

AKÜ FEMÜBİD 19 (2019) 015801 (203-212)

AKU J. Sci. Eng. 19 (2019) 015801 (203-212)

Doi: 10.5578/fmbd.67822

Araştırma Makalesi / Research Article

Box-Behnken Yöntemi ile Soma Kömür Atıklarından (-0,5 mm) Temiz Kömür Eldesi için Deney Tasarımı ve Regresyon Analizi

Muhammed Fatih Can¹, Eyüp Sabah¹¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

e-posta: mfcan@aku.edu.tr

Geliş Tarihi: 08.05.2018

; Kabul Tarihi: 19.12.2018

Öz

Burada ELİ (Manisa-Soma) şlam havuzundan alınan ince boyutlu (-0,5 mm) atık kömürlerin en ekonomik zenginleştirme prosesi ile çevreye zarar vermeden tekrar ülke ekonomisine kazandırılması hedeflenmiştir. Zenginleştirme işleminde, kömüre eşlik eden kil minerallerinin hidrosiklonla uzaklaştırılması amaçlanmış, böylece temiz kömürün kül içeriğinin azaltılmasına çalışılmıştır. Hidrosiklonla gerçekleştirilen zenginleştirme testlerinde, deney parametreleri MINITAB 17 programında Box-Behnken deney tasarım yöntemi ile belirlenmiş ve sonuçlar Box-Behnken regresyon yöntemiyle analiz edilerek optimum parametreler tespit edilmiştir. Isıl değeri 1754 kcal/kg ve kül içeriği %54,87 olan atıktan, hidrosiklonla gerçekleştirilen ayırma işlemi sonrasında %55,75 kömür kazanma verimiyle 2573 kcal/kg ısıl değere sahip %42,60 kül içerikli kömür kazanılmıştır. Elde edilen temiz kömürün toplam kükürt içeriği %0,59 olup, yanıcı kükürt oranı %0,05'dir.

Anahtar kelimeler

Kömür Atığı;
Hidrosiklon;
Box Behnken;
Deney Tasarımı;

Experimental Design and Regression Analysis for Clean Coal Recovery from Soma Coal Waste (-0.5 mm) by Box-Behnken Method

Abstract

Here, in order to the recontributing to the national economy with the most suitable enrichment process without harming to the environment of the fine-sized (-0.5 mm) coal taken from ELİ Manisa/ Soma coal sludge pond has been aimed. In enrichment process, the being removed by hydrocyclone of clay minerals accompanied by coal has been aimed. Enrichment experiment parameters have been determined by Box-Behnken experimental design method and the results have been interpreted by MINITAB 17 program and optimum parameters have been determined after the results were analyzed by Box-Behnken regression method. After the separating process from the wastes containing 54.87% ash and 1754 kcal/kg heat value by 55.75% yield of coal gain, the coal having 42.60% ash and 2573 kcal/kg heat value have been obtained. The total and combustible sulfur content of the obtained clean coal are 0.59% and 0.05%, respectively.

Keywords

Coal Waste;
Hydrocyclone;
Box Behnken;
Experiment Design;

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Kömür dünya üzerinde en çok ve coğrafi olarak dağınık halde bulunan fosil yakıttır. Dünya genelinde 816,22 milyar ton görünür rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Bunun anlamı ise Dünya'nın 153 yıldan fazla bir süre yetecek kömür rezervine sahip olduğudur (İnternet-1). Mevcut üretim ve tüketim miktarları açısından görünür petrol ve doğal gaz rezervlerinin tükenme ömürleri kömüre nazaran çok daha kısadır. Bu bakımdan kömür gelecekte önemli enerji kaynakları arasında ilk sırada olacaktır. Modern kömür hazırlama tesisleri, iri, orta ve ince

kömür temizleme devrelerinden oluşur. Kömür hazırlamada 0,589 mm (28 meş) altında boyut dağılımı gösteren kömürler, "ince kömür" olarak tanımlanırlar. Gelişen mekanizasyona bağlı olarak, üretilen kömürde bugünün madenciliği daha fazla ince malzeme oluşturmaktadır. Günümüzde artık bu tür kömürlerin kazanılması zorunluluk haline gelmiştir. Geçmiş yıllarda ince ve çok ince kömürlerin atılması daha ekonomik olmasına rağmen, hızla gelişen teknoloji sayesinde ince kömür artık günümüzde değerlendirilebilmektedir. Böylece kazanılan ince kömürlerin atığa gitmesi

