerinin üzerinde olması zor bir ayırmanın olacağını göstermektedir. Ayırmanın doğası gereği ince boyutlarda yoğunluk yükseldikçe ayırma daha da zorlaşmaktadır. 1.5 ile 2.0 yoğunlukları arasındaki kalan malzeme miktarı %20-30 arasında değişmektedir.

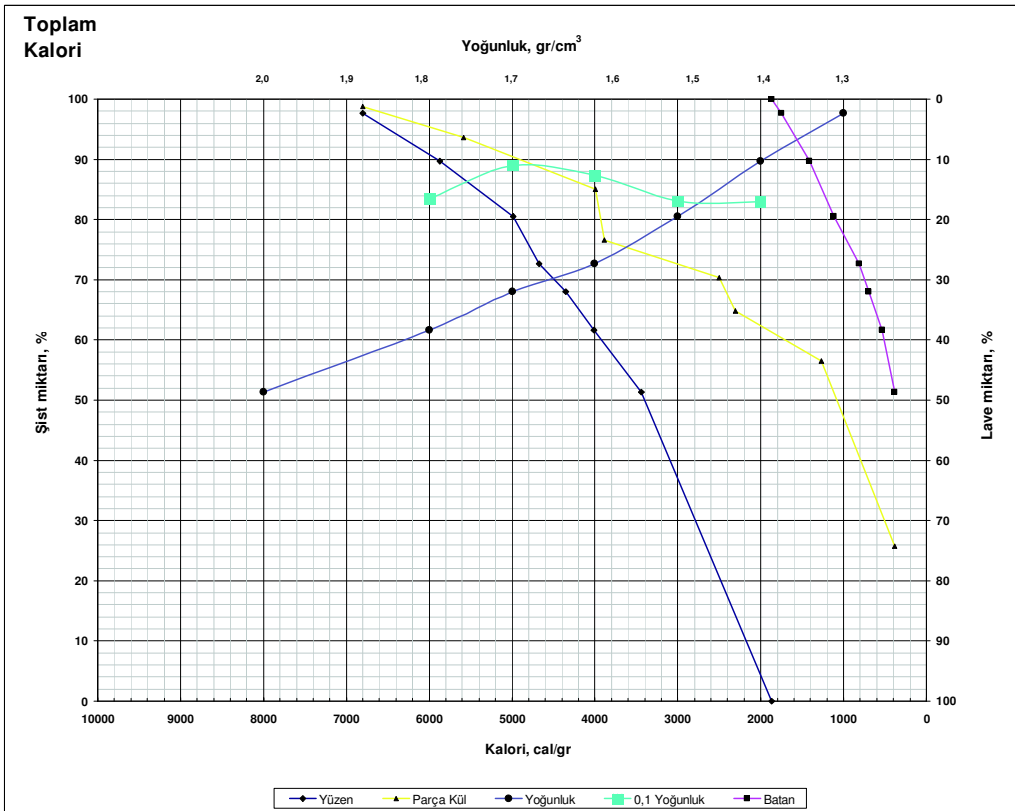
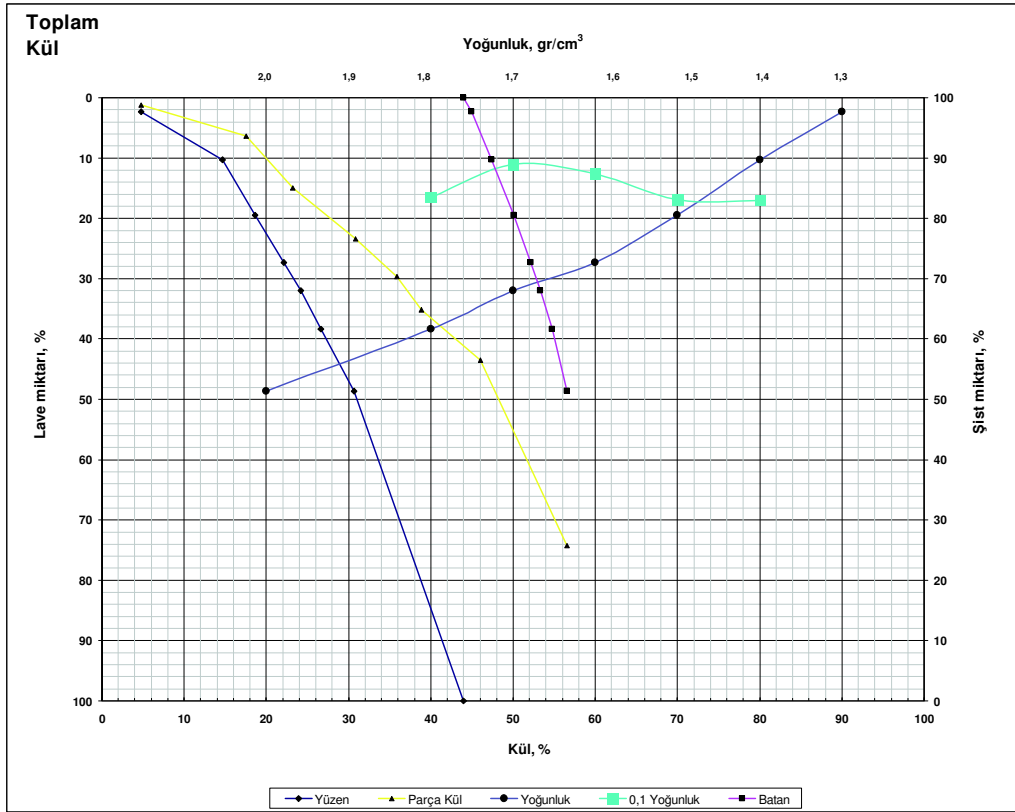
Ara ürün olarak bilinen bu fraksiyonun %15'den büyük olması kömür yıkanabilme özelliğinin zor olduğunu göstermektedir. Bunun olası sebebi kömürün kül içeriğinin homojen olarak olması olabilir. Bu durumda kömürden maksimum verimle, istenen kalori ve kül içerikli lave elde etmek için jigleme gibi diğer yoğunluk ayırıcılarına yerine yüksek yoğunluklarda çalışan ağır ortam ayırmasının tercih edilerek zenginleştirmenin yapılması gerekliliği sonucu çıkarılabilir.

Çizelge 5. Toplam (hesaplanan) malzemenin yoğunluk analizine göre kül ve kalori dağılımı.

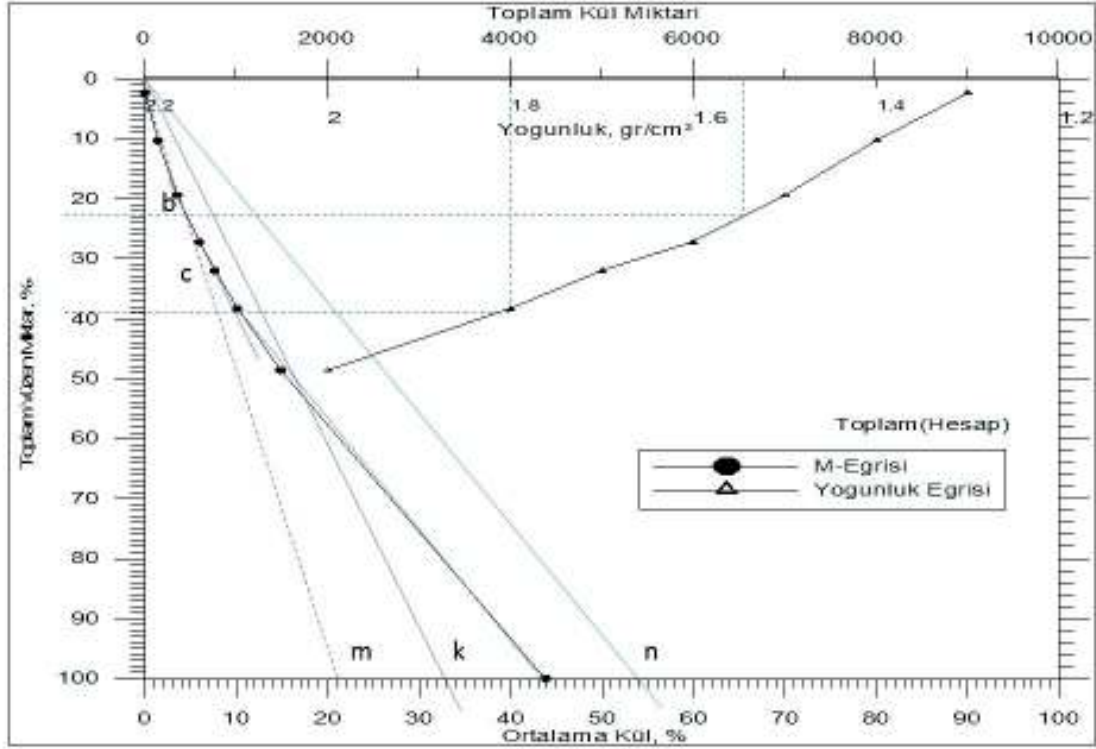
Yoğunluk gr/cm ³	Miktar %	Kül,		Lave külü,					Şist külü, %
		%	%	P x C	ΣP ↓	ΣPC ↓	ΣC ↓	ΣP ↑	
- 1.30	2.4	4.8	11.4	2.4	11.4	4.8	100.0	4,398.3	
1.30 - 1.40	8.0	17.6	140.0	10.3	151.4	14.6	97.6	4,386.8	44.9
1.40 - 1.50	9.1	23.2	211.2	19.5	362.6	18.6	89.7	4,246.9	47.4
1.50 - 1.60	7.8	30.9	241.7	27.3	604.2	22.1	80.5	4,035.7	50.1
1.60 - 1.70	4.8	35.9	170.5	32.0	774.8	24.2	72.7	3,794.0	52.2
1.70 - 1.80	6.3	38.8	244.9	38.3	1,019.6	26.6	68.0	3,623.5	53.3
1.80 - 2.00	10.3	46.1	472.8	48.6	1,492.5	30.7	61.7	3,378.6	54.8
2.00	51.4	56.5	2,905.8	100.0	4,398.3		51.4	2,905.8	56.5
TOPLAM	100.0	43.98	4,398.3						

Yoğunluk gr/cm ³	Miktar %	Kalori		Lave kalori					Şist kalori, cal/gr
		cal/gr	cal/gr	P x C	ΣP ↓	ΣPC ↓	ΣC ↓	ΣP ↑	
- 1.30	2.4	6,803	16,165	2.4	16,165	6,803	100.0	187,013	
1.30 - 1.40	8.0	5,589	44,542	10.3	60,707	5,868	97.6	170,848	1,750
1.40 - 1.50	9.1	3,996	36,417	19.5	97,124	4,991	89.7	126,305	1,409
1.50 - 1.60	7.8	3,892	30,453	27.3	127,577	4,676	80.5	89,889	1,116
1.60 - 1.70	4.8	2,502	11,897	32.0	139,474	4,353	72.7	59,436	817
1.70 - 1.80	6.3	2,310	14,572	38.3	154,046	4,017	68.0	47,539	700
1.80 - 2.00	10.3	1,273	13,068	48.6	167,114	3,438	61.7	32,966	535
2.00	51.4	387	19,899	100.0	187,013		51.4	19,899	387
TOPLAM	100.0	1,870	187,013						

Yapılan analizlerden elde edilen Mayer eğrileri yatık bir özellik göstermektedir (Şekil 4). Bu yüksek kül içeriğinin bir göstergesidir. Eğrinin x-ekseni boyunca fazla ötelenmemesi kömürün fazla miktarda bağlı kayaç içerdiğini göstermektedir. Bu durum daha önce de değindiğimiz ve zor yıkama özelliklerinin oluşmasına neden olan karot örneği üzerinden çalışmanın bir sonucu olabileceği gözükmektedir. Eğrinin geniş bir yay çizmemesi ve eğri yayının bir noktada ani olarak bükülmemesi, kömür bileşiminin homojen olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Toplam malzemenin kül ve kalori dağılımının Yüzdürme-Batırma eğrileri.



Şekil 4. Toplam malzemenin kül dağılımının Mayer eğrileri.

3.4 Yüzdürme-Batırma Testi Ürünlerinin Analizleri

Yüzdürme-Batırma testi sonrasında elde edilen düşük küllü ve yüksek kalorili yoğunluk fraksiyonundan alınan temsili örneğin komple analizleri Çizelge 6'da verilmektedir. Kömürün ısıl değeri saf kömür bazında hesaplandığında 7,500 kal/gr değerinde olduğu, uçucu oranı ise saf kömür bazında %42 değerindedir. Uçucu miktarı %20 civarında olan kömürlerin en yüksek ısıl değere (8,500 kal/gr) sahip olduğu düşünülürse bu uçucu oranlarında elde edilen kalorifik değerlerin normal olarak gerçekleştiği söylenebilir. Kömür ısıl değeri ile kömürle derecesi arasında belirli bir ilişki olduğu bilindiğine göre örneğimizdeki kömürün orta derecede kömürleşme derecesine sahip olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlar çalışılan kömürün sert linyit (alt-bitümlü) olarak tanımlanabileceğini göstermektedir. Sert linyitler nem oranları düşük olduğundan suda şişmezler ve yaş metotlarla da yıkama ve hazırlama işlemlerine tabi tutulabilirler. Bu bakımdan, kömür yıkanmasını da içine alan kömür hazırlama işlemlerinin çalışılan kömüre uygulanabilir görülmektedir.

Kömürün çok az oranlarda (%0.3 S) kükürt içerdiği görülmektedir. Yakmada kullanılan kömürler için oluşturulan SO₂ emisyonuna göre üst sınırlar belirlenmiştir. Küçük yakma sistemleri için genelde yanar kükürt oranının %1'den az olması istendiğinden oldukça önemli bir avantaj oluşturacaktır.

Çizelge 6. Temsili temiz kömür örneğinin tam kimyasal analizi.

Analiz	Nem	Kül	Kükürt	Uçucu	Üst ısı	Alt ısı
Birimi	%m/m	%m/m	%m/m	%m/m	cal/gr	cal/gr
Lave	6.5	5	0.3	37.4	6,635	6,445

3.5 Tesiste Elde Edilen Ürünlerin Kimyasal Analizleri

Yüzdürme-Batırma testleri sonucunda tesisteki kömürün yıkanabilirliğinin zor olmasından dolayı tesiste, bu tür kömürlerin yıkanmasında kullanılan üç ürünlü yıkama siklonu ile çift yoğunlukta kömür yıkama işlemi gerçekleştirilmektedir. Kömür yıkama işlemi sonucunda lave, mikst ve şist oluşmaktadır. Elde edilen mikst merdaneli (dişli) kırıcıda serbestleşme işlemine tabi tutularak tekrar üç ürünlü yıkama siklonu devresine beslenmektedir. Sonuç olarak tesiste lave ve şist olmak üzere iki ürün elde edilmektedir. Piyasanın talebi doğrultusunda lave üç katlı elek ile sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırma sonucunda ceviz, fındık ve toz ürün olarak satışı gerçekleştirilmektedir. Yapılan analizler sonucunda tesiste elde edilen ürünlerin tam analizleri Çizelge 7’de görülmektedir. Çizelge 8’de ise elde edilen lave ve şistin kül ve kalori dağılımları yer almaktadır. Elde edilen sonuçlara göre tesiste elde edilen lavenin ortalama kül içeriğinin %27.5 olduğu, buna karşın şistin ortalama kül içeriğinin ise 61.9 olduğu görülmektedir.

Çizelge 7. Tesiste elde edilen ürünlerinin tam analizleri.

Analiz	Birim	LAVE-KÖMÜRLER			ŞİSTLER		
		Ceviz	Fındık	Toz	Şlam	Pasa	Şlam
Nem	%	4.83	5.15	4.87	4.64	2.15	3.47
Kül	%	30.33	24.85	24.34	34.7	58.71	66.6
Uçucu Madde	%	32.93	34.9	34.5	30.84	32.21	21.41
Üst kalori	cal/g	4,465	4,894	4,995	4,146	1,264	1,332
Toplam Kükürt	%	2.13	2.11	2.11	2.43	0.82	1.01

Çizelge 8. Tesiste elde edilen ürünlerinin kül dağılımları.

ÜRÜNLER	Miktar	Miktar	Kül	Dağılım	Kalori	Dağılım
	ton/s	%	%	%	cal/g	%
Ceviz	17.5	17.5	30.3	11.9	4,465.0	26.0
Fındık	7.5	7.5	24.9	4.2	4,894.0	12.2
Toz	20.0	20.0	24.3	10.9	4,995.0	33.3
Şlam Kömür	5.0	5.0	34.7	3.9	4,146.0	6.9
Lave Toplam	50.0	50.0	27.5	30.8	4,709.5	78.5
Pasa	30.0	30.0	58.7	39.4	1,264.0	12.6
Şlam atık	20.0	20.0	66.6	29.8	1,332.0	8.9
Şist Toplam	50.0	50.0	61.9	69.2	1,291.2	21.5
Beslenen Kömür	100.0	100.0	44.7	100.0	3,000.3	100.0

4 SONUÇ

Bu çalışmada Grup İdeal Madencilik tarafından kurulması planlanan kömür yıkama tesisi için karot numunesi üzerinde ağır ortam ayırımı testleri yapılarak kömürün yıkanabilme durumu araştırılmıştır. Üzerinde çalışılan karot örneği birbirine göre oldukça farklı kül ve kalorili birimlerden oluşmaktadır. Karot örneği; ortalama %45 kül tenörlü ve ortalama 2,000 cal/gr kaloriye sahiptir. Kömür sert-linyit özelliklere sahiptir. Kömür içerisinde suda dağılıma özelliği gösteren malzemeler bulunmaktadır. Bu nedenle sulu ortamda yıkama uygundur. Kömür çok az kükürt içermektedir. Çevresel açıdan çok önemli avantajlara sahiptir. Uçucu oranı ve kömürleşme derecesinin orta olması kullanımı açısından avantaj oluşturmaktadır.

Temsili olarak seçilen sondaj numunesine yapılan yıkanabilirlik testleri sonucunda kömürün zor yıkanabilir özellikte olduğu ve en kolay ayırımın 1.7 gr/cm^3 yoğunluğunda gerçekleşeceği tespit edilmiştir. Bu nedenle çift yoğunluk ayırma sistemleri ile kömürün yıkanmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Tesiste, tek yoğunluk devresi kullanarak çift yoğunlukta ayırımı tek bir cihazda yapabilen üç ürünlü yıkama siklonu kullanımı tercih edilmiştir. Bu ağır ortam ayırma cihazı, daha düşük enerji tüketimi, daha düşük işletme maliyeti, daha az manyetik kaybı ve sistemde daha düşük ağır ortam sirkülasyonu sağlamaktadır. Tesiste çift yoğunlukta ayırım gerçekleşmektedir. Çift yoğunlukta ayırım sonucunda tesiste elde edilen lavenin ortalama kül içeriğinin %27.5 olduğu, şistin ortalama kül içeriğinin ise %61.9 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak yüzdürme batırma testleri sonucunda elde edilen veriler ışığında kurulan tesisin çalışması sonucunda elde edilen lavenin ortalama külüne göre değerlendirme yapıldığında sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Lave külü ve şist külündeki değişimin mikstin üç ürünlü yıkama siklonuna beslenmeden önce merdaneli kırıcı ile serbestleştirilmesinin ayırma verimine etkisinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak ülkemizdeki düşük kaliteli kömürlerin verimli bir şekilde değerlendirilmesinde sermaye harcamaları ile işletme harcamalarını optimize etmek için uygun bir yıkama modeli olarak çift yoğunluklu ağır ortam siklonlarının dikkat çekici avantajlarının olabileceği söylenebilir.

5 KAYNAKLAR

- Arslan, V. 2006. Kuru Kömür Hazırlama Yöntemleri, *Madencilik*, 45, 3, s. 9-18.
- Arslan, V., Kemal, M. 2004. Kömür Hazırlama ve Türkiye'deki Uygulamalar, *Türkiye 14 Kömür Kongresi*, Zonguldak.
- CWP (2005) *Üç ürünlü Yıkama Siklonları*, <http://www.cwp.com.tr/urunler.aspx?id=41>
- Çelik, H. 2006. İnce Kömürlerin Temizlenmesinde Köpük Flotasyonu ve Ağır Ortam Siklonlarının Entegrasyonu, *DEÜ, Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8, 2, s. 93-106.
- Jacobs, J., de Korte, G. J. 2013. The Three-product Cyclone: Adding Value to South African Coal Processing, *The Journal of the Southern African Institute of Mining & Metallurgy*, 113, pp. 859-863.
- Kural, O. 1991. *Kömür*, İTÜ, İstanbul.
- Önal, G., Ateşok, G. 1994. *Cevher Hazırlama El Kitabı*, İTÜ, İstanbul.
- Pathak, K. (2012) *Quality of Coal.*, Department of Mining Engineering, IIT, Kharagpur - 721302 <https://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CD A Q F j A A & url = http % 3 A % 2 F % 2 F i n t i n n o . i i t k g p . e r n e t . i n % 2 F c o u r s e s % 2 F 9 5 1 % 2 F w f i l e s % 2 F 1 4 9 4 5 3 & e i = O N I M U 6 T t M e G m 0 Q W n n o E 4 & u s g = A F Q j C N G a v R 3 b Z 7 C - y 4 B r n h P J 6 - a z Y - h E 1 g & sig 2 = a J E b 9 k z z W K p H K S k p J k 9 K X A & b v m = b v . 6 1 7 2 5 9 4 8 . d . d 2 k>
- TS ISO 1928, 2010. *Katı Mineral Yakıtlar-Bombalı Kalorimetrik Metot ile Üst Isı Değerlerinin Tayini ve Alt Isı Değerlerinin Hesaplanması*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3037 / ISO 7936, 2003. *Taşkömürü-Yüzme –Batma Özelliklerinin Tayini ve Gösterilmesi-Cihaz ve İşleri için Genel Talimatlar*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE 1726/TS ISO 1953, 2006. *Taşkömürü-Tane Büyüklüğü Analizi-Elleme Yöntemi*, TSE, Ankara.
- TSE ISO 1171, 2006. *Katı Mineral Yakıtlar, Kül Miktarı Tayini*, TSE, Ankara.
- Üzülmöz, M., Yeldan, M. 1990. *Kömürlerimizin Değerlendirilmesi*, Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Değerlendirme Raporu, İstanbul.
- Yıldız, N., 2007. *Cevher Hazırlama*, Ertem Basım, Ankara.
- Zhao, S., Zhang, C., Xu, X., Yao, W., Chen, J., Yuan, Z., Zhang, H. 2010. Super-Large Gravity-Fed 3-Product Heavy Medium Cyclone, *16th International Coal Preparation Congress Conference Proceedings*, pp. 296-305.

TAŞKÖMÜRÜ ARTIKLARININ SUSUZLANDIRILMASINDA POLİMERLERİN ETKİSİ

THE EFFECT OF POLYMERS ON DEWATERING OF BITUMINOUS COAL

H. A. Taner, V. Önen

Selçuk Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya

ÖZET: Kömürün susuzlandırılmasında flokülasyon ve filtrasyon yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı mineral maddelerden oluşan Zonguldak Çatalağzı taşkömürü lavvar artığının flokülasyon ve filtrasyon davranışına polimerlerin etkisi incelenmiştir. Flokülant olarak Cyanamide A 150 ve A130 (anyonik), tesiste kullanılmakta olan Apol (anyonik), Cyanamide N100 (noniyonik) ile Cyanamide C521 (katyonik) polimerleri kullanılmıştır. Çalışılan deneysel parametreler; polimer tipi/dozajı, süspansiyon katı oranı, karıştırma hızı ve pH değeridir. Deneysel çalışmalarda kullanılan flokülantların performansları, süspansiyonun zamana bağlı arayüzey yüksekliği değişimi, flokülasyon sonucunda oluşan temiz suyun bulanıklığı ve filtrasyon süresi esas alınarak değerlendirilmiştir. Flokülasyonda en iyi verimi sırasıyla N100, Apol, A150, A130 ve C521 vermiştir. Çalışılan tüm flokülantlar için belirlenen optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan minimum bulanıklık değerleri, flokülasyon verimleri, çökme hızları ve filtrasyon süreleri sırasıyla N100 için 6 mg/L'de 2.21 NTU, %99.62, 213 mm/dk ve 68 sn; Apol için 1 mg/L'de 5.5 NTU, %99.05, 160 mm/dk ve 101 sn; A150 için 1.5 mg/L'de 8.59 NTU, %98.51, 192 mm/dk ve 130 sn; A130 için 1 mg/L'de 11.36 NTU, %98.02, 137 mm/dk ve 125 sn ve C521 için 1.5 mg/L'de 79.53 NTU, %86.17, 58 mm/dk ve 318 sn'dir.

ABSTRACT: Flocculation and filtration are commonly used for coal dewatering. In this study, the effect of polymers onto the flocculation and filtration behaviours of Zonguldak Çatalağzı bituminous coal preparation plant tailings including different mineral materials has been investigated. Cyanamide A150 and A130 (anionic), Apol (anionic) used in the plant, Cyanamide N100 (nonionic) and Cyanamide C521 (cationic) polymers were used as flocculants. Working parameters were polymer type/dosage, solid ratio, stirring speed and pH. In the experimental studies the performance of used flocculants were evaluated based on time-dependent interfacial height change of suspension, turbidity of supernatant after flocculation and filtration time. In order of N100, Apol, A150, A130 and C521 polymers gave the best flocculation yield. For studied all flocculants, optimum dosages, minimum turbidity datum obtained with this optimum dosage, flocculation yields, sedimentation velocities and filtration times were 6 mg/L, 2.21 NTU, %99.62, 213 mm/min and 68 sec for N100; 1 mg/L, 5.5 NTU, %99.05, 160 mm/min and 101 sec for Apol; 1.5 mg/L, 8.59 NTU, %98.51, 192 mm/min and 130 sec for A150; 1 mg/L, 11.36 NTU, %98.02, 137 mm/min and 125 sec for A130; 1.5 mg/L, 79.53 NTU, %86.17, 58 mm/min and 318 sec for C521, respectively.

1 GİRİŞ

Katı-sıvı ayırımı uygulamaları genelde problem arz eden süreçlerdir; zira süspansiyon içinde yer alan farklı boyut, şekil ve ağırlıktaki katı taneciklerin varlığı ve kolloidal davranışları, ortam ile ilgili değişkenler, kullanılan elektrolitler ve bütün bunların birbirleriyle olan etkileşimleri katı-sıvı ayırımı işlemlerinde belirleyici olmaktadır. Susuzlandırmada temel amaç, mümkün olduğunca katı oranı düşük berrak su ve su oranı düşük katı elde etmektir (Sabah ve Cengiz 2004). Cevher hazırlama tesislerinde de berrak suyun büyük öneme sahip olması ve malzemenin nem içeriğinin mümkün olduğunca az olması isteği sebebiyle, susuzlandırma önemli bir işlem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Katı-sıvı ayırımı işlemlerinin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi kömür hazırlama tesisleri için de gerek ekonomik gerekse teknolojik açıdan kritik bir süreçtir. Kömür hazırlama tesislerinde katı-sıvı ayırımı tikiplerde gerçekleştirilir. Tikilerde susuzlandırmanın verimli şekilde yapılabilmesi için tikilere bağlı bazı parametrelerin, tesis artık suyundaki katıların fiziksel, kimyasal ve elektrokinetik özelliklerinin ve kullanılan kimyasalların özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir. Kömür hazırlama tesislerinde susuzlandırma amacıyla; çöktürme, filtrasyon ve bunların kombinasyonları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Suda çözülebilen sentetik polimerler (flokülanlar) ile sedimentasyon hızlandırılmaktadır. Genellikle yüksek molekül ağırlıklı polimerler endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan reaktiflerdir. Bu reaktifler kek geçirgenliğini değiştirmekte ayrıca filtre keki nemini de etkilemektedir (Mishra 1973, Nicol vd. 1980, Akdemir vd. 1999). Susuzlandırmada ana problemlerden bir tanesi artık veya konsantr kömürde oluşan aşırı nemdir. Kömür içerisindeki nem, kömürün ısı değerini düşürerek yanma problemleri oluştururken nakliye maliyetlerini de artırır (Singh 1998).

Malayoğlu vd. (1998) yaptığı çalışmada, GLİ Tunçbilek-Ömerler lavvarı sulu atıklarının flokülasyonunda, anyonik polimerlerle daha iyi çöktürme sonuçları elde etmişlerdir. Sabah vd. (2004) farklı tipte polimerleri karıştırarak dual etki sayesinde bulanıklıkta iyi sonuçlar elde ederken, orta anyonik polimer ile yüksek çökeltme hızlarına ulaşmışlardır. Bentli'nin (2010), yaptığı bir başka çalışmada ise uygun bir elektrolit varlığında polimerlerin çökeltme hızını artırdığını tespit etmiştir.

Bu çalışmada, farklı polimerlerin taşkömürü lavvar artıklarının flokülasyonuna ve filtrasyon davranışlarına etkisi incelenmiştir. Bulguların değerlendirilmesinde, flokülasyon deneylerinde bulanıklık değerleri, çökeltme hızı ve flokülasyon verimi; filtrasyon deneylerinde ise süzülme süresi ve nem esas alınmıştır.

2 MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Malzeme

Kömür şlamı Türkiye Taşkömürü Kurumu Karadon Müessesesi Çatalağzı lavvarı yıkama tesisi tikiner girişinden alınmıştır. Orijinal süspansiyonun katı oranı %9 olup, doğal pH değeri 8.6'dır.

Deneyisel çalışmalarda flokülant olarak Cyanamide A150 ve A130 (anyonik), Cyanamide C521 (katyonik), Cyanamide N100 (noniyonik) ile tesiste kullanılmakta olan Apol (anyonik) polimerleri kullanılmıştır. pH değerinin etkisinin araştırıldığı deneylerde ortamın pH değeri HCl ve NaOH ile ayarlanmış ve pH kontrolünde Jenco 6230 marka dijital pH metre kullanılmıştır.

2.2 Yöntem

Deneyisel çalışmalar 500 ml'lik beherde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak çalışılacak her flokülant için uygun stok çözeltiler hazırlanarak, deneyisel çalışmalar distile su ile hazırlanan bu stok çözeltiden seyreltilerek değişik konsantrasyonlarda dozlanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışılacak deneyisel koşulların belirlenebilmesi amacıyla gerçekleştirilen ön deneylerde 2 dk süre ile 800 dev/dk karıştırma hızında ön karıştırma koşulları ile flokülant ilavesinden sonra 3 dk karıştırma süresi ve deney sonucunda 5 dk çöktürme süresi optimum koşullar olarak belirlenerek deneyisel çalışmalara bu koşullarda devam edilmiştir.

Numuneler mekanik karıştırıcıda 2 dk süre ile 800 dev/dk hızda homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra, çalışılan konsantrasyonda flokülant ilavesi yapılmış ve 3 dk karıştırma süresi sonunda sistem durdurulmuş daha sonra süspansiyon 5 dk çökelmeye bırakılmıştır. Çökme süresi boyunca katı-sıvı ara yüzey yüksekliği takip edilmiş ve çökme süresi sonunda hava-su ara yüzeyinin belirli bir mesafe altından alikot alınarak Velp TB1 marka türbidimetre cihazı ile süspansiyonun bulanıklık değeri ölçülmüştür. Deneyin başarısı Eşitlik 1 kullanılarak belirlenmiştir (Osborne 1978, Özkan 2003).

$$\% \text{ Flokülasyon} = \left[\frac{T_0 - T_f}{T_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

Burada; T_0 , süspansiyonun flokülasyon öncesi bulanıklık değeri (NTU: Nephelometric Turbidity Unit); T_f , süspansiyonun flokülasyon sonrası bulanıklık değeridir.

Flokülasyon deneylerinde çalışılan deneyisel parametreler, polimer tipi/miktarı, karıştırma hızı, katı oranı ve ortam pH değeridir. Filtrasyon deneylerinde Şekil 1'de verilen düzenek kullanılmıştır. Flokülasyon deneylerinde elde edilen optimum koşullar her bir polimer için tekrar edilerek, çalışılan tüm polimerler için filtrasyon süresi, filtre kekinin nemi ve çamurdaki AKM (askıdaki katı madde) miktarı belirlenmiştir.

3 BULGULAR

3.1 Taşkömürü Artıklarının Karakterizasyonu

Deneyisel çalışmalarda kullanılan numunenin ASTM standartlarına göre elde edilen özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Numunenin LECO AC350 marka kalorimetreyle tespit edilen ısıl değerinin 4,900 kcal/kg olduğu görülmektedir. Şlamda taşkömürü oranı yüksek olduğu için artığın üst ısıl değeri oldukça yüksektir ve malzeme mikst ile karıştırılarak Çatalağzı Termik Santraline gönderilmektedir.

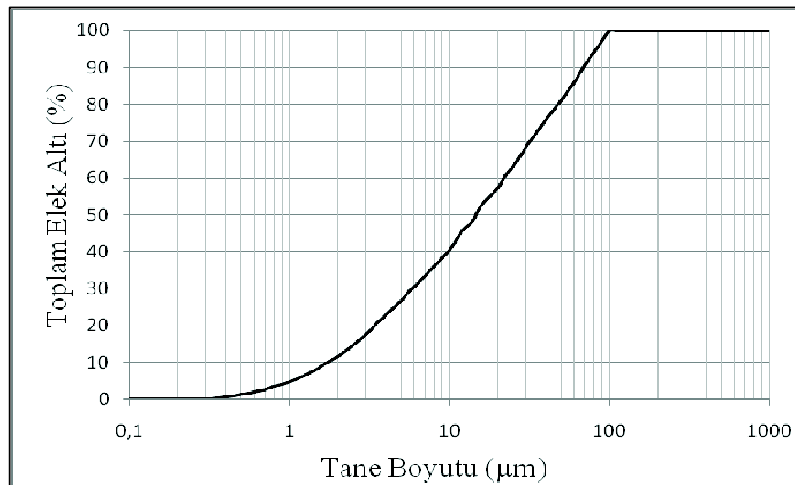


Şekil 1. Filtrasyon düzeneği.

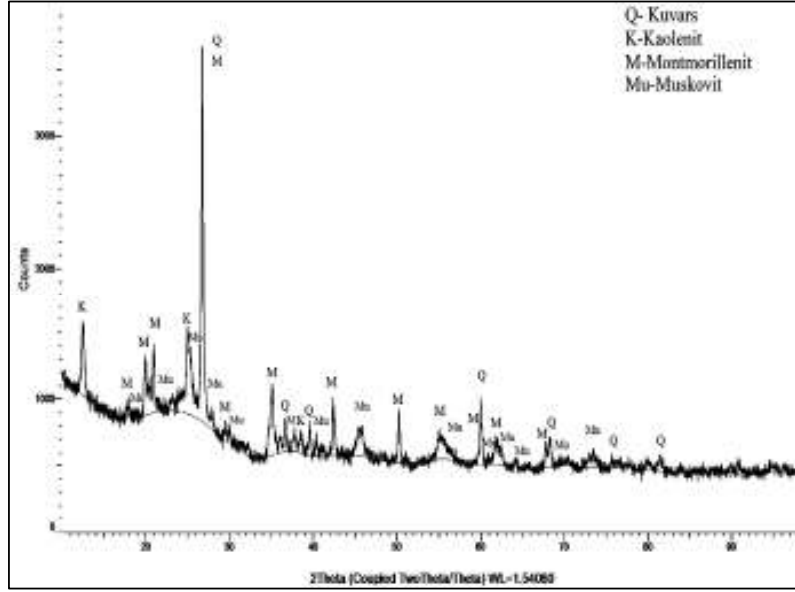
Çizelge 1. Numune özellikleri.

Kül (%)	Karbon (%)	Uçucu madde oranı (%)	Üst ısı Değeri (kcal/kg)	Yoğunluk (g/cm ³)	Doğal pH	d ₉₀ tane boyutu (µm)
37	44.26	18.74	4,960	1.48	8.6	78.47

Numunenin boyut analizi lazerli tane boyut ölçüm cihazı Malvern Mastersizer 2000 ile gerçekleştirilmiş olup, numunenin %80'i 50 mikronun altındadır (Şekil 2). XRD cihazıyla gerçekleştirilen mineralojik analizi sonucunda numunenin kuvars, kaolenit, montmorillenit ve muskovit minerallerinden oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 3).

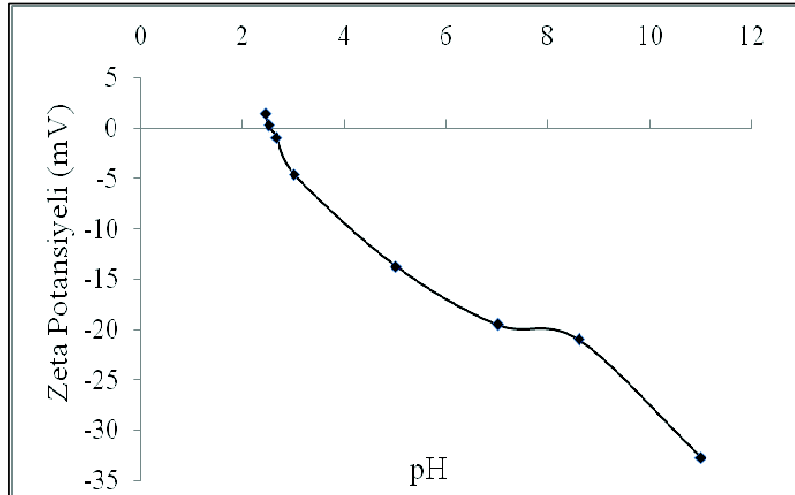


Şekil 2. Deneylerde kullanılan numunenin tane boyutu dağılımı.



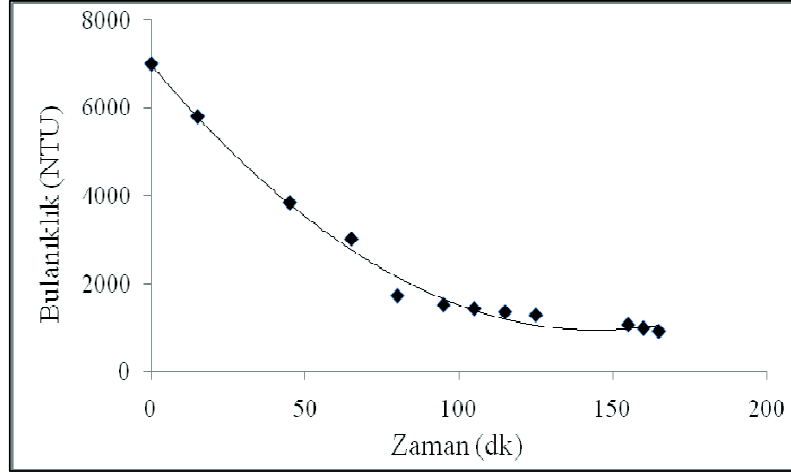
Şekil 3. Taşkömürü artıklarının XRD analizi.

Deneylerde kullanılan çeşme suyunun pH değeri 7.11 ve suyun iletkenliği ise 2283 mS'dir. BTC marka Zetaplus cihazı ile farklı pH değerlerinde yapılan zeta potansiyel ölçümlerinde artığın yüzey elektrik yükünü sıfır yapan pH değeri (ZPC-Zero point of charge) 2.55 olarak ölçülmüş ve bu değerden sonra pH değeri arttıkça, malzemenin negatif yük kazandığı saptanmıştır (Şekil 4). Artığın doğal pH 8.6'da ölçülen zeta potansiyeli -21.02 mV olup, düşük stabilite sergilemektedir.



Şekil 4. pH değerlerine bağlı zeta potansiyel değerleri.

Kömür şlamının doğal sedimentasyon davranışını belirlemek amacıyla 500 ml'lik mezür içerisinde (hiç bir katkı maddesi ilave edilmeksizin) süspansiyonun çökme davranışı incelenmiş, bulanıklığın yaklaşık 2 saatten sonra sabit kaldığı ve çökelmenin hızının 15 mm/dk olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Kömür şlamının doğal sedimentasyonu.

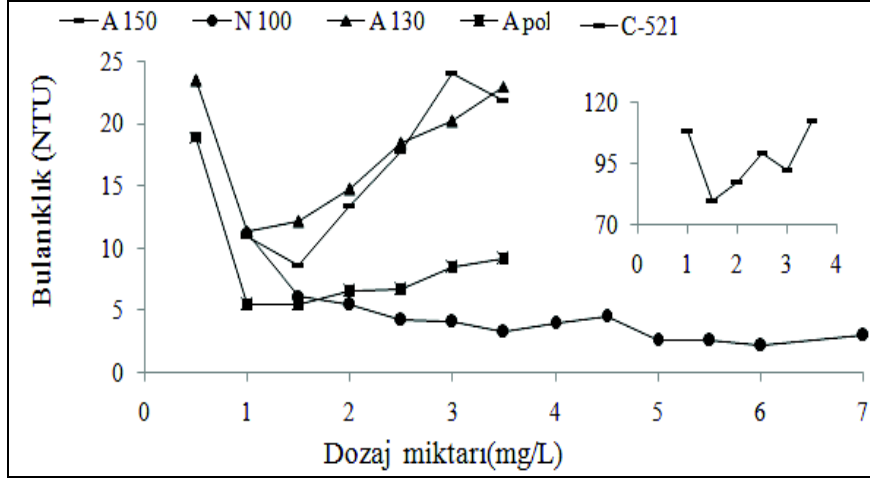
3.2 Flokülasyon Deneyleri

Flokülasyon deneylerinde 5 farklı polimer (N100, A150, A130, Apol ve C521) kullanarak, dört farklı parametrenin (dozaj miktarı, karıştırma hızı, katı oranı ve pH değeri) etkisi incelenmiştir. Flokülasyon için optimum koşullar belirlenerek, filtrasyon deneyleri belirlenen bu optimum koşullarda gerçekleştirilmiştir.