önlenebilmekte ve atık depolamasındaki sorunların da önüne geçilebilmektedir. Kempnich (2003) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, global temiz kömür üretiminin %7'si flotasyon yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. İri kömürün hazırlanmasında kullanılan gravimetrik yöntemler, düşük maliyet, yüksek kapasite ve seçicilik gösterirler. İnce kömürün temizlenmesinde de gravimetrik yöntemlerin uygulanması söz konusudur. Bununla birlikte, separatörlerin kullanımında bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte, çok ince boyutlu kömürün (ultra fine coal) zenginleştirilmesinde hidrosiklonlar, Multi Gravite Separatör (MGS), Falcon konsantratörü vs. gibi gelişmiş gravite ayırıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Bu ayırıcılar ile kömürün zenginleştirilmesi üzerine birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalar yürütülmüş ve iyi sonuç(lar) alınmıştır.



Şekil 1. Hidrosiklon ünitesi.

Yıldırım vd. (1995) Zonguldak'ta MGS cihazı ile yapılan bir çalışmada %36,6 küllü kömürden %7,01 temiz kömürü %75,8 yanma verimi ile elde etmişlerdir. Arslan vd. (1999) MGS cihazı ile yaptıkları çalışmada %35,75 küllü Yeniçubuk, Gömerek linyit kömürlerinden %19,23 küllü temiz kömürü %79,82 verimle kazanmışlardır. Çiçek vd. (2002) Manisa-Soma'da MGS cihazı ile yaptıkları çalışmada %35,9 küllü sert linyit kömüründen %18 temiz kömürü %79,5 yanabilir verimle elde etmiştir. Abd-Elrahim (2003) taşıyıcı kolon flotasyon ile %10,13 kül içerikli çok ince boyutlu kömürden %5,15 kül içerikli temiz kömürü %79,94 verimle kazanmıştır. Li vd. (2003) Çin'de siklo-mikro kabarcık kolonu ile %47,11 kül içerikli kömür şlamından

%79,26 yanabilir verimle %10,55 küllü temiz kömür elde etmiştir. Soma kömür atıklarından kömürün kazanılmasına yönelik araştırmalar oldukça sınırlıdır. Çiçek vd. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, Soma lavvarı atıkları sarsıntılı masa ve MGS'de fraksiyonel bazda zenginleştirme işlemine tabi tutularak %35,9 kül içeriğine sahip lavvar atığından %10-15 kül oranında temiz kömür elde edilmiş ve etkin bir ayırma için zenginleştirme tesisi akım şeması önerilmiştir. Yine Soma kömür yıkama tesisi atığından alınan numuneler ile gerçekleştirilen bir başka çalışmada, %54,04 kül içeriğine sahip atıktan, 0,038 mm altı şlam uzaklaştırıldıktan sonra, spiral ve MGS'de yapılan zenginleştirme işlemi sonucunda %55 verimle %14,81 kül oranında spiral ürünü temiz kömür, ağırlıkça %7,3 ve %14,2 oranlarında %9,69 ve %28,48 kül içerikli iki ayrı temiz kömür elde edilmiştir (Yüce vd., 2007). Bu çalışmada, ELİ (Manisa-Soma) atık barajından alınan yaklaşık %82'si 425 mikron altındaki kömür atığının uygun bir ayırma prosesi ile ucuz ve verimli bir şekilde kazanılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Deneysel çalışmalarda kullanılan atık kömür numunesi (52 kg) Ege Linyitleri İşletmesi (Soma) Eski Park Lavvarı'na ait şlam havuzlarından tedarik edilmiştir. Atığın karakterizasyonu ile hidrosiklonla kömür kazanma tespitinde kül oranları esas alınmıştır. Şartlar optimize edilip en uygun zenginleştirme parametresi tespit edildikten sonra kül oranlarına ilaveten toplam ve yanabilir kökürt ile alt ısı değerleri belirlenmiştir. Kül analizleri, orijinal kömürde TS-ISO 1171 standardına uygun olarak Carbolite CWF 11-5 marka fırında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan atığın boyut dağılımının tespitinde Retsch AS 200 model elek sarsma cihazı kullanılmış, atıkta kil bulunduğu için elek analizleri yaş olarak yapılmıştır. -38 µm malzemenin tane boyut analizi, MALVERN Mastersizer 2000 cihazında yaş yöntemle ölçülmüştür. Yoğunluk tayini Quantachrome Ultracycrometer 100 otomatik piknometrede gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk tayini, kül analizi vs. çalışmada hassasiyet gerektiren bütün tartım işlemlerinde Precisa marka XR 405A model hassas terazi kullanılmıştır

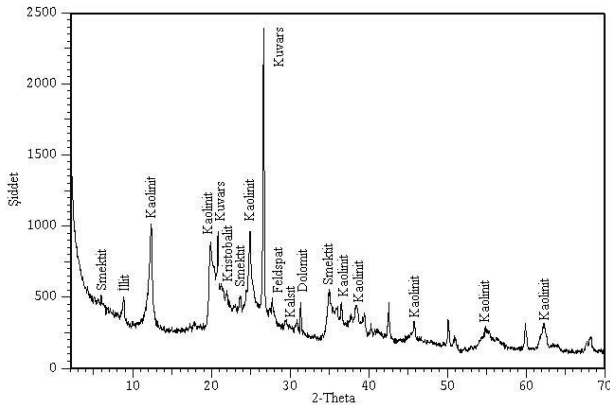
2.1. Hidrosiklonda zenginleştirme deneyleri

Zenginleştirme deneyleri; 200 litre tank hacmine sahip, siklon alt ve üst ürünlerinin 2 ayrı haznede toplanabildiği, 0–10 bar arası basınç üretebilen bir hidrosiklon ünitesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Deneylerde çapı 44 mm olan Mozley yapımı hidrosiklonda etkin bir ayırma için optimize edilen işletme parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Hidrosiklon işletme parametreleri.

| Siklon çapı (mm) | Optimize edilen işletme parametreleri | | | |
|------------------|---------------------------------------|----------------|------------------|----------------|
| | Besleme basıncı (bar) | Katı oranı (%) | Vortex çapı (mm) | Apex çapı (mm) |
| 44 | 0,5/1/1,5/ | 3/7,2/10 | 11,1/14,3 | 3,2/4,5/6,4 |

Box-Behnken tasarımları için deneme noktasının sayısı $N = 2k(k-1) + nc$ denklemiyle belirlenmektedir (George Box ve Donald Behnken, 1960). Bu denklemde k etken sayısını nc merkezi deneme sayısını belirtmektedir. Hidrosiklon deneylerinde gözlem sayısı Box-Behnken yöntemine göre belirlenmiş ve buna göre 18 adet deney yapılması uygun bulunmuştur. Kül ve kükürt miktarlarının minimum, kömür kazanma veriminin maksimum olduğu çıktılar optimum sonuç olarak alınmıştır.



Şekil 3. Orijinal atığın XRD difraktogramı.