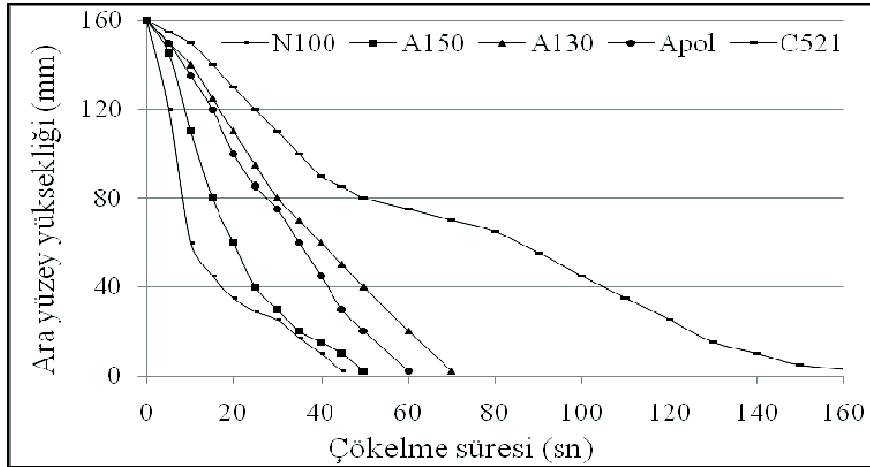
3.2.1 Polimer miktarının etkisi

Flokülant tipinin ve dozajının flokülasyona etkisini belirleyebilmek amacıyla, her bir flokülant için doğal pH değerinde (8.6) ve ön deneylerde belirlenen optimum koşullarda farklı flokülant dozajlarında deneyler gerçekleştirilmiş ve çökme boyunca zamana karşı ara yüzey yüksekliği değişimi ölçülerek 5 dakika sonunda bulanıklık ölçümü yapılmıştır. Böylece her bir flokülant için süspansiyonun en düşük bulanıklık değerini veren optimum dozajlar belirlenmiştir (Şekil 6-7). Şekil 6'da görüldüğü üzere en düşük bulanıklık değeri 6 mg/L dozajda N 100 ile sağlanırken, daha sonra sırasıyla Apol, A150, A130 ve C521 gelmektedir. Anyonik polimerler ile düşük konsantrasyonlarda daha etkili sonuçlar elde edilmiştir. Yaklaşık 1.5 mg/L dozajdan sonra verim düşmeye başlamıştır. Anyonik polimerlerde, A150 polimeri ile en iyi bulanıklık 1.5 mg/l dozaj miktarı ile 8.59 NTU elde edilirken, A130 polimeri ile en iyi bulanıklık 1 mg/L dozaj miktarı ile 11.36 NTU ve Apol polimeri ile en iyi bulanıklık 1 mg/L dozaj miktarı ile 5.5 NTU elde edilmiştir.

Dozajın artması N100'de olumsuz etki göstermezken, diğer polimerler için olumsuz etki meydana getirmiştir. Bir süspansiyondaki kararlı partiküllerin en iyi şekilde flokülasyonunu sağlamak için gerekli optimum polimer dozajının, katının yüzey alanının yarısını kaplayacak miktardaki dozaj olduğu ifade edilmektedir (Somasanduran vd. 1998, Ersoy 2003). Eğer ortama bu dozajdan fazla miktarda polimer ilave edilirse yani taneler üzerinde fazla miktarda polimer adsorplanırsa o zaman taneler arasında köprü oluşumu engellenmekte ve flokülasyon olumsuz yönde etkilenmektedir.



Şekil 6. Dozajın bulanıklığa etkisi.



Şekil 7. Optimum dozajlardaki ara yüzey yüksekliği ve çökeltme süresi eğrileri.

Çalışılan tüm flokülantlar için optimum dozajlarda zamana bağlı ara yüzey yüksekliği değişimi incelendiğinde çökeltme hızları açısından en iyi performansı sırasıyla N100, A150, Apol, A 130 ve C521 flokülantlarının verdiği görülmektedir. Akdemir vd. (1999) yapmış oldukları çalışmada, anyonik ve noniyonik polimerlerle yüksek flokülasyon verimine ulaşmışlar ve noniyonik polimerlerin yüzey adsorpsiyonunun tane yüzeyindeki oksijen atomlarıyla polimerlerin hidrojen atomları arasında oluşan hidrojen bağıyla gerçekleştiğini açıklamışlardır.

Flokülasyon deneylerinde optimum koşullarda elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde flokülasyon verimi, ulaşılan son bulanıklık değeri ve çökeltme hızı açısından en iyi sonucun noniyonik polimerle elde edildiği görülmektedir. Noniyonik polimer ile optimum dozajda (6 mg/L) ulaşılan bulanıklık değeri 2.21 NTU'dur. Ancak daha düşük dozajlarda da tesiste kullanılan Apol polimerine yakın bulanıklık değeri elde edilebilmiştir. Örneğin Apol polimeri ile 1 mg/L'de 5.5 NTU bulanıklığa ulaşılırken, N100 polimeri ile 2 mg/L'de 5.47 NTU bulanıklık değeri elde edilebilmiştir.

Çizelge 2. Elde edilen en iyi koşullar.

Polimer	Çamur yoğunluğu (g/cm ³)	Çökeltme hızı (mm/dk)	Optimum dozaj (mg/L)	Optimum bulanıklık (NTU)	Flokülasyon verimi (%)
N 100	0.99	213	6	2.21	99.62
A 150	1.4	192	1.5	8.59	98.51
A 130	1.32	137	1	11.36	98.02
A pol	1.13	160	1	5.5	99.05
C 521	1.9	58	1.5	79.53	86.17

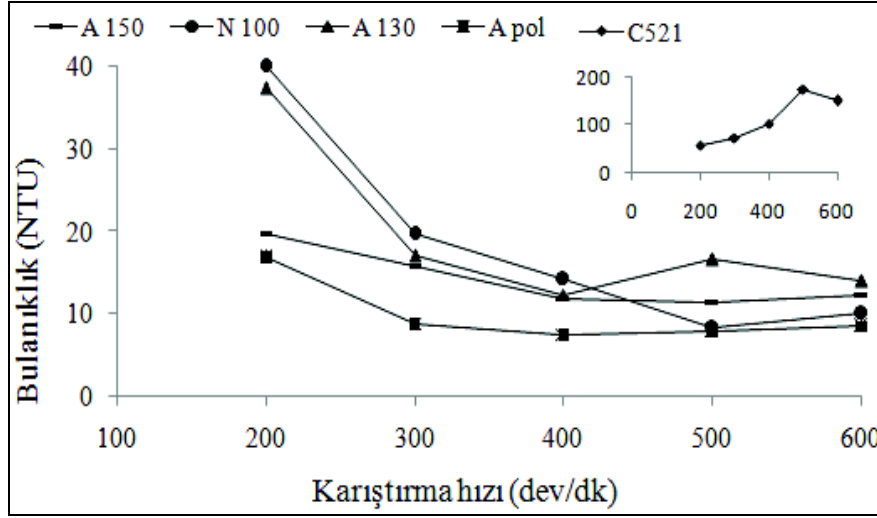
Flokülasyon verimi açısından noniyonik polimerin tesiste kullanılan Apol polimeri ile yakın verim değerleri (%99) sağladığı gözlenirken noniyonik polimer ile daha hızlı çökeltme sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca noniyonik polimer yüksek katı oranlarında çalışılması halinde diğer polimerlere göre belirgin şekilde yüksek flokülasyon verimi sağlayabilmektedir (Şekil 9). Fakat N100 polimeri için gerekli optimum dozajda anyonik polimerlere göre 6 kat daha fazladır ki bu durumun tesis ekonomisine yükü göz ardı edilemez. Çalışılan katyonik polimer ile kömür şlamının çöktürülmesinde etkili bir flokülasyon verimi elde edilememekle birlikte en yüksek çamur yoğunluğunu sağlayan C521 olmuştur. Çamur yoğunluğunun yüksek olması çökeltme hızının daha az hacim kaplaması anlamına gelmektedir. Sonuç olarak noniyonik ve anyonik polimerler flokülasyonda oldukça etkili olurken, katyonik yapıdaki C521'in belirgin bir etkisi olmamıştır. Literatürdeki bazı çalışmalarda bu sonucu desteklemektedir (Akdemir vd 1999, Sabah ve Cengiz 2004).

3.2.2 Karıştırma hızının etkisi

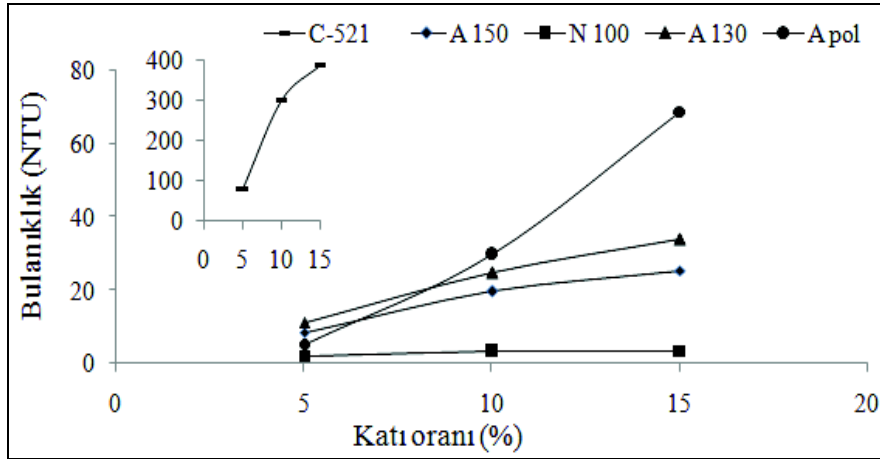
Karıştırma hızının kömür şlamının flokülasyonuna etkisini belirlemek amacıyla 5 farklı hızda (200; 300; 400; 500; 600 dev/dk) flokülasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Anyonik ve noniyonik polimerlerin kullanıldığı deneylerde optimum karıştırma hızı 500 dev/dk olarak belirlenirken, katyonik polimer C521 yüksek karıştırma hızlarından olumsuz etkilenmiştir. Bu durum, C521 polimerinin taneleri köprüleme kabiliyetinin düşük olması nedeniyle oluşan zayıf flokların yüksek hızlara dayanımının diğer polimerlere oranla daha az olduğunu göstermektedir (Yılmaz 2006). Bundan dolayı anyonik/noniyonik polimerler için 500 dev/dk ve katyonik polimer için 200 dev/dk optimum karıştırma hızı olarak seçilmiştir.

3.2.3 Katı oranına bağlı flokülasyon deneyleri

Flokülasyona katı oranının etkisinin belirlenmesinde 3 farklı katı oranı (%5, %10 ve %15) ile çalışılmıştır. Şekil 9'da görüldüğü gibi, noniyonik polimer hariç diğer polimerlerin her biri katı oranı artışından etkilenmiştir. En berrak süspansiyon noniyonik polimer ile elde edilirken, diğer polimerler için katı oranının artışı bulanıklık açısından olumsuz etki göstermiştir. C521'in etkisinin incelendiği deneylerde, %5, %10 ve %15 katı oranlarında sırasıyla 79.53 NTU, 300 NTU ve 388 NTU bulanıklık elde edilmiştir. Bu sonuçlara istinaden, tüm polimerlerde etkisinin benzer olması nedeniyle diğer parametrelerin etkisini incelemek için %5'lik katı oranlarında deneyler yapılmıştır.



Şekil 8. Karıştırma hızının bulanıklığa etkisi (N100 6 mg/L, A150 1.5 mg/L, A130 1 mg/L, Apol 1 mg/L, C521 1.5 mg/L).

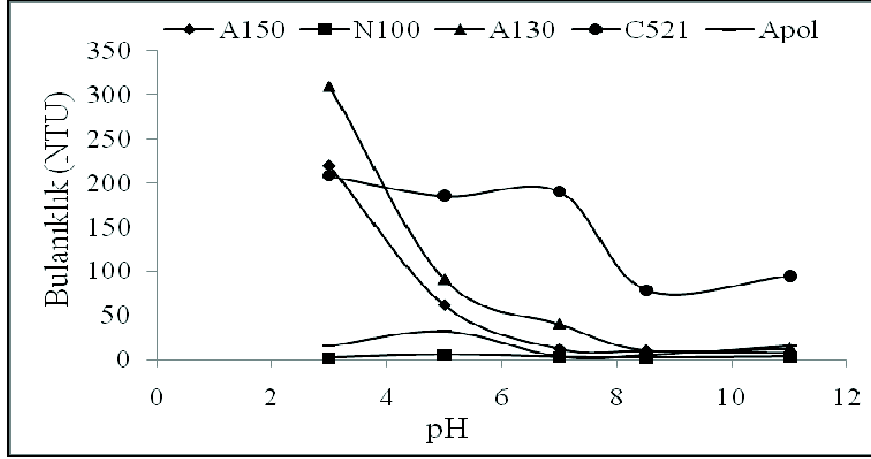


Şekil 9. Kati oranının bulanıklığa etkisi (N100 6 mg/L, A150 1.5 mg/L, A130 1 mg/L, Apol 1 mg/L, C521 1.5 mg/L).

3.2.4 pH değerinin etkisi

Kömür şlamının flokülasyonuna pH değerinin etkilerini belirleyebilmek için, çalışılan tüm polimerler için doğal pH değerlerinde belirlenen optimum şartlarda flokülasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 10). Asidik ortamda polimerlerin flokülasyona etkisi azalmaktadır. Örneğin, A150 polimer için pH 3'te 219 NTU bulanıklık gözlenirken, pH 11'de 8.66 NTU bulanıklık gözlenmiştir. Tüm polimerlerde en iyi sonuçlar süspansiyonun doğal pH değerinde yani pH 8.6'da elde edilirken, N100 polimeri hariç, diğer polimerlerin hepsi pH değişiminden etkilenmiştir. Literatürde iyonik olmayan polimerlerin pH değişiminden fazla etkilenmediği, anyonik polimerlerin ise nötr ve hafif alkali ortamlarda daha etkili

olduğu ve katyonik polimerler için ise uygun pH seviyelerinin çok değişken olduğu belirtilmektedir (Klimpel 1997, Yılmaz 2006).



Şekil 10. pH değerinin bulanıklığa etkisi (N100 6 mg/L, A150 1.5 mg/L, A130 1 mg/L, Apol 1 mg/L, C521 1.5 mg/L).

3.3 Filtrasyon Deneyleri

Filtrasyon deneyleri sonunda, süzülme süresi, filtre edilen kekin nemi ve çamurda askıdaki katı madde miktarları (AKM) belirlenmiştir (Çizelge 3). Flokülasyonda en hızlı çökmeyi sağlayan noniyonik polimer ile en yüksek filtre kekinin nemi olduğu görülmüştür. Bunun aksine en hızlı süzülme süresi 68 sn olarak noniyonik polimerle elde edilmiştir. Noniyonik polimer ile çökeltile kömür şlamının filtrasyon hızındaki bu artış daha iri flokların oluşmasının gözlenmesi nedeniyle kek geçirgenliğinin artması olarak yorumlanmıştır. Çamurda askıda katı madde miktarının az olması sıvıda askıda kalan katı madde miktarının fazla olması anlamına gelmektedir. Bu durumda kazanılan suyun temizliği bazında düşünüldüğünde en az katı madde içeren su katyonik polimer ile elde edilmektedir.

Çizelge 3. Filtrasyon deney verileri.

Polimer	Süzülme süresi (sn)	Nem (%)	AKM (mg/L)
N 100	68	16.99	556700
A 150	130	15.92	949100
A 130	125	14.97	725000
A pol	101	15.38	602500
C 521	318	15.88	1045900

4 SONUÇLAR

Zonguldak taşkömürü şlamının flokülasyonu deneylerinde N100 (noniyonik), A150; A130; Apol (anyonik) ve C521 (katyonik) ile çalışılmıştır, elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda belirlenen optimum dozajlar ve bu dozajlarda ulaşılan bulanıklık değerleri ve çökeltme hızları N100 için 6 mg/L'de 2.21 NTU ve 213 mm/dk; Apol için 1 mg/L'de 5.5 NTU ve 160 mm/dk; A150 için 1.5 mg/L'de 8.59 NTU ve 192 mm/dk; A130 için 1 mg/L'de 11.36 NTU ve 137 mm/dk ve C521 için 1.5 mg/L'de 79.53 NTU 58 mm/dk'dır.
- Noniyonik ve anyonik polimerler flokülasyonda oldukça etkili olurken katyonik yapıdaki C521'in belirgin bir etkisi olmamıştır.
- Flokülasyon verimi açısından noniyonik polimerin tesiste kullanılan Apol polimeri ile yakın verim değerleri (%99) sağladığı gözlenirken, N100 polimer ile daha hızlı çökeltme hızı sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca noniyonik polimer yüksek katı oranlarında çalışılması halinde diğer polimerlere göre belirgin şekilde yüksek flokülasyon verimi sağlayabilmektedir. Fakat N100 polimeri için gerekli optimum dozaj, anyonik polimerlere göre 6 kat daha fazladır ki bu durumun tesis ekonomisine yükü göz ardı edilemez.
- Çalışılan tüm flokülantlar için optimum pH değeri süspansiyonun doğal pH değeri olarak belirlenmiştir. N100 polimeri hariç, diğer polimerlerin hepsi pH değişiminden etkilenmiştir.

Filtrasyon deneylerinde noniyonik polimerler diğer polimerlere göre yaklaşık olarak iki kat daha hızlı olduğu ölçülmüştür. Ancak sonuçlar filtre kekinin nemi ve AKM değerleri açısından incelendiğinde tesiste kullanılan Apol polimerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

5 KAYNAKLAR

- Akdemir, Ü., Aydoğan, S., Canbazoğlu, M., Özkan, A. 1999. Kömürün Susuzlandırılmasında Polimerlerle Diğer Bazı Reaktiflerin Karşılaştırılması, *Türkiye 16. Madencilik Kongresi*, ISBN 975-395-310-0.
- Bentli, İ. 2010. Kömür Lavvar Tesisi Atıkların Flokülasyonunda İnorganik Elektrolitlerin Etkisi, *Ekoloji*, 19, 76, s. 71-77.
- Ersoy, B. 2003. Mermer İşleme Tesisi Atık Su Arıtımında Kullanılan Flokülantların Tanıtımı, *Türkiye 4. Mermer Sempozyumu*, s. 449-462, Afyon.
- Klimpel, R. R. 1997. Introduction to Chemicals Used in Particle Systems, *ERC Particle Science & Technology*, Florida, pp. 10-13.
- Malayoğlu, U., Akar, A., Seyrankaya, A. 1998. Developing Sedimentation Criteria for Slimes of Ömerler Coal Washing Plant by Flocculation, *Innovation in Mineral and Coal Processing*, A. A. Balkema Publishers, pp. 195-200, Turkey.
- Mishra, S. 1973. Effect of Flocculation on Moisture Reduction of Fine Coal, *Coal Mining and Processing*, 56 p.
- Nicol, S. K., Day, J. C., Swanson, A. R. 1980. Oil Assisted Dewatering of Fine Coal, *Fine Particles Processing*, Ed. Somasanduran, P., pp. 1661-1675.
- Osborne, D. G. 1978. Recovery of Slimes by a Combination of Selective Flocculation and Flotation, *Trans. Inst. Min. Metall. Sec. C.*, pp. 189-193.
- Ozkan, A. 2003. Coagulation and Flocculation Characteristics of Talc by Different Flocculants in the Presence of Cations, *Minerals Engineering*, 16, pp. 59-61.
- Sabah, E., Cengiz, İ. 2004. Poliakrilamitlerin İyonik Gruplarının Kömür Hazırlama Tesisi Atıklarının Çökeltme Davranışına Etkisi, *Türkiye 14. Kömür Kongresi*, s. 133-140, Zonguldak.
- Sabah, E., Cengiz, İ. 2004. An Evaluation Procedure for Flocculation of Coal Preparation Plant Tailings, *Water Research*, 38, pp. 1542-1549.

- Singh, B. P., Besra, L., Reddy, P. S. R., Sengupta, D. K. 1998. Use of Surfactants to Aid the Dewatering of Fine Clean Coal, *Fuel*, 77, 12, pp. 1349-1356.
- Somasanduran, P., Das, K. L. 1998. Flocculation and Selective Flocculation-An Overview, *Innovations in Mineral and Coal Processing*, A. A. Balkema Publishers, pp. 195-200, Turkey.
- Yılmazer, Y. A. 2006. *Baritin Polimerleri ile Flokülasyonu ve Katyonların Etkisi*, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, s. 50.

KÖMÜR ATIĞI UÇUCU KÜL İNCELİĞİNİN YERALTI DOLGUSU ÜZERİNE ETKİLERİ

THE EFFECTS OF COAL FLY ASH FINENESS ON UNDERGROUND BACKFILL

İ. Çavuşoğlu

Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane

A. O. Yılmaz, M. Çapık

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

ÖZET: Beton endüstrisinde yaygın kullanımı olan uçucu küller son yıllarda özellikle yeraltı kömür işletmeleri başta olmak üzere yeraltı dolgularında atık malzeme olarak kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada, yeraltı dolgusunda atık malzeme olarak kullanılan uçucu külün inceliğinin dolgu karışımlarının su miktarına, priz sürelerine ve dayanıma olan etkileri incelenmiştir. 5 ve 15 dk bilyeli değirmende öğütme işlemine tabi tutulan uçucu küller dolgu içerisinde orijinal malzeme yerine sırasıyla %40 ve %100 ve %5, %10, %20, %100 ikame olacak biçimde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, malzemenin inceliğinin ve ilave oranının artırılmasıyla dolgu karışımlarının su ihtiyacının arttığını, priz sürelerinin uzadığını, erken dayanım değerlerinin düştüğü ve uzun dayanım değerlerinin ise arttığını göstermiştir.

ABSTRACT: Fly ash, which is commonly used in the concrete industry, in recent years, especially in underground coal mining, is used as waste material in underground backfill. This paper investigates the effects of fineness of the fly ash used as waste materials in underground backfill on the water content, setting times and compressive strength of backfill mixtures. The first, fly ash was subjected to the ball mill process for 5 and 15 min. Then, fly ash milled with 5 and 15 min. were used to partially replace original fly ash at %40, %100 and %5, %10, %20, %100 by weight, respectively. Test results indicated that water demand of backfill mixtures was increased, setting times of backfill mixtures were extended, and early strength values were decreased and final strength values were increased as the fly ash fineness and replacement ratio increased.

1 GİRİŞ

Atık, ihtiyaç duyulmayan ve uzaklaştırılan veya mevzuat hükümlerine göre bertaraf edilmek zorunda olan her türlü madde olarak tanımlanmaktadır (Karapınar 2009). Atıklar, endüstrinin hemen her alanında çeşitli şekillerde meydana gelebilmektedirler. Teknolojinin gelişmesi ve nüfusun artışı ile birlikte çoğalan atıklar çevreye ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri ile büyük bir sorun haline gelmektedir. Özellikle ülkelerin kalkınmasında önemli bir faktör olan enerji sektöründeki hızlı büyüme ile bu alanda meydana gelen atık malzemelerin çoğalması bu sorunun artmasında etkili olmaktadır.

Günümüzde enerji ihtiyacının büyük bir kısmı, ömrü en uzun olan birincil enerji kaynağı kömür ile karşılanmaktadır. Ancak enerji üretiminde kömürün kullanılması ile bazı çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Özellikle termik santrallerde elektrik üretmek amacıyla kullanılan kömürün yanmasıyla oluşan hava emisyonları ve küller, çevresel açıdan zararlı bir takım olumsuzlukları meydana getirmektedir (Avcı 2005, Meegoda vd. 2011).

Tüm dünyada elektrik enerjisi üretmek için yanma ürünü olarak kullanılan kömürün santrallerde yakılması sonucunda yaklaşık olarak 600 milyon ton atık kül ortaya çıkmaktadır (Blissett ve Rowson 2012). Son yıllarda atık malzemelerin değerlendirilmesi ile ilgili çalışmaların yoğunluğu göze çarpsa da endüstriyel bir atık olan küllerin dünyada %25'inden daha azı değerlendirilmektedir (Aruntaş 2006, Meegoda vd. 2011). Az miktarda da olsa küller puzolanik özelliklerinden dolayı genellikle inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Son zamanlarda atık malzemelerin depolanma alanlarında ve çevresel problemlerden kaynaklı yaşanan sıkıntılar nedeniyle, santral atığı küllerin özellikle madencilik ve inşaat sektörlerinde dolgu malzemesi olarak kullanılarak bertaraf edilmesinde büyük bir artış söz konusu olmaktadır (Çavuşoğlu 2008).

Uçucu küller, yeraltı dolgusunda puzolanik özelliklerinden dolayı hem bağlayıcı malzemelere alternatif veya ikame olarak hem de atık malzeme sınıfında kullanılmaktadır (Çavuşoğlu vd. 2013). Küllerin büyük bir çoğunluğunun kökeni kömür olduğu için genellikle kömür ocaklarında özelliklerine bağlı olarak hem atık malzeme hem de dolguda bağlayıcı hammadde olarak kullanılmaları mümkün olmaktadır (Benzaazoua vd. 2004, Çavuşoğlu 2008, Erçikdi vd. 2009, Erçikdi 2009). Özellikle farklı endüstriyel alanlarda kullanılmadıklarında bertaraf edilmeleri için yeraltı ve yerüstü kömür işletmelerinde dolgu içerisinde kullanımları söz konusudur. Dolgu içerisinde uçucu kül kullanımı ile hem ekonomik hem de çevresel açıdan uygun malzeme temin edilmişken diğer yandan da madencilikte potansiyel rezervlerin kullanılabilirliği artırılmış olmaktadır. Çevresel açıdan bakılırsa, farklı bir kaynaktan dolgu malzemesine gereksinim duyulmadığı için doğal kaynakların korunması gibi önemli bir etken söz konusudur.

Uçucu küllerin beton içerisinde kullanımlarında betonun birçok özelliğini değiştirdiği (iyileştirdiği) bilinmektedir. Bunların başında; taze betonda işlenebilirliği artırması, terlemeyi azaltması, sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltması, kimyasal etkilere karşı betonun direncini artırması, betonun hidrasyon ısını azaltması, dayanıklılığı ve zamanla dayanımı artırması gibi konular gelmektedir (Yazıcı ve Arel 2012, Özel 2007, Toutanji vd. 2004). Dolgu içerisinde kullanımlarında da özellikle macun dolgu

karışımlarında bir takım kimyasal reaksiyonlar sonucu dayanım ve dırabilitede meydana gelen kayıpları önlediği belirtilmektedir (Hassani vd. 2001, Benzaazoua vd. 2002, Mishra ve Karanam 2006, Erçikdi 2009). Ancak uçucu küllerin inceliğinin dolgu içerisinde etkileri ile ilgili herhangi bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu tip çalışmalar genellikle beton veya çimento harçlarının içinde kullanımına yönelik olmuştur.

Uçucu küllerin çimento hamuru içerisine ilave edildiklerinde dayanım bakımından kontrol numunesine göre erken kür sürelerinde bir düşüş yaşandığı belirtilmektedir. Ancak ilerleyen kür sürelerinde bu durum değişebilmektedir (Erdoğan 1997, Yazıcı ve Arel 2012). Uçucu küller sahip oldukları doldurma (filler) etkisi ve puzolanik özelliklerinden dolayı harç ve betonların teknik özelliklerini diğer puzolanlar gibi etkilemektedir. Betonun özelliklerini etkilediği durumlarda, uçucu külün doldurma etkisinin puzolanik özelliklerinden daha etkili olduğu bilinmektedir (Aiqin vd. 2003). Uçucu küller bünyesinde çoğunluğu silisyum, alüminyum ve demir oksitli bileşenler olduğu için puzolanik aktivite özelliğine ve çok ince tanecikli ve amorf yapıya sahiptirler. Uçucu küllerin bünyelerinde bulunan silisyumlu ve alüminyumlu malzemeler çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)_2) tepkimeye girerek ilave kalsiyum silika hidratları (C-S-H) oluştururlar. Oluşan bu C-S-H jelleri beton veya çimentolu harçların dayanımında bir artışa sebep olurlar. Aynı zamanda uçucu küller çok ince tanecikler içermelerinden dolayı beton veya çimentolu harçlar içerisinde boşlukları doldurma eğilimindedirler ve daha kompakt malzeme oluştururlar (Yazıcı ve Arel 2012).

Uçucu küllerin inceliğinin beton veya çimento hamuru içerisinde etkisi ile ilgili bazı çalışmalar mevcuttur. Kiattikomol vd. (2001) çalışmalarında uçucu külleri 3 farklı boyutta (ince, orta ve kaba) sınıflandırmış ve bu malzemeleri beton içerisinde %20 oranında çimento yerine ikame olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında küllerin inceliklerinin artmasıyla puzolanik aktivite indekslerinin arttığını ve oluşturulan harçların dayanım değerlerinin de arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca uçucu kül inceliğinin aktivite indeksi üzerine olan etkisinin kimyasal bileşimlerinden daha önemli olduğunu vurgulamışlardır. Chindaprasirt vd. (2005) çalışmalarında uçucu kül inceliğinin çimentolu harçlarda boşluk boyutu, porozite ve dayanıma etkilerini incelemiştir. İki farklı inceliğe sahip F tipi uçucu külü çimento yerine %20 ve %40 seviyelerinde ikame olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında bütün kür sürelerinde portland çimentosu ile hazırlanan harçların basınç dayanımlarının uçucu küllerle hazırlanandan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca en ince öğütülmüş uçucu külle yapılan harçların erken dayanımlarının öğütülmemiş kaba külle yapılanlara göre daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir. İnceltilmiş külle yapılan çimentolu harçların orijinal külle yapılanlara göre daha kompakt ve yoğun olduğu ve bununda dayanıma olumlu yansıtığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, yeraltı dolgularında atık malzeme olarak kullanılan uçucu kül yerine öğütülmüş uçucu kül kullanımının dolgu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ağırlıkça %25 oranında çimento ve %75 oranında uçucu kül kullanılan yeraltı dolgusunda iki farklı zaman diliminde öğütmeye tabi tutulan uçucu kül çeşitli oranlarda orijinal kül ile yer değiştirilerek karışım numuneleri oluşturulmuş ve karışımın su miktarına, priz sürelerine ve dayanıma olan etkileri incelenmiştir.

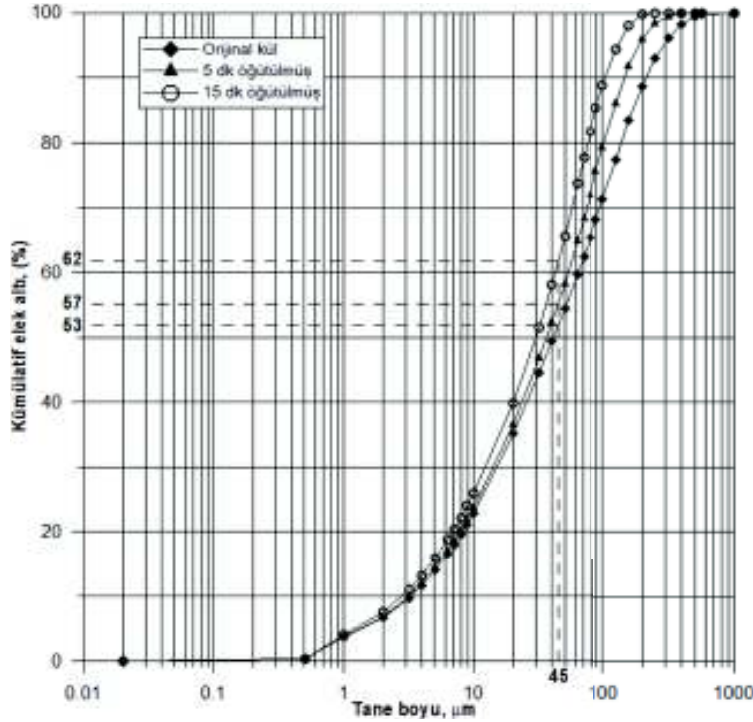
2 MATERYAL VE METOT

2.1 Materyal

2.1.1 Uçucu Kül

Deneyisel çalışmada atık malzeme olarak kullanılan orijinal ve öğütülmüş uçucu küllere yapılan tane boyu analizi deneyi sonuçları Şekil 1’de görülmektedir. Analiz sonucunda orijinal uçucu külün 45 µm altı malzeme miktarı yaklaşık %53 ve 20µm altı malzeme ise %35’dir. 5 dk öğütülmüş malzemenin 45 µm altı malzeme miktarı yaklaşık %57 ve 20µm altı malzeme ise %37’dir. 15 dk öğütülmüş malzemenin ise 45 µm altı malzeme miktarı yaklaşık %62 ve 20µm altı malzeme ise %40’dır. Uçucu külün betonda kullanımına yönelik hazırlanan standartlarda 45µm altı malzeme miktarının %60’ın altına düşmemesi gerektiği belirtilmiştir (TS EN 450-1/A1 2008).

Dolgularda genellikle farklı tipte atık ve kayaç malzemeler kullanıldığı için tane boyu dağılımına yönelik herhangi bir standart yoktur. Buna rağmen dolguda kullanılacak malzemenin tane boyu dağılımının iyi bilinmesi gerekmektedir. Macun dolguda 20µm altı malzeme oranının %15’ten az olmaması gerektiği belirtilmektedir (Brakebusch 1994). Atık malzeme uçucu külün 20 µm altı malzeme oranının %35 olması dolgu için macun kıvamı sağlayacak kolloidal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca ince boyutlu malzemelerin iri taneler arasında kalan boşlukları doldurmak sureti ile düşük çimento içeriklerinde yüksek dayanım verdiği de bilinmektedir (Yılmaz 2003).



Şekil 1. Uçucu küllerin tane boyu analizleri.

Uçucu küllere yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. Analizler sonucunda santral atığı uçucu külün S+A+F toplamının >%70 olması dolayısıyla ASTM C618 (2005)’e göre F sınıfı (düşük kireçli) kül standartına girdiği tespit

edilmiştir. Ayrıca TS EN 450-1'e göre S+A+F toplamının >%70 olduğu ve bu standarta uygunluğu belirlenmiştir. CaO miktarı %10'dan büyük olduğundan kireçsi kül sınıfına da girmektedir. Uçucu külün kızdırma kaybı, reaktif silis ve Cl⁻ miktarı standart sınırları içerisinde. Ancak TS EN 450/A1 (2008)'e göre SO₃ miktarı >%3 olduğundan standarda uygun değildir.

Çizelge 1. Uçucu külün kimyasal analizi ve standartları ile karşılaştırması.

Oksit (%)	Uçucu Kül	Standartlar		
		ASTM C618	TS EN 450-1	
		F	C	
SiO ₂	50.38			
Al ₂ O ₃	14.06	>70	>50	>70
Fe ₂ O ₃	9.9			
S+A+F	74.34			
CaO	13.25			
MgO	1.2			<4
SO ₃	3.16	<5	<5	<3
K ₂ O	1.97			
Na ₂ O	3.18			<5
KK	0.86	<5	<5	<5
Cl ⁻	0.17			<1
Serb. CaO	0.91			<2.5
Reak. SiO ₂	40.89			>25
Reak. CaO	8.78			<10

2.1.2 Çimento

Çimentoya ait kimyasal analiz sonuçları, standartlar ve kimyasal bileşenlerine ait veriler Çizelge 2'de verilmiştir. CEM II çimentosu katkılı çimento sınıfındadır. Çalışmada kullanılan çimentonun A-M (P-L) olması içerisinde %80-94 aralığında klinker ana bileşeni, %6-20 aralığında kalker (L) ve doğal puzolan (P) bileşeni olduğunu ifade etmektedir (TS EN 197-1 2002). Çimentonun bileşenleri tedarik edilen firmadan elde edilmiştir.

2.2 Metot

2.2.1 Karışım Dizaynı

Dolgu karışımında katı malzemelerin oranları ağırlıkça %25 çimento ve %75 kül olacak biçimde ayarlanmıştır. Dolguda büyük bir paya sahip olan uçucu kül malzemesinin daha ince boyutlarda dolgu içerisinde etkilerini incelemek için uçucu küllere öğütme yapılmıştır. 5 dk ve 15 dk öğütme yapılan kül malzemesinden 5 dk öğütülen malzeme ağırlıkça atık malzeme yerine %100 ve %40, 15 dk öğütülen malzeme ise %100, %5, %10 ve %20 ilave edilerek karışım dizaynı gerçekleştirilmiştir. Öğütülmüş uçucu kül kullanılan bu karışım dizaynında toplam 54 numune hazırlanmıştır (Çizelge 3).

Çizelge 2. Çimentoya ait kimyasal analiz sonuçları, standartlar ve kimyasal bileşenleri.

Oksit (%)	Cem II	Standartlar		Kimyasal Bileşenler	
		TS EN 197-1		Bileşen (%)	Cem II
SiO ₂	20.98			C ₃ S	49.19
Al ₂ O ₃	6.25			C ₂ S	4.91
Fe ₂ O ₃	3.19			C ₃ A	5.62
CaO	59.74			C ₄ AF	9.38
MgO	1.43			Fiziksel Özellikleri	
SO ₃	3.01	<4		Özgül Ağırlık	3.09
K ₂ O	0.44			Priz Başlangıç	02:45
Na ₂ O	0.56			Priz Sonu	03:10
Na ₂ O (eşd.)	0.85			Blain Yüzey (g/cm ²)	4,692
Cl ⁻	0.0166	<0.1		Mekanik Özellikler [Bas. Day. (MPa)]	
				Standart değerler	Ölçülen değerler
KK	4.51	<5		2 gün min. 20	26
Çözünmeyen Kalıntı	-	<5		7 gün	
				28 gün min. 42.5	47.9

Çizelge 3. Öğütülen (5-15 dk) uçucu külün orijinal kül yerine ilave edildiği karışım miktarları.

Çimento tipi		CEM II				
Çimento-Kül Oranı (ağırlıkça, %)		25-75				
Orijinal kül yerine ikame edilen öğütülmüş kül oranı (%)		5	10	20	40	100
Öğütme Dakikası (dk)	5				•	•
	15	•	•	•		•
Kür Süresi (Gün)	2	✓	✓	✓	✓	✓
	7	✓	✓	✓	✓	✓
	28	✓	✓	✓	✓	✓

Numunelerin hazırlanmasında 20 lt kapasiteli çimento mikseri kullanılmıştır (Şekil 2). 1.5 HP motor gücünde olan mikserin karıştırma aparatı 3 farklı devir hızına (84/145/352 dev/dk) sahiptir. Karışım malzemesi ilk önce demir bir çubuk yardımıyla karışım kovası içerisinde karıştırıldıktan sonra makineye yerleştirilmiştir. Ön karışımı sağlanan malzemeler karıştırma makinesi içerisinde 5-6 dk karıştırıldıktan sonra numune kalıplarına yerleştirmek üzere çıkarılmıştır. Bütün numuneler sabit bir kıvamda (20 cm çökme değeri) yapıldığından bu kıvamı yakalamak için ilave olarak yeteri miktarda su, gözleme dayalı olarak eklenmiştir. Karışım sonrasında malzemeler 50x50x50 mm'lik küp numune kalıplarına doldurulmuştur. Sonrasında nemli bir ortamda 1 gün bekletilen numuneler kalıplarından çıkartıldıktan sonra en az %90 nem oranına ve yaklaşık 20-22 °C hava şartlarına sahip numune saklama dolabında gerekli görülen kür süresi kadar bekletilmiştir.

2.2.2 Taze ve Sertleşmiş Numunelere Yapılan Deneysel Çalışmalar

Taze numunelere karışımın kıvamını belirlemek için çökme (slump) deneyi ve karışımın priz başlangıç-bitiş sürelerini belirlemek için ise vikat deney aleti ile priz

süresi tayini deneyi yapılmıştır. Betonda kıvam belirlemek için standartlarda bulunan taze beton deneyleri kapsamında TS EN 12350-2 (2010)'a göre deney yapılmıştır. Priz başlangıç-bitiş süresi için ise TS EN 13409 (2005) Priz Süresi Tayini deney metodu ile otomatik vikat aleti kullanılarak yapılmıştır. Priz süreleri vikat haznesine yerleştirilen malzemeye vikat iğnesinin 10 dk aralıklarla batmasıyla ölçülmüştür. 40 mm boyu olan vikat haznesine doldurulan taze karışımda iğnenin 4 mm (± 1) yukarıda kalmasıyla priz başlangıç, 0.5 mm'ye kadar girmesiyle de priz bitiş süresi hesaplanmıştır.



Şekil 2. Dolgu malzemeleri karıştırıcısı (a), çökme değeri ölçümü (b).

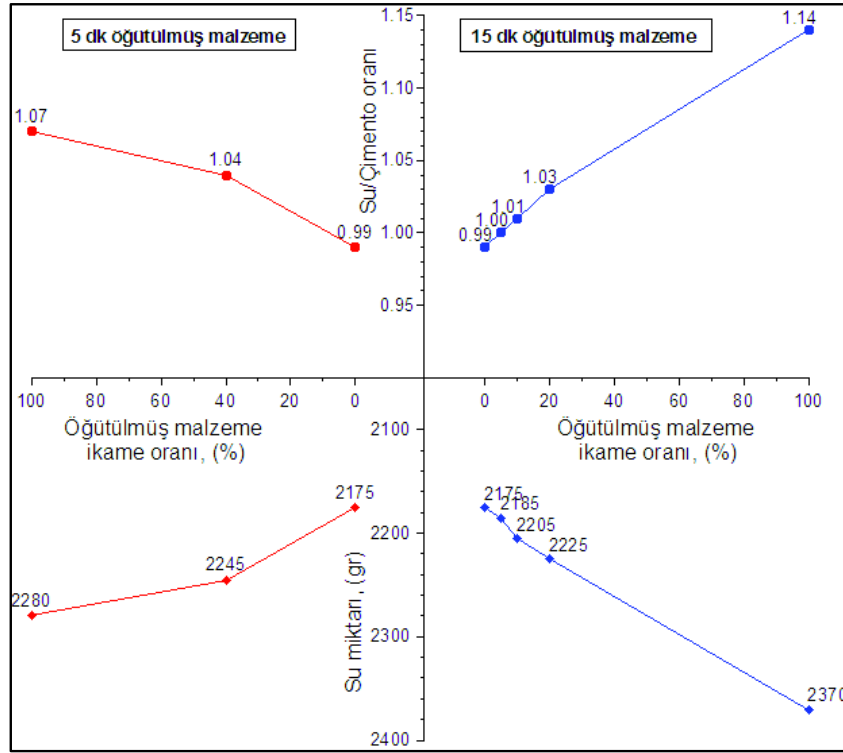
Taze karışım sonrasında oluşturulan numuneler kür ortamında belirlenen kür süresi (2, 7 ve 28 gün) kadar bekletilmiştir. Kür süresi sonunda numunelere tek eksenli basma dayanımı deneyi yapılarak sonuçları elde edilmiştir. Tek eksenli basma dayanım deneyi TS EN 196-1 (2002) Çimentolarda Dayanım tayini deney standartına göre yapılmıştır. Deney için kullanılacak numuneler 2400 (± 200) N/s yükleme hızı ayarlanan basma dayanım cihazına yerleştirilmiş ve tek eksenli basma dayanım deney sonuçları elde edilmiştir.