3. Bulgular

3.1. Karakterizasyon testleri

3.1.1. Mineralojik analiz

Atık kömür numunesinde yer alan kil ve kil dışı mineralleri tam olarak tanımlayabilmek için Rigaku-Giger Flex cihazı kullanılmıştır. Şekil 3’de beslemeye ait XRD difraktogramı görülmektedir. Atıkta kömüre

eşlik eden mineraller smektit, illit, kaolinit, kuvars, kristobalit, feldispat, kalsit ve dolomittir.

3.1.2. Kömür analizi

Kömür atık numunesinin kuru bazda analiz sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Orijinal atığın kül oranının yüksek olması (%54,82), atık içerisinde yüksek miktarda inorganik madde bulunduğunu göstermektedir. Tesis atığının toplam kükürt içeriği ise oldukça düşük düzeydedir (%0,48).

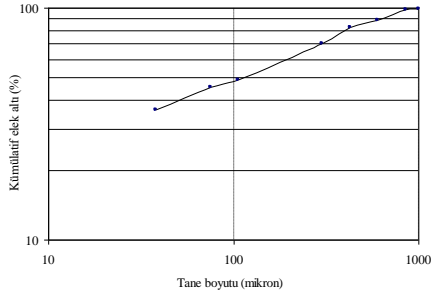
Çizelge 2. Atık kömür numunesinin analiz sonuçları.

| | |
|--------------------------|-------|
| Kül (%) | 54,82 |
| Uçucu Madde (%) | 28,92 |
| Yanıcı Kükürt (%) | 0,01 |
| Toplam Kükürt (%) | 0,48 |
| Alt Isıl Değer (kcal/kg) | 1754 |

Atığın tane boyutuna bağlı kül analiz değerleri Çizelge 3’de verildiği gibi, %40’dan fazla miktarın 38 µm boyutunun altında yer alması kömür ve ona eşlik eden inorganik katıların yeterince serbestleşmiş olduklarını göstermektedir. Bu durumun zenginleştirme işlemine olumlu etkisi olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, 38 µm boyutu üzerinde bulunan atığın kül oranının ortalama %37 civarında olması, kömüre eşlik eden inorganik katıların büyük miktarının -38 µm altında olduğunu göstermektedir. Kükürt ve kül oranları dikkate alındığında +38 µm fraksiyonundaki atığın herhangi bir zenginleştirme işlemine tabi tutulmadan sadece sınıflandırılarak termik santrallerde yakıt olarak kullanılabilceği görülmektedir.

3.1.3. Tane boyutu analizi

Tamamı 1 mm (ASTM 18 mesh) altında yer alan tesis atığının boyut dağılımı Şekil 4’de gösterilmiştir. Atığın boyut dağılımından da görüldüğü gibi, -0,5 mm tane boyutundaki malzeme miktarının %85’den yüksek olması, kömür ve kömüre eşlik eden inorganik maddelerin boyut dağılımının çok ince olduğunu göstermektedir. Şekil 5’de -38 µm boyutundaki malzemenin tane boyut dağılımı görülmektedir.

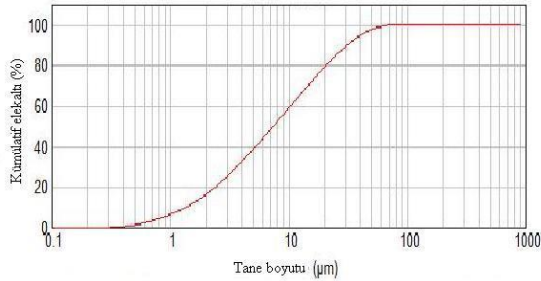


Şekil 4. Kömür atığının tane boyut dağılımı eğrisi.

38 μm altı malzemenin boyut dağılımı incelendiğinde d_{10} : 1,358 μm , d_{50} : 7,448 μm ve d_{90} : 31,328 μm olduğu görülmektedir. Özellikle 38 μm altı malzemenin yaklaşık %50'sinin 7 μm altı olması ve toplam malzemenin %40,94'ünün de 38 μm 'dan küçük malzeme olduğu düşünüldüğünde ultra ince malzemenin çokluğu dikkat çekmektedir.