3 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

3.1 Malzeme İnceliğinin S/Ç Oranı ve Su Miktarına Etkisi

Laboratuar çalışmalarında 15 dk ve 5 dk öğütülen kül malzemesi dolgu karışımları içerisinde atık kül malzemesi yerine ikame olarak kullanılmış ve malzeme inceliğinin karışımın su miktarına ve S/Ç oranına etkisi belirlenmiştir (Şekil 3). 15 dk öğütülen kül sırasıyla %5, %10, %20 ve %100 olmak koşuluyla atık kül içerisinde ikame olarak kullanılmıştır. 5 dk öğütülen kül malzemesi ise sırasıyla %40 ve %100 ikame olacak şekilde kullanılmıştır.

Şekil 3'de malzeme inceliğinin dolgu karışımının su miktarına ve S/Ç oranına etkisini göstermektedir. Şekil incelendiğinde malzeme inceliği ile karışımda kullanılan su miktarının arttığı görülmektedir. %100 oranında atık kül yerine kullanılan 15 dk öğütülmüş kül dolgu karışımının S/Ç oranını 0,99'dan 1,14'e kadar yükseltmiştir. Yine aynı şekilde 5 dk öğütülen kül malzemesinin dolgu karışımı içerisinde %100 oranında atık kül yerine kullanıldığında karışımın S/Ç oranı 1,07'e yükselmiştir. Malzemenin inceltilmesiyle yüzey alanında artış sağlanmış ve daha fazla su ihtiyacı doğmuştur.

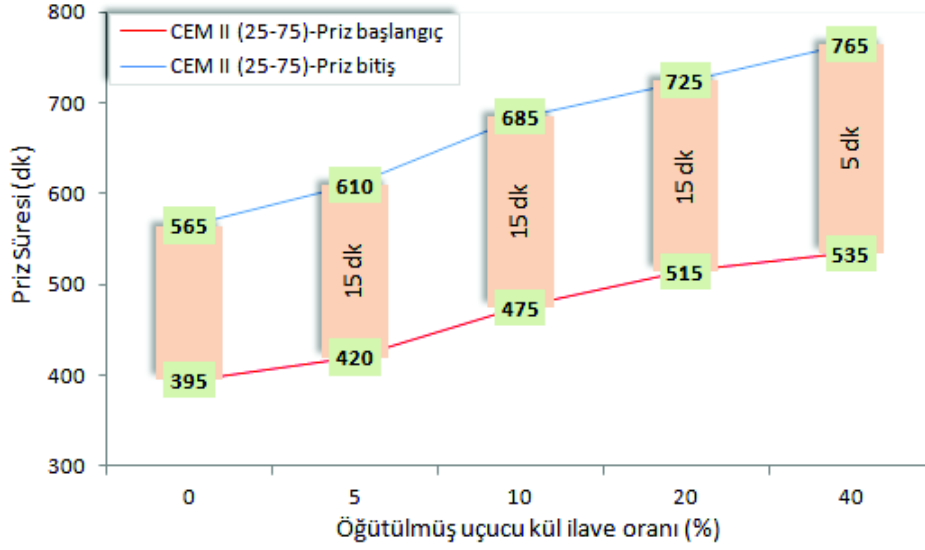


Şekil 3. Öğütülmüş kül malzemesi (15 dk ve 5 dk) ilave oranlarına bağlı olarak S/Ç ve su miktarı değişimleri.

Karışımında kullanılan su miktarlarına baktığımızda en yüksek kullanım değeri %100 ikame edilen inceltmiş kül malzemelerinin olduğu karışımlarda görülmüştür. Orijinal kül kullanılan karışımında 2,175 gr su kullanılmıştır. 15 dk öğütülen kül malzemesinin %100 ikame oranında kullanıldığında ise su miktarı 2,370 gr olmaktadır. 5 dk öğütülen malzemenin %100 kullanımında ise 2,280 gr olmaktadır.

3.2 Malzeme İnceliğinin Priz Sürelerine Etkisi

Öğütülmüş uçucu kül malzemesinin dolgu içerisinde kullanılan uçucu kül ile belirli oranlarda yer değiştirmesiyle priz süresine olan etkileri incelenmiştir. Malzeme inceliğinin priz sürelerine etkisinin grafiği Şekil 4’de gösterilmektedir. İnceliğin artmasıyla aynı kıvamda su ihtiyacının artması ve dolayısıyla S/Ç oranının artması sağlanmıştır. Bu artışla beraber çimentoların hidratasyon süresinde ve aynı zamanda priz süresinde bir uzamaya sebebiyet vermiştir. CEM II çimentosuyla gerçekleştirilen deneylerde orijinal kül kullanılan numunelerin priz başlangıç süreleri 395 dk olarak gerçekleşmiştir. 15 dk öğütülmüş külün atık kül içerisinde %5’lik ilavesi sonrasında ise priz başlangıç süresi 420 dk olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte %10 ve %20 ilaveleri sonrasında priz başlangıç süreleri sırasıyla 475 ve 515 dk olarak gerçekleşmiştir. 5 dk öğütülmüş külün %40 ilavesinde ise priz başlangıç süresi 535 dk olarak gerçekleşmiştir. Her iki öğütme dakikasında (5-15 dk) inceliği artırılan küllerin %100 ilave oranlarında ise kullanılan su miktarının fazlalığından dolayı 900 dakikaya kadar ölçüm yapan vikat deney aletinde priz başlangıç ve bitiş süreleri elde edilememiştir. Bu numunelerde su kullanımı sırasıyla 2,280 ve 2,370 gr olmuştur. Dolgu numunesi içerisinde su hacminin artması, katı ve bağlayıcı malzeme oranının düşmesi kıvamın aynı olmasına rağmen priz sürelerine olumsuz etki etmiştir.



Şekil 4. Öğütülmüş külün (5 ve 15 dk öğütülmüş malzeme) dolgu içerisinde atık malzeme yerine ikame kullanımının priz süresine etkisi.

Malzeme inceliğinin priz süresine olan etkileriyle ilgili veriler Çizelge 4’de görülmektedir. İnceliğin artmasıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri arasındaki fark atmıştır. Orijinal külün kullanıldığı numunelerde priz süreleri arasındaki fark 170 dk iken 15 dk öğütülmüş malzemede bu fark %5 ikame kullanım oranında 190 ve %10 ve %20 ikame oranlarında 210 dk’ya çıkmıştır. 5 dk öğütülmüş malzemede ise %40 ikame kullanım oranında ise 230 dk seviyelerine çıkmıştır. İnceliğin artmasıyla aynı zamanda priz başlangıç süreleri de uzamıştır. 15 dk öğütülmüş malzemeden %5 ilave oranında kullanıldığında priz başlangıcındaki uzama miktarı değişimi %6, %10 kullanımında %19 ve %20 kullanımında ise %29 şeklinde gerçekleşmiştir. Aynı şekilde 5 dk öğütülmüş malzemenin %40 ikame oranında kullanılmasıyla priz süresinde %35’lik bir uzama gerçekleşmiştir.

Çizelge 4. Öğütülmüş malzemenin farklı oranlarda kullanımı ile dolgu priz sürelerinin değişimi.

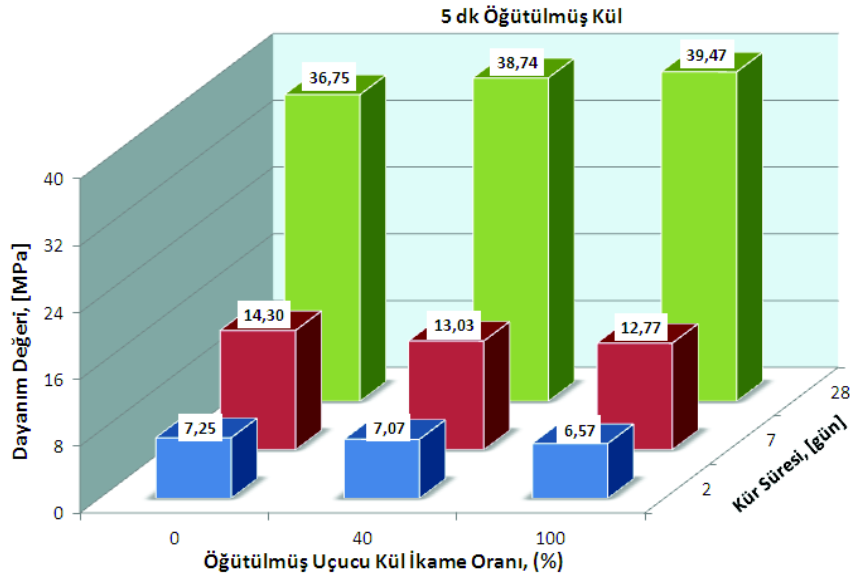
Karışım Tipi	Kullanılan Çimento CEM II				
	Priz Süresi (dk)				
İlave Oranı	Başlangıç, [A]	Bitiş, [B]	Fark, [C]	Artma Miktarı, [D]	Artma Yüzdesi, [E]
15 dk öğütülmüş					
İlave Oranı (%0) [1]	395	565	170	0	0%
İlave Oranı (%5) [2]	420	610	190	25	6%
İlave Oranı (%10) [3]	475	685	210	80	19%
İlave Oranı (%20) [4]	515	725	210	120	29%
5 dk öğütülmüş					
İlave Oranı (%0) [1]	395	565	170	0	0%
İlave Oranı (%40) [2]	535	765	230	140	35%

$$[C_{1,2,3,4}] = [(B_{1,2,3,4}) - (A_{1,2,3,4})], \quad [D_{1,2,3,4}] = [(A_{1,2,3,4}) - (A_1)], \quad [E_{1,2,3,4}] = [(D_{1,2,3,4}) / (A_1)] * 100$$

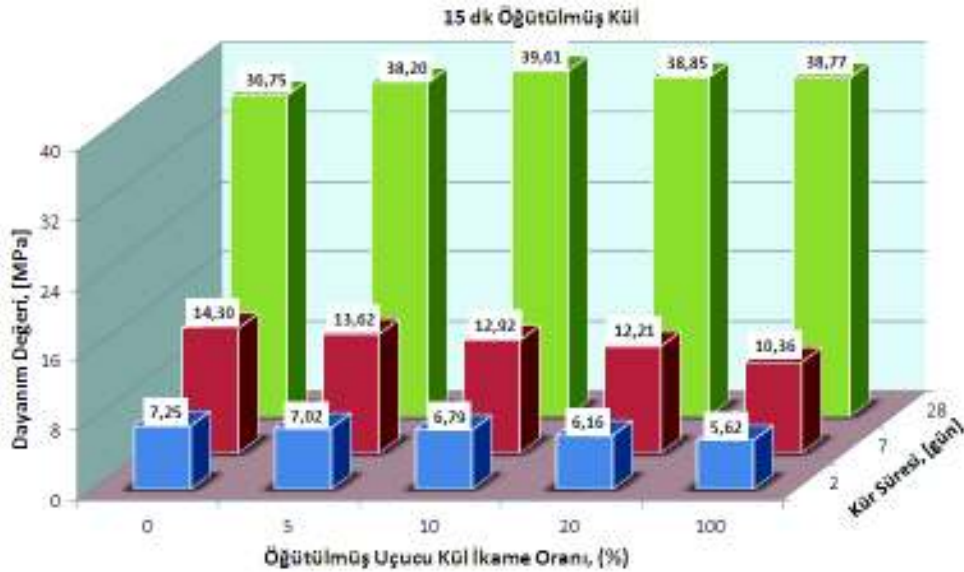
Malzemelerin inceliğinin artmasıyla puzolanik özelliklerinin arttığı bilinmektedir (Toutanji vd. 2004). Bu durumda uçucu kül inceliği dayanıma olumlu etki etmektedir. Ancak puzolanik aktivite deneylerinde su hacmi sabit tutulup çimento yerine kül ilave edilmektedir. Dolgu karışımlarında ise malzemelerin inceliğiyle beraber karışımın su ihtiyacında bir artma meydana gelmekte ve priz sürelerinin uzamasına temel etken olmaktadır. Pan vd. (2003) çalışmasında inceliğinin artmasıyla sabit S/Ç oranında priz sürelerinin uzadığını belirtmiştir.

3.3 Malzeme İnceliğinin Dayanıma Etkisi

5 dk ve 15 dk öğütülmüş uçucu kül malzemelerinin dolgu karışımlarının içerisinde orijinal uçucu kül yerine ilave edildiğinde kısa ve uzun dönemli dayanıma etkileri Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla görülmektedir.



Şekil 5. Öğütülmüş (5 dk) malzemenin dayanıma etkisi.



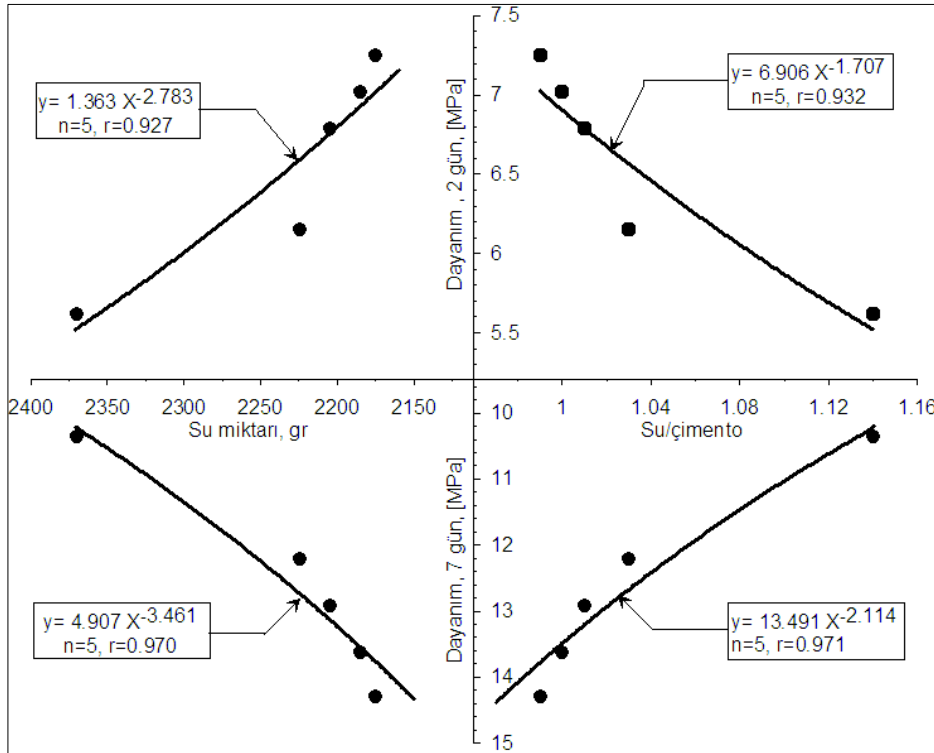
Şekil 6. Öğütülmüş (15 dk) malzemenin dayanıma etkisi.

Öğütülmüş malzemelerde yüzey alanın artmasıyla aynı kıvamda oluşturulan karışım daha fazla suya ihtiyaç duymuştur. Öğütülmüş malzeme ilavelerinde fazla suyla oluşturulan numunelerin 2 ve 7 günlük dayanıma etkileri S/Ç oranının da artmasıyla düşmüştür (Şekil 5). 2 ve 7 günlük kür sürelerinde en yüksek dayanım değeri orijinal kül ile hazırlanan karışımlara ait olup sırasıyla 7.25 MPa ve 14.30 MPa olarak ölçülmüştür. 5 dk öğütülmüş külün %40 ilave edildiği karışımın 2 günlük dayanım değeri 7.07 MPa iken 7 günlük dayanım değeri 13.03 MPa değerindedir. %100 ilave edildiği karışımın ise 2 günlük dayanım değeri 6.57 MPa iken 7 günlük dayanım değeri ise 12.77 MPa olarak ölçülmüştür. Malzemelerin su ihtiyaçları öğütülmüş malzeme kullanılmayan karışımda 2,175 gr, 5 dk öğütülmüş malzemedan %40 ilave oranında kullanılan numunede 2,245 gr ve %100 ilave oranında kullanılan numunede 2,280 gr olmuştur. Aynı şekilde S/Ç oranları ise sırasıyla 0.99, 1.04 ve 1.07 olarak gerçekleşmiştir. Karışımlarda artan su miktarı dayanıma kısa kür sürelerinde olumsuz etkilemiştir. Ancak öğütülmüş uçucu kül kullanımının uzun dönemli dayanımda etkileri olumlu olmuştur. Öğütmeyle küldde sağlanan tane inceliği karışım içerisinde su ve hidrasyon sonucu oluşan boşlukların doldurulmasına etki etmiştir. Bu sayede daha kompakt bir numune elde edilmiştir. Uzun dönemli (28 günlük) kür süresi irdelendiğinde orijinal kül ile yapılan karışımın dayanım değeri 36.75 MPa iken 5 dk öğütülmüş külün %40 ilave edildiği karışımın 38.74 MPa ve %100 ilave edildiği karışım 39.47 MPa'dır. İnceltmiş malzeme ilave oranının artmasıyla dayanım değerinin 28 günlük kür süresinde arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 6'da 15 dk öğütülmüş külün dolgu içerisinde orijinal kül yerine ikame olarak kullanıldığında dayanıma olan etkisi incelenmiştir. Öğütme dakikası arttığında malzemenin inceliği ve yüzey alanı artmaktadır. Öğütülmüş kül ilave edilen karışımlarda aynı kıvamda malzeme oluşturulduğunda daha fazla miktarda suya ihtiyaç duyulmaktadır. Fazla miktarda kullanılan su kısa süreli (2 günlük) dayanım değerlerini olumsuz etkilemiştir. Orijinal kül ile oluşturulan numunede kullanılan su miktarı 2,175 gr iken 15 dk öğütülmüş ve %5 ilaveli numunede 2,185 gr, %10 ilaveli numunede 2,205 gr, %20 ilaveli numunede 2,225 gr ve %100 ilaveli numunede ise 2,370 gr'dır. Sırasıyla S/Ç oranları ise orijinal kül ile oluşturulan numunenin 0.99, öğütülmüş kül ilaveli numunelerin ise 1.00, 1.01, 1.03 ve 1.14'tir. Şekil 6'da 2 günlük kür süresi incelendiğinde en yüksek dayanım değeri orijinal kül ile oluşturulan numuneden 7.25 MPa ile elde edilmiştir. Öğütülmüş kül ilave oranlarından ise en yüksek dayanım 7.02 ile %5 ilaveli numuneden elde edilmiştir. Öğütülmüş uçucu kül ilave oranı arttıkça dayanım değeri düşmektedir. En düşük dayanım %100 ilaveli numuneden 5.62 MPa değeri ile elde edilmiştir. Yine 7 günlük kür süresinde en yüksek dayanım orijinal kül ile yapılan numuneden 14.30 MPa dayanım değeri ile elde edilmiştir. Öğütülmüş malzeme ilave oranlarında en yüksek dayanım ise %5 ilaveli numuneden 13.62 MPa değeri ile elde edilmiştir. Öğütülmüş malzemenin ilave oranı arttıkça dayanım değeri 7 günlük kür süresinde de düşmektedir. En düşük dayanım değeri %100 ilave oranında 10.36 MPa değeri ile elde edilmiştir. Numunelerin uzun dönemli (28 gün) dayanım değerleri incelendiğinde durum kısa süreli (2-7 gün) numunelerden farklılık arz etmektedir. Bu kür süresinde en yüksek dayanım değeri öğütülmüş malzemedan %10 ilave oranında kullanılan numuneden 39.61 MPa değeri ile elde edilmiştir. Diğer ilave oranlarında değerler birbirine yakın çıkmıştır ve bütün ilave oranlarında dayanım değeri orijinal kül ile yapılan numuneden yüksek çıkmıştır.

Uçucu kül malzemesinin çimento ve beton karışımı gibi malzemelerde ikame olarak kullanıldıklarında inceliğinin artmasıyla uzun dönemli kür sürelerinde dayanımı arttırıcı etki ettiği yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (Kiattikomol vd. 2001, Chindaprasirt vd. 2005, Yazıcı ve Arel 2012). İnceliğin artmasıyla beraber karışım içerisinde oluşan mikro boşluklar bu malzemeler tarafından doldurulmaktadır. Bunun sonucunda daha kompakt bir numune elde edilmesi sağlanmaktadır.

Uçucu küllerin öğütülmesi (15 dk) sonrasında S/Ç oranı, kullanılan su miktarları ve 2-7 gün dayanım değerleri arasında korelasyonlar kurulmuştur. 15 dk öğütülmüş külün %0-5-10-20-100 ilave oranları sonrasında S/Ç oranı-su miktarı ve 2-7 gün dayanım değerleri arasındaki ilişki Şekil 7’de verilmiştir. Şekilde kullanılan su miktarı ve aynı zamanda S/Ç oranı artarken dayanım değerinin düştüğü görülmektedir. Su miktarı ve dayanım değerleri arasında, S/Ç oranı ve dayanım değerleri arasında 5 numune verisine dayanarak yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir ($r > 90$). Bunun sonucunda değişkenler arasında çok kuvvetli bir ilişkinin var olduğu belirlenmiştir. Uzun dönemli dayanımlardan sadece 28 günlük dayanım değeri belirlendiğinden su/miktarı-S/Ç oranı ve dayanım değerleri arasında herhangi bir ilişki tespiti yapılmamıştır.



Şekil 7. 5 dk öğütülmüş malzeme kullanılan numunelerde S/Ç oranı ve su miktarına bağlı olarak 2 ve 7 günlük dayanım değişimi.

4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada uçucu kül inceliğinin yeraltı dolgusundaki etkileri incelenmiştir. Bu inceleme sonrasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Uçucu kül inceliğinin artmasıyla karışımların aynı kıvamda su ihtiyaçları artmıştır. Öğütülmüş malzeme ilave oranının artmasıyla da su ihtiyacının arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek su ihtiyacı 15 dk öğütülmüş malzemenin %100 ilave edildiği karışımda gözlemlenmiştir ve S/Ç oranı 1.14 olarak ölçülmüştür. 5 dk öğütülmüş malzemenin %100 ilavesiyle S/Ç oranı 1,07 seviyesinde gerçekleşmiştir.
- Dolgu karışımlarının priz süreleri öğütülmüş kül ilavesiyle uzadığı gözlemlenmiştir. 15 dk öğütülmüş külün %20 ilavesiyle priz başlangıç süresinin %29 oranında uzadığı belirlenmiştir. Öğütülmüş küllerin her ikisinin %100 ilave oranlarında kullanımlarında priz süreleri ölçülemezdir. Bu karışımlarda S/Ç oranı 5 dk için 1.07 ve 15 dk için 1.14 olarak belirlenmiştir.
- Öğütülmüş küllerin ilavesiyle karışımların erken dayanım (2-7 gün) değerleri düşmüştür. Ancak uzun dönemli dayanım değerlerinde öğütülmüş malzemelerin bütün ilave oranlarında bir artış söz konusudur. En yüksek dayanım değeri 15 dk öğütülmüş külün %10 ilave edildiği karışımdan 39.61 MPa olarak ölçülmüştür.

Öğütülmüş malzemelerin dolgu karışımları içerisinde dayanıma olan etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için daha uzun kür sürelerinde numuneler oluşturulması ve dayanım değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca numunelerin mikro yapıdaki boşluk oranlarının analiz edilerek malzeme inceliğinin boşluk doldurma etkisinin ortaya çıkartılması gerekir.

5 KAYNAKLAR

- Aiqin, W., Chengzhi, Z., Wei, S. 2003. Fly Ash Effects: I. The Morphological Effect of Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, 3, pp. 2023–2029.
- Aruntaş, H. Y. 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniv. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, 1, pp. 193-203.
- ASTM, C618-05 2005. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, Annual Book of ASTM Standards.
- Avcı, S. 2005. Türkiye’de Termik Santraller ve Çevresel Etkileri, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü, *Coğrafya Dergisi*, İstanbul, 13, pp. 1-26.
- Benzaazoua, M., Belem, T., Bussière, B. 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill, *Cement and Concrete Research*, 32, pp. 1133-1144.
- Benzaazoua, M., Fall, M., Belem, T. 2004. A Contribution To Understanding The Hardening Process Of Cemented Pastefill, *Minerals Engineering*, 17, 2, pp. 141–152.
- Blissett, R. S., Rowson, N. A. 2012. A Review of The Multi-Component Utilization of Coal Fly Ash, *The Science and Technology of Fuel and Energy*, 1, pp. 1-23.
- Brakebusch, F. W. 1994. Basics of Paste Backfill Systems, *Mining Engineering*, 46, pp. 1175-1178.
- Chindapasirt, P., Chai, J., Sinsiri, T. 2005. Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, 27, pp. 425–428.
- Çavuşoğlu, İ. 2008. Uçucu Küllerin Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması: Örnek Bir Uygulama (Çayırhan), *Madencilik Dergisi*, 47, 3, pp. 3-13.
- Çavuşoğlu, İ., Yılmaz, A. O., Çapık, M. 2013. Uçucu Küllerin Maden Dolgularında Kullanım Biçimleri, 23. *Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, s. 1055-1062, Antalya.
- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, İ. 2009. Utilization of Industrial Waste Products as Pozzolanic Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 2–3, pp. 848-856.

- Erçikdi, B. 2009. *Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi*, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 124 s.
- Erdoğan, T. Y. 1997. *Admixtures for Concrete*, Middle East Technical University Press, Ankara, 188 s.
- Hassani, F. P., Ouellet, J., Hossein, M. 2001. Strength Development in Underground High Sulphate Paste Backfill Operation, *CIM Bulletin*, 94, pp. 57-62.
- Karapınar, N. 2009. Maden Atık Yönetimi; Macun Teknolojisi Kullanımı, *Madencilik Dergisi*, 48, 1, pp. 31-42.
- Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., Chutubtim, S. 2001. A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Fineness from Various Sources as Pozzolanic Materials, *Cement and Concrete Composites*, 23, pp. 335-343.
- Meegoda, J. N., Gao, S., Al-Joulani, N. M. A., Hu, L. 2011. Solid Waste and Ecological Issues of Coal to Energy, *Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste*, 15, 2, pp. 99-107.
- Mishra, M. K., Karanam, U. M. R. 2006. Geotechnical Characterization of Flyash Composites for Backfilling Mine Voids, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 6, pp. 1749-1765.
- Özel, C. 2007. *Katkılı Betonların Reolojik Özelliklerinin Taze Beton Deney Yöntemlerine Göre Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, 249 s.
- Pan, S. C., Tseng, D. H., Lee, C. C., Lee, C. 2003. Influence of The Fineness of Sewage Sludge Ash on The Mortar Properties, *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 1749-1754.
- Toutanji, H., Delatte, N., Aggoun, S., Duval, R., Danson, A. 2004. Effect of Supplementary Cementitious Materials on The Compressive Strength and Durability of Short-Term Cured Concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 311-319.
- TS EN 12350-2, 2010. *Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 13409, 2005. *Perdah ve/veya Tesviye İşlerinde Kullanılan ve Hidrolik Priz Alabilen Bileşiklere Uygulanacak Deney Metotları - Priz Süresinin Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1, 2002. *Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. *Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450-1/A1, 2008. *Uçucu Kül - Betonda Kullanılan - Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Yazıcı, S., Arel, H. 2012. Effects of Fly Ash Fineness on The Mechanical Properties of Concrete, *Sadhana*, 37, 3, 389-403.
- Yılmaz, E. 2003. *Sülfür İçeren Maden Atıklarından Hazırlanan Çimentolu Macun Dolgu Örneklerinin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 117 s.

ÖĞÜTÜLEBİLİRLİĞİN KÖMÜR GÖMÜLME DERİNLİĞİNE BAĞLI OLARAK DEĞİŞİMİ

VARIATION OF COAL GRINDABILITY WITH BURIAL DEPTH

S. Albayrak
TTK Kozlu TİM, Zonguldak

S. Kızgut, D. Çuhadaroğlu, S. Yılmaz, B. Akkaya, M. Bilen
Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET: Bir malzemenin öğütülmesine birçok faktör etki eder. Sertliği çok yüksek olan (örnek olarak kuvars verilebilir) bir malzemenin öğütülebilirliği çok kolay olabilir veya tersi olarak sertliği düşük (örnek olarak linyit verilebilir) bir malzemenin öğütülebilirliği daha zor olabilir. Kömür öğütülebilirliği değişik ranktaki kömürlerin göreceli sertliklerinin ufalama sırasındaki derecelenmesinde önemlidir. Öğütülebilirlik çoğunlukla HGI kullanılarak ilişkilendirilmiştir. Öğütülebilirlik madencilik faaliyetlerinde, düşük HGI daha yüksek enerji gerektirdiği için önemlidir. Öğütülebilirliğin kömürlerin gömülme derinliklerine bağlı olup olmadığını anlamak üzere Batı Karadeniz Taşkömür Havzası Amasra bölgesi kömürlerinden numuneler alınmış ve farklı derinliklere ait bu numunelerin HGI analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucu örneklerin orjinal HGI değerleri 52.81 ile 79.26 arasında değişmekte olup, yüzen örneklerde bu değerler 45.30 ile 73.52 arasında değiştiği belirlenmiştir.

ABSTRACT: Many factors affect grinding of materials. Grindability of tough material (for example quars) can be easy but grindability of material which has lower toughness (for example lignite) can have hard grindability. Coal grindability is important at sorting different crushability of coals regarding relatively tough coals at different ranks. Grindability of coals mostly can be understood with HGI. Grindability in mining facilities is important due to the fact that lower HGI values of coals need more energy to be grinded. Samples are taken from Amasra region of West Black Sea Pit Coal Basin to understand whether grindability of coals is related to burial depth of coals or not. Samples which have different burial depth are analyzed and their HGI values are obtained. HGI values of original samples are between 52.81 and 79.26 and HGI values of floating samples change between 45.30 and 73.52.

1 GİRİŞ

Kömür, gerçekte değişik oranlarda organik ve inorganik yapıcı ve bileşenler içeren tortul bir kayaç olarak tanımlanmaktadır. Ana elemanı karbondur ve karbonun yanı sıra hidrojen, oksijen ve azottan oluşan, kükürt ve mineral maddeler içeren, fiziksel ve kimyasal olarak farklı yapıya sahip bir maddedir. Bu nedenle oluşumu karbon çevrimine çok bağlıdır. Kömür çevrimi bataklıklarda başlar. Kömürleşmenin başlıca kaynakları bitkiler, havadan veya yüzeysel sulardan alınan CO₂'dir. Doğada; yapı, doku, bileşenler ve köken açısından birbiriyle tam anlamda özdeş iki kömür oluşumuna rastlamak hemen hemen olanaksızdır.

2011 yılı rakamlarıyla, üretilen taşkömürünün (967 milyon ton koklaşabilir ve 5,670 milyar ton buhar kömürü olmak üzere toplam 6,637 milyar ton) ~%11'i (717 milyon t) ve ticarete konu taşkömürünün (1,137 milyar ton) ise ~%24'ü (276 milyon ton) demir çelik endüstrisinde kullanılmaktadır.

Yüksek fırın teknolojisinde 1 ton çelik üretimi için 770 kg kömür gerekmektedir. 1 ton pulverize enjeksiyon kömürü (PCI) 1.4 ton koklaşabilir kömüre karşı düşmektedir. Ark fırınları teknolojisiyle hurdadan çelik üretiminde ise; ark fırınlarında kullanılan elektriğin büyük kısmı termik santrallerden geldiği için; 1 ton çelik üretiminde de 150 kg kömür gerekeceği hesaplanmaktadır (WC 2011-2012).

Zonguldak Havzası 150 yıldan fazla bir süredir kömür madenciliği yapılan ve ülkemizin taşkömürü üretilen tek bölgesidir. Bu süreçte yaklaşık olarak toplam 430 milyon ton satılabilir kömür üretimi yapılmıştır (1865–2010).

Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda; Kozlu, Üzülmez ve Karadon bölgelerinde koklaşabilir, Armutçuk bölgesinde yarı koklaşabilir ve Amasra bölgesinde koklaşma özelliği bulunmayan rezervler mevcuttur. Havzada -1,200 m derinliğe kadar tespit edilmiş jeolojik rezerv 1.34 milyar ton'dur.

2 ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK

Bir malzemenin öğütülmesine birçok faktör etki eder. Sertliği çok yüksek olan örneğin kuvars gibi bir malzemenin öğütülebilirliği çok kolay olabilir veya tersi olarak sertliği düşük örneğin linyit gibi bir malzemenin öğütülebilirliği daha zor olabilir. Öğütülebilirlik, malzemenin öğütme işlemine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Öğütülebilirliğin belirlenmesinde sıklıkla “Bond İş İndeksi (BWI)” ve “Hardgrove Öğütülebilirlik İndeksi (HGI)” kullanılmaktadır. Kömürlerin özellikle pulverize yakıt olarak kullanımında, öğütülebilirliğinin belirlenmesi Hardgrove Grindability Index (HGI) ile yapılır (Mcintyre ve Plitt 1980).

HGI'nın belirlenmesi için yapılan deneysel yöntem pahalı bir yöntem olmamasına rağmen, ölçümü fazla bir zaman gerektirmektedir. Bu nedenle araştırmacılar HGI'yi kısa analiz, petrografik bileşim ve yansıtma ölçümü kullanarak tahmin etmeye çalışmaktadırlar.

Genellikle kömürün öğütülebilirliğini belirlemek için kullanılan standart HGI belirleme yönteminde -1,190+590 µm arasına sınıflandırılmış malzeme kullanılır ve

çapı 25.4+/-0.13 mm olan 8 bilye arasında malzeme 3 dakika boyunca 20+/-1 devirde rulmanlarında döndürülür.

Değirmen 60 devir dakikayla döner. Değirmenden elde edilen ürün eleklenir ve 74 µm altında malzeme elde edilir ve aşağıdaki eşitlikte 74 µm altına geçen malzeme miktarı gram olarak yazılarak HGI değeri belirlenir.

$$HGI = 13 + 6.93 D_{74} \quad (1)$$

Burada, $D_{74} = 74$ µm den geçen malzeme (gr) miktarıdır.

Kömürler, öğütülebilirlikleri bakımından HGI değerlerine göre Çizelge 1'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 1. Kömürlerin öğütülebilirlikleri bakımından HGI değerlerine göre sınıflandırılması.

HGI	Öğütülebilirlik Özelliği
HGI < 50	Zor öğünen kömür
50 < HGI < 70	Orta öğünen kömür
HGI > 70	Kolay öğünen kömür

Yüksek HGI'ya sahip kömürler bazen kullanım dışı olabilmektedir. Kırma, öğütme ve kömür taşınması kömürden yayılan tozla ilişkilendirilmektedir. HGI aynı zamanda madencilikteki toz oluşumu ile doğrudan ilişkilidir (Baffi ve Ramani 1979, Moore ve Bise 1984, Bagherieh vd. 2007).

İş indeksi ise cevherin öğütülebilirlik özelliklerine bağlı olup değirmenlerin boyutlandırılmasında enerji tüketimi hesaplamalarında, öğütme devrelerinin verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan bir üretim parametresidir. BWI da bir boyuttan daha ince olan malzeme miktarının üretimi için gerekli olan enerji ölçülür (Bond ve Maxon 1938, Bond 1947-1961).

Kömürün öğütülebilirliği kompleks bir özellik olup kömürün sertliği, dayanım, kırıklılık (fracture), sağlamlık (tenacity) gibi özelliklerine bağlıdır. Bütün bu özelliklerin petrografik bileşim, kömür rankı, mineral dağılımı ve kömür litolojisi ile yakından ilgili olduğu Hower tarafından (1998) ifade edilmektedir.

Trimble ve Hower (2002) tarafından yapılan çalışmada kömür petrografisi ile HGI öğütme özellikleri incelenmiştir. Kullanılan kömürler dar bir aralıktaki yansıtma değerlerinden seçilmiş böylelikle rank etkisi minimuma indirilmiştir. Bu çalışmada vitrinitçe ve mineralce zengin tekli ve ikili litotiplerin HGI'nın tahmininde olumlu etki yaptığı bulunmuştur. Çalışmada 0.75–1 arasında R_{max} 'a sahip kömürler seçilmiştir.

Özbayoğlu vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada 163 alt bitümlü kömür 11 özellik açısından incelenmiştir. Bu özellikler Nem, Kül, Uçucu Madde ve Sabit Karbon gibi kısa analizler, petrografik analiz, (hüminit, liptinit, inertinit, R_{max}) kuvars içeriği ve diğer mineral içeriği olup, lineer regresyon yapılmıştır, burada tahmin edilen ve gerçek değer arasındaki fark 6.54 olarak bulunmuştur. Farkın büyük olmasından

dolayı lineer regresyon bırakılmış nonlinear regresyon yapılmış fark 5.46 olarak bulunmuştur.

Bagherieh vd. (2007) çalışmalarında Özbayoğlu vd. (2007) gibi kömür petrografik bileşimi (vitrit, liptinit, inertinit) R_{max} , sülfür ve kül içeriğini HGI ile ilişkilendirmeyi yapay nöral ağ (artificial neural network) kullanarak yapmaya çalışmışlardır. HGI'nin liptinit içeriği artışı ile azaldığı vitrit içeriği ile arttığını belirlemişlerdir. Kül içeriği ve HGI arasında bir eğilim bulunamamıştır. Aynı durum sülfür için de geçerlidir. Bu durum sülfürün organik veya inorganik olmasından kaynaklanabilir.

Chelgani vd. (2007) çalışmalarında kömürün öğütülebilirliğini, petrografi, kısa ve uzun analiz değerlerini çoklu regresyon (multiple regration) ve yapay nöral ağ modelleri kullanarak ilişkilendirmişlerdir.

Jorjani vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada Kentucky kömürünün öğütülebilirliği, kömürün petrografik bileşim ve elementel analiz sonuçları ile ilişkilendirilmiştir. Araştırma çok değişkenli regresyon analiz yöntemi (multivariable regression method) kullanılarak yapılmıştır. Bu işlemde maseral kompozisyonu kül, nem ve elementel analiz sonuçları HGI ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. TiO_2 ve Al_2O_3 artışının HGI'yı düşürdüğü, Fe_2O_3 artışının HGI'yı artırdığı görülmüştür. Mikrit ve eksinit artışı ile HGI'nin düştüğü, vitrit artışı ile HGI'nin arttığı belirlenmiştir. Mineral bileşiminin kül içeriğine göre HGI ile daha iyi ilişkilendirilebileceği görülmüştür.

Ural ve Akyıldız (2004) çalışmalarında çözünebilir mineral madde içeriği ile HGI arasında bir ilişki olduğunu ifade etmektedirler.

Ateşok et al. (2005) yaptığı çalışmada çeşitli ranka sahip kömürlerin anyonik dağıtıcı kullanılarak öğütülebilirliği incelenmiştir. Başlangıçta benzer boyut dağılımına sahip düşük ve yüksek ranklı iki kömürden düşük ranklısının daha kolay öğütüldüğü belirlenmiştir.

3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Numune

Kömür numuneleri, Batı Karadeniz Taşkömürü Havzası Amasra Bölgesi kömürlerinden 7 farklı derinliği temsilen alınan numuneler olup, No 1'den No 7'ye kadar kotlanmışlardır.

DeneySEL çalışmalar; kimyasal analizler, yüzdürme-batırma testleri ve HGI tayini için yapılan deneylerden oluşmaktadır.

Öğütülebilirliğin belirlenmesi için HGI deneyleri yapılmış, deneyler için standartta belirtildiği gibi -1.18+0.600 mm boyut gurubu malzeme hazırlanmıştır. HGI deneyleri hem boyutlandırılmış orijinal numuneler üzerinde, hem de mineral madde etkisinin azaltılması amacıyla yapılan 1.50 gr/cm³ yoğunlukta yüzdürme-batırma testlerinden alınan yüzen üründe (temiz kömürde) yapılmıştır. Yüzdürme işlemi kalsiyum nitrat

(Ca(NO₃)₂) ile hazırlanmış ağır ortamda yapılmıştır (çalışmalar TSE'nin hazırladığı TS 330, 690, 711, 1227 standartlarından yararlanılarak yapılmıştır).

3.2 Kimyasal ve Elementel Analizler

Öğütülebilirlik çalışmalarında mineral madde etkisinin azaltılması/giderilmesi amacıyla numunelere 1.50 gr/cm³ yoğunluklu ortamda yüzdürme-batırma testi yapılmıştır. Orijinal numunelerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Orijinal kömür numunelerinin analiz sonuçları (kuru bazda).

Numune	Derinlik (m)	K (%)	UM (%)	SK (%)	S (%)	ÜID (Kcal/kg)	AID (Kcal/kg)
No 1	66.05	30.73	32.47	36.80	1.80	4,720	4,496
No 2	138.05	17.74	40.12	42.14	3.70	5,890	5,624
No 3	276.88	57.37	19.90	22.73	0.63	2,810	2,672
No 4	302.55	36.71	26.67	36.62	0.67	4,240	4,035
No 5	362.38	10.14	35.26	54.60	0.57	6,590	6,299
No 6	423.30	12.18	36.40	51.42	0.76	6,340	6,055
No 7	665.05	27.52	28.80	43.68	1.34	5,330	5,095

K: kül, UM: uçucu madde, SK: sabit karbon, S: kükürt, Ü(A)ID: üst (alt) ısıl değer

Orijinal numunelerin analiz sonuçları incelendiğinde No 5 ve No 6 kotlu iki numunenin düşük kül içeriğine, No 4 kotlu numunenin oldukça yüksek kül içeriğine ve diğerlerinin ise %17-30 arasında değişen orta düzeyde kül içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum öğütülebilirlik çalışmalarında kömür yapısından çok bu inorganik kısımların etkisi olacağına bir göstergesi olmuştur. Uçucu madde, kükürt içeriğinin ve ısıl değerlerin kül içeriğine bağlı olarak rastgele bir değişim gösterdiği görülmüştür.