Çizelge 3. Tane boyutuna bağlı kömür analiz değerleri.

| Tane boyutu (μm) | Miktar (%) | Kül (%) | Toplam kükürt (%) | Üst ısıl değer (kcal/kg) | Alt ısıl değer (kcal/kg) | Sabit karbon (%) | Uçucu madde (%) |
|-------------------------------|------------|---------|-------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|
| +425 | 7,32 | 27,64 | 0,63 | 3984 | 3808 | 30,87 | 37,31 |
| -425 +300 | 13,57 | 31,86 | 0,65 | 3663 | 3500 | 28,64 | 34,93 |
| -300 +106 | 23,94 | 37,28 | 0,60 | 3292 | 3138 | 23,97 | 33,37 |
| -106 +75 | 4,16 | 38,66 | 0,54 | 3211 | 3059 | 23,05 | 33,34 |
| -75 + 38 | 10,07 | 48,55 | 0,49 | 2563 | 2420 | 13,80 | 33,51 |
| -38 | 40,94 | 67,56 | 0,34 | 1059 | 985 | 6,80 | 21,39 |
| Toplam | 100,00 | | | | | | |

Şekil 5. 38 μm altı malzemenin boyut dağılımı eğrisi.

Atık kömür numunesinin sahip olduğu özellikleri ortaya koymak için yapılan kalitatif ve kantitatif analizlerden elde edilen bulgular Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Kömür atığının özellikleri.

| Parametre | |
|---|----------------------------------|
| Katı yoğunluğu (g/cm^3) | 1,8740 |
| Bünye nemi (%) | 29,8 |
| Tane boyutu (mm) | -1 |
| Mineral madde içeriği | Kuars, smektit, illit, kaolinit, |
| Orijinal atığın kül içeriği (%) | 54,82 |

3.2. Atıktan kömür kazanımı

3.2.1. Hidrosiklon ile zenginleştirme deneyleri

Zenginleştirme deneylerinde hidrosiklona ait yapısal ve çalışma parametrelerinin optimizasyonunda 4 girdi (bağımsız) ve 2 çıktı (bağımlı) değişkene dayalı yüzey modellemesinden (response surface) Box-Behnken modelinden faydalanılmıştır. Girdi değişkenleri olarak; katı oranı, apeks ve vorteks çapı ile besleme basıncı; çıktı olarak da kül ve kömür kazanma verimi esas alınmıştır. Bu proseste girdiler ile çıktılar arasındaki matematiksel ilişkiyi irdeleyen teknik, Box-Behnken modelidir.

3.2.1.1. Kül için regresyon modeli

Kül için hazırlanan regresyon modeli, MINITAP 17.0 paket programı yardımıyla değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge 5'te modelin özeti görülmektedir.

Tahmin hatası kareleri toplamı (PRESS), atanan değerler ile gözlenen değerler arasındaki sapmanın bir ölçüsüdür. PRESS, karesel farkların toplamı olan

kalan hatanın karesine (SSE) benzerdir. PRESS'i hesaplamak için kullanılan formül, her gözlemin veri kümesinden sistematik olarak çıkarılması, regresyon denkleminin tahmin edilmesi ve modelin kaldırılan gözlemi ne kadar iyi tahmin ettiğini belirleme yöntemine eşdeğerdir.