1.50 gr/cm³'de yüzen ürünlerin kimyasal analiz verileri Çizelge 3'de verilmiştir, yüzen ürünlerin kısa analiz yanı sıra organik elementel bileşimleri de belirlenmiştir.

Çizelge 3. 1.50 gr/cm³'de yüzen ürünlerin analiz sonuçları (kuru bazda).

Numune	K (%)	UM (%)	SK (%)	S (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
No 1	9.68	40.64	48.77	0.91	71.03	4.928	1.244	12.208
No 2	7.63	43.35	44.95	4.07	72.33	5.257	1.126	9.587
No 3	11.71	34.74	52.20	1.35	70.97	4.848	1.083	10.039
No 4	8.93	33.58	56.62	0.87	72.28	4.799	1.063	12.058
No 5	5.39	35.50	58.49	0.62	76.11	5.126	1.122	11.632
No 6	5.09	36.71	57.15	1.05	76.02	4.279	1.083	12.478
No 7	7.95	35.56	55.81	0.68	76.22	4.961	0.792	10.077

C: karbon, H: hidrojen, N: azot, O: oksijen

Bu sonuçlar incelendiğinde; kül içeriğinin %5.09–11.71 arasında değiştiği, uçucu madde içeriğinin örnek derinliğine bağlı olarak azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Kükürt içeriğinde orijinal numuneye göre yer yer önemli bir yükseliş meydana gelmiştir.

Organik elementel bileşim değerleri incelendiğinde; derinliğe bağlı olarak karbon içeriğinde bir artma eğilimi, azot içeriğinde bir azalma eğilimi olduğu, hidrojen ve oksijen içeriklerinde önemli bir farklılık olmadığı görülmüştür.

Kömürleşmeye bağlı olarak karbon içeriğinde meydana gelmesi gereken düzenli artış iki örnekte küçükte olsa bir sapma göstermiştir.

3.3 HGI Deneyleri

Başlangıçta örnek tanımlamaları ve öğütülebilirlik çalışmalarının yalnızca orijinal örneklerde yapılması planlanmıştır. Ancak orijinal örneklerin bir kısmının inorganik kısımlarının yüksek olması nedeniyle yapılan öğütülebilirlik çalışmalarında elde edilen değerlerin kömür yapısından çok mineral madde dağılımına bağlı olduğu belirlendiği için HGI deneyleri hem orijinal numunelerde hem de 1.50 gr/cm³ yoğunluklu ortamda yüzdürme-batırma testinden alınan yüzen ürünlerde yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Orijinal ve yüzen örneklere ait HGI değerleri.

Numune	HGI						
	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7
Orijinal	68.23	52.81	74.92	62.85	68.98	62.25	79.26
Yüzen	50.91	45.30	54.12	55.18	59.02	58.32	73.52

Orijinal numunelerde HGI değerlerinin 52.81–79.26 arasında değiştiği belirlenmiş ve HGI değerlerinin kömüre ait derinlik, karbon içeriği verilerinde değişimle bir bağı olmadığı görülmüştür.

Bu durumun kömürlerin kül (mineral madde) içeriğinin önemli ölçüde değiştiği göz önüne alınırsa beklenebilir bir durum olduğu söylenebilir. Nitekim Trimble ve Hower (2002) yaptıkları çalışmalarda mineral madde içeriği ve bileşiminin kömürlerin öğütülebilirliği üzerinde önemli etkisinin olduğunu ortaya koymuştur.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kömür örneklerinin kimyasal bileşim sonuçları incelendiğinde kömürlerin rankının HVB ve HVC arasında değiştiği görülmektedir.

Orijinal kömür örneklerinin kükürt içeriği %0.57–3.70 arasında değişirken, yüzen kömür örneklerinin kükürt içeriği %0.68–4.07 arasında değişmektedir. Uçucu madde içerikleri orijinal kömür örneklerinde kül içeriğine bağlı rastgele bir değişim göstererek %19.90–40.12 arasında değişirken, yüzen kömür örneklerinde %33.58–43.35 arasında değişerek derinlikle düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir. Kül içerikleri orijinal kömür numunesinde %10.14–57.37 arasında iken, yüzen kömür örneklerinde %5.09–11.71 arasında oldukça düşük değerlere sahiptirler.

Orijinal örneklerde HGI değerleri 52.81–79.26 arasında değiştiği saptanmıştır. Kömüre ait gömülme derinliği ve buna bağlı yansıtma, uçucu madde, elementel

bileşim göz önüne alındığında HGI değerleri, bunlara bağlı değişimle bir ilişki göstermemektedir.

Kül içeriğinin etkisinin kısmen giderilmesi ile, yani bu amaçla yapılan yüzdürme-batırma testlerinden alınan yüzen ürünlerde yapılan HGI deneylerinin sonuçlarına göre HGI değeri ile derinlikteki değişim arasında daha kuvvetli ilişki ortaya çıkmıştır.

Kömürleşme derecesi öğütmede önemli rol oynar. Ayrıca öğütmede kömür neminin de öğütülebilirliği zorlaştırdığı, petrografik yapı elemanları arasında da öğütülebilirlik farklılıkları olduğu da dikkate alınmalıdır.

Kömür örneklerinde mineral madde içeriği tür olarak da tanımlanmalıdır. Böylece yüzdürme-batırma işlemlerinde kömür davranışı hakkında daha kesin yargılara varılabilir.

Bölgenin jeolojik verileri ışığı altında, bölgenin bazı damarlarının tamamen veya kısmen aşınması, yayılımlarının değişmesi, kırılması ve kıvrılması dikkate alınarak, damarların dikeydeki değişimi kadar yataydaki değişimleri de incelenmelidir.

5 KAYNAKLAR

- Ateşok, G. 1986. *Kömür Hazırlama*, İTÜ Maden Fakültesi, Güney Matbası, İstanbul, 191 s.
- Ateşok, G., Özer, M., Boylu, F., Dinçer, H. 2005. The Effect of Anionic Dispersants on Grindability of Different Rank Coals, *International Journal of Mineral Processing*, 77, pp. 199–207.
- Bagherieh, A. H., Hower, J. C., Bagherieh, A. R., Jorjani, E. 2008. Studies of the Relationship Between Petrography and Grindability for Kentucky Coals Using Artificial Neural Network, *International Journal of Coal Geology*, 73, pp. 130–138.
- Chelgani, S. C., Hower, J. C., Jorjani, E., Mesroghli, S., Bagherieh, A. H. 2008. Prediction of coal Grindability Based on Petrography, Proximate and Ultimate Analysis Using Multiple Regression and Artificial Neural Network Models, *Fuel Processing Technology*, 89, pp. 13–20.
- Crelling, J. C. 2008. *Coal Macerals, Petrographic Atlas of Coals, Cokes Chars, Carbons, Graphites*, Coal Research Center of Department of Geology. Southern Illinois University. <http://mccay.lib.siu.edu/projects/crelling2/atlas.html>.
- DPT, 2006. *Taşkömürü Çalışma Grubu Raporu*, Enerji Hammaddeler Alt Komisyonu, Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
- ECE, 1988. *International Classification of Hard Coals by Types*. ECE/COAL/115, New York, USA, United Nations.
- Hardgrove, R. M. 1938. Grindability of Coal Trans, ASME, *Fuels and SteamPower FSP*, 54, 5, pp. 37–46.
- Jorjani, E., Hower, J. C., Chelgani, S. C., Shirazi, M. A., Mesroghli, S. 2008. Studies of Relationship Between Petrography and Elemental Analysis with Grindability for Kentucky Coals, *Fuel*, 87, pp. 707–713.
- Kural, O. 1988. Madencilik ve Kömür Üretiminin Gelişimi, *Kömür*, ed. O. Kural, s. 1–6.
- Özbayoğlu, G., Özbayoğlu, A. M., Özbayoğlu, M. E. 2008. Estimation of Hardgrove Grindability Index of Turkish Coals by Neural Networks, *International Journal of Mineral Processing*, 85, pp. 93–100.
- Suggate, R. P., Dickinson, W. W. 2004. Carbon NMR of Coals: The Effects of Coal Type and Rank, *International Journal of Coal Geology*, 57, pp. 1–22.

- Suiçmez, T. 2007. *Kömür Petrografik Bileşenlerinin Seçimli Olarak Ayrılması*, Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 63 s.
- Trimble, A. S., Hower, J. C. 2003. Studies of Relationship Between Coal Petrology and Grinding Properties, *International Journal of Coal Geology*, 54, pp. 253–260.
- Toroğlu, İ. 1990. *Amasra Bölgesi Kömürlerinin Değerlendirme Olanaklarının Araştırılması*, Doktora Tezi (yayınlanmamış), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 139 s.
- TS 330, 1966. *Maden Kömüründe Kül Tayini*, TSE, Ankara, 4 s.
- TS 690, 2002. *Maden Kömürü-Toplam Rutubet Tayini*, TSE, Ankara, 8 s.
- TS 711, 2002. *Taşkömürü ve Kok-Uçucu Madde Tayini*. TSE, Ankara, 8 s.
- TS 1227 ISO 3310-1, 1996. *Kömür Öğütülebilirliğinin Hardgrove Yöntemiyle Tayini*, TSE, Ankara.
- Ural, S., Akyıldız, M. 2004. Studies of the Relationship Between Mineral Matter and Grinding Properties for Low-Rank Coals, *International Journal of Coal Geology*, 60, pp. 81–84.
- URL-2 (2008) <http://www.tr.wikipedia.org/wiki/Kömür> (25 Nisan 2008).
- URL-3 (2008) http://geol.eng.ankara.edu.tr/lecture_notes/komur/12_komur-ortamlar.pps. *Kömürleri oluşturan ortamların incelenmesi*. s. 27-28, (03 Haziran 2008).
- Yılmaz, S. 2004. *Katı Fosil Yakıtlarda Mineral Gidermenin Yanma Üzerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 105 s.
- Yiğit, E. 1999. *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 181 s.
- WC (2008-2012) *World Coal Association*, www.worldcoal.org

ZONGULDAK ŞLAM KÖMÜRÜNÜN KURUTULMASINDA MİKRODALGA VE KONVANSİYONEL FIRININ VERİMLİLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF EFFICIENCIES OF MICROWAVE AND CONVENTIONAL OVENS IN THE DRYING OF ZONGULDAK SLIME COAL

H. Hacifazlıoğlu

İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Avcılar/İstanbul

ÖZET: Zonguldak havzasında her yıl 6 milyon ton civarında bitümlü kömür üretilmekte ve kömür yıkama tesislerinden 0.3 milyon tonun üzerinde şlam kömür çıkmaktadır. Şlam kömür, hidrosiklon üst akımından alınan pülpün filtre edilmesi ile elde edilen yüksek oranda kil ve nem içeren, düşük kalorili bir yakıttır. Bu yakıtın sanayinin çeşitli dallarında kullanılabilmesi için iyileştirilmesi ve belli bir nem içeriğine indirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmadaki kurutma deneylerinde kullanılan disk filtre ürünü bitümlü şlam kömürün nem içeriği %26, ortalama tane boyutu ~30 mikrondur. Şlam kömür mikrodalga ve konvansiyonel ısıtmalı fırında ayrı ayrı kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonunda her bir fırının kurutma verimlilikleri belirlenmiştir. Ayrıca, her iki tip kurutucuda kurutulmuş olan şlam kömürlerin yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Mikrodalga ısıtmalı ortamda termal gerilmeler sonucunda şlam kömür üzerinde mikro ve makro çatlaklar oluşmuş ve bu çatlaklar şlam kömürün daha hızlı kurumasını sağlamıştır. Bu bakımdan mikrodalga fırının kurutma verimliliği daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca mikrodalga enerjisi, şlam kömürü selektif ısıttığı için işlem sonrasında şlam kömürün yüzey sıcaklığı daha düşük bulunmuştur.

ABSTRACT: Nearly 6 million tonnes of bituminous coal is produced in Zonguldak basin and more than 0.3 million tonne slime coal is output from the coal washing plants. Obtained through the filtration of pulp taken from hydrocyclone top flow, slime is a low-calorie fuel with containing clay minerals and moisture in high proportions. This slime fuel should contain a certain moisture level to be used in various fields of industry. The moisture content of disc filtered bituminous coal used in experimental drying studies is 26% and average particle size is ~30 micron. The slime coal was dried separately in both microwave and conventional ovens. After the drying process, the efficiency of each oven was determined. Besides, the surface temperatures of the slime coal dried in both types of oven were compared. In the microwave heating oven, micro and macro cracks appeared on the slime coal causing them to dry faster. In that manner, the drying efficiency of slime coal in the microwave oven was found to be higher. As the microwave energy heated the slime coal selectively, the surface temperature was found to be lower after the process.

1 GİRİŞ

Kömürlerin üretildikleri gibi doğrudan kullanımlarını engelleyen en önemli safsızlıklardan biri nemdir. Nem, kömürün ısı değerini düşürür, nakliye giderlerini artırır. Ayrıca, koklaştırma, gazlaştırma ve sıvılaştırma gibi teknolojik işlemlerde ürün kalitesini ve verimliliğini düşürür. Yakma, briketleme, koklaştırma, gazlaştırma, düşük sıcaklık karbonizasyonu ve sıvılaştırma gibi kömür değerlendirme proseslerinin öngördüğü nem sınırlamaları vardır. Kömürün susuzlaştırılması ve kurutulması ekonomik açıdan, külünden arındırılması kadar önemli bir işlemdir (Pikon1987; Jangam ve Majumdar 2010).

Ülkemizdeki kömürlerin büyük çoğunluğu yüksek nem içerikli (ortalama %40), düşük kalorili ve yan taş olarak çoğunlukla kil içeren genç kömürlerdir. Yıkama yöntemlerinin yaş olması ve kömürün bünyesindeki kil minerallerinin suyu fazla tutması nedeni ile konvansiyonel kurutmada önemli sorunlar yaşanmakta istenilen nem seviyelerine nadiren ulaşılabilmektedir. Kömür yıkama uygulamalarının sonunda suyun uzaklaştırılması hem ürün hem de atık bertarafı açısından önemlidir. Elde edilen temiz kömürün suyundan ayrılması nakliye, stoklama, satış şartları ve izleyen işlemleri etkilerken, atığın susuzlaştırılması çevresel problemler açısından gereklidir.

Termik santrallerde ve diğer yakma sistemlerinde, kömürün nem ve kül içeriği arttıkça ısı verim düşmektedir. Kömürlerde, yaklaşık %1 oranında nem artışının, %1 oranında kül artışına eş değer miktarda ısı değeri düşüreceği bilinmektedir. Ticari kömür değerlendirme yöntemlerinin öngördüğü nem sınırlarına uymayan kömür kullanıldığında da, sistem verimi azalır ve ürün kalitesi düşer. Sistem veriminin düşmesi, birim ısı enerjisi ve ürün gereksinimini karşılamak için beslenmesi gereken kömür miktarını artırır. Böylece, kömür tüketimi, buna bağlı olarak da çevre kirliliği artar. Baca gazlarının içerdiği nem miktarı yükseldikçe, baca gazı çıkış sıcaklıklarını arttırmak gerekir. Aksi takdirde, baca gazlarında yoğunlaşma ve asidik karakterdeki sıvı damlacıkları, metal aksamda korozyona neden olur (Özdoğan vd. 1998).

Zonguldak havzasında üretilen bitümlü kömürlerin HGI değerleri yüksek (>70) olup, diğer kömür tiplerine göre daha kırılabilir yapıdadır (Su vd. 2004). Bu bakımdan üretimle birlikte aşırı ufalanma meydana gelmekte ve üretilen kömürün ortalama %20'si -1 mm boyutlu ince kömürlerden oluşmaktadır. İnce kömürün %15'lik kısmı ise "şlam" diye tabir edilen süper ince tanelerden (ortalama -20 mikron) ve çoğunlukla kil minerallerinden oluşmaktadır. Zonguldak havzasında, yıllık 300 bin tonun üzerinde şlam kömür oluşmakta ve bu şlamlar genellikle açık havada kurutularak ÇATES'de yakıt olarak değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, konvansiyonel kurutucularda (döner kurutucu gibi) şlam boyutunda yapılan kurutma genellikle verimsiz olmakta ve istenilen nem değerlerine çoğu zaman ulaşamamaktadır. Bunun nedeni, tane boyutu küçüldükçe birim kütle başına yüzey alanı ve nem tutma oranının artması ve kurutma eğiliminin zorlaşmasıdır. Tane boyutu küçüldükçe yüzey alanı artacağı için, taneler arası harici porların miktarı, dolayısıyla yüzey neminin oranı da artar. Ayrıca tane içi dâhili porların, yaş işlemlerde kullanılan su tarafından erişilebilirlik oranı ve dolayısıyla nem içerikleri de, tane boyutu küçüldükçe artar. Yüzey nemi ya da harici porlardaki nem, uzaklaştırmaya en uygun nemdir. Dâhili porlardaki bünye nemi, kömürün por

yapısına bağlı olarak kurutma işlemlerinde sorun çıkarabilmektedir (Swamy 1988, Osborne 1990, Özdoğan vd. 1998).

Susuzlandırma mekanik bir işlem olup, kurutmada buharlaşma söz konusu olduğu için termal bir işlemdir. Termal işlemler oldukça pahalı operasyonlardır. Bunun anlamı termal işlemde ton başına harcanan parasal değer yüksek seviyelerde olmasıdır. İşletim sıcaklıklarının artmasıyla bu durum oldukça hassas hale gelebilmektedir (Ateşok ve Kangal 2012). Bu bakımdan, düşük kaliteli kömürlerin kurutulması için ekonomik verimliliği yüksek pek çok kurutucu geliştirilmiştir. Son dönemde geliştirilen kurutuculardan en önemlileri; akışkan yataklı kurutucu (*fluidized bed dryers*), mikrodalga enerjili kurutucu (*microwave dryers*), burğu konveyörlü kurutucu (*screw conveyor dryers*), SSD (*superheated steam dryer*) ve entegre kurutuculardır (Jangam ve Majumdar 2010). Ülkemizde en yaygın kullanılan kömür kurutucularının başında konvansiyonel döner kurutucular (*rotary dryers*) gelmektedir. Ancak döner kurutucuların ilk yatırım maliyeti yüksek (*10 t/s kapasiteli bir tesis için 200 bin \$*), kurutuma verimleri ise düşüktür. Ülkemizdeki kömür işletmelerden alınan verilere göre, kurutmada nem yüzdesindeki düşüş çoğu zaman %5 ile %15 aralığında değişmektedir.

Yukarıda anılan kurutucuların her birinin kurutma performansı ve kullanım alanı farklıdır. Bir malzeme için en uygun kurutucu tipi o malzemenin teknik özelliklerine bağlı olarak değişir. Örneğin, çok ince boyutlu tanelerin kurutulmasında döner kurutucular verimsiz iken, bantlı kurutucu, flash kurutucu ve Holo-Flite gibi indirekt kurutucular endüstriyel ölçekte şlam kömürlerin kurutulması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Şlam kömürlerin kurutulması için tavsiye edilen bir diğer önemli kurutucu tipi mikrodalga enerjili kurutma fırınlarıdır. Chironis (1986) yaptığı bir çalışmada çok ince boyutlu Colowyo kömürünün kurutulmasında mikrodalga fırının performansını test etmiş ve %97'lik bir kurutma verimi ile yüksek performans sağladığını rapor etmiştir. Mikrodalga enerjisinin çok ince tanelerin kurutulmasında diğer ısı yöntemlerine göre çok etkili olduğunu belirtmiştir. Graham (2006) DryCol adlı projesinde, mikrodalga enerjisi ile diğer konvansiyonel kurutucuların etkinliğini karşılaştırmış ve çok ince kömürün kurutulmasında mikrodalga enerjisinin daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca konvansiyonel termal kurutmada kendiliğinden yanma riskinin olduğundan ve ürünün özelliklerinde bozulma meydana gelebileceğinden bahsetmiştir. Mikrodalga enerjisinin serbest ve bünye nemini aynı anda giderebildiğini ve kömürün koklaşma özelliğine etki etmediğini belirtmiştir. Seehra vd. (2007) kömür şlamalarının kurutulması için 800 W güçteki mikrodalga enerjisi ile konvansiyonel termal kurutmayı karşılaştırmış ve mikrodalga enerjisinin kurutmada daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, %10'luk bir nem düşüşü için yaklaşık maliyetin 3 \$/t olduğunu rapor etmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında, mikrodalga enerjisi ile şlam kömürün kurutulması incelenmiş ve konvansiyonel ısıtım (rezistanslı) kurutma ile kurutma verimlilikleri karşılaştırılmıştır.

2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Şlam Kömür Numunesi ve Özellikleri

Kurutma deneylerinde kullanılan şlam kömür numunesi Zonguldak Çatalağzı beldesinde faaliyet gösteren özel bir işletmeye ait kömür zenginleştirme tesisinden alınmıştır. Kapasitesi 100 ton/saat olan bu tesiste -100+1 mm kömürler ağır ortam siklonu ile, - 1+0.075 mm kömürler spiral konsantratörlerle zenginleştirilmektedir. Ocaktan gelen ve tesis ünitelerinin her birinde oluşan toz kömürler spiral konsantratörlere girmeden önce 40 cm çaplı hidrosiklon bataryasından geçirilmektedir. Hidrosiklonların alt akımları spirale beslenirken, üst akım - yani şlam kömür - tükine gönderilmektedir. Şlam, tükine ilave edilen 8 g/t oranındaki anyonik bir flokülant ile çöktürülmekte ve daha sonra disk filtreye verilmektedir. Kurutma deneylerinde kullanılan şlam kömür numunesi, disk filtre çıkışından alınmış olan %26 nem içerikli şlam kömürdür. Şlam kömürler stok alanlarında açık havada kurutulduktan sonra nem içeriği %16'ın altına düşürülerek Çatalağzı termik santraline gönderilmektedir. Disk filtre çıkışından alınan şlam kömür numunesi 40 lt'lik havası alınmış kapalı kovalara konmuş ve İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama laboratuvarına getirilmiştir. Bu numuneler laboratuvarında hiç bir ön işleme tabi tutulmaksızın direkt deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Şlam kömürün özelliklerinin saptanması için öncelikle kısa kimyasal analiz ve daha sonra yaş eleme yöntemi ile kömürün elek analizi ve akabinde boyuta göre kül dağılımları saptanmıştır. Bu analizlerin sonuçları Çizelge 1-2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Şlam kömür numunesinin kısa kimyasal analiz sonuçları.

Analizler	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Toplam Nem (%)	26.00	-
Toplam Kül (%)	33.52	45.30
Uçucu Madde (%)	15.39	20.80
Sabit Karbon (%)	25.09	33.90
Toplam Kükürt (%)	0.56	0.76

Çizelge 2. Şlam kömürün yaş elek analizi sonuçları ve boyuta göre kül dağılımları.

Elek Açıklığı (µm)	Miktar (%)	Kül (%)	Σ Elekalıtı (%)	Σ Eleküstü (%)	Σ Kül (%)
-425+300	0.01	10.10	100.00	0.01	10.10
-300+212	1.53	7.50	99.99	1.54	7.52
-212+150	3.09	5.20	98.46	4.63	5.97
-150+106	4.67	5.45	95.37	9.30	5.71
-106+75	6.22	5.90	90.70	15.52	5.78
-75+53	7.54	20.30	84.48	23.06	10.53
-53+38	7.67	25.20	76.94	30.73	14.19
-38	69.27	59.12	69.27	100.00	45.30
Toplam	100	45.30	--	--	--

2.2 Mikrodalga ve Konvansiyonel Fırın

Kurutma deneyleri mikrodalga ısıtmalı ve konvansiyonel ısıtmalı olmak üzere 2 farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga ısıtmalı kurutma ortamı için 1,000 Watt gücünde mutfak tipi mikrodalga fırın kullanılmıştır. Konvansiyonel ısıtmalı kurutma deneyleri için benzer güçle çalışan (1,000 W'lık) konvansiyonel rezistanslı mutfak tipi bir elektrikli fırın kullanılmıştır. 200 gr ağırlığındaki aglomere edilmiş şlam kömür numunesi değişik kurutma sürelerinde ayrı ayrı mikrodalga ve konvansiyonel fırında bekletilmiş ve nem içeriği %1'in altına düşünceye kadar kurutulmuştur. Konvansiyonel fırında yapılan kurutma deneylerinde farklı sıcaklıkların (50, 100, 150 °C) kurutma verimine etkisi araştırılmışken, mikrodalga enerjili kurutma deneylerinde farklı enerji güçlerinin (120, 400 ve 700 W) kurutma verimine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, her deney sonunda çıkan kurutulmuş ürünün sıcaklığı infrared termometre ile ölçülmüştür. Kurutma veriminin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikten faydalanılmıştır.

$$\text{Kurutma Verimi (\%)} = \frac{[\text{Beslenen Şlam Kömürün Nemi (\%)} - \text{Çıkan Ürünün Nemi(\%)}] * 100}{[\text{Beslenenin Şlam Kömürün Nemi(\%)}]}$$

Şlam kömürlerin farklı fırınlarda kurutulması durumunda, ürünlerin görüntüleri de farklı olmuştur. Özellikle mikrodalga fırından çıkan ürün üzerinde çok sayıda mikro ve makro çatlak gözlemlenmişken, konvansiyonel fırından çıkan üründe çatlaklara rastlanmamıştır (Şekil 1a-b).



(a)

Mikrodalga fırında kurutulmuş şlam kömür



(b)

Konvansiyonel fırında kurutulmuş şlam kömür

Şekil 1. Mikrodalga (a) ve konvansiyonel fırında (b) kurutulmuş şlam kömür görüntüleri.

3 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1 Mikrodalga Fırında Kurutma Deneyleri

Mikrodalga fırında şlam kömür; 120, 400 ve 700 W mikrodalga enerji güçlerinde ayrı ayrı kurutulmuştur. Ön çalışmalar ile kurutma süreleri, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 ve 36 dk olarak belirlenmiştir. Farklı kurutma süreleri sonunda elde edilen

ürünlerin nem, kurutma verimleri ve ürün çıkış sıcaklıkları Çizelge 3-5'de verilmiştir.

Çizelge 3. Kurutma süresine bağlı olarak şlam kömürün nem, kurutma verimi ve sıcaklığı.

Kurutma Süresi (dakika)	Kurutmada Mikrodalga Gücü: 120 W		
	Şlam Kömür Nemi (%)	Kurutma Verimliliği (%)	Şlam Kömür Sıcaklığı (°C)
0	26.00	0.00	20.40
4	25.40	2.31	31.30
8	24.10	7.31	52.50
12	21.50	17.31	53.50
16	18.50	27.85	55.00
20	15.15	41.73	57.00
24	11.60	55.38	59.00
28	7.70	70.38	62.00
32	3.50	86.54	64.00
36	0.00	100.00	66.00

Çizelge 3-5'den görülebileceği üzere, mikrodalga çıkış gücü arttıkça, kuruma süresi de kısalmaktadır. 8 dakikalık bir kuruma süresi sonunda 120 W mikrodalga gücünde ürün nemi %26'dan %24.10'a düşmüşken, gücün 400 W'a çıkarılması durumunda ürün nemi %16'a düşmüştür. Aynı süre sonunda 700 W mikrodalga gücünde nemin tamamen giderilebileceği açıkça görülmektedir. Çizelge 3-5'den, mikrodalga fırında gücün artırılması ile elde edilen ürünlerin çıkış sıcaklığının da arttığı görülmektedir. 120 W güçte yapılan 36 dakikalık kurutma sonucunda sıcaklık 66 °C iken, 700 W güçte yapılan 8 dakikalık kurutma sonunda ürün sıcaklığı 125 °C bulunmuştur. Endüstriyel ölçekte daha büyük güçlerin kullanılması söz konusu olduğu için, ürün çıkış sıcaklıklarının da daha yüksek olacağı muhtemeldir. Bu durumun özellikle kurutma sonrasındaki boşaltma, taşıma ve torbalama gibi işlemlerde sorun yaratabileceği unutulmamalıdır.

Çizelge 4. Kurutma süresine bağlı olarak şlam kömürün nem, kurutma verimi ve sıcaklığı.

Kurutma Süresi (dakika)	Kurutmada Mikrodalga Gücü: 400 W		
	Şlam Kömür Nemi (%)	Kurutma Verimliliği (%)	Şlam Kömür Sıcaklığı (°C)
0	26.00	0.00	20.40
4	16.00	38.46	64.00
8	4.50	82.69	70.00
12	2.50	90.38	74.00
16	0.00	100.00	101.00
20	-	-	-
24	-	-	-
28	-	-	-
32	-	-	-
36	-	-	-

Çizelge 5. Kurutma süresine bağlı olarak şlam kömürün nem, kurutma verimi ve sıcaklığı.

Kurutma Süresi (dakika)	Kurutmada Mikrodalga Gücü: 700 W		
	Şlam Kömür Nemi (%)	Kurutma Verimliliği (%)	Şlam Kömür Sıcaklığı (°C)
0	26.00	0.00	20.40
4	9.00	65.38	72.00
8	0.00	100.00	125.00
12	0.00	100.00	-
16	-	-	-
20	-	-	-
24	-	-	-
28	-	-	-
32	-	-	-
36	-	-	-

3.2 Konvansiyonel Fırında Kurutma Deneyleri

Konvansiyonel elektrikli fırında 50, 100 ve 150 °C ortam sıcaklıklarında şlam kömür ayrı ayrı kurutulmuştur. Ön araştırmalar sonucunda, konvansiyonel ısıtım kurutmada kısa kurutma süreleri için verim düşük bulunduğu için kurutma süreleri mikrodalga enerjili kurutmaya göre daha uzun tutulmuş ve 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 80, 120 ve 240 dk olarak belirlenmiştir. Farklı kurutma süreleri sonunda elde edilen ürünlerin nem, kurutma verimleri ve ürün sıcaklıkları Çizelge 6-8'de verilmiştir.

Çizelge 6. Kurutma süresine bağlı olarak şlam kömürün nem, kurutma verimi ve sıcaklığı.

Kurutma Süresi (dakika)	Konvansiyonel Fırın Kurutma Sıcaklığı: 50 °C		
	Şlam Kömür Nemi (%)	Kurutma Verimliliği (%)	Şlam Kömür Sıcaklığı (°C)
0	26.00	0.00	20.40
4	25.63	1.40	32.10
8	24.47	5.85	32.00
12	23.24	10.58	33.00
16	22.56	13.20	32.00
20	22.19	14.62	32.20
24	21.67	16.65	33.00
28	21.11	18.80	34.40
32	20.42	21.45	33.00
36	19.78	23.90	33.00
40	19.00	26.92	33.20
80	14.00	46.15	32.00
120	11.00	57.69	33.00
240	0.00	100.00	35.20

Çizelge 7. Kurutma süresine bağlı olarak şlam kömürün nem, kurutma verimi ve sıcaklığı.

Kurutma Süresi (dakika)	Konvansiyonel Fırın Kurutma Sıcaklığı: 100 °C		
	Şlam Kömür Nemi (%)	Kurutma Verimliliği (%)	Şlam Kömür Sıcaklığı (°C)
0	26.00	0.00	20.40
4	25.45	2.10	35.20
8	24.38	6.20	37.00
12	23.75	8.65	40.10
16	21.37	17.80	42.80
20	18.70	28.08	44.30
24	17.31	33.40	46.00
28	15.67	39.70	48.30
32	14.50	44.20	50.70
36	13.13	49.50	53.00
40	11.38	56.20	56.40
80	2.50	90.38	64.70
120	0.00	100.00	87.00
240	-	-	-

Çizelge 8. Kurutma süresine bağlı olarak şlam kömürün nem, kurutma verimi ve sıcaklığı.

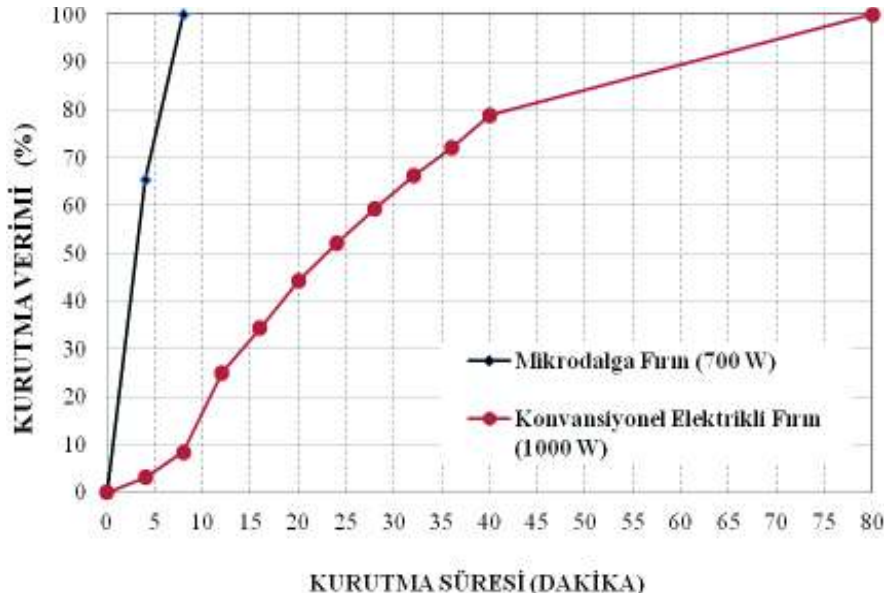
Kurutma Süresi (dakika)	Konvansiyonel Fırın Kurutma Sıcaklığı: 150 °C		
	Şlam Kömür Nemi (%)	Kurutma Verimliliği (%)	Şlam Kömür Sıcaklığı (°C)
0	26.00	0.00	20.40
4	25.19	3.10	43.10
8	23.81	8.40	50.70
12	19.50	25.00	60.00
16	17.08	34.30	69.20
20	11.50	44.23	80.00
24	12.45	52.10	88.00
28	10.55	59.40	94.30
32	8.78	66.20	99.10
36	7.28	72.00	103.00
40	5.50	78.85	109.80
80	0.00	100.00	143.00
120	-	-	-
240	-	-	-

Konvansiyonel fırında, sıcaklık artışı suyun daha kolay buharlaşmasını sağlamakta ve şlam kömürün kuruma süresini kısaltmaktadır. Öyle ki, 150 °C'lik bir sıcaklıkta, 80 dk'nın sonunda şlam tamamen kurumuştur. Ancak, aynı süre sonunda 50 °C'de ürünün nemi % 14, 100 °C'de ise ürün nemi %2.50 bulunmuştur. Şlam kömürün tamamen kurutulması durumunda; 50, 100 ve 150 °C'lik kurutma ortamları için ölçülen ürün sıcaklık değerleri ise sırasıyla 35, 104 ve 143 °C'dir. Mikrodalga fırında ise, 120, 400 ve 700 W güç seviyeleri için ürün sıcaklıkları sırasıyla 66, 101 ve 125 °C bulunmuştur. Bu sıcaklık değerlerinden de görülebileceği gibi, yüksek

sıcaklıklarda yapılan konvansiyonel kurutmada şlam kömür yüzeyi aşırı ısınmaktadır. Oysa mikrodalga enerjisi selektif ısıtma sağladığı için ürünlerdeki sıcaklık dağılımı daha üniform ve ürün sıcaklığı daha düşük olmuştur. Kurutmada yüksek ürün sıcaklıkları, kömürün daha kolay okside olmasına ve tutuşmasına neden olabileceği için istenmeyen bir durumdur.

3.3 Mikrodalga ve Konvansiyonel Fırının Kurutma Verimliliklerinin Karşılaştırılması

Mikrodalga ve konvansiyonel fırından elde edilen en yüksek kurutma verimliliği sonuçları Şekil 2’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Mikrodalga fırın için en yüksek kurutma verimi 700 W güçte sağlanmışken, konvansiyonel fırın için 150 °C kurutma sıcaklığında sağlanmıştır.



Şekil 2. Mikrodalga ve konvansiyonel elektrikli fırının süreye bağlı kurutma verimliliklerinin karşılaştırılması.

Mikrodalga ve konvansiyonel fırından çıkan kuru şlamların yapısı incelendiğinde, mikrodalga fırında kurutulmuş olan şlamların çatlaklı bir yapıda olduğu görülmüştür. Şlam kömür üzerindeki mikro ve makro çatlaklar Şekil 1a’da açıkça görülmektedir. Benzer çatlaklar Lester ve Kingman (2004)’ün çalışmasındaki kömür üzerinde de gözlemlenmiştir. Mikrodalga enerjisi, sadece su moleküllerini hedef aldığı için hem şlamın içindeki neme hem de dışındaki neme aynı anda etkiyebilmektedir. Şlam kömürün içindeki su molekülleri, mikrodalga enerjisi ile titreştirilmekte ve çok hızlı bir şekilde ısınmaktadır. Isınan sıvı su molekülleri faz değiştirerek gaz fazındaki su buharına dönüşmekte ve kapalı şlam yapısı içerisinde bir buhar basıncı oluşturmaktadır. İçerdeki buhar basıncının artmasıyla aglomere taneler çatlamakta ve bu yolla buhar (nem) dışarıya çıkmaktadır. Şekil 1b’de ise konvansiyonel fırında kurutulmuş şlam kömür gösterilmiştir. Söz konusu numune üzerinde herhangi bir termal çatlak bulunmamaktadır. Bunun temel nedeni, şlam kömürün dıştan içe doğru yavaş yavaş ısınmasıdır. Konvansiyonel ısı, önce şlam kömürün dışını ısıtmakta ve daha sonra konveksiyon ve kondüksiyon yoluyla şlam kömürün içine doğru

ilerlemektedir. Böyle bir durumda şlam içinde bir buhar basıncı oluşmayacağı için, şlam yüzeyinde de çatlaklar oluşmamıştır.

4 SONUÇLAR

Zonguldak havzasında şlam kömür, kömür yıkama tesislerinden çıkan ve içerisindeki kömür oranına (genellikle %40-60 arasında) bağlı olarak "termik santral yakıtı" ya da "atık çamur" olarak nitelendirilebilen bir üründür. Şlam kömürlerin çok ince boyutlu olması ve yüksek oranda kil içermesi nedeni ile zenginleştirilmeleri oldukça güç, verimsiz ve maliyetli bir işlemdir. Bu bakımdan şlam kömürlerin büyük bir bölümü zenginleştirilmez ve önce susuzlandırma ve daha sonra kurutma yapılarak ürün kalitesi arttırılır. Kurutma, şlam kömürlerin kalitesinin yükseltilmesi için uygulanabilecek en basit iyileştirme yöntemidir. Ancak, yaygın kullanılan konvansiyonel ısıtmalı kurutucular şlam kömürlerin kurutulmasında yeterince verimli değildir. Bu bakımdan son dönemde kurutma mekanizmaları birbirinden farklı olan pek çok yeni tipte kurutucu geliştirilmiştir. Bu kurutuculardan biri olan mikrodalga ısıtmalı kurutucu, gerek enerji verimliliği gerekse kurutma süresinin kısalığı bakımından, şlam kömürlerin kurutulmasında kullanılabilir alternatif bir kurutucudur. Bu çalışmada, Zonguldak bitümlü şlam kömürlerinin kurutulmasında mikrodalga ve konvansiyonel elektrikli fırının kurutma verimlilikleri araştırılmış ve mikrodalga enerjili kurutma hakkında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Şlam kömür, 700 W güçte çalıştırılan bir mikrodalga fırında, 150 °C'de yapılan konvansiyonel kurutma işlemine göre 10 kat daha hızlı kurutmuştur. Test edilen fırınlar benzer enerji tüketimine sahip oldukları için kurutma süresinin kısalması mikrodalga enerjili kurutmada elektrik tüketim maliyetlerini düşürmüştür.
- Kurutma tesislerinde, kurutulmuş ürünlerin çıkış sıcaklık değerleri özellikle taşıma ve torbalama gibi son işlemlerde sorun yaratabilmektedir. Ayrıca, ürün çıkış sıcaklıklarının aşırı artması ile kömürün oksidasyonu ve akabinde kömürün tutuşması söz konusudur. Bu bakımdan yüksek sıcaklığa sahip ürünlerin çoğu zaman soğutulması gerekmektedir. Soğutma, ilave bir maliyet unsuru ve zaman kaybı olacağı için istenmeyen bir işlemdir. Bu bakımdan fırından çıkan ürünlerin mümkün olduğunca düşük sıcaklıkta olması istenir. Mikrodalga enerjili kurutmadaki selektif ısıtma mekanizması, ürünün çok fazla ısınmadan nem kaybetmesini sağlayabilmektedir. Mikrodalga fırında ürünün tamamen kuruduğu durumda (8 dk) ürün yüzey sıcaklığı 125 °C iken, konvansiyonel fırında (80 dk) kuru ürünün yüzey sıcaklığı 143 °C ölçülmüştür. Ancak, endüstriyel ölçekli kurutmada sıcak hava ortamın nemini yüklenerek genelde çiğlenme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkla kurutma ortamını terkedeceği için ürün sıcaklıkları daha da düşük olacaktır.
- Mikrodalga enerjili kurutmanın dezavantajı, şlam kömür üzerinde termal gerilmelerle ve ani buhar çıkışıyla meydana gelen mikro ve makro çatlaklardır. Bu durum, mikrodalgada kurutulan kömürlerin daha kolay parçalanacağı anlamına gelmektedir. Ancak şlam kömürün öğütülüp kullanılması söz konusu ise bu çatlaklar avantaja dönüşebilmektedir.

- Bu çalışmaya konu olan bitümlü şlam kömürün nem içeriği %26, alt ısı değeri 2,890 kcal/kg'dir. Şlam kömürün kurutulması durumunda ısı değeri 4,182 kcal/kg'a kadar çıkmaktadır. Bu bakımdan tek başına kurutma bile, çoğu zaman atık diye nitelendirilen şlam kömürlerden yüksek kaliteli yakıtların elde edilmesine olanak sağlayabilmektedir.
- Mikrodalga enerjili kurutma günümüzde gıda, ağaç, tekstil ve seramik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak mikrodalga fırınların ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, kurutma ortamında homojen mikrodalga dağılımının sağlanamaması ve yüksek güvenlik önlemleri gerektirmesi nedeniyle özellikle cevher ve kömür hazırlama tesislerindeki kullanımında çekinceler oluşturmuştur. Son yıllarda bu çekinceleri ortadan kaldırmak amacıyla yeni kombine mikrodalga fırın tasarımları yapılmakta ve Drycol prosesi gibi yöntemlerle madenciye umut vaat eder bir duruma gelmektedir.

5 KAYNAKLAR

- Ateşok, G., Kangal, M. O. 2012. *Susuzlandırma ve Kurutma*, İTÜ Maden Fakültesi, Yurt Madenciliğini Geliştirme Yayınları, İstanbul, 126 s.
- Chironis, N. P. 1986. Microwaves Dry Fine Coal, *Coal Age*, 91, 12, pp. 64-65.
- Graham, J. 2002. Microwaves for Coal Quality Improvement: The Drycol Project, *US Patent Application 20070151147*, International Patents Pending.
- Jangam, S. V., Majumdar, A. S. 2010. Coal Dehydration, *A Compilation of Relevant Publications and Technical Reports*, 77 p.
- Lester, E., Kingman, S. W. 2004. Effect of Microwave Heating on the Physical and Petrographic Characteristics of a UK Coal, *Energy & Fuels*, 18, pp. 140-147.
- Karthikeyan, M., Zhonghua W., Mujumdar, A. S. 2009. Low-Rank Coal Drying Technologies—Current Status and New Developments, *Drying Technology*, 27, pp. 403-415.
- Richard, S. R. 1990. Briquetting Peat and Peat-Coal Mixtures, *Fuel Processing Technology*, 25, pp. 175-190.
- Seehraa, M. S, Kalrab, A., Manivannana, A. 2007. Dewatering of Fine Coal Slurries by Selective Heating with Microwaves, *Fuel*, 86, 5-6. pp. 829-834.
- Su, O., Akçın, N., Toroğlu, İ. 2004. Kömürün Öğütülebilirliği ile Dayanım ve İndeks Özellikleri Arasındaki İlişki, *Türkiye 14. Kömür Kongresi*, s. 77-86, Zonguldak,.
- Swamy, K. M., Narayanaa, K. L., Murtya, J. S. 1988. Acoustic Drying of Coal, *Drying Technology*, 6, 3. pp. 501-514.
- Osborne, D. G. 1990. *Screening, Solid-Liquid Separation*, Third Edition, Ed. Svarosky, L., Butterworths, London.
- Özdoğan, S., Polat, M., Çelik, M. S. 1998. Kömürün Susuzlaştırılması ve Kurutulması, *Kömür*, s. 297-315.

ELBİSTAN TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜL KARAKTERİZASYONU VE ADSORPSİYON UYGULAMALARI

CHARACTERIZATION OF ELBİSTAN THERMAL POWER PLANT FLY ASH AND APPLICATION OF ADSORPTION

A. Aksoğan Korkmaz

İnönü Üniversitesi, Malatya MYO, Maden Teknolojisi Bölümü, Malatya

Ç. Dağdeviren

İnönü Üniversitesi, Hekimhan MYO, İnşaat Bölümü, Malatya

Ç. Sarıcı Özdemir

İnönü Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Malatya

ÖZET: Uçucu kül; doğada yoğun olarak küresel şekilli, katı veya boşluklu çoğunlukla camsı (amorfor) yapıda bulunan, ince pudramsı taneciklerden oluşur. Termal veya elektrik üretim santrallerinde yanan kömürün temel ürünüdür. Ucuz bir adsorbent olmasından dolayı uçucu kül amonyum, fenol, fosfat, klorofenoller, boyalar ve ağır metal iyonlarının adsorpsiyonunda kullanılmaktadır. Bu çalışmada uçucu kül kullanılarak sulu solüsyonlardan Metilen mavisi (MB) ve Malahit yeşilinin (MG) farklı konsantrasyonlar ve sürelerde adsorpsiyonu incelenmiştir. Langmuir ve Freundlich izotermi kullanılarak denge eşitlikleri analiz edilmiştir. Langmuir izotermine göre maksimum adsorpsiyon kapasitesi MB ve MG için sırasıyla 6.60 mg g⁻¹ ve 4.11 mg g⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

ABSTRACT: Fly ash; consists of fine, powdery particles that are predominantly spherical in shape, either solid or hollow, and mostly glassy (amorphous) in nature. Fly ash is the major byproduct of coal burning in thermal and electricity-generating power plants. As a low cost adsorbent, the application of fly ash has been deployed in the adsorption of ammonium, phenol, phosphate, chlorophenols, dyes and heavy metal ions. The study adsorption of Methylene Blue (MB) and Malachite Green (MG) from aqueous solution onto fly ash was investigated at different concentrations and periods. Equilibrium data were analysed using Langmuir and Freundlich isotherms. According to Langmuir isotherm, maximum adsorption capacities for MB and MG were determined to be 6.60 mg g⁻¹ and 4.11 mg g⁻¹ respectively.

1 GİRİŞ

Türkiye’de 2010 yılı EÜAŞ verilerine göre, enerji arzında en büyük payı %31.9 ile doğalgaz alırken, bunu %30.7 ile kömür, %26.7 ile petrol ve %10.7 ile yenilenebilir ve diğer doğal kaynaklar izlemektedir (EÜAŞ 2011). Ülkemizin önemli enerji kaynaklarından olan linyitlerin, termik santral kazanlarında pülverize olarak yakılmasıyla inorganik katı atıklar olan uçucu küller ortaya çıkmaktadır. Uçucu külün kömür cürufundan farkı, tane boyutunun daha küçük (1-200 µm) olmasıdır (Ural 2005). Uçucu küller ortalama 2.4 g/cm³ yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye doğru değişmektedir. Karbon içeriği fazla olan küller koyu gri iken, demir içeriği yüksek olanlar ise açık gri renktedirler (Erdoğan 2007).

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesine göre iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi ağırlıkça %70’den fazla olan uçucu küller F sınıfı olarak adlandırılırken, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarı ağırlıkça %50-70 arasında olan uçucu küller ise C sınıfı olarak sınıflandırılmaktadır. F sınıfı küllerde CaO yüzdesi düşük (<%10) olduğundan düşük kireçli uçucu kül olarak tanımlanırken, C sınıfı küllerde bu oran daha yüksek (>%10) olduğundan yüksek kireçli uçucu kül olarak tanımlanmaktadır (Ahmaruzzaman 2009).

TS EN 197-1’e göre sınıflandırmada ise uçucu küller Silisli (V sınıfı) ve Kalkersi (W sınıfı) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelmektedir. Esas olarak reaktif SiO₂ ve Al₂O₃’den oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif CaO oranının %10’dan az, reaktif SiO₂ miktarının %25’den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan, esas olarak reaktif CaO, reaktif SiO₂ ve Al₂O₃’den oluşan; geri kalanı Fe₂O₃ ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif CaO oranının %10’ın fazla, reaktif SiO₂ oranının da %25’ten fazla olması gerekmektedir (Görhan vd. 2008).

Puzolan özellik gösteren uçucu küller; çimentodan tuğla beton üretimine, zemin stabilizasyonundan yol yapımına kadar birçok inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Bunun yanında yapay zeolit üretimi, lastik dolgusu ve adsorbent olarak da kullanım imkanı bulmaktadır (Güler vd. 2005).

Bu çalışmada, Afşin-Elbistan termik santralinden alınan uçucu külün metilen mavisi ve malahit yeşili boyaları kullanılarak, farklı konsantrasyonlarda ve sürelerde adsorpsiyonu çalışılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen veriler üzerinde Langmuir ve Freundlich izotermleri çizilerek, maksimum adsorpsiyon kapasitesi belirlenmiştir.

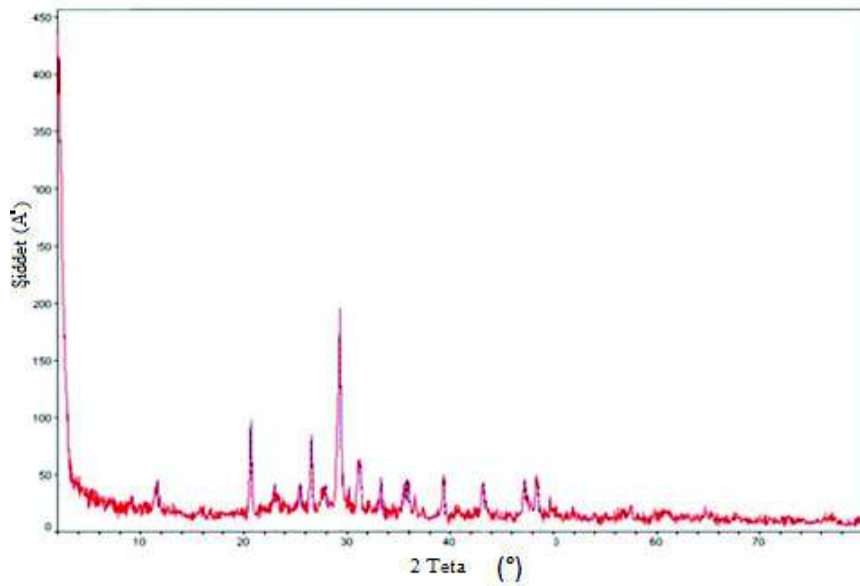
2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Afşin-Elbistan termik santralinden alınan uçucu kül örneğinin, kimyasal, mineralojik ve yüzey özelliklerinin belirlenebilmesi için XRD, FTIR, SEM analizleri İnönü Üniversitesi laboratuvarlarında yaptırılmıştır.

Uçucu kül, adsorbsiyon deneylerinden önce etüvde 110 ± 5 °C de kurutulmuş ve öğütülerek 200 mesh (-0.074 mm) elekten elenmiştir. Deneysel çalışmalarda 25, 50, 75, 100 ve 125 mg/L konsantrasyonlarda Merck marka MB ve MG boya çözeltilerine 0.5 g uçucu kül eklenerek, 25 °C sıcaklıkta 400 rpm'de 1 saat karıştırılmış ve boya konsantrasyonları UV spektrofotometresinde ölçülmüştür.

3 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

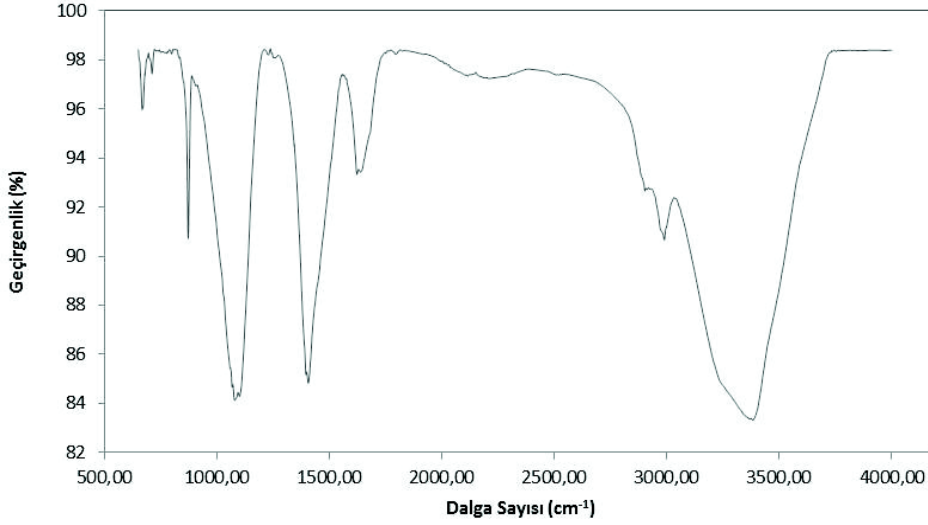
Uçucu külün yüzey özelliklerini belirlemek için kullanılan enstrümantal tekniklerden biri XRD'dir. Hammaddenin yapısında bulunan bağlı elementler ve amorf bir özellik içerip içermediği bu analiz yöntemi ile belirlenebilir. Uçucu küle ait XRD sonucu Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Uçucu kül XRD grafiği.

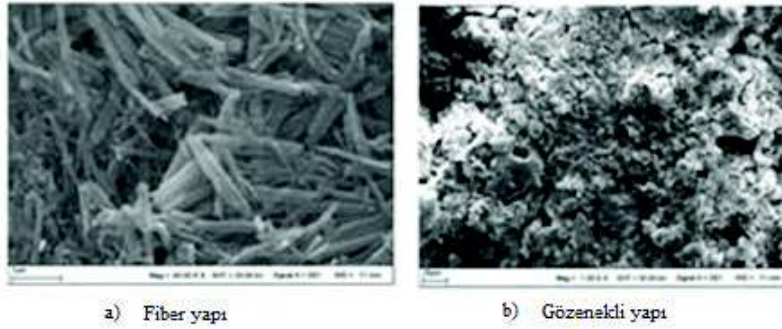
Uçucu küllerin XRD analizleri incelendiğinde; yaklaşık olarak 3,035 Å'daki keskin pikin kalsit ve bunun yanında az da olsa illit mineraline ait olduğu görülmüştür. Yapı içerisinde bulunan diğer piklerin ise, kömürün mineral içeriğinin tamamıyla uzaklaşması sonucu yapı içinde kalan piritik oluşumlara ait olduğu düşünülmektedir. Uçucu küle bağlı olan fonksiyonel grupların belirlenmesi için yapılan FTIR analizine ait grafik Şekil 2'de verilmektedir.

Şekil 2 incelendiğinde; yaklaşık $2,950\text{ cm}^{-1}$ 'de alifatik CH grubu, $3,000\text{-}3,500\text{ cm}^{-1}$ 'de ise aromatik CH grubu ve -OH bağı görülmektedir. Aynı şekilde $1,600\text{-}1,700\text{ cm}^{-1}$ 'de bu aromatikliği destekleyen C=C grubu görülmektedir. $1,000\text{-}1,500\text{ cm}^{-1}$ 'de görülen iki keskin dar pik, kömürün yanması sonucu oluşan uçucu kül içerisindeki karboksil gruplara aittir. 700 cm^{-1} 'de görülen pik ise, çok yüksek sıcaklıklarda kömür yapısında gerçekleşen H deformasyonuna ait olan piktir (Elbeyli ve Pişkin 2006).



Şekil 2. Uçucu kül FTIR grafiği.

Farklı boyutlarda ve farklı açılarda uçucu kül numunesinin SEM görüntüleri Şekil 3'de görülmektedir. Şekil 3 incelendiğinde; uçucu kül numunesi için fiber ve gözenekli olmak üzere iki farklı yapı gözlenmektedir. Gözenekler incelendiğinde; daha çok yapı içerisinde mezo gözeneklerin var olduğu görülmektedir. Boya adsorpsiyonu deneylerinde; uçucu külün çok yüksek konsantrasyonlarda iyi bir adsorban olmadığı, daha düşük konsantrasyonlarda ise elverişli olabileceği gözlenmiştir. Fakat diğer adsorbanlara nazaran daha fazla kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Alkali aktivasyonu, kimyasal aktivasyon, çeşitli çözücülerle etkileştirme gibi ön işlemler yapılarak uçucu külün adsorban özellikleri daha da iyileştirilebilir.



Şekil 3. Uçucu kül SEM görüntüleri.

Adsorbsiyon çalışmalarının değerlendirilmesinde en çok kullanılan iki eşitlik Langmuir ve Freundlich izotermidir. Langmuir izotermi:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 \cdot b} + \frac{C_e}{Q_0} \quad (1)$$

q_e = Denge de adsorplanan madde miktarı (mg/g)

Q_0 = Yüzeyin tek tabaka olarak kaplanabilmesi için gerekli miktar (mg/g)

b = Langmuir sabiti (L/mg)

C_e =Adsorbant denge konsantrasyonu (mg/L)

Freundlich izoterminde ise eşitlik aşağıdaki gibi olup; burada k_f ve n değerleri her sıcaklık için bir sabittir

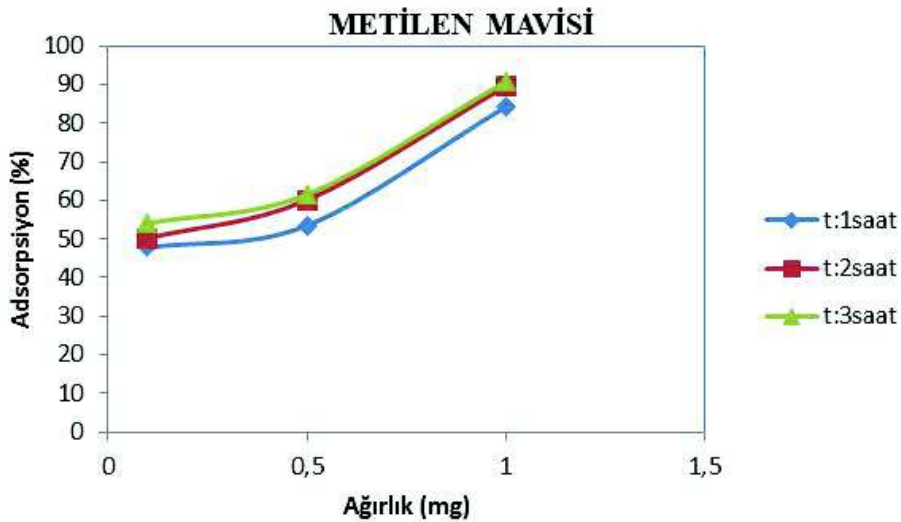
$$\ln q_e = \ln k_f + \left(\frac{1}{n}\right) \ln C_e \quad (2)$$

Yapılan deneylerde, farklı konsantrasyonlarda elde edilen adsorpsiyon denge sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. Yine deney sonuçlarına göre adsorpsiyon kapasitelerinin süreye bağlı olarak değişimleri Şekil 4-5’de verilmektedir.

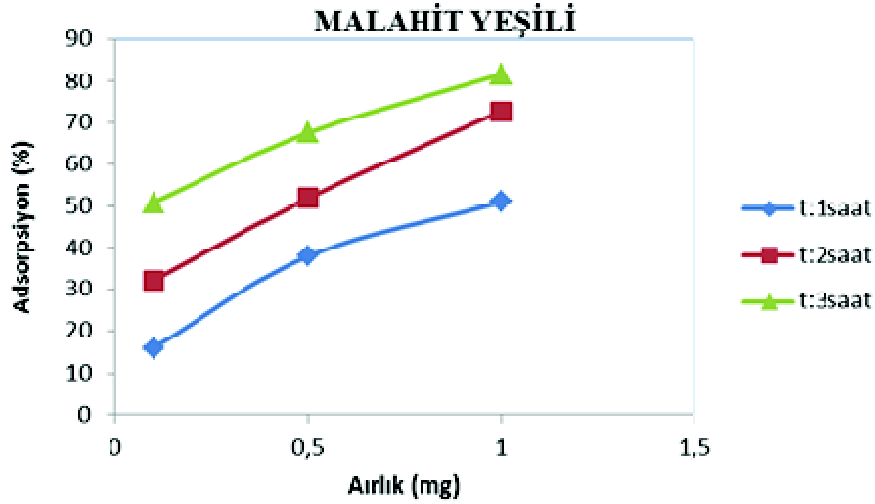
Çizelge 1. Adsorpsiyon denge sonuçları.

	Langmuir İzotermi			Freundlich İzotermi		
	Q_0 (mg/g)	B (L/mg)	R^2	k_f (L/g)	N	R^2
Metilen Mavisi	6.60	0.21	0.971	2.27	3.97	0.968
Malahit Yeşili	4.11	0.07	0.955	0.95	3.27	0.877

Çizelge 1 incelendiğinde; her iki boyanın da tek tabakalı adsorpsiyon olan Langmuir izotermine uyduğu görülmektedir. Maksimum adsorplama kapasiteleri metilen mavisi için 6.60 mg/g, malahit yeşili için ise 4.11 mg/g çıkmaktadır. Adsorpsiyon kapasiteleri arasındaki bu fark, iki boyanın molekül büyüklüğü ile molekül kütlelerinin eşit olmamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. Farklı konsantrasyonlardaki uçucu külün metilen mavisi ile zamana bağlı adsorpsiyon değişimi.



Şekil 5. Farklı konsantrasyonlardaki uçucu külün malahit yeşili ile zamana bağlı adsorbsiyon değişimi.

5 KAYNAKLAR

- Ahmaruzzaman, M. 2009. Role of Fly Ash in the Removal of Organic Pollutant from Waste Water, *Energy and Fuels*, 23, pp. 1494-1511.
- Elbeyli, İ. Y., Pişkin, S. 2006. Combustion and Pyrolysis Characteristics of Tunçbilek Lignite, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 83, pp. 721-726.
- Erdoğan, T. Y. 2007. Beton, ODTÜ Yayıncılık.
- EUAŞ, 2011. *Elektrik Üretim Sektör Raporu*.
- Freundlich, H. M. F. 1906. Über Dye Adsorption in Lusungen, *The Journal of Physical Chemistry*, 57, pp. 385-470.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., Demir, İ. 2008. Uçucu Kül Bölüm 1: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım alanları, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, s. 85-94.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., Demir, İ. 2009. Uçucu Kül Bölüm 2: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, s. 33-42.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H. 2005. Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, s. 419-423, İzmir.
- Langmuir, I. 1918. The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum, *Journal of the American Chemical Society*, 40, pp. 1361-1368.
- Ural, S. 2005. Comparison of Fly Ash Properties from Afsin- Elbistan Coal Basin, Turkey, *Journal of Hazardous Materials*, B119, pp. 85-92.

YATAĞAN VE SOMA TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNİN KARAKTERİZASYONU

CHARACTERIZATION OF YATAGAN AND SOMA THERMAL POWER PLANT FLY ASHES

İ. Kurşun, Ş. G. Özkan, M. Terzi, N. Enkhtaivan, İ. Demir
İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET: Türkiye'de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve bunun sonucunda ortalama 20 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Çevresel açıdan olumsuz etkiler yaratabilen, ancak yararlı kullanım açısından da önemli potansiyele sahip uçucu küllerin hem çevresel etkilerinin azaltılması, hem de çimento vb. sektörlerde kullanımının önemli bir seçenek olduğu görülmektedir. Bu çalışmada Yatağan ve Soma termik santralleri uçucu küllerinin hem çevresel açıdan hem de farklı sektörlerde kullanılabilirlikleri açısından karakterizasyonu ve sınıflandırılmasının yapılması ve küllerin içerdiği ağır metallerin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda termik santrallerinden alınan numuneler üzerinde fiziksel, kimyasal ve mineralojik analizler olmak üzere çeşitli karakterizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon deneyleri sonucunda; her iki numunede de çözünen Pb, Fe, Cd içeriklerinin çevresel standartlar açısından nispeten yüksek olması ve uçucu küllerin çeşitli ulusal ve uluslararası standartlara göre farklı sektörlerde kullanılabilecek özellikte olmaları elde edilen bazı önemli bulgulardır.

ABSTRACT: Approximately 45 million tons of coal used at power plants and as a consequence an average of 20 million tons of fly ash occurs in Turkey annually. Reduction of environmental impacts of the thermal power plant fly ashes, which can create adverse environmental impacts but also has significant potential for beneficial use, and their application in cement and several other industries appears to be an important option. In this study, characterization and classification of fly ashes taken from thermal power plants in terms of environmental aspects as well as the usability in different industries and investigation of the contents of heavy metals were aimed. In this context, physical, chemical and mineralogical characterization tests have carried out on the fly ash samples. As a result of the characterization tests; solved Pb, Fe, Cd contents of both samples are relatively high in terms of environmental standards and both ashes have required properties to be used in different industries according to various national and international fly ash standards were some of the most important findings.

1 GİRİŞ

Bilindiği üzere enerji, hayat kalitesini iyileştiren, ekonomik ve sosyal ilerlemeyi sağlayan en önemli faktördür. Dünya birincil enerji arzı 1973 ve 2009 yılları arasında yaklaşık iki kat artış göstererek 12,150 milyon ton eşdeğer petrol (tep) düzeyine ulaşmıştır. Dünya birincil enerji arzında 2009 yılı itibarıyla petrolün payı %32.8, doğal gazın payı %20.9, nükleer enerjinin payı %5.8 ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ise %3.1 olmuştur. Aynı dönemde kömürün enerji arzındaki payı ise 3305 milyon tep ile %27.2 düzeyine ulaşmıştır (IEA 2011).

Türkiye’de termik santrallerde elektrik üretimi için maden kömürü, linyit, fuel-oil, motorin, doğal gaz, sıvılaştırılmış gaz (LPG), nafta gibi fosil yakıtlar ve türevleri ile jeotermal kaynaklar ve atıklar kullanılmaktadır. Kömür yakıtlı termik santrallerin Türkiye’de ağırlıklı bir elektrik enerjisi üretim biçimi olarak seçilmesinin başlıca nedeni, kömürün fuel-oil veya doğalgaz gibi Türkiye’de pahalı ya da yetersiz miktarda olan yakıtlara göre daha ucuz olarak kabul edilmesidir. Türkiye’nin hidroelektrik güç ile birlikte en önemli öz enerji kaynağı linyitlerdir.

Türkiye’deki termik santrallerde kullanılan kömürün yanması sonucu her yıl büyük miktarda uçucu kül atık olarak doğal çevreye bırakılmaktadır. Atık olarak oluşan uçucu kül ve kazan altı külleri farklı çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu sebeple uçucu külün çeşitli alanlarda kullanılması ve değerlendirilmesi çok önemlidir. Uçucu küller dünyada çimento ve beton olarak baraj duvarları köprü ayakları, maden ve diğer yapıların dolgu enjeksiyonlarında ve diğer pek çok inşaat yapılarında tarımda çatı bahçesi ve ağaçlandırma çalışmalarında, agrega olarak otoyol köprü yol ve briket yapımında, asfalt içinde dolgu maddesi, yol drenaj kanallarında kullanılmaktadır (Dunxi 2003, Gunindi 2005).

Uçucu külün ana bileşenleri olan silisyum, alüminyum, demir ve kalsiyum oksitleri toplam bileşimin yaklaşık %80-95’ini oluşturur. Magnezyum, titan, sodyum, potasyum, kükürt ve fosfor gibi minör bileşenler ise toplam bileşimin yaklaşık %0,5-10’unu oluşturur. Uçucu küller Sb, Ar, Ag, Ba, Be, B, Cu, F, Pb, Mn, Mg, Mo, Ni, Se, Te, Tl, Sn, Ti, U, V ve Zn gibi eser derişimlerde 20 ile 50 arasında element içerir (Wilcox ve Hardy 1988). Yakma sonrasında kömürün orijinal mineral madde içeriğinin %20’ye kadar olan kısmı kazan altı külünde, %80’e kadar olan kısmı ise uçucu külde yer almaktadır. Termik santrallerde kömürün yanmasıyla kömürle birlikte bulunan kirliliğe sebep olma potansiyeline sahip As, Cd, Ga, Ge, Pb, Sb, Se, Sn, Mo, Ti ve Zn gibi toksik iz elementler atıklara (cüruf, kül ve gaza) transfer olurlar. 25 kadar iz element çevresel açıdan önemli olarak değerlendirilmektedir. Bunlar arasında en yüksek öneme sahip olanlar ise; As, B, Cd, Hg, Mo, Pb, Se’dir. Birçok tehlikeli elementi içeren uçucu küller ve kazan altı külleri toplama havuzlarında ya da yığınlar halinde depolanmaktadır. Ancak bu atıkların çok az kısmı kullanılmaktadır (Ayçık 2008, Özbayoğlu 2011, 2012).

Bu çalışmanın amacı Yatağan ve Soma termik santralleri uçucu küllerinin hem çevresel açıdan hem de farklı sektörlerde kullanılabilirlikleri açısından karakterizasyonunun ve sınıflandırılmasının yapılması ve buna bağlı olarak küllerin içerdiği ağır metal, iz elementler ve radyoaktif element içeriklerinin araştırılmasıdır.

2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

DeneySEL çalışmalarına esas olan uçucu kül numuneleri Yatağan ve Soma termik santrallerinden alınmıştır. Numuneler termik santrallerin elektrofiltrasyon bölümlerinden bir ay süreyle her vardiyada alınarak biriktirilmiştir. Daha sonra bu numuneler İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Laboratuvarları'na getirilmiş ve numuneler üzerinde bir dizi fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.1 Fiziksel Analizler

Uçucu kül numunelerinin fiziksel özelliklerini ortaya koymak amacıyla; nem analizi, tane boyut analizi ve yoğunluk tayini deneyleri yapılmıştır.

2.1.1 Nem analizleri

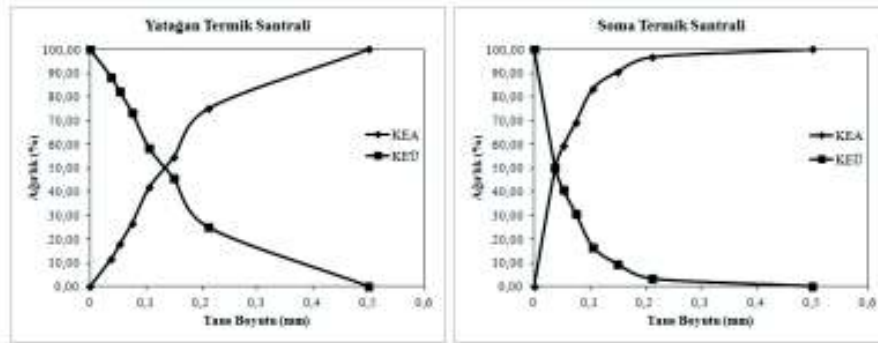
Çalışma kapsamında TS 690 ISO 598 (Metod-C) standardına göre toplam nem (örneğin laboratuvara getirildiği durumda içerdiği nem) analizleri yapılmıştır.

Nem analizlerinin sonucunda, Soma TS uçucu kül numunesinin toplam %3.27, Yatağan TS uçucu kül numunesinin ise toplam %4,21 nem içerdiği belirlenmiştir.

2.1.2 Tane boyutu analizleri

Uçucu küllerin tane boyutları öncelikle kullanılan kömürün öğütülme derecesine bağlıdır. Termik santrallerden alınan küller boyut küçültme işlemlerine tabi tutulmadan orijinal halleri ile boyut analizine tabi tutulmuşlardır. Kül numunelerinin tane boyut analizlerinde yaş eleme yöntemi kullanılmıştır. Analizler TS ISO 2395 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

Yatağan TS ve Soma TS uçucu kül numunelerinin yaş elek analizi sonucunda elde edilen tane boyut dağılımı grafikleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin tane boyut dağılımı grafikleri.

Tane boyut dağılımı grafiklerinden Yatağan TS külünün d_{50} ve d_{80} boyutları sırasıyla 0.13 mm ve 0.27 mm, Soma TS külünün d_{50} ve d_{80} boyutları ise sırasıyla 0.04 mm ve 0.10 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar ışığında Yatağan TS numunesinin Soma TS numunesine göre daha iri boyutta olduğu görülmüştür.

2.1.3 Yoğunluk tayini

Uçucu kül numunelerinin yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla TSE CEN ISO TS 17892-3 standardına göre piknometre ile yoğunluk analizleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlara göre Yatağan TS külünün ortalama yoğunluğu 2.17 g/cm^3 , Soma TS külünün ortalama yoğunluğu ise 2.34 g/cm^3 olarak tespit edilmiştir.

2.2 Kimyasal ve Fizikokimyasal Analizler

Uçucu kül numunelerinin kimyasal ve fizikokimyasal özelliklerini ortaya koymak amacıyla; komple kimyasal içerik analizi, pH profili deneyleri, suda çözünürlük deneyleri ve zeta potansiyeli deneyleri yapılmıştır.

2.2.1 Komple kimyasal içerik analizi

Termik santral uçucu kül numunelerinin numunenin kimyasal analizi kapsamında; majör oksitlerin ve çeşitli minör elementlerin toplam içerikleri, ICP-ES (emiyon spektrometrisi) analizi ile belirlenmiştir. Kızdırma kaybı ise numunenin $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılması sonrasında hesaplanan ağırlık değişimi ile bulunmaktadır. Nadir toprak elementleri, iz element ve refrakter element içerikleri ise ICP-MS (kütle spektrometrisi) analizi ile belirlenmiştir. Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin komple kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin komple kimyasal analiz sonuçları.

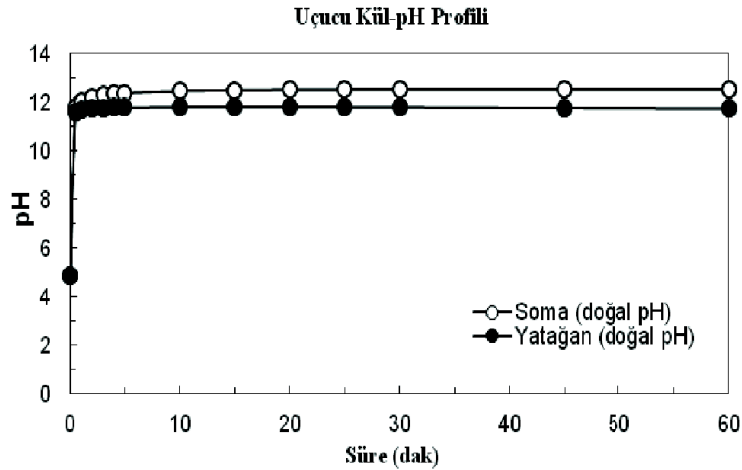
Yatağan TS				Soma TS			
Element	(%)	Element	ppm	Element	(%)	Element	ppm
SiO ₂	45.94	Y	87.30	SiO ₂	40.58	Y	31.4
Al ₂ O ₃	19.28	La	66.00	Al ₂ O ₃	20.16	La	49.4
Fe ₂ O ₃	7.14	Ce	134.10	Fe ₂ O ₃	3.80	Ce	82.3
MgO	4.43	Pr	15.49	MgO	1.59	Pr	10.23
CaO	17.28	Nd	61.60	CaO	28.91	Nd	39.8
Na ₂ O	0.57	Sm	12.95	Na ₂ O	0.27	Sm	6.69
K ₂ O	1.93	Eu	2.37	K ₂ O	1.41	Eu	1.55
TiO ₂	0.78	Gd	13.20	TiO ₂	0.63	Gd	5.96
P ₂ O ₅	0.24	Tb	2.18	P ₂ O ₅	0.21	Tb	0.85
MnO	0.06	Dy	13.35	MnO	0.04	Dy	4.96
Cr ₂ O ₃	0.047	Ho	2.76	Cr ₂ O ₃	0.015	Ho	0.97
Sc (ppm)	19.00	Er	8.14	Sc (ppm)	14	Er	2.88
K.Kayıbı	3.00	Tm	1.26	K.Kayıbı	2.1	Tm	0.40
Total	99.74	Yb	7.64	Total	99.75	Yb	3.03
Ba (ppm)	533.00	Lu	1.14	Ba (ppm)	567	Lu	0.44
Be (ppm)	4.00	Mo	9.80	Be (ppm)	3	Mo	1.8
Co (ppm)	21.20	Cu	37.10	Co (ppm)	11.3	Cu	26.0
Cs (ppm)	9.40	Pb	9.40	Cs (ppm)	36.5	Pb	20.9
Ga (ppm)	20.10	Zn	58.00	Ga (ppm)	20.4	Zn	53
Hf (ppm)	5.00	Ni	117.00	Hf (ppm)	4.8	Ni	49
Nb (ppm)	18.80	As	34.00	Nb (ppm)	15.6	As	129.8
Rb (ppm)	104.50	Cd	0.68	Rb (ppm)	87.6	Cd	1.4
Sn (ppm)	4.00	Sb	1.50	Sn (ppm)	3	Sb	0.3
Sr (ppm)	406.40	Bi	0.20	Sr (ppm)	321.3	Bi	0.4
Ta (ppm)	1.20	Ag	<0.10	Ta (ppm)	1	Ag	<0.1
Th (ppm)	210.00	Au (ppb)	<0.50	Th (ppm)	125	Au (ppb)	<0.5
U (ppm)	160.00	Hg	0.07	U (ppm)	110	Hg	0.07
V (ppm)	159.00	Tl	0.30	V (ppm)	258	Tl	0.2
W (ppm)	5.50	Se	2.000	W (ppm)	3	Se	2.3
Zr (ppm)	152.70			Zr (ppm)	157.0		

Komple kimyasal analizler sonucunda her iki santrale ait uçucu kül numunelerinin de V, Zr, Sr, U, Th ve Ba içeriklerinin kömürden uçucu küle transfer olan elementlerin oranı açısından diğer elementlere göre özellikle yüksek olduğu görülmüştür.

2.2.2 pH Profili deneyleri

İz elementlerin su içerisindeki hareket kabiliyetleri büyük ölçüde pH'a bağlıdır (Doğan 2007). Kül su sistemlerinin pH'ının statik olmadığı ve zamanla değiştiği göz önünde bulundurulmalıdır. pH'ı kontrol eden elementler suyun süzülmesiyle geçtikçe hem asit hem de alkali küller doğala daha yakın pH değerleri gösterme eğilimine girmekte ve bazı elementlerin hareket kabiliyetlerini etkilemektedirler (Görhan 2009).

Uçucu kül süspansiyonlarının pH profilini elde etmek amacıyla %1 katı oranında süspansiyon hazırlanmıştır. Bunun için 1 gr kül, pH'sı belirlenmiş 100 gr saf su ile bir beher içerisinde manyetik karıştırıcı ile karıştırılmış ve bu işlem esnasında belirli periyotlarla süspansiyonun pH değerleri okunmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen Yatağan ve Soma TS'leri kül numunelerinin pH profilleri Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin pH profilleri.

Süreye bağlı olarak elde edilen uçucu kül numunelerinin su içerisindeki pH değerlerinin bazık olduğu görülmektedir. Bu bilgi daha önce yapılan Türk küllerinin pH değişimi ile ilgili çalışmalardaki veriler ile örtüşmektedir. Genelde uçucu kül pH'si 8'in altına düşmemekte ve uçucu küller %2-3 oranında suda çözünmektedirler. Oluşan çözelti, kalsiyum sülfat içerdiği için alkali tepkime vermektedir (Özdemir 2003).

2.2.3 Suda çözünürlük deneyleri

Uçucu küllerin suda çözünürlüklerinin bilinmesi özellikle çevre açısından büyük önem taşımaktadır. As, Cd, Pb, vs gibi metallerin suda çözünerek hem ekolojik zararlara neden olması hem de yeraltı sularına karışarak çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmesi gözardı edilemeyecek önemli bir konudur. Genel olarak uçucu küllerin bünyesinde SO₂ ve toprak alkali metaller suda çözünür. İyi bir külde suda çözünen madde miktarı az olmalıdır.

Suda çözünürlük deneyleri manyetik karıştırıcı kullanılarak 1,000 dev/dak ile 2, 4, 6 saat sürelerinde 25 °C, 60 °C ve 80 °C de saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Süre ve sıcaklığa bağlı çözünürlük deneyleri sonuçlarına göre Yatağan ve Soma TS uçucu küllerinin çözünürlüklerinin süre sıcaklığa bağlı olarak arttığı ve en fazla çözünmenin 6 saat süre ve 80 °C sıcaklık şartlarında olduğu belirlenmiştir.

Suda çözünme deneyleri sonucunda elde edilen çözeltiler, uçucu küllerden çözünerek suya geçen içeriklerin belirlenmesi amacıyla ICP yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre Yatağan ve Soma TS küllerinden 6 saat sürede çözünen ağır metal içeriklerinin 13.02.2008 tarihli ‘Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’ndeki sınır değerlerle karşılaştırması yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Yatağan ve Soma TS küllerinin çözünen ağır metal içeriklerinin su kalitesi yönetmeliğindeki sınır değerlerle karşılaştırılması.

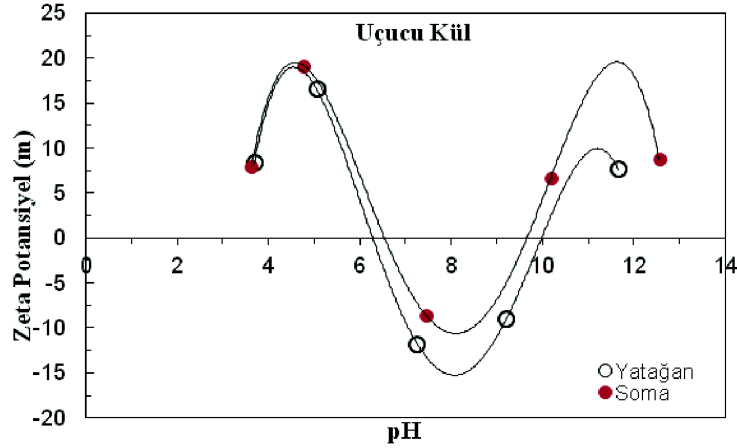
Elementler	Maden sanayii atık sularının alıcı ortama deşarj standartları (mg/l)	Yatağan TS külü suda çözülmesi ile elde edilen çözeltilerin analiz sonucu (mg/l)			Soma TS külü suda çözülmesi ile elde edilen çözeltilerin analiz sonucu (mg/l)		
		20 °C	60 °C	80 °C	20 °C	60 °C	80 °C
Kurşun (Pb)	0.5	1.783	2.973	3.256	0.792	1.792	2.623
Demir (Fe)	3	5.172	6.712	6.912	4.025	4.712	5.612
Çinko (Zn)	3	0.667	0.891	1.217	0.195	0.295	0.462
Civa (Hg)	0.05	0.0093	0.0099	0.0126	0.0093	0.0099	0.0126
Kadmiyum (Cd)	0.2	0.745	0.866	0.943	0.125	0.370	0.675
Bakır (Cu)	5	0.275	0.421	0.563	0.1791	0.263	0.299

Yatağan ve Soma TS uçucu küllerindeki 6 saat sürede çözünen ağır metal içeriklerinin 13.02.2008 tarihli “Su Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği”ndeki maden sanayi atık sularının alıcı ortama deşarj standartlarındaki sınır değerler karşılaştırılması sonucunda her iki numunede de çözünen Pb, Fe, Cd içeriklerinin sınır değerleri aştığı görülmektedir.