Bu yüzden PRESS özellikle modelin öngörü yeteneğini değerlendirmek için kullanılır. Genellikle, PRESS değeri ne kadar küçükse, modelin öngörme kabiliyeti o kadar iyidir. Ayrıca kullanılan Minitab yazılımı, genel olarak yorumlanması daha sezgisel olan tahmini R²'yi hesaplamak için PRESS değerini kullanır. Bununla birlikte, bu istatistikler, önerilen modele aşırı uymayı engelleyebilir. Aşırı uyum; modele popülasyonda önemli olmayan etkilere ilişkin terimler eklediğinizde, örnek verilerde önemli görünse de daha geniş bir perspektifte alakası düşük olmasına rağmen kendisine aşırı uyumlu modelde yer bulabilmesidir. Bu tür aşırı uyumlu modeller örnek verilere göre tasarlanmış olup, bu nedenle genel nüfus hakkında tahminler yapmak için yararlı olmayabilir.

$$X_{\text{kül}} = 44,1803 - (1,2966 * X_{\text{vorteks}}) + (1,7196 * X_{\text{Apeks}}) - (0,3831 * X_{\text{Katı oranı}}) + (0,4644 * X_{\text{Besleme Basıncı}}) - (0,8417 * X_{\text{Apeks}} * X_{\text{Apeks}}) - (0,7466 * X_{\text{Katı oranı}} * X_{\text{Katı oranı}}) + (0,2646 * X_{\text{Besleme Basıncı}} * X_{\text{Besleme Basıncı}}) - (0,4222 * X_{\text{vorteks}} * X_{\text{Apeks}}) + (0,1956 * X_{\text{vorteks}} * X_{\text{Katı oranı}}) + (0,2994 * X_{\text{vorteks}} * X_{\text{Besleme Basıncı}}) + (1,1052 * X_{\text{Apeks}} * X_{\text{Katı oranı}}) - (0,0671 * X_{\text{Apeks}} * X_{\text{Besleme Basıncı}}) - (0,1298 * X_{\text{Katı oranı}} * X_{\text{Besleme Basıncı}})$$

Çizelge 5. Kül için model özeti.

| Model | R | R ² | Düzeltilmiş R ² (adj-R ²) | Standart Sapma (S) | PRESS |
|-------|--------|----------------|--|--------------------|---------|
| 1 | 0,9394 | 0,8825 | 0,787 | 1,0252 | 74,7085 |

Kül: Bağımlı değişken

Modelde R²=0,8825; Düzeltilmiş R²=0,787 olup, bağımsız değişken durumundaki "Apeks", "Vorteks", "Katı oranı" ve "Besleme basıncı"; bağımlı değişkenleri kendi aralarında çapraz ilişki kurdukları durumdaki kül yüzdesi değişkenine ait Standart Sapması (S) %1,0252 oranında açıklamaktadır. Buna göre iyi düzeyde korelasyon bulunmaktadır.

Yanıt yüzey regresyonu olan Box-Behnken yöntemi ile elde edilen grafiklerde bağımsız değişkenlerin kül yüzdeleri ile ilişkileri Çizelge 6'da verilmiştir. Bu analiz esnasında kullanılan PRESS parametresi

"Vorteks*Vorteks" parametresinin model için uyumsuz olduğunu tespit edip değerlendirmeden çıkarmıştır. Regresyon modeli katsayıları, modeldeki bir terim ile yanıt değişkeni arasındaki ilişkinin boyutunu ve yönünü tanımlar. Terimler arasında çoklu-doğrusallığı en aza indirmek için, katsayıların hepsi kullanılan verilerin birimleri şeklindedir.

Çizelge 6. Kül için regresyon modeli.