2.2.4 Zeta potansiyeli ölçümleri

Elektriksel çift tabaka ve dolayısıyla zeta potansiyeli ölçümü, flokülasyonu ve dağılmayı (dispersiyon) kontrol etmektedir (Yiğit ve Özkan 2007). Bu bağlamda uçucu küllerin yüzey özelliklerinin belirlenmesi ve sıfır yük notalarının (syn) bulunması amacıyla her bir numunenin pH’ya göre zeta potansiyeli ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamındaki zeta potansiyeli ölçümleri elektroforetik yöntemle ve Brookhaven Zetaplus cihazı kullanılarak yapılmıştır. Farklı pH’larda yapılan ölçümler sonucunda uçucu küllerin pH’ya bağlı zeta potansiyel profili elde edilmiştir. Ölçüm verileri ile oluşturulan Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin pH’ya bağlı zeta potansiyeli profili Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin zeta potansiyeli grafiği.

Şekilde görüldüğü üzere her iki TS kül numunesinin de tek bir sıfır yük noktası bulunmamaktadır. Her iki numunedeki ölçüm alınan pH aralıklarında iki sıfır yük noktası gözlenmiştir. Yaklaşık olarak pH=6.5 ile pH=9.8 aralıklarında numunelerin yüzey yüklerinin negatif olduğu görülmektedir.

Bunun nedeninin numunedeki bulunan amorf camsı silikatlardan ortama geçen Si^{+4} ve Al^{+3} veya Ca^{+2} gibi iyonların etkisi olduğu düşünülmektedir. $pH < 6.5$ ve $pH > 9.8$ durumlarında ise yüzey yükleri pozitif olmaktadır. Bunun nedeni ise 10'dan yüksek pH değerlerinde yüzey yükünün Ca^{+2} , Mg^{+2} ve Al^{+3} gibi iyonların etkisi sonucunda artması, pH=6.5'den düşük pH değerlerinde ise Si^{+4} iyonu etkisi ile yine yüzey yükünün pozitif değerlerde artmasına bağlanabilir.

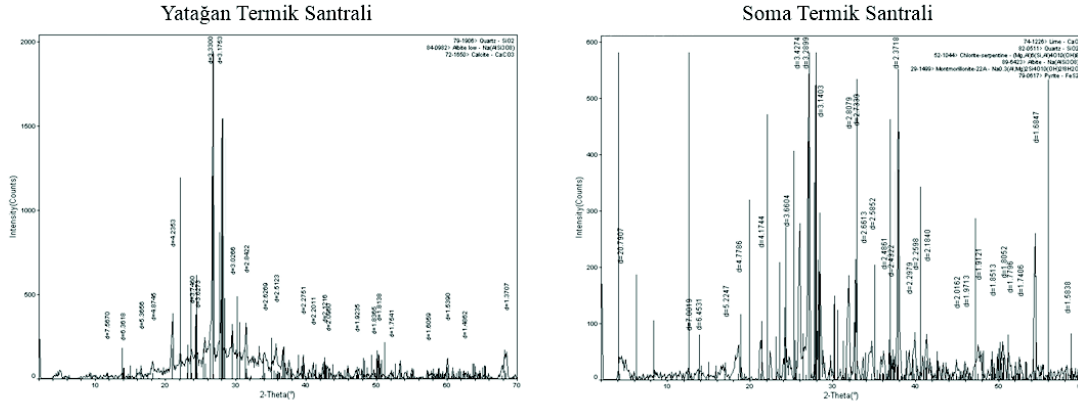
Uçucu küllerde çift sıfır yük noktası gözlenmesi durumu Özdemir ve Çelik (2002) tarafından da ortaya konulmuştur. Buna göre zeta potansiyeli ölçümleri bu konu ile ilgili bulguları desteklemektedir.

2.3 Mineralojik İncelemeler

Mineralojik incelemeler kapsamında; Yatağan ve Soma termik santralleri uçucu küllerinin mineralojik yapıları hakkında bilgi edinilmesi amacıyla XRD (X-Ray Diffraction) analizleri, optik mikroskop incelemeleri ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.3.1 XRD İncelemeleri

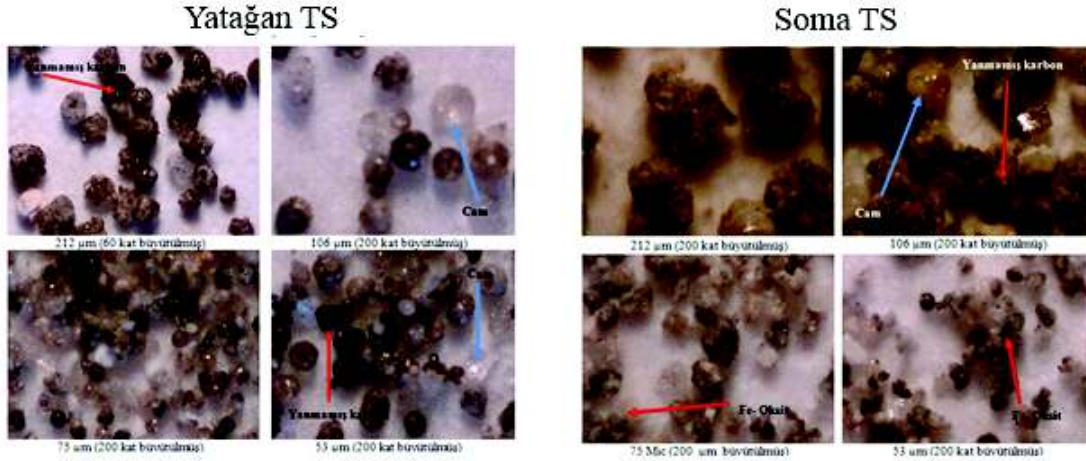
XRD ölçümleri sonucunda Yatağan TS uçucu kül numunesinin yüksek oranda kuvars- SiO_2 ve nispeten daha düşük miktarlarda albit- $Na(AlSi_3O_8)$, kalsit $CaCO_3$ minerallerini, Soma TS uçucu kül numunesinin ise kireç, kuvars- SiO_2 , albit- $Na(AlSi_3O_8)$, kalsit $CaCO_3$, klorit, serpantin, pirit, montmorillonit minerallerini içerdiği belirlenmiştir. Her iki kül numunesinde de iz elementlerin ve radyoaktif minerallerin XRD'de görülmesi mümkün olmamış, ancak ICP ve SEM analizlerinde tespit edilebilmiştir. Yatağan TS ve Soma TS uçucu kül numunelerinin XRD kırınım desenleri Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin XRD kırınım desenleri.

2.3.2 Optik mikroskop incelemeleri

Elek analizi sonucunda elde edilen fraksiyonlar mineral kompozisyonlarının belirlenmesi amacıyla optik mikroskop altında incelenmiş ve fotoğraflanmıştır. Yatağan TS ve Soma TS küllerinin mikroskop fotoğrafları Şekil 5’de görülmektedir.



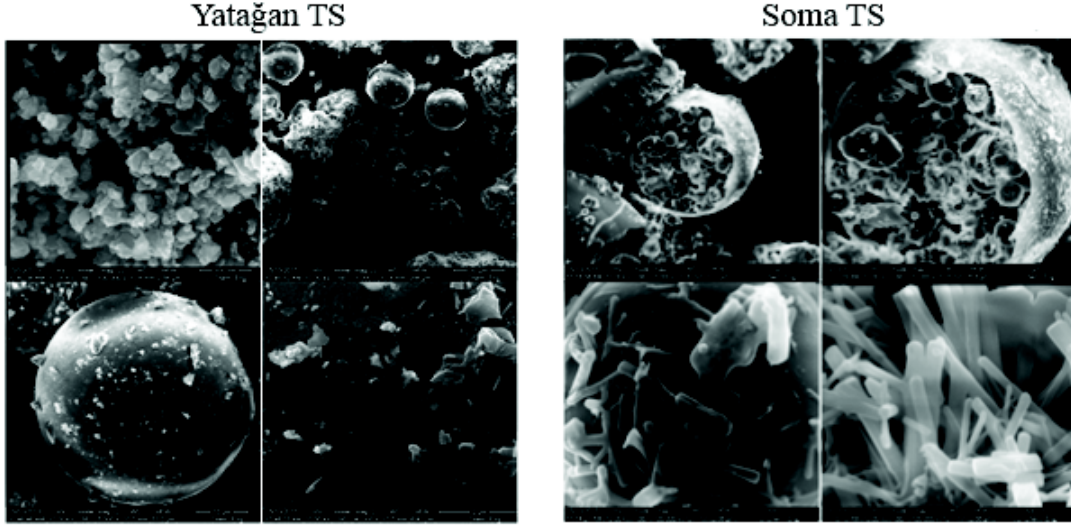
Şekil 5. Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin mikroskop fotoğrafları.

Optik mikroskop incelemeleri sonucunda gerek Soma TS külünde gerekse Yatağan TS külünde amorf maddelerin (cam) en önemli kısım olduğu saptanmıştır. Bunun yanı sıra özellikle Yatağan küllerinde hala yanmamış karbon parçacıkları da göze çarpmaktadır. Soma TS külünde ise Fe-oksit fazı dikkati çekmektedir.

Uçucu küllerdeki silisin bir kısmı kuvars kristalleri halinde, diğer bir kısmı ise alüminyumla birleşerek mullite (2SiO_2 , $3\text{Al}_2\text{O}_3$) dönüşmüş halde, geri kalanın ise camsı yapıda olduğu belirlenmiştir. Demir ise kısmen manyetit (Fe_3O_4) ve hematit (Fe_2O_3) geri kalanın da camsı yapıda olduğu saptanmıştır.

2.3.3 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri

Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin morfolojilerinin belirlenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizleri kapsamında elde edilen görüntüler Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Yatağan TS ve Soma TS uçucu küllerinin mikroskop fotoğrafları.

Soma TS uçucu külü morfolojik (SEM) analizleri değerlendirildiğinde genellikle büyüklükleri farklı, değişken ve düzensiz küresel tanecikler gözlenmektedir. Her iki külden de yüzeylerde pürüzlü küresel ve yarı küresel yapı hakimdir. Her iki külden de mevcut köşeli taneciklerin kil tanecikleri olduğu görülmektedir. Yine köşeli yapıların bazıları yanmamış karbondur. Yarı küresel taneciklerin kaynağının ise, küresel yapıların parçalanması ve kil minerallerinin yanmasından sonra ergime sıcaklığının altında soğuması olabileceği düşünülmektedir. Yatağan külü homojen olmayan bir tane dağılımına sahiptir. Yatağan küllerindeki kuvars ve ortoklas mineralleri kömür kaynaklı olup, stabil kristal örgüleri nedeniyle yanmadan küle katılmışlardır. Yatağan külünde kül taneciklerinde aglomerasyona rastlanmıştır. Her iki kül numunesinde de yanmamış karbonlar (char) az oranda blok yapılı ve daha çok oranda ağ ve pelet yapılı olarak gözlenmiştir.

2.4 Yatağan TS ve Soma TS Uçucu Küllerinin Uçucu Kül Standartlarına Göre Sınıflandırma Sonuçları

ASTM C618 standardına göre Yatağan Termik Santrali uçucu kül numunesi; SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerikleri toplamının %72.36 oluşu ile F tipi uçucu kül sınıfında yer almaktadır. Soma Termik Santrali uçucu kül numunesi ise SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerikleri toplamının %64.54 oluşu ile C tipi uçucu kül sınıfına girmektedir. Aynı zamanda bu küller CaO yüzdeleri %10'un üstünde olduğu için yüksek kireçli kül sınıfında yer almaktadırlar.

Hem Yatağan TS hem de Soma TS uçucu külleri ASTM 618 standardındaki sınır değerleri karşılamaları dolayısıyla çimento katkısı olarak kullanılabilir özelliktedirler.

F sınıfı uçucu kül küresel yapısı nedeniyle betonun işlenebilme özelliğini iyileştirmekte, taze betonda su kusmayı (terleme) azaltmakta, betonun hidrasyon ısısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonu dökümüne imkan tanımakta, puzolanik reaksiyon sayesinde betonun uzun dönemli mukavemetine katkıda bulunmakta, betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve betonun iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere dayanıklılığını arttırmaktadır. Buna karşılık, uçucu kül betonun erken dayanımını düşürebilmekte ve özellikle yüksek kireç içerikli (C sınıfı) uçucu külün betonda yüksek oranda kullanımı ise betonun hacim sabitliğinin bozulmasına yol açabilmektedir (Yazıcı 2005).

Yatağan TS uçucu küllerinin kimyasal bileşiminin uluslararası TS 639 standardında belirtilen limitlere uygun olduğu ve bu standarda göre de çimentoda kullanılabilir özellikte olduğu görülmektedir. Soma TS uçucu külleri ise SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içerikleri toplamının %70'den az olması nedeniyle standarttaki kriterleri karşılayamamaktadır.

TS EN 197-1 genel çimento sınıflarının bileşimini, özelliklerini ve uygunluk kriterlerini içeren tanımlayıcı bir standarttır. Yatağan ve Soma TS uçucu külleri TS EN 197-1 standardına göre kireç (CaO) oranları %10'dan, SiO_2 oranları ise %25'ten fazla oldukları için W (kalkersi) uçucu kül sınıfına girmektedirler. W sınıfı uçucu küller, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir töz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu standarda göre her iki kül numunesi de çimentoda kullanılabilir özelliktedir.

Sonuç olarak Yatağan ve Soma TS küllerinin çimento katkısı olarak kullanımlarında ait oldukları uçucu kül sınıfının özelliklerine göre avantaj ve dezavantajları da göz önünde bulundurulmalıdır.

3 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Enerji üretim sektöründe önemli bir yere sahip olan ve geleceğe yönelik yapılan projeksiyon çalışmalarında mevcut konumu daha uzun yıllar boyunca kaybetmeyeceği görülen termik santrallerin çalıştırılması sonucunda dünya ölçeğinde yılda milyarlarca ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Yatağan TS'den her yıl yaklaşık 1.3 milyon ton, Soma TS'den ise her yıl yaklaşık 2.5 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Günümüze kadar milyonlarca ton birikmiş olan uçucu küller herhangi bir değerlendirme işlemine tabi tutulmadığı düşünülmektedir. Ayrıca ne kadar yüksek verimle çalışsalar da santrallerin elektrofiltrelerinin devreye alınmaları sırasında bir miktar uçucu kül çevreye deşarj olmaktadır. Bu küllerin hem içerdikleri potansiyel çevre kirleticilerin azaltılması, hem de içerdikleri değerli metallerin kazanılması açısından değerlendirmeleri ise büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında Yatağan ve Soma termik santrallerinden uçucu kül numuneleri alınarak bu numunelerin üzerinde karakterizasyon gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen önemli bulgular;

Her iki numunenin de V, Zr, Sr, U, Th ve Ba içerikleri özellikle yüksek olduğu görülmüştür. Yatağan TS uçucu kül numunesinin 159 ppm V, 152.7 ppm Zr, 406.4 ppm Sr, 160 ppm U, 210 ppm Th ve 533 ppm Ba, Soma TS uçucu kül numunesinin

ise 258 ppm V, 157 ppm Zr, 321.3 ppm Zr, 110 ppm U, 125 ppm Th ve 567 ppm Ba içerdiği belirlenmiştir. Bu içeriklerin cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemleri ile değerlendirilmesinin önemli bir çalışma konusu olduğu görülmektedir.

Uçucu kül numunelerinin suda çözünme davranışlarının belirlenmesi ve küllerdeki suda çözünen içeriklerin “Su Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği”ndeki sınır değerler açısından incelenmeleri amacıyla sıcaklığa ve zamana bağlı suda çözünürlük deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda her iki kül numunesindeki suda çözünebilir içeriklerin çözünürlüğünün de sıcaklık ve zamana bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Her iki termik santrali kül numunesinde de en yüksek çözünme 80 °C sıcaklık ve 6 saat süresince yapılan deneyler sonucunda elde edilmiştir. Bu şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda Yatağan Termik Santrali kül numunesinde 2,975.66 mg/lt Ca, 3.448 mg/lt Ni, 2.675 mg/lt Mo, 1.217 mg/lt Zn, 3.256 mg/lt Hg, 2.556 mg/lt Cr, 3.986 mg/lt Ba, 6.912 mg/lt Fe, 1.621 mg/lt Co, 4.677 mg/lt Sr, Soma Termik Santrali kül numunesinde ise 2,267.21 mg/lt Ca, 3.021 mg/lt Ni, 2.127 mg/lt Mo, 2.623 mg/lt Hg, 2.125 mg/lt Cr, 1.672 mg/lt Ba, 5.612 mg/lt Fe, 1.679 mg/lt Co, 2.717 mg/lt Sr çözünmesi gözlenmiştir. Suda çözünürlük deneyleri sonuçlarına dayanarak Yatağan ve Soma termik santralleri uçucu küllerindeki 6 saat sürede çözünen ağır metal içeriklerinin 13.02.2008 tarihli “Su Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği”ndeki maden sanayii atık sularının alıcı ortama deşarj standartlarındaki sınır değerler karşılaştırılması sonucunda her iki numunede de çözünen Pb, Fe, Cd içeriklerinin sınır değerleri aştığı görülmektedir.

Kimyasal analizler sonucu elde edilen değerler kullanılarak numunelerin uçucu kül standartlarına göre sınıflandırılmaları yapılmıştır. ASTM C618 standardına göre Yatağan Termik Santrali uçucu kül numunesi; SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerikleri toplamının %72.38 oluşu ile F uçucu kül sınıfında, Soma Termik Santrali uçucu kül numunesi ise SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerikleri toplamının %64.54 oluşu ile C uçucu kül sınıfında yer almaktadır. Aynı zamanda bu küller CaO yüzdeleri %10’un üstünde olduğu için yüksek kireçli kül sınıfında yer almaktadırlar. Buna göre hem Yatağan TS hem de Soma TS uçucu külleri ASTM 618 standardındaki sınır değerleri karşılamaları dolayısıyla çimento katkısı olarak kullanılabilir özelliktedirler. Ancak Yatağan ve Soma TS küllerinin çimento katkısı olarak kullanımlarında ait oldukları uçucu kül sınıfının özelliklerine göre avantaj ve dezavantajları da göz önünde bulundurulmalıdır. Yatağan TS uçucu küllerinin kimyasal bileşiminin uluslararası standard TS 639’da belirtilen limitlere uygun olduğu ve bu standarda göre de çimentoda kullanılabilir özellikte olduğu görülmektedir.

Soma TS uçucu külleri ise SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerikleri toplamının %70’den az olması nedeniyle standarttaki kriterleri karşılayamamaktadır. TS EN 197-1 genel çimento sınıflarının bileşimini, özelliklerini ve uygunluk kriterlerini içeren tanımlayıcı bir standarttır. Yatağan ve Soma TS uçucu külleri TS EN 197-1 standardına göre kireç (CaO) oranları %10’dan, SiO₂ oranları ise %25’ten fazla oldukları için W (kalkersi) uçucu kül sınıfına girmektedirler. W sınıfı uçucu küller, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO₂ ve Al₂O₃’den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu standarda göre her iki kül numunesi de çimentoda kullanılabilirlik kriterlerini karşılamaktadır.

Sonuç olarak gerçekleştirilen karakterizasyon deneyleri; Yatağan ve Soma TS uçucu küllerinin içerdiği ağır metal, iz elementler ve radyoaktif element içeriklerinin hem çevresel etkilerinin azaltılabilirliğinin hem de ekonomik açıdan değer teşkil edebilecek içeriklerin kazanılmasının araştırılmasının önem teşkil eden araştırma konuları olduğunu ortaya koymuştur.

4 TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmayı 22333 sayılı proje ile destekleyen İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür eder.

5 KAYNAKLAR

- Ayçık, G. 2008. Kömür ve Külü ile Biyomas Külündeki Radyoaktif İzotopların Ortamdan Uzaklaştırılması (leaching), *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, ISBN: 978-796-404-743-5, Ankara.
- Doğan, Ö. 2007. *Afşin/Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Çöktürülmüş Kalsiyum Karbonat (CaCO₃) Kazanım Koşullarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- Dunxi, Y. 2009. Carbonation of Coal Fly Ash under Oxy-fuel Combustion Conditions, *International Conference on Power Engineering*, Kobe, Japan.
- Görhan, Z. 2009. *İleri Teknoloji Elementlerinin (ga-ge-se-te) Bazı Kömür Yataklarındaki Konsantrasyonlarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Günindi, İ. 2005. *Yumurtalık Sugözü Uçucu Külü İçeren Betonların Basınç, Eğilme ve Aşınma Dayanımlarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- IEA, 2011. *International Energy Agency*, <http://www.iea.org>
- Ozbayoğlu, G. 2011. Partitioning of Major and Trace Elements of a Turkish Lignite with Size and Density, *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 47, pp. 51-60.
- Özbayoğlu, G. 2012. Coal Preparation Effect on the Removal of Trace Elements, *Atılım Üniversitesi E-Bülten*, 25, ISSN: 1306-3472.
- Özdemir, O. 2001. *Tunçbilek Termik Santrali Uçucu Küllerinin Karakterizasyonu ve Yan Ürünlerinin Eldesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, O., Çelik, M. S., 2002. Characterization and Recovery of Lignitic Fly Ash by Products from the Tunçbilek Power Station, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 41, 2, pp. 143-150.
- Wilcox, D. A., Hardy, M. A. 1988. Effects of Coal Fly-Ash Disposal on Water Chemistry in An Intradunal Wetland at Indiana Dunes, *Environmental Science and Biology Faculty Publications*.
- Yazıcı, H. 2005. Yüksek Hacimde C Sınıfı Uçucu Kül İçeren Betonların Mekanik Özellikleri ve Sülfürik Asit Dayanımlılığı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11, 3, pp. 443-448.
- Yiğit, E., Özkan, Ş. G. 2007. *Flotasyon Yöntemi ve Uygulamaları*, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, ISBN: 978-975-404-784-4, 170 s.

**TÜRKİYE'DE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE
KÖMÜRÜN DURUMUNA VE KOMBİNE ÇEVİRİMLİ
ENTEĞRE GAZLAŞTIRMA (IGCC)
TEKNOLOJİSİNE GENEL BAKIŞ**
*AN OVERVIEW OF THE STATUS OF COAL IN
ELECTRICITY PRODUCTION IN TURKEY AND
INTEGRATED GASIFICATION COMBINED CYCLE
(IGCC) TECHNOLOGY*

H. Çelik, S. Samanlı, Ö. Öney, Y. Can
Uşak Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Uşak

ÖZET: Türkiye enerji kaynakları açısından dışa bağımlı bir ülkedir. Artan enerji talebi ve fiyatlar nedeniyle yerli enerji kaynaklarından daha fazla yararlanılması zorunluluk arz etmektedir. Bu kaynaklardan birisi de linyittir. Bu rezervlerin kullanılması kalkınma hedefleri doğrultusunda birçok olumlu katkılar yapacaktır. Ayrıca, temiz kömür teknolojilerindeki gelişmeler kömüre dayalı termik santrallerin önemini arttırmıştır. Bu sistemlerden birisi de Kombine Çevrimli Entegre Gazlaştırma Sistemidir (IGCC). IGCC mevcut kömür teknolojileri içerisinde ileri bir teknolojidir. Konvansiyonel kömüre dayalı güç sitemlerine göre başlıca avantajları yüksek verimli oluşları ve düşük emisyon değerlerine sahip olmalarıdır. Bu çalışmada dünyada elektrik üretimi, ülkemiz linyit rezervleri ve linyite dayalı termik santraller hakkında özet bilgiler verilmekte ve Kombine Çevrimli Entegre Gazlaştırma Sistemi (IGCC) tanıtılmaktadır.

ABSTRACT: Turkey is heavily dependent on imports in energy resources. The continuous rise of energy demand and prices makes it imperative for Turkey to meet a growing share of energy need from indigenous resources. One of these sources is lignite. Use of these reserves would make many positive contributions in line with development objectives. Additionally, developments in clean coal technology have increased the importance of coal-based thermal power plants. One of these systems is Integrated Gasification Combined Cycle System (IGCC). IGCC is an advanced technology that represents the cleanest of currently available coal technologies. Advantages of IGCC over current conventional coal-based power generation systems include: Higher efficiencies and lower emissions. In this study, the production of electricity in the world, lignite reserves and lignite based thermal power plants of Turkey are briefly outlined and Integrated Gasification Combined Cycle System (IGCC) is introduced.

1 GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkelerdeki hızlı nüfus artışı, paralelinde toplumsal refah seviyelerindeki yükseliş ve sanayileşmenin de etkisi ile en önemli üretim faktörlerinden biri haline gelen enerjiye olan talep sürekli olarak yükselmekte; enerji, insan hayatında giderek önemi artan vazgeçilmez bir olgu haline gelmektedir. Enerji üretimi ve tüketimi aynı zamanda bir ülkenin sosyal ve ekonomik kalkınmışlık düzeyini yansıtan önemli göstergelerden biri haline gelmiştir.

Ekonomik anlamda değişik yöntemlerle enerji elde edilen kaynaklar, enerji kaynakları olarak isimlendirilmekte ve değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Enerjinin kullanılışlarına (Koç ve Şenel 2013) ve dönüştürülebilirliklerine göre (Başol 1985) sınıflandırılması Çizelge 1’de verilmiştir.

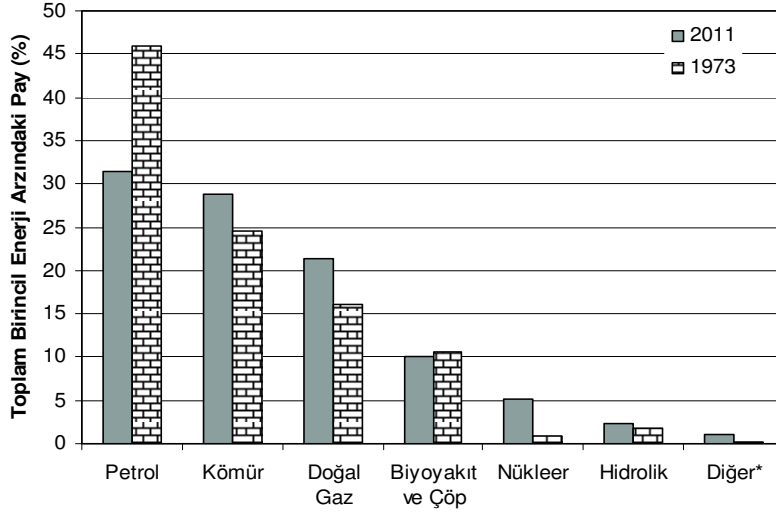
Çizelge 1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.

Kullanılışlarına Göre		Dönüştürülebilirliklerine Göre	
A) Yenilenemez	B) Yenilenebilir	A) Birincil (Primer)	B) İkincil(Sekonder)
Fosil Kaynaklı:	-Hidrolik	-Petrol	-Elektrik
-Kömür	-Güneş	-Kömür	-Kok-Briket
-Petrol	-Biyokütle	-Doğal gaz	-Havagazı (Şehirgazı)
-Doğal gaz	-Rüzgar	-Hidrolik	-Biogaz
Çekirdek Kaynaklı:	-Jeotermal	-Nükleer	-Sıvılaştırılmış petrol gazı
-Uranyum	-Dalga, Gel-Git	-Jeotermal	(L.P.G.)
-Toryum	-Hidrojen	-Güneş	
		-Rüzgar	
		-Odun	
		-Tezek	

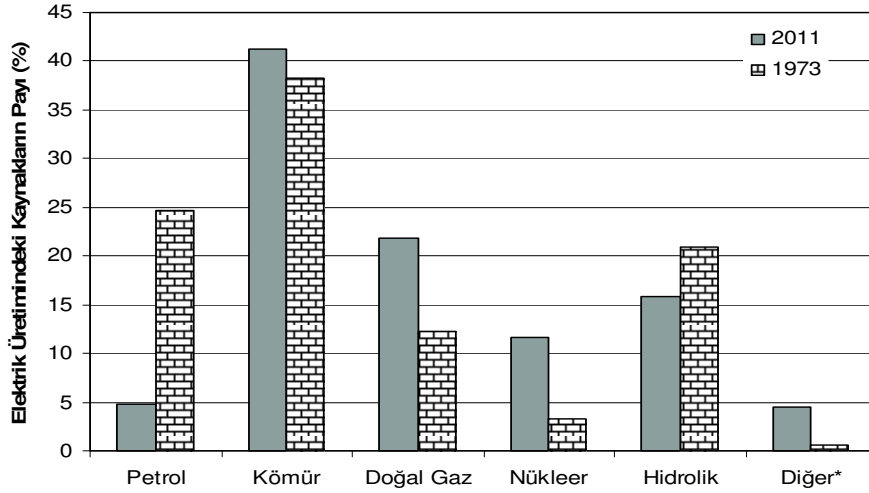
Dünya birincil enerji arzı 1973 ve 2011 yılları arasındaki 38 yılda yaklaşık 2.15 kat artarak 2011 yılı itibariyle 13.113 mtep (milyon ton eşdeğer petrol) düzeyine ulaşmıştır. Söz konusu dönemde; petrolün payı %46’dan %31.5’e düşerken, doğal gazın payı %16’dan %21.3’e, nükleer enerjinin payı %0.9’dan %5.1’e yükselmiştir. Aynı dönemde kömürün payı 4.2 puan artışla %24.6’dan %28.8 düzeyine ulaşmıştır (Şekil 1). 2011 yılında dünya birincil enerji arzında fosil menşeli kaynaklar olan petrol %31.5, kömür %28.8, doğal gaz %21.3 ile toplam arzın %81.6’sını oluşturmuştur (IEA 2013).

1973-2011 arasındaki dönemde dünyada üretilen elektrik enerjisi yaklaşık 3.6 kat artarak 22.126 Twh’a yükselmiştir. 2011 yılı dünya elektrik üretiminin %41.3’ü kömürden, %21.9’u doğalgazdan, %15.8’i ise hidrolik kaynaklardan sağlanmıştır (Şekil 2) (IEA 2013).

Fosil yakıtların Dünya’da bilinen rezerv dağılımları petrol eşdeğeri olarak % 70 kömür, %14 petrol, %16 doğal gaz olarak hesaplanmaktadır. Bilinen petrol rezervlerinin ömrü 40 yıl, doğal gazın 60 yıl, kömürün ise 240 yıldır. Dünya elektrik üretiminde, 2004 yılında %39 civarında olan kömür payının, 2020 yılında %48’e yükseleceği tahmin edilmektedir.



Şekil 1. 1973 ve 2011 yıllarında dünya birincil enerji arzında kaynakların payı (%) (*jeotermal, güneş, rüzgar vb.).



Şekil 2. 1973 ve 2011 yıllarında dünya elektrik üretiminde kaynakların payı (%) (*jeotermal, güneş, rüzgar, biyoyakıt ve çöp vb.).

Kömür; rezervlerinin dünyaya yayılmış olarak bulunması, bilinen rezervlerin uzun ömürlü olması, arama üretim ve nakliye kolaylığı gibi nedenlerle dünyada en güvenilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir (Önal ve Doğan 2006). Kömürün birincil yakıt olarak kullanımının 2030 yılına kadar yaklaşık %30 oranında ve dünyadaki kömüre dayalı termik santrallerin kapasitelerinin ise %40'ın üzerinde artacağı beklenmektedir (Mondol vd. 2009).

Ülkemizde ise birincil enerji arzının kaynaklara dağılımında yıllar içerisinde önemli değişiklikler söz konusudur. 1971 yılında arzın %46.5'i petrol, %29'u odun ve hayvan-bitki artıkları ve %23.5'i yerli kömürden (linyit, taşkömürü ve asfaltit) karşılanırken; 2011 yılına gelindiğinde en büyük pay %32.3 ile 1980'li yılların ortalarından itibaren ithalatına başlanan doğal gazın olmuş, petrol %26.7, yerli kömür

%15.8 ve odun ve hayvan-bitki artıkları %3.1 düzeyine gerilemiş, ithal kömür (taşkömürü, kok ve petrokok) ise %15.5 seviyesine yükselmiştir (TKİ 2013).

Kaynaklar açısından bakıldığında, 2012 yılı itibariyle toplam elektrik üretiminin %43.6'sı doğalgazdan, %15.9'u yerli kömürden, %24.2'si hidrolik kaynaklardan, %12.2'i ithal kömürden, %2.4'ü rüzgardan, % 0.4'ü asfaltitten ve % 1.3'ü diğer kaynaklardan sağlanmıştır. 2011 yılı ile kıyaslandığında özellikle ithal kömür ve hidrolik kaynaklardan yararlanma oranı artarken, linyit ve doğalgazın oranlarında düşme görülmüştür (ETKB 2013).

2012 yılı itibariyle Türkiye'nin kurulu gücü toplam 57,059.4 MW olup bunun toplam %21.72'sini (12,391 MW) kömüre dayalı termik santraller oluşturmaktadır. Yerli kömürün ülkemiz elektrik kurulu gücü ve brüt elektrik üretimi içindeki payı hızla düşmektedir.

1986 yılında %37.3 düzeyine kadar yükselen kurulu güç içindeki pay 2004 yılında %18.4 düzeyine kadar gerilemiş, 2005 ve 2006 yıllarında devreye alınan Çanakkale Çan ve Afşin-Elbistan B santralleri ile %21 seviyesine kadar yükseltilebilmişse de daha sonra bu alanda yeni bir yatırımın devreye girmemesi nedeniyle 2012 yılında yerli kömürün kurulu güç içindeki payı %15.1 olarak gerçekleşmiştir.

Brüt elektrik üretimi içindeki yerli kömür payı da doğal olarak benzer bir gelişimi izlemiştir. Yerli kömürün kurulu güç ve brüt elektrik üretimindeki payı Şekil 3'de verilmiştir (TKİ 2013).



Şekil 3. Yerli kömürün kurulu güç ve brüt elektrik üretimindeki payı (TKİ 2013).

2 TÜRKİYE KÖMÜR REZERVLERİ VE TERMİK SANTRALLERİN DURUMU

2.1 Türkiye Kömür Rezervleri

Ülkemizde taşkömürü rezervleri sadece Zonguldak'ta bulunmaktadır. Havzada bugüne kadar yapılan çalışmalarda -1,200 m derinliğe kadar tespit edilmiş toplam jeolojik rezerv 1,316 milyar ton olup, bunun yaklaşık %39'u (514 milyon ton)

görünür rezerv olarak kabul edilmektedir. Havzada koklaşabilir rezervler Kozlu, Üzülmüş ve Karadon bölgelerinde yer almaktadır. Koklaşabilir taşkömürü rezervlerinin toplam rezervler içerisindeki payı yaklaşık %67'dir. Havza kömürlerinin kalorifik değeri 5,450-7,050 kcal/kg (AID) arasında değişmektedir (TTK 2013).

Linyit sahaları ise ülkemizin bütün bölgelerine yayılmıştır. 2012 yılı sonu itibariyle toplam linyit rezervi yaklaşık 13.4 milyar ton'dur (Çizelge 2) (Özbayoğlu ve Arslan 2013). En önemli rezervlerimiz; Afşin-Elbistan, Muğla, Soma, Tunçbilek, Seyitömer, Beypazarı ve Sivas'da bulunmaktadır. En büyük rezerv Afşin-Elbistan bölgesinde olup, rezerv miktarı yaklaşık 3.4 milyar ton ve ortalama 1,100 kcal/kg ısıl değerdedir. Türkiye linyit rezervleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Türkiye linyit rezervleri (2012) (x 1000 t) (Özbayoğlu ve Arslan 2013).

Sektör	Görünür	Mümkün	Muhtemel	Toplam
EÜAŞ	7,589,156	207,706	2,963	7,799,825
TKİ	2,338,227	226,832	1,560	2,566,619
MTA	1,420,000	118,531	--	1,538,531
Özel sektör (2011)	1,094,000	362,000	139,000	1,595,000
Toplam	12,441,383	915,069	143,523	13,499,975

Linyit sahaları ülkemizde bütün bölgelere yayılmış olup, bu sahalardaki linyit kömürünün ısıl değerleri 1,000-5,000 kcal/kg arasında değişmektedir. Ülkemizdeki toplam linyit rezervinin yaklaşık %68'i düşük kalorili olup, %23.5'i 2,000-3,000 kcal/kg arasında, %5.1'i 3,000-4,000 kcal/kg arasında, %3.4'ü 4,000 kcal/kg üzerinde ısıl değerdedir. Linyit ve taşkömürü devlet ve özel sektör tarafından üretilmektedir. Yıllık satılabilir taşkömürü üretimi yaklaşık 2.5 milyon ton'dur. Bu üretimin yaklaşık % 60'ı elektrik üretiminde, %20'si demir-çelik sektöründe, kalanı sanayi ve ısınma sektöründe tüketilmektedir. Yıllık linyit üretimimiz ise yaklaşık 70 milyon ton olup, yaklaşık % 80-85'i elektrik üretiminde, kalan miktarı ise sanayi ve ısınma sektöründe kullanılmaktadır (TKİ 2013).

2.2 Kömüre Dayalı Santrallerin Türkiye Açısından Önemi

Ülkemizde toplam 25 adet termik santral bulunmaktadır. Bunun 17 adedi linyite (8,143 MW), 2 adedi ise taşkömürüne (335 MW) dayalı olup toplam kapasiteleri 8,478 MW'dır. 1950'li yıllarda üretime başlayan Tunçbilek ve Soma termik santralleri halen üretime devam etmektedir. 1970'li yıllarda linyite dayalı termik santrallerin kurulmasına başlanmış ve 1980'li yıllarda santrallerin çoğu kurulmuştur. 1,440 MW kapasiteli Afşin-Elbistan termik santrali ise 2004 yılında işletmeye alınmıştır (Say 2006).

Ülkemizdeki kömüre dayalı termik santrallerin çoğu konvansiyonel metotlarla işletilmektedir. Bu santrallerin tamamı tüvenan kömür yakmak üzere tasarlanmış olup herhangi bir kömür zenginleştirme işlemi bulunmamaktadır. Bu termik santrallerden Çayırhan (620 MW), Elbistan B (1,440 MW) ve Çan (320 MW) termik santralleri bir kenara bırakılacak olursa, halen çalışan termik santrallerin çoğu kullanım sürelerini

(25 yıl) doldurmuştur. Bu nedenle düşük kapasite ile çalıştırılmak zorunda kalınmaktadır (Ateşok 2009). Ülkemiz linyit rezervleri dikkate alındığında mevcut kurulu güce ilave olarak 17,000 MW linyite dayalı termik santral kurulma kapasitesi vardır. Böylece linyite dayalı kurulu güç toplam olarak yaklaşık 25,000 MW'a ulaşabilecektir (Koçak 2013).

Kömür kaynaklarımıza dayalı termik santrallere yatırım yapmakla, doğal gaz santrallerine göre en az on kat, ithal kömür santrallerine göre en az dört kat daha fazla istihdam yaratılacaktır. Ayrıca doğalgaz santrallerine oranla santral yatırımının yüksek olmasına karşın, yakıt maliyetinin düşük olması nedeniyle de elektrik fiyatlarının ucuzlamasına önemli katkısı olacaktır. Kömür rezervlerine dayalı elektrik üretimi arttıkça, Türkiye'nin ithalat-ihracat farkı ve dışa bağımlılığı azalacak, yerli sanayi gelişecektir (DEKTMK 2012).

Diğer taraftan, elektrik üretiminde farklı enerji üretim yöntemlerinin çalışma süreleri de genel maliyetleri doğrudan etkilediğinden mutlaka dikkate alınmalıdır. Termik santraller yılda 6,000 ile 8,000 saat çalışmakta, ayrıca 760 saat de bakım yapılmaktadır. Hidrolik santraller su rejimine bağlı olarak yılda en fazla 4,000 saat, rüzgâr santralleri ise yılda 2,000-2,500 saat çalışmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde de linyit kaynaklarımızın önemi bir kez daha anlaşılmaktadır (Şengüler 2014, Özbayoğlu 2014).

3 KOMBİNE ÇEVİRİMLİ ENTEGRE GAZLAŞTIRMA SİSTEMİ (IGCC)

Temiz kömür teknolojileri; enerji verimliliğini artırmakta ve kömürün neden olduğu çevre gaz emisyonlarını azaltmaktadır. Temiz kömür teknolojileri; kömürün üretimi, zenginleştirilmesi ve kullanımında verimliliği artırarak kömür kullanımının çevresel etkilerini azaltmaya yönelik teknolojiler olarak tanımlanır. Temiz kömür teknolojilerinin uygulanması ile kömürün yanması sonucu ortaya çıkan emisyon azaldığı gibi, tüketilen her ton kömürden elde edilen faydalı enerji artırılmış olur (TKİ 2013).

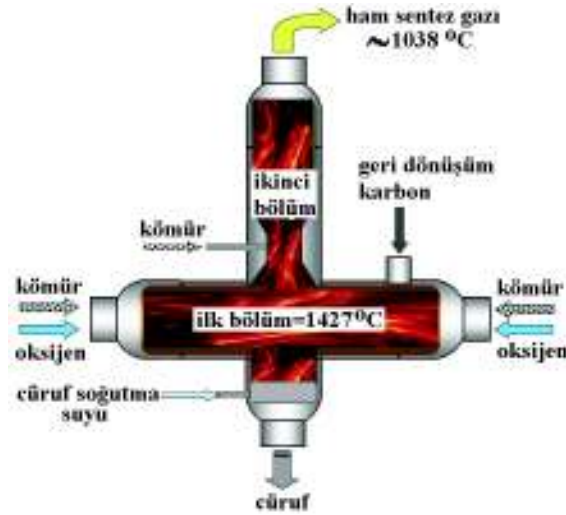
Temiz kömür teknolojileri olarak adlandırılan kömüre dayalı güç üretim teknolojileri ısısal verimliliği arttırmak, CO₂ ve diğer emisyonları (NO_x, SO₂ ve partiküller) düşürmek için geliştirilmektedir. Günümüzde başlıca kömüre dayalı güç üretim teknolojileri aşağıda sıralanmıştır (IEA 2011):

- Süperkritik (SC) ve ultrasüperkritik (USC) pulverize kömür yakma teknolojisi,
- Dolaşımli akışkan yatak yakma (CFBC) teknolojisi,
- Kombine çevrimli entegre gazlaştırma teknolojisi (IGCC)

Kömürün (veya petrokok, biyokütle vb. gibi diğer hidrokarbonların) gazlaştırılması; kömürün elektrik üretimi, çeşitli kimyasalların üretimi gibi çeşitli maksatlarla kullanılan sentez gazı veya syngas olarak isimlendirilen ve genel olarak hidrojen ve karbonmonoksitten oluşan bir gaza dönüştürülmesi amacıyla yapılan bir işlemdir. Günümüzde kömürün gazlaştırılması ile elektrik üretimi prensibine dayalı en başarılı uygulanan metot Kombine Çevrimli Entegre Gazlaştırma (Integrated Gas Combined Cycle, IGCC) teknolojisidir. IGCC; gelişmekte olan ve kömür gibi fosil kaynaklardan

yüksek verimlilik ve düşük emisyon hacim değerleri ile elektrik üretiminde kullanılan bir sistemdir (WPG 2008, Rardin vd. 2005, Maurstad 2005).

IGCC prosesinin ilk bölümünde ince öğütülmüş kömür (kuru veya pülp halinde) bir gazlaştırıcıda (Şekil 4) yüksek sıcaklık ve sınırlı miktarda oksijen ile birlikte tepkimeye sokulmakta, hidrojen ve karbonmonoksitçe zengin sentez gazına kimyasal olarak dönüştürülmektedir. Kömürün kuru beslendiği durum pülp halinde beslemeye göre daha az su buharlaştırılacağından verimi daha yüksek olan bir uygulamadır. Gazlaştırıcıda oluşan cüruf atılmakta veya ticari olarak kullanılabilir. Günümüzde hareketli yataklı gazlaştırıcı, akışkan yataklı gazlaştırıcı ve sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı olmak üzere 3 tip gazlaştırma sistemi mevcut olup, sürüklemeli akışlı gazlaştırıcının kullanımı diğerlerine göre daha yaygındır. Bu gazlaştırıcıda yakıtın kalış süresi çok kısa olduğundan, yakıtın çok küçük boyutlarda ufalanarak beslenmesi gerekmektedir (WPG 2008, Rardin vd. 2005, Maurstad 2005, Wu ve Wang 2012).

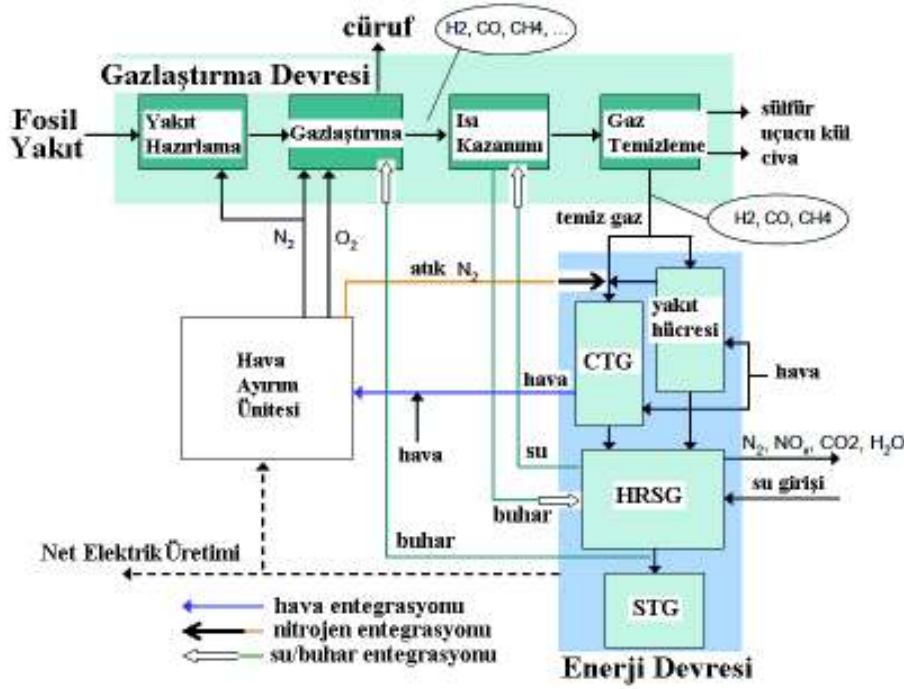


Şekil 4. Gazlaştırıcının kesit şekli (Conoco Phillips E-Gas™ Technology) (WPG 2008)

Gazlaştırıcıya verilen oksijen hava ayırım ünitesinden sağlanmakta, kömürün kısmi oksidasyonu gazlaştırıcıdaki sıcaklığı yükseltmekte ve sentez gazı oluşumu için karbon dönüşümüne katkı vermektedir. Hava ayırım ünitesinden elde edilen azot gazı, sentez gazının gaz türbin jeneratörüne (Combustion Gas Turbine Generator, CTG) verilmesinden önce seyreltilmesi amacıyla kullanılabilir. Gazlaştırıcıdan alınan sentez gazı önce soğutulup daha sonra sülfür, civa, amonyak, klorit ve uçucu kül gibi kirlenici unsurlardan temizlendikten sonra elektrik üretimi amacıyla CTG'ye gönderilmektedir. Sentez gazı burada azot ile birlikte yakıldığından, NO_x gaz emisyonu düşürülmektedir. Sentez gazından uzaklaştırılan kükürtlü bileşiklerden, ticari olarak kullanılabilir nitelikte elementel kükürt elde edilebilir. Gaz temizleme ünitesinden sonra gerektiğinde CO₂ gazı tutumuna yönelik karbon yakalama ve depolama (Carbon Capture and Storage, CGS) ünitesi kurulabilir. Atık gazlarının yüksek kısmi basınçları ve düşük hacimsel akışları nedeniyle, gaz temizleme prosesi geleneksel temizleme yöntemlerine göre verimli ve düşük maliyetli şekilde gerçekleştirilebilir. Gazlaştırıcıdan alınan sıcak ham sentez gazı makul oranda ısı içerdiğinden, bu ısıdan ısı kazanım ünitesi ile buhar

türbin jeneratörü (Steam Turbine Generator, STG) için buhar kazanılabilmektedir. Bu maksatla ısı kazanım ünitesinin kullanımı verim değerini yükseltirken, yatırım maliyetini artırmaktadır.

Gaz türbin jeneratöründe (CTG) oluşan atık yanma gazları hala önemli oranda yüksek ısı içerdiğinden ısı kazanım buhar jeneratörüne (HRSG) gönderilir. Buradan kazanılan buhar ile STG çalıştırılarak kombine çevrimde ilave elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir (Şekil 5). Sentez gazının yanma öncesi temizlenmesi IGCC yönteminin önemli avantajlarından. Bu durum NO_x ve SO_2 gazlarının yanma sonrası gaz temizleme usulüne göre daha ucuz kontrolüne olanak vermektedir. Ayrıca, CO_2 nispeten daha konsantre halde olduğundan daha kolay şekilde ayırımı gerçekleştirilebilmektedir. Kombine çevrim teknolojisi ile düşük emisyon derecelerinde, kömürden elektrik üretim verim değerleri önemli derecede yükseltilebilmektedir (WPG 2008, Rardin vd. 2005, Maurstad 2005, Wu ve Wang 2012).



Şekil 5. Kombine çevrimli entegre gazlaştırma sistemi akım şeması (Rardin vd. 2005).

IGCC devresinde CO_2 gazının yakalanmasına yönelik devre dizaynında, CO_2 gazının taşınım için kompresyonu yanında iki ilave prosese ihtiyaç duyulmaktadır (Maurstad 2005):

- CO 'in H_2O ile tepkimeye sokularak H_2 ve CO_2 'e dönüştürüldüğü reaktör ve
- solvent yöntemi (fiziksel: Selexol, Rectisol, Purisol prosesi veya kimyasal: Benfield, MEA, MDEA, Sulfinol prosesi), membran yöntemi (polymerik, metalik, seramik) veya sıvılaştırılmış gaz akımının distilasyonu yöntemi. (DMSEMS 2010)

Çizelge 3’de bitümlü kömürler için IGCC sistemine CO₂ yakalama ünitesinin eklendiği ve eklenmediği tesis tasarımlarında verim ve yatırım maliyetleri verilmektedir. Çizelgedeki 2020 tesisleri; bitümlü kömür yakan, gazlaştırıcıya kuru beslemenin yapıldığı ve iki aşamalı sürüklemeli akışlı gazlaştırıcının kullanıldığı tesisler için 2020 yılına ait tahmini değerleri ifade etmektedir. Tablodan görüleceği üzere CO₂ yakalama üniteli 2020 yılı tesisleri, günümüz CO₂ yakalama ünitesinin eklenmediği IGCC tesislerine göre verim değerleri daha yüksek ve yatırım maliyeti hemen hemen aynı olacaktır.

Çizelge 3. Günümüz IGCC teknolojilerinin ve 2020 yılı tesislerinin karşılaştırılması (Maurstad 2005)

	CO ₂ yakalama ünitesiz			CO ₂ yakalama üniteli		
	GE*	Shell*	2020 tesisi	GE	Shell	2020 tesisi
Verim, (% , alt ısı değeri)	38.0	43.1	48.9	31.5	34.5	43.2
Yatırım maliyeti (\$/kW)	1,187	1,371	1,129	1,495	1,860	1,248

*Gazlaştırıcı tipi (GE: General Elektrik)

Bitümlü kömürler gibi yüksek kaliteli kömürler linyit gibi düşük kaliteli kömürlere göre daha yüksek verimle gazlaştırılmaktadır. Düşük kaliteli kömürlerin yüksek nem ve kül içerikleri nedeniyle, nemi buharlaştırma ve külü ergitme için daha çok enerji harcanacağından, daha fazla oksidasyona (daha çok oksijen) ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda, düşük kaliteli kömürler düşük birim ısı değerlerinden dolayı sisteme daha fazla yakıt besleme gereksinimi doğuracağından, bu durum daha geniş proses cihazlarına ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, yüksek kül içeriği daha fazla kapasiteli cüruf işleme sistemine sebep olmaktadır (Maurstad 2005).

IGCC teknolojisinin avantaj ve dezavantajları ise aşağıda sıralanmıştır (Wu and Wang 2012):

- Yüksek hidrokarbonlu herhangi bir yakıt (düşük veya yüksek kükürtlü kömür, antrasit ve biyokütle gibi) kullanılabilirdiğinden yüksek yakıt esnekliğine sahiptir.
- Elektrik üretim verimi CO₂ tutma olmaksızın %45’den daha fazla olabilir. Mevcut işletilmekte olan tesislerde bu değer %38-41 aralığında bulunmaktadır. Gaz türbinlerinin gelişimi ve gelecekteki verim arttırmaya yönelik iyileştirmeler ile verim %50’nin üzerine çıkartılabilecektir.
- IGCC tesisleri geleneksel kömüre dayalı termik santrallerden daha düşük SO_x, NO_x ve partikül madde emisyon değerlerine sahiptir.
- Gazlaştırıcıdan çıkan sentez gazı yüksek basınca sahip olduğundan, CO₂ uzaklaştırılması daha küçük ekipmanlar ve daha basit şekilde gerçekleştirilebilmektedir.
- Gazlaştırma ve gaz temizleme sürecinde elde edilen cüruf, uçucu kül gibi malzemeler ticari olarak değerlendirilebilir. Örneğin, cüruf bina uygulamalarında kullanılabilir.

- CO₂ tutma işlemi sonrasında özellikle hidrojen gazının potansiyel temiz yanıcı yakıt kaynağı olarak popülerliği artmaktadır.
- Ultra süperkritik güç santralleri ile karşılaştırıldığında IGCC yönteminin ilk yatırım maliyeti %6-10 daha fazladır.
- Son yıllarda IGCC teknolojisinin mevcudiyeti önemli derecede artmış olmasına rağmen, pulverize kömür teknolojisinin hala gerisindedir. Yöntemin güvenilirliği en önemli engel olarak kabul edilmektedir.
- Tesisin uzun yapım süresi ve az işletme tecrübesi diğer dezavantajlar arasında sayılabilir.

4 SONUÇ

Kömür yaygın ve ucuz bir enerji kaynağı olarak büyük önem taşımakta ve enerji arzında güvenilirliğini korumakta olup, gelecek yıllarda da önemini giderek arttıracığı öngörülmektedir. Dünyada kömür yakan santrallerde yeni yakma teknolojileri uygulanarak santral verimi arttırılmakta ve atmosfere salınan zararlı emisyonlar azaltılmaktadır.

Linyit rezervlerimizin ağırlıklı olarak düşük ısı değerinde olması, bu kaynaklarımızın daha çok termik santrallerde elektrik üretim amaçlı tüketilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak, çoğu konvansiyonel metotlarla işletilmekte olan, tüvenan kömür yakmak üzere projelendirilmiş termik santrallerimiz dizayn değerlerinin altında verim ile çalışır durumdadır. Diğer yandan Ülkemizin enerjideki dışa bağımlılığının azaltılması için yerli kaynaklardan azami ölçüde faydalanmak gerekmektedir.

Enerji verimliliğini artırmak ve kömürün neden olduğu gaz emisyonlarını azaltmayı hedefleyen temiz kömür teknolojilerinin kullanılması yerli kaynaklarımızın etkin kullanımına yönelik çözümlerdendir. Bu teknolojilerden yüksek kaliteli kömürlere daha başarılı ve ekonomik olarak uygulanabilen Kombine Çevrimli Entegre Gazlaştırma Sistemi (IGCC) teknolojisi ve diğer teknolojilerden en uygun olanının tespit edilerek kullanılması yerli kömür kaynaklarımızın daha verimli bir şekilde değerlendirilmesi açısından önemlidir.

5 KAYNAKLAR

- Ateşok, G. 2009. *Kömür Kullanımı ve Temiz Kömür Teknolojileri*, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, İstanbul.
- Başol, K. 1985. *Doğal Kaynaklar Ekonomisi (Doğal Kaynaklar, Enerji ve Çevre Sorunları)*, İstiklal Matbaası, İzmir.
- DMSEMS (2010) *IGCC State-of-the-Art Report: A Part of EU-FP7 Low Emission Gas Turbine Technology for Hydrogen-rich Syngas*, Department of Mech. & Structural Eng. & Material Science, University of Stavanger, Norway, http://www.h2-igcc.eu/Pdf/State-of-the-art%20IGCC%20_2010-04-29.pdf

- DEKTMK (2012) *Enerji Raporu 2012*, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara, ISSN: 1301-6318, <http://www.dektmk.org.tr/>
- ETKB (2013) *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Bağlı ve İlgili Kuruluşların Amaç ve Faaliyetleri*, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <http://www.enerji.gov.tr/>
- IEA (2011) *Power Generation From Coal 2010*, International Energy Agency, <http://www.iea.org/>
- IEA (2013) *Key World Energy Statistics 2013*, International Energy Agency, <http://www.iea.org/>
- Koç, E., Şenel, M. C. 2013. Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu: Genel Değerlendirme, *Mühendis ve Makine*, 54, 639, s. 32-44.
- Koçak, C. 2013. Türkiye Kömür Rezervlerine Dayalı Elektrik Üretimi ve Elektrik Talep Tahminleri, *23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey*, Antalya.
- Maurstad, O. 2005. *An Overview of Coal Based Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technology*, Massachusetts Institute of Technology Laboratory for Energy and the Environment, Cambridge.
- Mondol, J. D., Wright, D. M., Rezvani, S., Huang, Y., Hewitt, N. 2009. Techno-economic Evaluation of Advanced IGCC Lignite Coal Fuelled Power Plants with CO₂ Capture, *Fuel*, 88, pp. 2495–2506.
- Özbayoğlu, G. (2014) *Enerji Üretiminde Kömürün Geleceği ve Türkiye’de Durum*, http://acikarsiv.atilim.edu.tr/browse/397/iz-13_gulhanozbayoglu.pdf
- Özbayoğlu, G., Arslan, V. 2013. Status of Coal: Turkey, *XVII International Coal Preperation Congress*, İstanbul-Turkey, pp. 41-44.
- Önal, G., Doğan, Z. 2006. Enerjide Temiz Kömür, *Türkiye 10. Enerji Kongresi*, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi.
- Rardin, R., Yu. Z., Holland. F., Oberbeck, J., Black, A. 2005. *Factors that Affect the Design and Implementation of Clean Coal Technologies in Indiana*, Purdue Energy Research Modeling Groups, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Say, N. P. 2006. Lignite-fired Thermal Power Plants and SO₂ Pollution in Turkey, *Energy Policy*, 34, pp. 2690–2701.
- Şengüler, İ. (2014) *Türkiye’nin Yeni Linyit Kaynakları ve Enerji Potansiyeli*, www.dektmk.org.tr/
- TKİ (2013) *Sektör Raporu 2012*, Türkiye Kömür İşletmeleri, www.tki.gov.tr
- TTK (2013) *Taşkömürü Sektör Raporu*, Türkiye Taşkömürü Kurumu, www.taskomuru.gov.tr
- WPG (2008) *Technology Status and Project Development Risks of Advanced Coal Power Generation Technologies in APEC Developing Economies*, Worley Parsons Group, Inc., Energy Working Group Project EWG 06/2007A, http://www.egcfe.ewg.apec.org/projects/EWG_06-2007_Report%20_2008-10-01.pdf
- Wu, Z., Wang, S. 2012. IGCC Plant Technology Recent Research: CO₂ Management and System Integration, *International Conference on Environmental Engineering and Technology Advances in Biomedical Engineering*, 8, pp. 37-45.

TERMİK SANTRALLERDE YANMAMIŞ KARBONUN NEDENLERİ VE AZALTILMASI

REASONS AND DECREASING OF UNBURNED CARBON IN THERMAL POWER STATIONS

M. Bilen, S. Kızıgut, İ. Toroğlu, S. Yılmaz
Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET: Kömüre dayalı elektrik üretimi yapılan termik santrallerde ve büyük miktarlarda öğütülmüş çok ince kömür kullanılan tesislerde külde yanmamış karbon içeriği %6-7, zaman zaman da daha yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu durum karbon kaybına bağlı olarak yanma verimliliğindeki düşüşü ifade etmektedir, ayrıca elde edilen külün çimento katkı maddesi vb. amaçlı kullanımını, yüksek karbon içeriğinden dolayı sınırlamaktadır. Külde yanmamış karbon miktarının azaltılması ile ekonomik anlamda bir katma değer sağlanmakta ve özellikle termik santral küllerinin çimento katkı maddesi vb. inşaat sektöründe kullanım olasılığı artmaktadır. Bu çalışmada öncelikle külde yanmamış karbon varlığının nedenleri ortaya konmakta ve sorunun giderilmesi için çözüm önerileri sunulmaktadır.

ABSTRACT: Unburned carbon content of ash from coal fired thermal power stations and plants which use huge amount of coal is sometimes 6-7% and even more. This simply means loss of carbon and depending on the carbon loss, decrease in efficiency. Carbon loss is not only causing decrease in efficiency but also it results in a economical way and not making use of the ash properly, such as ash can not be used as additives for cement due to its high carbon content. Decreasing the carbon content of the ash would be better for the economy and the ash from thermal power stations will be used in cement as additives, which means less cost and better development for construction field. The reasons behind low efficiency of combustion and high amount of unburned carbon would be investigated and alternatives for the solution to the problem will be tested and improved.

1 GİRİŞ

Ülkemizde kömürün elektrik üretiminde kullanım oranı %26 civarında iken bu oran ABD’nde %51, komşumuz Yunanistan’da %62’dir. Kömür gerek ekonomik enerji kaynağı olması her ne kadar çevresel anlamda dezavantajlarının olmasına karşın gelişen teknolojilerle bu dezavantajlarının azaltıldığı gerekçesiyle kısa ve orta vadede enerji ihtiyacını karşılamada kullanılmaya devam edeceği bilinmektedir. Ülkemizde kömür yataklarını iyi kullanamadığımız bilinen bir gerçek olarak karşımızda durmaktadır. Kömür, ulusal enerji kaynağımız olarak birinci önceliğimiz olmalı/olmaya devam etmelidir.

Termik santrallerin ve kömür kullanılan diğer endüstriyel tesislerin yüksek yanma verimliliği ile çalıştırılmasının ekonomiye, çevreye ve sınırlı olan enerji kaynaklarının israf edilmemelerine büyük katkısı olacaktır. Ülkemizde termik santrallerde ve büyük miktarlarda kömür kullanılan bazı tesislerde yüksek ısı kapasite ve yüksek yanma verimliliği elde etmek için, kömürün mikronize boyuta öğütülerek kullanıldığı pulverize enjeksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu tesislerden bazılarında yakma veriminin düşük olduğu, uçucu kül ve taban küllerinde %5-6 zaman zaman da %10'lara yaklaşan oranlarda karbon bulunduğu belirtilmektedir. Bu durum; ilgili tesislerin

- öğütme ünitesindeki öğütme işleminden
- yakma sisteminden (hava miktarı, yakma sıcaklığı ve yakma zamanı vb),
- kullanılan kömürden ya da yanma davranışları farklı olan kömürlerin karıştırılarak kullanımından kaynaklanabilmektedir.

Tesislerde; yanma odasına gönderilen kömürün yani değirmen çıkışı pulverize kömürün tane boyut dağılımı ya da öğütme ünitesi akım şemasının tasarımı, değirmen çıkışında boyut kontrolü ile geri dönüş yükünün tekrar öğütülmemesi v.b gibi durumlar yanma veriminde düşüğe neden olmaktadır. Kömüre dayalı termik santrallerde kullanılan kömürün yanma özelliklerinin ortaya konması santralin etkin işletimi için bir zorunluluk taşır.

Kömürün uzun ve kısa analizi, petrografik analizleri yanısıra yanma karakterizasyonunu belirlemek üzere yapılan doğrudan yakma teknikleri yanma sürecinin optimizasyonunda kullanılmaktadır. Külde bulunan yanmamış karbona bağlı yanma sorunlarının ve nedenlerinin ortaya konması içinde benzer analiz teknikleri kullanılmaktadır. Yanma sürecinin optimizasyonunda kullanılan kömürün boyut dağılımı, buna bağlı olarak yakma havası miktarı, yakma sıcaklığı ve zamanı önemli parametrelerdir.

Oldukça heterojen bir malzeme olan kömürün yanma karakteristiklerinin belirlenmesinde kısa ve uzun analiz verileri çoğunlukla yetersiz olmaktadır. Bu veriler, birbirinden farklı olgunluğa sahip kömürlerde yanma özellikleri arasındaki fark yüksek olduğu için anlamlı olabilmektedir. Ancak bazı durumlarda özellikle petrografik bileşime bağlı olarak beklenmedik yanma davranışlarına rastlanılmaktadır. Kömürü oluşturan organik bileşenlerin analizine bağlı mikroskobik

analizler, yanmamış karbona bağlı optimizasyon çalışmalarında ve kömür yanma özelliklerinin belirlenmesinde anlamlı veriler oluşturmaktadır. Kömürü oluşturan organik bileşenlerden liptinit ve vitrinit reaktif maseralleri, füzinit ve semifüzinit inert bileşenleri oluşturmaktadır. Ancak bu mikro petrografik bileşenlerin tanecik içindeki dağılımlarında yanma mekanizmasını daha karmaşık hale getirmektedir. Kömür taneciği içindeki liptinitlerin varlığı tane yanma davranışını önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

Enerji santrallerinde külde yanmamış karbon farklı miktarlarda olabilmektedir. Yatak külünde ve uçucu küllerde farklı miktarlarda yanmamış karbona rastlamak mümkündür. Uçucu küldeki yanmamış karbon, termik santrallerde yakma verimini yansıtan önemli bir veridir (Yan ve Li 2009). Yanmamış karbon miktarları uçucu küllerde genelde daha fazladır ancak bu miktar yakma rejimine bağlı değişim göstermektedir. Bartonova'ya (2006) göre bütümlü kömürle çalışan bir santralde, yatak külünde yanmamış karbon miktarı %1.23 iken uçucu külde yanmamış karbon miktarı %5.57 olarak bulunmuştur. Deneysel yada bilgisayarlı yollarla yanmamış karbon tahmin sistemi geliştirmek için bir çok yaklaşım mevcuttur (Pallarés vd. 2009). Uçucu küldeki yanmamış karbonun, kömür karışımı için beslenen fazla hava oranıyla ilişkisini araştırmıştır (Lee vd. 2012). Yanmamış karbon kazan içi yanma sonrasında oluştuğu için birçok parametreye bağlıdır ve bilinen ya da tahmin edilen yanmamış karbona neden olan parametreler dışında birçok parametrenin yanmamış karbon oluşumunda etkili olabileceği düşünülmektedir. Volkan (2006) yaptığı çalışmada yanmamış karbonu, kullanım alanlarını uçucu külde karşılaşılan yanmamış karbona ait bulgulara yer vermiştir. Yanmamış karbon tesisler için hem ekonomik anlamda bir kayıp hem de atıkların değerlendirilmesinde azaltılması gereken bir parametre olduğu için atıkların çevreye salınmasında ve çevre kirliliğinde göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Çalışma ithal kömüre dayalı elektrik üretimi yapan bir santralde gerçekleştirilmiştir. Tesiste farklı noktalardan kömür ve kül numuneleri alınmıştır. Numunelerin nem, kül içerikleri boyut dağılımları belirlenmiş ve petrografik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar için tesiste kömür stok sahasında bulunan stoklanmış kömürden ve değirmen çıkışından numune alınarak “Stok Numunesi” ve “Değirmen Ürünü” olarak kodlanmıştır. Ayrıca uçucu kül ve taban külünden numuneler alınmıştır. Numunelerin nem ve kül analizleri Çizelge 1’de verilmektedir.

Çizelge 1. Numunelerin nem ve kül analizleri.

Adı	Nem (%)	Kül (%)
Stok Numunesi	4.77	8.60
Değirmen Ürünü	3.00	11.12
Uçucu Kül	0.40	95.10
Taban Külü	21.95	98.50

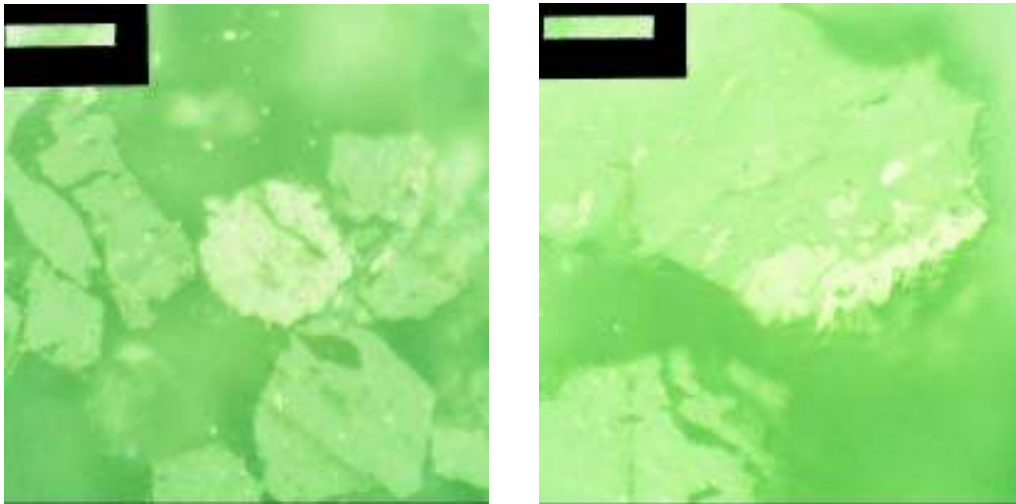
2.1 Stok Numunesi ile Yapılan Çalışmalar

Stok numunesinin boyut analizi Çizelge 2’de verilmektedir.

Çizelge 2. Stok numunesinin boyut analizi.

Elek Boyutu (mm)	Miktar (%)	Σ EA (%) \uparrow	Σ EÜ (%) \downarrow
-50.00+25.00	10.57	100.00	10.57
-25.00+12.50	10.00	89.43	20.57
-12.50+10.00	6.86	79.43	27.43
-10.00+3.350	26.28	72.57	53.71
-3.350+1.180	25.73	46.29	79.44
-1.180+0.500	7.17	20.56	86.61
-0.500+0.212	4.77	13.39	91.38
-0.212+0.150	1.63	8.62	93.01
-0.150+0.106	0.10	6.99	93.11
-0.106+0.075	0.40	6.89	93.51
-0.075+0.053	0.17	6.49	93.68
-0.053+0.038	0.65	6.32	94.33
-0.038	5.67	5.67	100.00
Toplam	100.00		

Stok numunesinin %72’si 10 mm’nin altındadır. Stok numunesi üzerinde mikroskopik çalışmalar yapılmıştır. Numuneye ait mikro fotoğraflarda farklı kömür yapıları Şekil 1’de görülmektedir. Yapılan mikroskopik çalışmalar sonucunda kömür örneğinin aynı ranklı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1. Stok numunesinin mikro fotoğrafları.

2.2 Değirmen Ürünü ile Yapılan Çalışmalar

İlgili tesisin değirmen çıkışından yani yakma kazanlarına gönderilen pulverize (çok ince) öğütülmüş üründen alınan numunenin boyut analizleri yapılmış ve Çizelge 3’de sunulmuştur. Çizelge 3’de verilen bu sonuçlara göre pulverize (çok ince) boyuta öğütüldüğü belirtilen bu üründe %45 oranında 0.075 mm’nin üzerinde malzeme olduğu görülmektedir. 0.106 mm’nin üzerindeki malzeme miktarı da %22 civarındadır.

Çizelge 3. Değirmen ürününün boyut analizi.

Elek Boyutu (mm)	Miktar (%)	ΣEA (%)↑	ΣEÜ (%)↓
-0.500+0.212	1.08	100.00	1.08
-0.212+0.150	3.56	98.92	4.64
-0.150+0.106	17.21	95.36	21.85
-0.106+0.075	23.70	78.15	45.55
-0.075+0.053	6.39	54.45	51.94
-0.053+0.038	21.17	48.06	73.11
-0.038	26.89	26.89	100.00
Toplam	100.00		

2.3 Uçucu Kül ve Taban Külü Numuneleri ile Yapılan Çalışmalar

Boyut gruplarına bağlı olarak yanmamış karbon içeriğinin belirlenmesi için uçucu kül ve taban külü numunelerinin elek analizleri yapılmış ve her bir boyut grubunun kül analizleri yapılarak yanmamış karbon miktarları belirlenmiştir. Uçucu küle ait sonuçlar Çizelge 4’de, taban külüne ait sonuçlar Çizelge 5’de sunulmaktadır. Çizelge 4’de verilen uçucu küle boyut gruplarına bağlı olarak kül içeriklerinin değişimi incelendiğinde, kül içeriğinin boyuttaki artışla azaldığı, yani küle karbon varlığının önemli ölçüde iri boyutlu malzeme içinde bulunduğu görülmektedir. Uçucu külün %14.33’ü 0.075 mm’den (200 mesh’den) büyük boyutlu olup, %14.82 oranında karbon içermektedir.

Çizelge 4. Uçucu külün boyut dağılımı ve boyut gruplarında kül içerikleri.

Elek Boyutu (mm)	Miktar (%)	Σ EA (%)↑	Σ EÜ (%)↓	Kül (%)	Σ Kül (%)↓	Σ Yanmamış Karbon (%)
-3.350+1.180	0.03	100.00	0.03	-	-	-
-1.180+0.500	0.06	99.97	0.09	-	-	-
-0.500+0.212	1.13	99.91	1.22	70.09	70.09	29.91
-0.212+0.150	6.18	98.78	7.40	81.45	79.69	20.31
-0.150+0.106	0.43	92.60	7.83	88.37	80.18	19.82
-0.106+0.075	6.50	92.17	14.33	91.13	85.18	14.82
-0.075+0.053	3.03	85.67	17.36	92.01	86.36	13.64
-0.053+0.038	10.39	82.64	27.75	96.25	90.08	9.92
-0.038	72.25	72.25	100.00	97.35	95.34	4.65
Toplam	100.00			95.34		4.66

Çizelge 5. Taban külünün boyut analizi ve % kül değişimi.

Elek Boyutu (mm)	Miktar (%)	ΣEA (%)↑	ΣEÜ (%)↓	Kül (%)	ΣKül (%)↓	ΣYanmamış Karbon (%)
-50.00+25.00	4.04	100.00	4.04	99.98	99.98	0.02
-25.00+12.50	5.18	95.96	9.22	99.94	99.96	0.04
-12.50+10.00	6.23	90.78	15.45	98.99	99.57	0.43
-10.00+3.350	33.21	84.55	48.66	98.72	98.99	1.01
-3.350+1.180	24.89	51.34	73.55	99.48	99.15	0.84
-1.180+0.500	4.45	26.45	78.00	99.52	99.18	0.82
-0.500+0.212	4.84	22.00	82.84	94.36	98.89	1.10
-0.212+0.150	5.83	17.16	88.67	95.02	98.64	1.36
-0.150+0.106	0.24	11.33	88.91	96.03	98.63	1.37
-0.106+0.075	2.86	11.09	91.77	96.96	98.58	1.42
-0.075+0.053	1.20	8.23	92.97	95.95	98.55	1.45
-0.053+0.038	2.97	7.03	95.94	94.74	98.43	1.57
-0.038	4.06	4.06	100.00	90.45	98.10	1.90
Toplam	100.00			98.11		

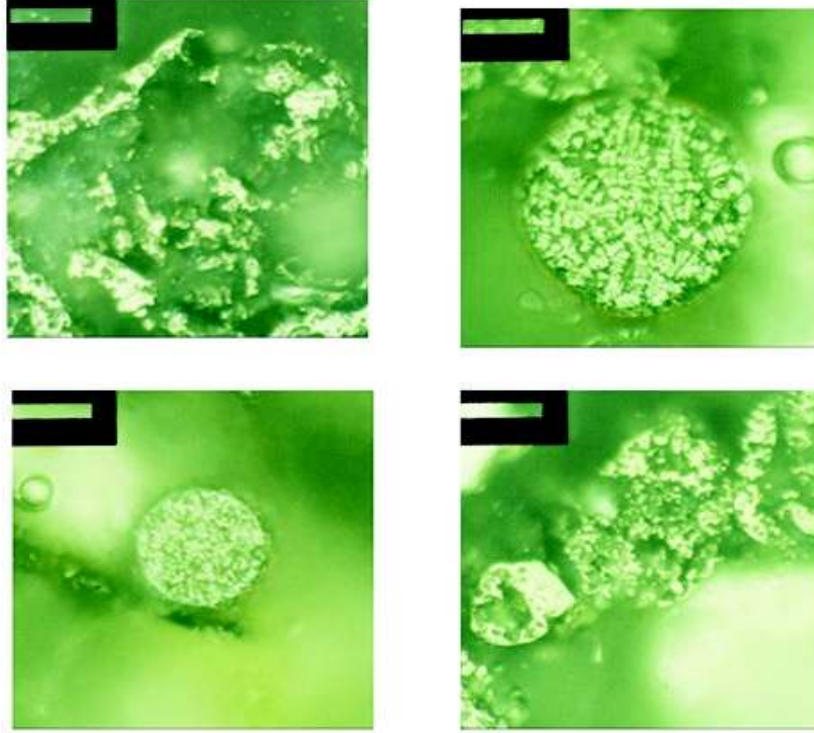
Çizelge 5’de verilen taban külünde boyut gruplarına bağlı olarak kül içeriklerinin değişimi incelendiğinde, taban külünde yanmamış karbon içeriğinin uçucu küle göre daha az olduğu görülmektedir. Cüruflaşma nedeniyle taban külü boyut analizi çok anlamlı olmamaktadır, ancak cüruftan koparak ince boyuta geçtiği için ince kısımda yanmamış malzeme kaybının daha yüksek olduğu görülmektedir. Taban külünün %91.77’si 0.075 mm’den (200 mesh’den) büyük boyutlu olup, %1.42 oranında karbon içermektedir.

Farklı boyutlardaki uçucu kül ve taban külü numuneleri ile hazırlanan peletler mikroskopik olarak incelenmiş, küldeki yanmamış karbonun yapıları belirlenmiştir. Uçucu kül numunesinin mikro fotoğrafları Şekil 2’de ve taban külü numunesinin mikro fotoğrafları Şekil 3’de verilmektedir.

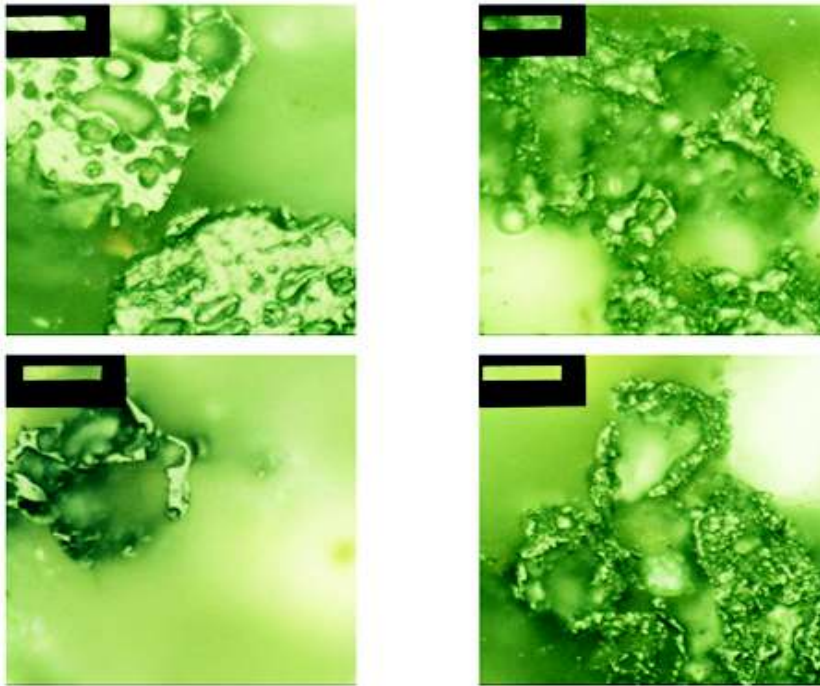
Şekillerde camsı yapı kazanan uçucu kül örnekleriyle beraber yanmamış karbon da izlenebilmektedir. Her ne kadar karbon miktarı düşük numuneler olsa da yapısal olarak karbon inert maddelere birleşmiş olarak gözükmemektedir ve kapanım halde oldukları için yanma olayı gerçekleşmemiştir. Uçucu küldeki yanmamış karbon yapıları incelendiğinde bunların çoğunlukla, kömürdeki füzinit ve semi füzinit gibi inert kökenli bileşenlerden meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde kapanım haldeki yanmamış karbonları gözlemlenmek mümkündür. Yanmamış karbon olarak gözlenen yapılar aslında bağlı tane olarak kömürün ve kömüre bağlı inert maddelerin birlikte bulunduğu formlardır. Bu formlar yanma odasında yanabilecek ortam varken sıcaklığın inert madde tarafından soğurulmasıyla veya bu yapıların yanmaya elverişli şartlara kavuşmamasıyla yanmamış karbon bünyelerinde saklı tutulur ve cüruflaşmış yapılar oluşur. Sıcaklığın kazan içinde fazlalaşması kazan içinde cüruflaşma açısından sakıncalıdır. Sıcaklığın optimizasyonu (en uygun şekilde getirilmesi) hem kazan içi

cürüflaşma hem de yanmamış karbon açısından önemlidir. Yanmamış karbon taneciklerinin iri tanelerden oluşmuş füzünit ve semifüzünitlerden oluştuğu, diğer yanmamış karbonların tane içindeki ve/veya çevresindeki inert yapılardan oluştuğu gözlenmektedir.



Şekil 2. Uçucu kül numunelerinin mikro fotoğrafları.



Şekil 3. Taban külü numunelerinin mikro fotoğrafları.

Taban külünde yanmamış karbon taneciklerinin iri tanelerden oluşmuş füzünit ve semifüzünitlerden oluştuğu belirlenmiştir. Diğer yanmamış karbonların tane içindeki ve/veya çevresindeki inert yapılardan oluştuğu görülmektedir.

3 SONUÇ VE ÖNERİLER

Uzun dönemli tesis verileri incelendiğinde külde yanmamış karbon miktarının %3.5-%8 arasında olduğu görülmüştür. Bu kayıp çeşitli yerlerden alınan numunelerin analiziyle nedenleri ve nasıl azaltılacağı araştırılmıştır. Tesisten alınan örneklerle tesiste yanan kömür karakterize edilmiş ve küllerden alınana verilerle yanma anlaşılmasına çalışılmıştır. Stok sahasından alınan örneğin külüne ve nemine bakılmış ve boyut analizi yapılmıştır. Stok numunesinin %4.72 nem ve %8.60 kül içerdiği ve numunenin %72'si 10 mm'nin altında olduğu görülmüştür. Stok sahasından alınan kömürler kırıcılara ordan da değirmenlere beslenmektedir. Değirmen sonrasında öğütülen kömür kazana beslenmektedir. Yapılan analizlerde öğütülen kömürün boyut dağılımı elde edilmiş ve bu boyut dağılımının yanmamış karbon üzerinde etkisinin fazla olduğu düşünülmektedir.

Öğütülen kömürün %45'i oranında 0.075 mm'nin üzerinde malzeme olduğu ve 0.106 mm'nin üzerindeki malzeme miktarının da %22 civarında olduğu görülmektedir. Uçucu kül ve taban külünde iri boyut gruplarında daha fazla yanmamış karbon olduğu görülmüştür.

Uçucu külün %14.33'ü 0.075 mm'den (200 mesh'den) büyük boyutlu olup, %14.82 oranında karbon içermektedir. Taban külünün %91.77'si 0.075 mm'den (200 mesh'den) büyük boyutlu olup, %1.42 oranında karbon içermektedir. Uçucu külden ve taban külden elde edilen mikro fotoğraflar incelendiğinde yanmamış karbonları gözlemek mümkündür.

Taban külden ve uçucu külden elde edilen sonuçlar bu küllerin oluşumundan önceki hali olan mikronize kömür parçacıklarının yanmasıyla oluşmaktadır. Taban külü ve uçucu kül farklı boyut gruplarında farklı yanmamış karbon değerlerine sahiptir ancak öğütülmüş kömür boyut gruplarında öğütülme derecesine bağlı yanmamış karbon miktarının azaldığı görülmektedir. Bu kaybı indirgeyebilmek için öğütme sistemi kontrolü gerçekleştirilmeli ve yanma performanslarının incelenmesiyle öğütme sistemi iyileştirmeye gidilmelidir.

4 KAYNAKLAR

- Bartonova, L., Klika, Z., Pears, D. A. 2006. Characterization of Unburned Carbon from Ash After Bituminous Coal and Lignite Combustion in CFBS, *Fuel*, 86, pp. 455-463.
- Lee, B. H., Eddings, E. G., Jeon, C. H. 2012. Effect of Coal Blending Methods with Different Excess Oxygen on Unburned Carbon and NO_x Emissions in an Entrained Flow Reactor, *Energy Fuels*, 26, pp. 6803-6814.
- Pallarés, J., Arauzo, I., Teruel, E. 2009. Development of an Engineering System for Unburned Carbon Prediction, *Fuel*, 88, pp. 187-194.
- Volkan, S. 2006. *Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Yanmamış Karbonun Geri Kazanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yan, W., Li, J. 2009. Modelling of the Unburned Carbon in Fly Ash, *EPE*, 1, 2, pp. 90-93.

AÇIK İŞLETME KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE LOJİSTİK REGRESYON ANALİZİ İLE İŞ KAZALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF OCCUPATIONAL ACCIDENTS IN OPENCAST MINING ENTERPRISES BY USING LOGISTIC REGRESSION ANALYSIS METHOD

S. Önder

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

M. Mutlu

Aksaray Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Aksaray

ÖZET: Kömür madenciliğinde yaşanabilecek iş kazalarının azaltılabilmesi için gerekli koruyucu önlemlerin alınması büyük önem taşımaktadır. Bunun için de, iş kazası kayıtlarının ayrıntılı olarak tutulması ve analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, TKİ'ye bağlı ELİ'nin 2006-2011 yılları arasında yerüstü işletmelerinde meydana gelen yaralanmalı iş kazaları incelenmiştir. Değerlendirmede SPSS paket programı kullanılarak bir lojistik regresyon modeli oluşturulmuştur. İş kazası kayıtlarındaki yer, meslek, neden, yaş, vardiya ve uzuv değişkenleri modelde bağımsız değişkenler olarak, gün kayıpları ise 3 günden az ve 3 günden fazla olacak şekilde bağımlı değişken olarak kategorize edilmiştir. Model oluşturabilmek için yapılan ikili lojistik regresyon analizi sonuçlarına göre, referans kategorilere göre değerlendirildiğinde 3 günden fazla iş günü kayıplı kazaya maruz kalma olasılığı açısından sırasıyla sosyal tesisler ve karo sahasının, atölyelerin ve açık ocak sahası en riskli yerler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca karayolu ile taşıma ve elle taşıma nedenli kazaların riskli olduğu, işçi meslek grubundan olan çalışanların da yüksek risk grubunda yer aldığı tespit edilmiştir.

ABSTRACT: In order to reduce the occupational accidents in coal mining, taking necessary protective measures is very important. For this, occupational accidents must keep in detail and analyze. In this study, between the years 2006-2011 non-fatal accidents occurring the surface mining of Aegean Lignite Enterprise (ALE) of Turkish Coal Enterprises (TKİ) have been evaluated. In the evaluation, a logistic regression model was generated by using SPSS package program. The accident records were categorized as area, occupation, reason, age, shift and part of body variables for independent variables, lost days that resulted less or greater than 3 lost workdays for dependent variable. According to binary logistic regression analyse results to generating the model, when evaluated according to reference categories, for the probability of exposure to accidents that resulted greater than 3 lost workdays, social facilities and surface plants, workshops, and opencast mining areas were determined as the most risky places respectively. Also the accidents related to transporting by road and manual handling has risk as well as workers occupation group were determined in the high risk group.

1 GİRİŞ

Madencilik, tarih boyunca uygarlıkları şekillendiren temel sektörlerden biri olmuştur. İçinde bulunduğumuz yüzyılda da, madencilik faaliyetleri olmaksızın insan yaşamının sürdürülebilmesi olası değildir. Fakat madencilik oldukça fazla iş kazasının meydana geldiği en tehlikeli iş grupları arasında yer almaktadır. İş kazalarının çok olması ise bu faaliyet grubundaki kazaların daha yakından izlenmesini, değerlendirilmesini ve kaza önleme çalışmalarına daha da fazla ağırlık verilmesini gerektirmektedir (İstanbulluoğlu 1999). 2012 yılında ülkemizde madencilik sektöründe yaşanan iş kazalarının %89'unun kömür ve linyit çıkartılmasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni, kömür üretiminin emek yoğun bir madencilik çalışması olması şeklinde açıklanabilir (TMMOB 2011). Her ne kadar yerüstü madenciliği yeraltı madenciliğine göre daha güvenilir çalışma ortamına sahip gibi görünse de kendi içerisinde bir takım tehlikeleri bulunmaktadır (Kasap ve Subaşı 2011).

Meydana gelen iş kazaları sosyal ve ekonomik açıdan toplumu olumsuz etkilemektedir. İş kazaları nedeniyle meydana gelen yaralanmalar, sakatlanmalar ve ölümler konunun sosyal boyutunu, iş gücü ve iş günü kaybı, tıbbi iyileştirmeler ve tazminatlar, maddi hasarlar (makine, teçhizat, bina vs.), üretim ve verimin düşüşü ise ekonomik yönünü ortaya koymaktadır (Yıldırım 2009). Bu istenmeyen durumların önlenmesi gerekli tedbirler daha önemli hale gelmiştir. Her bir kaza için sadece bir neden rapor edilmiş olsa da, söz konusu kazaların birbirinden bağımsız birçok etkenin bileşimi sonucunda meydana gelmektedir. Bütün etkenlerin bir arada değerlendirilmesi kazaların kök nedenlerini araştırmada kolaylık sağlamaktadır.

Literatürde kömür madenlerinde meydana gelen kazalar ile ilgili çalışmalar mevcuttur. İstanbulluoğlu, TKİ'ye bağlı işletmelerde 1984-1999 yılları arasında meydana gelen gün kayıplı ve ölümlü iş kazalarını incelemiştir. İlgili dönemde iş kazaları nedeniyle toplam 1,403,604 iş günü kaybı olduğunu ve bu kayıpların kuruma maliyetinin yaklaşık 68,875,000 Dolar olduğunu tespit etmiştir. Çalışmasında iş kazalarının gerçekleştirilen yatırımlarla ve meslek içi eğitimle doğrudan ilişkili olduğunu sonucuna ulaşmıştır (İstanbulluoğlu 1999). Önder ve Önder (2010), TKİ'ye bağlı işletmelerde 2001-2008 yılları arasında meydana gelmiş olan kazalarını varyans analizi yöntemi kullanarak incelemiştir. Çalışmanın sonucunda yeraltı işletmelerinde en büyük riski göçük ve elle taşımının oluşturduğu, en riskli meslek grubunun kazmacı olduğunu, yer üstü işletmelerinde ise en büyük riski iş makinelerinin oluşturduğunu, tamir-bakım-imalat bölümünün mekanik işlerinde çalışanların en riskli iş grubu olduğunu tespit etmişlerdir (Önder ve Önder 2010). Önder vd. (2011), TKİ'de yerüstü madenciliğini değerlendirdikleri çalışmalarında, yerüstü madenciliğinde daha az iş kazası meydana gelmesine rağmen iş günü kayıplarının daha fazla olduğu, yeraltında ise kazaların daha sık yaşanmasına rağmen iş günü kayıplarının daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Literatürde kömür madenciliğinde iş sağlığı ve güvenliği konusu ile ilgili lojistik regresyon analizi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar da mevcuttur. Aydın (2010), çoklu lojistik regresyon analizi ile kömür işçisi pnömokonyozu hastalığına yakalanma olasılığını tahmin etmeye çalışmıştır. Paul (2009), çok değişkenli regresyon modellemesiyle, Hindistan'daki madenlerde yaşanan iş kazalarının nedenlerini belirlemiş ve işçilerinin iş kazasına maruz kalma riskini tahmin etmiştir. Çalışmasının

sonucunda yaş, moral bozukluğu, iş memnuniyetsizliği ve fiziksel tehlike değişkenlerinin uygulama çalışmasının gerçekleştirildiği madenlerde önemli bir risk faktörü olduğunu ve model için hesaplanan olasılık oranlarını kullanarak bu olumsuz etkilerden etkilenen işçilerin az etkilenenlere göre kaç kat daha fazla yaralanma riskinin olduğunu tespit etmiştir.

ESAW metodolojisine göre ölümlü olmayan bir iş kazasının tanımında 3 günden fazla iş günü kayıplı ibaresi yer almaktadır (EUROSTAT 2001). Buradaki durumda ölümlü sonuçlanmayan kazanın meydana geldiği gün hariç art arda en az üç gün iş görmezlik durumundan bahsetmektedir. ESAW kayıtları incelendiğinde, bu iş kazalarının işletmeler tarafından daha fazla rapor edildiği görülmüştür.

Bu çalışmada Ege Linyitleri İşletmesi (ELİ)'de 2006-2011 yılları arasında meydana gelen iş kazası kayıtları incelenmiş ve verilere, kategorik veri analizinde kullanılan lojistik regresyon analizi uygulanmıştır. Analizde, bağımsız değişkenler yer, neden, meslek, uzuv, yaş, vardiya değişkenleri olarak, gün kaybı değişkenleri (0=üç günden az, 1=üç günden fazla) ise bağımlı değişkenler olarak alınmıştır. Analizlerde SPSS 17.00 istatistiksel analiz paket programı kullanılarak model oluşturulmuştur. Modelin iş kazaları sonucundaki gün kayıplarının olasılığını tespit etmedeki doğruluk oranı belirlenmeye çalışılmıştır.

2 İŞLETMENİN TANITIMI

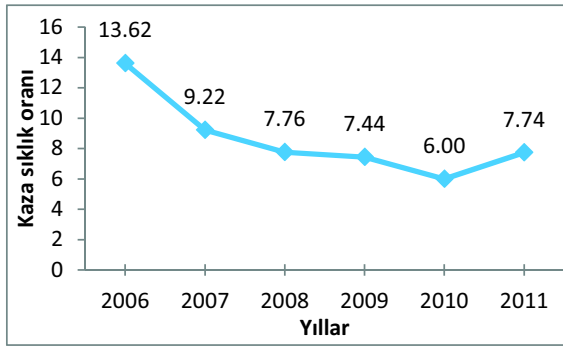
Türkiye'nin linyit üretimi 72.6 milyon ton/yıl dolayında olup, bunun 34.8 milyon ton/yılı TKİ tarafından üretilmektedir. ELİ, TKİ üretiminin yaklaşık %32'sini tek başına gerçekleştirmektedir. Açık işletme ile kömür üretimi yapılan ocaklarda, kömür üretimi ekskavatör, yükleyici ve kamyonlarla, dekapaj ise ekskavatör-kamyon kombinasyonu ile yapılmaktadır. Dekapaj çalışmalarında, ayna 9 inçlik delicilerle 6-8 metre aralıklarla 17 metre derinliğinde delinmektedir. Deliklere ANFO karışımı ve "emülite" konularak patlatılmaktadır. Patlatılarak gevşetilen malzeme 17-20 yd³ kepçe kapasiteli ekskavatörlerle kazılıp 85-170 short ton'luk kamyonlara yüklenip, döküm yerine götürülür ve dökülür. Kömürün yükleyiciler ile aynadan kopartılamayacak kadar sert olduğu yerlerde de patlatma işlemi uygulanmaktadır. TKİ'nin en gelişmiş tamir bakım atölyeleri de işletme bünyesinde bulunmaktadır. TKİ'nin diğer müesseselerinden gelen geniş hacimli revizyon işleri de bu atölyeler tarafından karşılanmaktadır (ELİ 2013).

ELİ'de 2006-2011 yılları arasında faaliyet göstermekte olan yeraltı ve yerüstü işletmelerinde toplam 258 iş kazası meydana gelmiştir. Bu kazalardan yer altı ocaklarında meydana gelen 18 iş kazası, 4 ölümlü iş kazası ve model oluşturulma aşamasında veriler kategorik hale getirilirken sayısal çoğunluğu ayrı bir kategori oluşturmak için yeterli bulunmayan 5 iş kazası analiz dışında bırakılmıştır. Model oluşturmada 231 yaralanmalı iş kazası verisi kullanılmıştır.

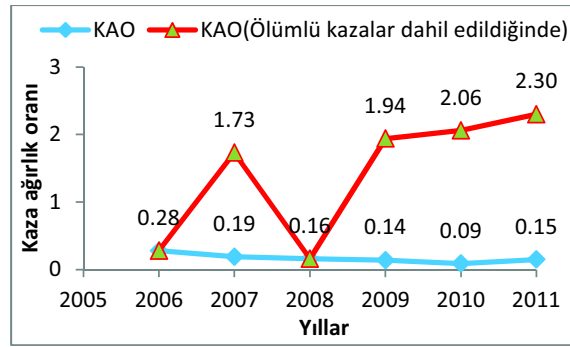
Kazaların değerlendirmesinde, Kaza Sıklık Oranı (KSO) ve Kaza Ağırlık Oranı (KAO) yaygın olarak kullanılan göstergelerdir. Kaza Sıklık Oranı (Accident Frequency Rate), takvim yılı içerisindeki ölümlü ve/veya ölümlü olmayan mesleki yaralanmaların toplam sayısının, aynı yıl içerisinde referans grupta yer alan işçilerin çalışma saatlerinin toplamına bölünmesiyle elde edilen değer 1,000,000 katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanır ve $KSO = (\text{Toplam kaza sayısı} / \text{Toplam insan saat})$

çalışma sayısı)*1,000,000 eşitliği ile belirlenir. Kaza Ağırlık Oranı (Accident Severity Rate), takvim yılı içerisinde ölümlü ve/veya ölümlü olmayan mesleki yaralanmalardan dolayı toplam kayıp gün sayısının, aynı yıl içerisinde referans grupta yer alan işçilerin çalışma saatlerinin toplamına bölünmesiyle elde edilen değer 1,000 katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanır ve $KAO = \frac{\text{Kazalardan dolayı toplam kayıp gün sayısı}}{\text{Toplam insan saat çalışma sayısı}} * 1,000$ eşitliği ile belirlenir (Özkılıç 2005).

Şekil 1 - 2’de ELİ’de 2006-2011 yılları arasındaki Kaza Sıklık Oranı ve Kaza Ağırlık Oranı grafikleri verilmiştir.



Şekil 1. KSO grafiği.



Şekil 2. KAO grafiği.

Şekil 1 incelendiğinde 2011 yılı dışında kaza sıklık oranlarında genel olarak bir azalma olduğu görülmüştür. Bunun nedeni işletmede meydana gelen iş kazalarının yıllara göre düzenli olarak azalması şeklinde ifade edilebilir. Şekil 2 incelendiğinde, işletme için genel olarak kaza ağırlık oranlarında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum kaza sayıları ile birlikte iş günü kayıplarının da azaldığı şeklinde yorumlanabilir. Ancak 2011 yılında yeniden bir artış söz konusudur. ELİ’de 2007, 2009, 2010 ve 2011 yıllarında meydana gelen ve analize dâhil edilmeyen 4 ölümlü iş kazasının dâhil edilmesiyle hesaplanan KAO değerlerinin değişimi de grafikte ayrıca verilmiştir. Söz konusu kazalar kaza ağırlık oranı hesabına dâhil edildiğinde değerlerin pik değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.

3 LOJİSTİK REGRESYON ANALİZİ VE UYGULAMA ÇALIŞMASI

İstatistiksel araştırmalarda iki veya daha çok değişken arasındaki ilişkinin belirlenmesi için en çok kullanılan yöntemlerden birisi de regresyon analizidir. İncelenen bir olayda, etkilenen, değişken bağımlı değişkendir ve genelde “Y” ile gösterilir. Değeri rastgele koşullara göre belirlenen, bağımsız olarak değişim gösteren ve başka değişkenlerin değişimi üzerinde etkide bulunan değişkenler bağımsız değişkendir ve genelde “X” ile gösterilir (Özdamar 2004).

Lojit regresyon özellikle ikili bağımlı değişken için tasarlanmış doğrusal olmayan bir regresyon modelidir. Literatürde, lojit regresyon aynı zamanda “Lojistik Regresyon” olarak da adlandırılmaktadır (Stock ve Watson 2007). İki şıklı değişkenler, kategorik değişkenlerin en yaygın olarak kullanılan şeklidir. Bağımlı değişkenin iki şıklı kategorik değişken olması durumunda bağımsız değişkenle (veya değişkenlerle)

bağımlı değişken arasındaki sebep-sonuç ilişkisini incelerken binary lojistik regresyon analizi kullanılır (Agresti 1996).

3.1 Lojistik Regresyon Modeli ve Özellikleri

Doğrusal regresyon modelinde bağımsız değişken verildiğinde, bağımlı değişkenin koşullu beklenen değeri,

$$E(Y | X) = \beta_0 + \beta_1 X \quad (1)$$

şeklinde gösterilir. Bu modelde bağımsız değişkenler üzerinde bir kısıtlama olmamasına rağmen, bağımlı değişkenin sürekli olması şartı aranır ve $-\infty$ ile $+\infty$ arasında tüm değerleri alabilir. Eşitlik 1'deki "E(Y | X)" şeklinde ifade edilen nicelik "koşullu beklenen değer" olarak bilinir. X değerine göre Y'nin koşullu değerini belirtmek için $\pi(X) = E(Y | X)$ eşitliği kullanılır (Hosmer and Lemeshow, 2000). $\pi(X)$ değerinin lojit dönüşümü sonrası Eşitlik 2 elde edilir.

$$g(X) = \ln \left[\frac{\pi(X)}{1-\pi(X)} \right] = \beta_0 + \beta_1 X \quad (2)$$

Eşitlik 2'deki g(X) ifadesi lojistik regresyon modelinin lojiti olarak adlandırılır. g(X) fonksiyonu parametreleri bakımından doğrusal olup bağımsız değişkenin aldığı değerlere göre $-\infty$ ile $+\infty$ arasında değişebilen fonksiyon olarak elde edilir (Hosmer and Lemeshow, 2000).

Lojistik regresyon analizinin önemli kavramlarından biri de olasılık (Odds) oranıdır. Odds oranı, bir olayın meydana gelme olasılığının meydana gelmeme olasılığına oranı olarak tanımlanabilir. Eşitlik 2'deki g(X) ifadesinin anti logaritması alındığında Odds oranına ulaşıldığı görülür (Eşitlik (3) (Agresti 1996)).

$$\text{Odds Oranı} = \exp[g(X)] = \exp [\beta_0 + \beta_1 X] = e^{\beta_0} (e^{\beta_1})^X = \left[\frac{\pi(X)}{1-\pi(X)} \right] \quad (3)$$

Eşitlik 3'teki Odds oranı Y değişkeninin X değişkeninin etkisi ile kaç kat daha fazla ya da % kaç oranda fazla gözlenme olasılığına sahip olduğunu belirtir (Özdamar 2004). Odds oranının 1'den büyük bir değer alması olayın gerçekleşmesi olasılığını artırdığı, 1'den küçük bir odds oranının ise olayın gerçekleşmesinin olasılığını azalttığı söylenilebilir (Tüzüntürk 2007).

3.2 Lojistik Regresyon Modelinin Tahmini ve Uyum İyiliği Testleri

Lojistik regresyon analizinde katsayılar hesaplandıktan sonra bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler tarafından ne derece tanımlanabildiğinin tespit edilebilmesi için modele olabilirlik oran testi ve Wald testi uygulanabilir. Olabilirlik fonksiyonunu kullanarak, gözlenen değerlerle tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması işlemi aşağıdaki ifade ile yapılmaktadır:

$$D = -2 \ln \left(\frac{\text{İndirgenmiş modelin olabilirliği}}{\text{Tüm modelin olabilirliği}} \right) \quad (4)$$

Eşitlik 4’teki D istatistiği değeri, doğrusal regresyonda hata kareler toplamına karşılık gelmektedir ve bu iki istatistik aynı role sahiptirler (Hosmer ve Lemeshow 2000). Bağımsız bir değişkenin önemine karar vermek amacıyla, denklemde bu bağımsız değişkenin olduğu ve olmadığı durumlardaki D değerleri karşılaştırılır ve G değeri elde edilir.

$$G = D(\text{İndirgenmiş model için}) - D(\text{Tüm model için}) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir (Hosmer and Lemeshow, 2000). Olabilirlik oran testinde hipotez testi için ise;

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \dots = \beta_k \neq 0 \quad (\text{en az bir } \beta_i \text{ sıfırdan farklıdır (} i = 1, 2, \dots, k \text{ olmak üzere)})$$

hipotezleri test edilmelidir. Model için hesaplanan G test istatistiği değeri belirlenen bir güvenilirlik seviyesinde (k-1) serbestlik dereceli χ^2 dağılımına sahiptir. Model için hesaplanan G test istatistiği değeri, tablo değerinden daha büyük veya eşit ise H_0 hipotezi kabul edilir. Bunun sonucunda modelin genel olarak anlamlı olduğu yorumu yapılabilir.

Modelin uyum iyiliğinin değerlendirilebilmesi için Hosmer-Lemeshow (H-L) testi, sınıflandırma tabloları ve yapay Cox&Snell ve Nagelkerke R^2 değerleri kullanılabilir. H-L uyum iyiliği istatistiği olan \hat{C} değeri, gözlenen ve beklenen frekanslardan oluşan (g x 2) tablosundan, Pearson ki-kare istatistiği değeri olarak hesaplanır. H-L test istatistiği değeri olan \hat{C} , (g-2) serbestlik derecesi ile χ^2 dağılımına yaklaşmaktadır (Murat ve Işığışık 2008). Test için “ H_0 : Parametreler belirleyicilik açısından iyi bir ayrımcılığa sahiptir” ve “ H_1 : Parametreler belirleyicilik açısından iyi bir ayrımcılığa sahip değildir” hipotezleri kullanılır. Model için hesaplanan \hat{C} değeri, eğer (g-2) serbestlik derecesinde χ^2 tablo değerinden küçük ise H_0 hipotezi kabul edilir ve modelin uyumunun iyi olduğuna karar verilir.

Lojistik regresyon modelinin uyum iyiliği testi için kullanılan bir başka yöntem de sınıflandırma tablolarıdır. Yüzdelerinin yüksek olması sınıflandırmanın doğru yapıldığını ve uyumun iyi olduğunu gösterir (Aksaraylı ve Saygın 2011).

Lojistik regresyon modellerinde klasik regresyon modellerinde hesaplanan R^2 değeri yerine yapay R^2 değerleri olan Cox&Snell ve Nagelkerke R^2 değerleri hesaplanabilmektedir. Bu değerler bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkeni açıklamakta ne kadar iyi olduğunu gösterirler. Değer ne kadar büyükse değişkenler modeli açıklamakta o kadar başarılıdır (Gök 2010).

İşletmede meydana gelen iş kazaları verileri, lojistik regresyon analizine uygun hale getirebilmek için kategorilere ayrılmıştır. Çizelge 1’de modelde kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler, her birinin alt kategorileri, kodları ve % dağılımları verilmiştir.

Gerçekleştirilen analizde Çizelge 1’de “Y” olarak belirtilen gün kaybı değişkeni bağımlı değişken olarak; X_{yer} , X_{neden} , X_{meslek} , X_{uzuv} , $X_{\text{yaş}}$ ve X_{vardiya} değişkenleri ise bağımsız değişkenler olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerinin iş kazaları sonucundaki gün kayıpları üzerindeki etki düzeyleri (3 günden az iş günü kaybı ya da 3 günden fazla iş günü kaybı) olmak üzere binary lojistik regresyon analizi ile

belirlenmeye çalışılmıştır. Bir diğer ifadeyle, bu bağımsız değişkenlerin iş kazası sonucu gerçekleşen iş günü kayıplarını 3 günden az ve 3 günden fazla şeklinde etkileme özelliğine sahip olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Modelin fonksiyonel yapısı kısaca şu şekilde özetlenebilir:

Gün Kaybı = F (Yer, Neden, Meslek, UzuV, Yaş, Vardiya Saati)

Çizelge 1. Modelde kullanılan kodlar ve % dağılımları.

Değişkenler	Değişkenlerin Açıklaması	Kod Değerlerinin Açıklaması	%
Y	İş günü kaybı	0 = 3 günden az iş günü kaybı	15.58
		1 = 3 günden fazla iş günü kaybı	84.42
X _{yer}	Kaza yeri	1 = Açık ocak sahası	47.62
		2 = Atölyeler	32.47
		3 = Sosyal tesisler, Karo sahası	12.55
		4 = Kriblaj, Lavvar, Ambarlar	7.35
X _{neden}	Kaza nedeni	1 = Makina	16.88
		2 = Elle taşıma	10.82
		3 = İş makinası	34.63
		4 = Diğer	21.65
		5 = El aletleri	8.23
		6 = Karayolu ile taşıma	7.79
X _{meslek}	Çalışanın mesleği	1 = Bakım personeli	45.45
		2 = Şoför	21.65
		3 = İşçi	12.12
		4 = İş makinesi operatörü	11.26
		5 = Nezaretçi, Diğer	9.52
X _{uzuv}	Kazalanan uzuv	1 = Baş	16.45
		2 = El, Kol	35.93
		3 = Ayak, Bacak	25.97
		4 = Gövde, Muhtelif	21.65
X _{yaş}	Yaş	1 = 22-34 yaş	17.75
		2 = 35-44 yaş	31.17
		3 = 45-55 yaş	51.08
X _{vardiya}	Vardiya saati	1 = 1. Vardiya (08:00-16:00)	73.60
		2 = 2. Vardiya (16:00-24:00)	17.75
		3 = 3. Vardiya (24:00-08:00)	8.65

Her bir bağımsız değişkenin istatistiksel olarak anlamlılığı ve modele dâhil edilmelerini belirlemek için yapılan basit ikili lojistik regresyon analizi sonucunda tüm bağımsız değişkenlerin parametrelerinin %99 güvenilirlik seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüş ve değişkenlerin kategorileri için hesaplanan Odds oranı değerlerinin tümü 1'den büyük olduğu için tüm değişkenlerin oluşturulacak model için önemli bir etken olduğu tespit edilmiştir. Tüm değişkenler modele katıldığında kurulan lojistik regresyon modeli için elde edilen analiz sonuçları ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Lojistik regresyon analizi sonuçları.

	Bağımsız Değişkenler	β	S.E.	Wald	df	Significant (p)	Exp (β)	95% CI	
								Lower	Upper
Yer	Kırbılay, Lavvar, Ambarlar ^a			13.849	3	.003			
	Açık ocak sahası	2.287	.700	10.678	1	.001***	9.844	2.497	38.805
	Atölyeler	2.347	.735	10.186	1	.001***	10.453	2.474	44.175
	Sosyal tesisler, Karo sahası	2.693	1.101	5.984	1	.014**	14.774	1.708	127.795
Meslek	Nezaretçi, Diğer ^a			9.706	4	.046			
	Bakım personeli	-2.171	.835	6.763	1	.009***	.114	.022	.586
	Şoför	-2.736	1.009	7.356	1	.007***	.065	.009	.468
	İşçi	-2.129	.958	4.941	1	.026**	.119	.018	.777
	İş makinesi operatörü	-1.238	1.174	1.112	1	.292	.290	.029	2.896
	Makine ^a			10.663	5	.058			
	Elle taşıma	2.379	1.163	4.185	1	.041**	10.793	1.105	105.436
Neden	İş makinası	.918	.539	2.900	1	.089*	2.505	.871	7.208
	Diğer	1.456	.735	3.929	1	.047**	4.289	1.016	18.094
	El aletleri	1.785	.868	4.225	1	.040**	5.958	1.086	32.675
	Karayolu ile taşıma	2.500	1.248	4.012	1	.045**	12.188	1.055	140.766
Yaş	45-55 Yaş arası ^a			1.800	2	.407			
	22-34 Yaş arası	-.397	.579	.471	1	.493	.672	.216	2.091
	35-44 Yaş arası	.461	.549	.706	1	.401	1.586	.541	4.652
Vardiya	1. Vardiya ^a			5.618	2	.060			
	2. Vardiya	.868	.706	1.511	1	.219	2.382	.597	9.502
	3. Vardiya	-1.240	.700	3.139	1	.076*	.289	.073	1.141
Uzuv	Baş ^a			3.145	3	.370			
	El, Kol	.775	.540	2.063	1	.151	2.171	.754	6.256
	Ayak, Bacak	.934	.682	1.878	1	.171	2.545	.669	9.680
	Gövde, Muhtelif	1.033	.743	1.932	1	.165	2.809	.655	12.054

a referans kategori.

* 0.10 (%90) güvenilirlik seviyesinde istatistiksel olarak anlamlıdır.

** 0.05 (%95) güvenilirlik seviyesinde istatistiksel olarak anlamlıdır.

*** 0.01 (%99) güvenilirlik seviyesinde istatistiksel olarak anlamlıdır.

Çizelge 2’de değişkenlerin anlamlılığını belirten Significant (p) sütunundaki değerler incelendiğinde açık ocak sahası, atölyeler, bakım personeli, şoför değişkenlerinin %99 güvenilirlik seviyesinde, sosyal tesisler-karo sahası, işçi, elle taşıma, diğer, el aletleri, karayolu ile taşıma değişkenlerinin %95 güvenilirlik seviyesinde, iş makinası ve 3. vardiya değişkenlerinin ise %90 güvenilirlik seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Wald değerleri, ilgili değişken için modele olan katkısının öneminin bir ölçüsüdür. Wald sütununda yer alan değerler incelendiğinde, yaş kategorisinde yer alan 22-34 yaş arası ve 35-44 yaş arası değişkenleri dışındaki tüm değişkenlerin 3 günden fazla iş günü kayıplı kazalar için önemli birer risk

faktörleri olduğu söylenilebilir. Anlamlı olduğu tespit edilen değişkenler için hesaplanan Odds oranı değerleri (Çizelge 2’de $\text{Exp}(\beta)$ sütununda yer alan değerler) için gün kaybı bakımından önemli bir risk faktörü olduğu yorumu yapılabilir. Hesaplanan Odds oranı değerlerine göre, 3 günden fazla iş günü kayıplı iş kazası geçirme ihtimali yer kategorisinde yer alan kriblaj, lavvar, ambarlara göre sosyal tesisler-karo sahasında, atölyelerde ve açık ocak sahasında sırasıyla 14.774, 10.453 ve 9.884 kat daha fazladır. Katsayıları negatif ve Odds oranı değerleri 0’a yakın olarak tahmin edilen meslek kategorisinde yer alan değişkenlere ilişkin yorum yapılabilmesi için Odds oranı değerlerinin 1/Odds oranı olarak düzeltilmesi gerekir (Hosmer and Lemeshow 2000). 3 günden az iş günü kayıplı kaza geçirme ihtimali nezaretçi-diğer meslek grubundan olan personele göre şoför, bakım personeli ve işçi için sırasıyla 15.385 kat, 8.772 kat ve 8.403 kat daha fazladır. Modelde neden kategorisinde yer alan, makina kullanımı nedeniyle meydana gelen kazalara göre 3 günden fazla iş günü kayıplı kaza geçirme ihtimali karayolu ile taşıma nedenli kazalarda, elle taşıma nedenli kazalarda, el aletleri kullanımı nedenli kazalarda, iş makinası kullanımı nedenli kazalarda ve diğer nedenli kazalarda sırasıyla 12.188 kat, 10.793 kat, 5.958 kat, 2.505 kat ve 4.289 kat daha fazladır. Modelde değişken katsayısı negatif olarak tahmin edilen ve vardiya kategorisinde yer alan 1. vardiyaya göre 3 günden az iş günü kayıplı kaza geçirme ihtimali 3. vardiyada 3.460 kat daha fazladır.

Modelin genel anlamlılığının testi için, model için hesaplanan G istatistik değeri olan 17.758 değeri, 6 serbestlik derecesi için χ^2 test istatistiğinin tablo değeri olan değer ile karşılaştırılmıştır. $17.758 > 16.812$ olduğu için H_1 hipotezi kabul edilmiştir. Buradan tahmin edilen modellerin bir bütün olarak anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Modelde Hosmer-Lemeshow test istatistiği değeri (\hat{C}) 19.188 olarak hesaplanmıştır. Modelin hesaplanmış olan \hat{C} test istatistiği değeri, %99 güvenilirlik seviyesinde tablo değeri ile karşılaştırıldığında $19.188 < 20.090$ olduğu için ve H_0 hipotezi kabul edilmiştir. Bağımlı değişkenin modeli etkin bir biçimde tanımladığı tespit edilmiştir.

Yapay R^2 ’lerin bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri açıklama oranı Cox & Snell için yaklaşık %51, Nagelkerke için %68 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin yapay R^2 değerleri için oldukça iyi değerler olduğu söylenebilir. Modelin 3 günden az iş günü kaybı ile sonuçlanan kazaları doğru tahmin etme oranı %27.8, 3 günden fazla iş günü kaybı ile sonuçlanan kazaları doğru tahmin etme oranı %99.5, modelin genel olarak doğru sınıflandırma oranının ise %88.3 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak lojistik regresyon denklemi:

$$\hat{Y} = 2.287 X_{\text{açıkocaksahası}} + 2.347 X_{\text{atölyeler}} + 2.693 X_{\text{sosyaltesisler,karo sahası}} - 2.171 X_{\text{bakımpersoneli}} - 2.736 X_{\text{şoför}} - 2.129 X_{\text{işçi}} - 1.238 X_{\text{işmakinasıoperatörü}} + 2.379 X_{\text{elletaşıma}} + 0.918 X_{\text{işmakinası}} + 1.456 X_{\text{diğer}} + 1.785 X_{\text{elaletleri}} + 2.500 X_{\text{karayoluiletaşıma}} - 0.397 X_{\text{22-34yaşarası}} - 0.461 X_{\text{35-44yaşarası}} + 0.868 X_{\text{2.vardiya}} - 1.240 X_{\text{3.vardiya}} + 0.775 X_{\text{el,kol}} + 0.934 X_{\text{ayak,bacak}} + 1.033 X_{\text{gövde,muhtelif}}$$

olarak bulunmuştur.

4 SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde Manisa ilinin Soma ilçesinde TKİ'ye bağlı olarak faaliyet göstermekte olan ELİ'nin açık ocaklarında 2006-2011 yılları arasında meydana gelen iş kazası kayıtları kullanılarak yapılan çalışmada, istatistiksel yöntemlerden biri olan lojistik regresyon analizi kullanılarak madencilik en önemli sorunlarından biri olan iş kazaları ve iş kazaları sonucundaki gün kayıpları ele alınmıştır. Lojistik regresyon analizi sonuçlarına göre modeldeki tüm değişkenler göz önüne alınarak 3 günden fazla iş günü kayıplı kaza geçirme olasılıkları değerlendirildiğinde, referans alınan kategorilerine göre;

- Kaza yeri olarak bir değerlendirme yapıldığında sırasıyla sosyal tesisler, karo sahası, atölyeler ve açık ocak sahasının riskli yerler olduğu,
- Meslek grupları bakımından bir değerlendirme yapıldığında sırasıyla işçi, bakım personeli ve şoförlerin yüksek risk altında olduğu,
- Kazalar nedenlerine göre değerlendirildiğinde, karayolu ile taşıma ve elle taşıma nedenli kazaların en riskli kazalar olduğu söylenilebilir.

Bu unsurlarda işletmede alınan tedbirlerin yeniden gözden geçirilerek artırılması gün kayıplarının azaltılabilmesi için büyük önem arz etmektedir. Alınacak tedbirler sırasıyla kaynakta, ortamda ve kişide korunma ilkeleri göz önünde bulundurularak düzenlenmelidir. Kazaların kök nedenlerine yönelik alınacak tedbirler, kazaların ortaya çıkmasını tümüyle engelleyeceğinden gün kayıplı kazaların meydana gelmesi de engellenmiş olacaktır.

Elle taşıma işlerinin mümkünse mekanik araçlarla yapılması, uzuvları koruyucu donanımların kullanılması ve ergonomiye yönelik alınan tedbirlerin yeniden gözden geçirilmesi hem kazaları önleyici, hem de kaza meydana gelmesi durumunda yaşanabilecek gün kayıplarını azaltması yönünden etkilidir. İşletmenin, atölyelerinde kullanılan kişisel koruyucu donanımların çalışanlar tarafından düzenli olarak kullanılıp kullanılmadığının kontrolü sağlanmalıdır. Atölyelerde düşmelere karşı her türlü çalışma zemini temiz ve engelsiz olarak bulundurulmalıdır. Çalışma zeminlerinde malzeme ve malzeme artığı bulundurulmamalı, kaymaya neden olacak maddelerin zemin üzerine dökülmesi engellenmelidir. Bakım atölyelerinde kullanılan forklift vb. iş makinelerini yetki belgesi olmayanlar kullanmamalı ve araç üzerine operatöründen başkası bindirilmemelidir. İş makinelerinin mekanik olarak tamir bakımında görevli olan çalışanların ellerini korumak için çalışanlara verilen eldivenlerin düzenli olarak kullanılıp kullanılmadığı denetlenmeli, eskiyenleri değiştirilmelidir. Meydana gelebilecek iş kazaları sonucundaki gün kayıplarının azaltılması hem çalışanların, hem işverenlerin hem de ülke ekonomisinin kazanç sağlayacağı düşünülürse, bu konuda yapılacak çalışmaların ne derece önemli olduğu ortadadır. Verilecek eğitimlerle işçileri tehlikeler ve riskler konusunda bilgilendirmek, işçilerin kişisel koruyucu donanımları kullanma alışkanlıklarını geliştirmek açısından meslek içi eğitimlerin süreklilik arz etmesi kaza meydana gelmesi durumunda işçinin maruz kalacağı zararın en düşük düzeye indirilmesi açısından önem arz etmektedir. Gerekli önlemlerinin alınmasından sonra da zamanla yeni tehlikeli durumlar oluşabilmektedir. Bu nedenle üretimin her aşamasında kontrol ve denetim aksamadan sürdürülmelidir.

Lojistik regresyon modelleri kategorik olarak gruplandırılan veriler için esnek ve uygun olduğundan birçok alanda kullanılabildiği gibi madencilik alanında da kullanılabileceği bu çalışmada kanıtlanmıştır. Bu uygulama çalışması sadece ELİ müessesesi için geçerlidir. İş kazalarını ayrıntılı olarak kayıt altına almış işletmeler bu tip çalışmalar gerçekleştirerek, meydana gelebilecek iş kazaları sonucundaki gün kayıplarını tahmin ederek, yüksek gün kaybına neden olan kaza bileşenleri tespit ederek, yaşanabilecek gün kayıplı kazaları azaltma yönünde önemli adımlar atabilirler.

5 TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmaya olan katkılarından dolayı TKİ çalışanlarına teşekkür ederler.

6 KAYNAKLAR

- Agresti, A. 1996. *An Introduction to Categorical Data Analysis*, John Wiley and Sons Inc., 372 p.
- Aksaraylı, M., Saygın, Ö. 2011. Algılanan Hizmet Kalitesi ve Lojistik Regresyon Analizi ile Hizmet Tercihine Etkisinin Belirlenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 13, 1, s. 21-37.
- Aydın, H. 2010. Evaluation of the Risk of Coal Workers Pneumoconiosis (CWP): A Case Study for The Turkish Hardcoal Mining, *Scientific Research and Essays*, 5, 21, pp. 3289-3297.
- EUROSTAT (2001) *European Statistics on Accidents at Work (ESAW) Methodology*. http://www.hsa.ie/eng/Statistics/ESAW_Methodology.pdf.
- Gök, A. C. 2010. *İşletmelerin Tahminleme Sürecinde Bulanık Doğrusal Regresyon Analizi ve Lojistik Regresyon Analizinin Uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S. 2000. *Applied Logistic Regression*, John Wiley & Sons, New York, 2, 373 p.
- İstanbuluoğlu, Y. S. 1999. 1984-1999 Yılları Arasında TKİ Kurumunda Olan İş Kazalarının İstatistiksel Değerlendirilmesi, *Madencilik Dergisi*, 38, 4, s. 29-41.
- Kasap, Y., Subaşı, E. 2011. Analitik Prosesi ile Açık İşletme Madenciliğinde Risk Denetimi, *Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu*, s. 139-147, Zonguldak.
- Murat, D., Işığçok, E. 2008, Expectations Regarding the Economic and Political Situation in the 2007 Election Period: The Case of Bursa, *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 27, 2, pp. 1-24.
- Önder, S., Önder, M. 2010. TKİ'ye Bağlı İşletmelerde Yaralanmalı İş Kazalarının Analizi, *Madencilik Dergisi*, 49, 3, s. 3-12.
- Önder, S., Suner, N., Önder, M. 2011. Madencilik Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Risk Değerlendirme Karar Matrisi ile İncelenmesi, *Türkiye 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, s. 399-406, Ankara.
- Özdamar, K. 2004. *Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi 1*, Kaan Kitabevi, Eskişehir, 649 s.
- Özkılıç, Ö. 2005. *İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri*, Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu, Ankara, 244 s.
- Paul, P. S. 2009. Predictors of Work Injuriy in Underground Mines – An Application of a Logistic Regression Model, *Mining Science and Technology*, 19, pp. 282-289.
- Stock, J. H., Watson, M W. 2007. *Introduction to Econometrics*, Pearson Addison Wesley, Boston, 840 p.
- TMMOB, 2011. *Madencilik Sektörü ve Politikaları Raporu*.
- Tüzüntürk, S. 2007. Ekonometri Bölümü Mezunlarının Çalışma Hayatına Girişi: Deneysel Bir Alan Araştırması, 8. *Türkiye Ekonometri ve İstatistik Kongresi*, Malatya.
- Yıldırım, H. 2009. Kapalı Devre Suni Solunum Sağlayan Cihazlar, *Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Sempozyumu*, s. 273-280, Adana.
- ELİ (2013) *ELİ tanıtım 2013*. Ege Linyitleri İşletmesi Müessesesi Müdürlüğü, <http://www.eli.gov.tr>.