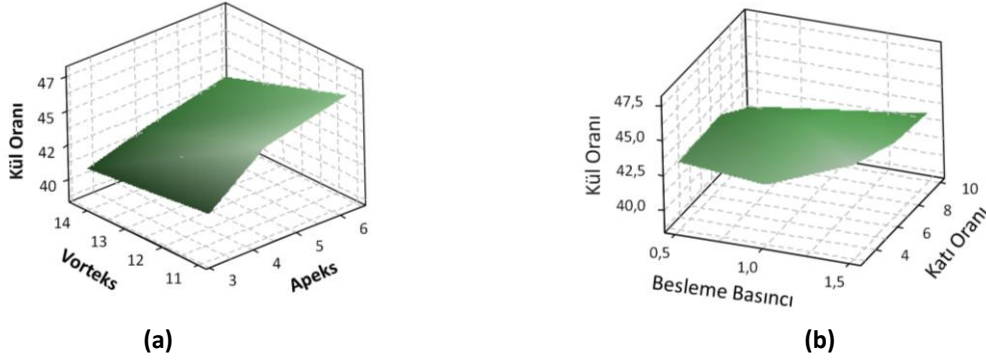
| Parametre | Katsayı | Standart Sapma | T | Anlamlılık Düzeyi (p) |
|----------------------------|---------|----------------|---------|-----------------------|
| Sabit Sayı | 44,1803 | 0,4352 | 101,521 | 0,000 |
| Vorteks | -1,2966 | 0,1893 | -6,850 | 0,000 |
| Apeks | 1,7196 | 0,2576 | 6,676 | 0,000 |
| Katı Oranı | -0,3831 | 0,2585 | -1,482 | 0,158 |
| Besleme Bas. | 0,4644 | 0,2599 | 1,787 | 0,093 |
| Apeks * Apeks | -0,8417 | 0,3942 | -2,135 | 0,049 |
| Katı Oranı * Katı Oranı | -0,7466 | 0,3870 | -1,929 | 0,072 |
| Besleme Bas.* Besleme Bas. | 0,2646 | 0,3773 | 0,701 | 0,493 |
| Vorteks*Apeks | -0,4222 | 0,2542 | -1,661 | 0,116 |
| Vorteks*Katı Oranı | 0,1956 | 0,2551 | 0,767 | 0,454 |
| Vorteks*Besleme Bas. | 0,2994 | 0,2563 | 1,168 | 0,260 |
| Apeks*Katı Oranı | 1,1052 | 0,3576 | 3,091 | 0,007 |
| Apeks*Besleme Bas. | -0,0671 | 0,3594 | -0,187 | 0,854 |
| Katı Oranı* Besleme Bas. | -0,1298 | 0,3607 | -0,360 | 0,724 |

Kül: Bağımlı değişken

Bu çizelgede yer alan T-değeri katsayı ve standart sapması arasında bir orandır. Bu oran özellikle sıfırlama hipotezini değerlendirirken kullanılan P parametresinin hesabı için elzemdir. Burada bahsi geçen sıfırlama hipotezi (null hypothesis) katsayının model için gerekli olup olmadığını gösteren bir katsayıdır. Bir katsayının p değeri alfa ile gösterilebilen parametrenin kullanılmaması halinde oluşabilecek risk %'si değerinden küçük ise elzemdir değil ise modelden çıkarılarak basitleştirilmesi mümkündür. Minitab programının destek sitesine (internet2) göre bu alfa değeri hassas sistemlerde 0,05 olarak kabul edilip %5'lik bir yanılma payını kabul ederek değerlendirme yapılabileceğini söylemekle birlikte bu değeri 0,2 olarak 15 parametrelilik modelde 5 adet parametrenin

(Besleme Bas.* Besleme Bas., Vorteks*Katı Oranı, Vorteks*Besleme Bas., Apeks*Besleme Bas. ve Katı Oranı*Besleme Bas.) sıfırlama hipotezine takıldığını söyleyebiliriz. Apex çapının artması kül içeriğinde artışa neden olmaktadır. En düşük kül içeriği 3,2 mm çaplı apeks ile elde edilmiştir. Alt akım yoğunluğunu etkileyen apeks çapı, iri partiküllerin alt açıklıktan siklonu terk etmesi için yeterli genişlikte olmalıdır. Çok geniş bir çıkış açıklığı, üst akıma gitmesi gereken

kil içerikli malzemelerin alt akıma karışmasına neden olurken, çok küçük apeks çapları pülp yoğunluğunu doğrudan artırarak ayırmayı olumsuz yönde etkilemektedir (Şekil 6). Ayrıca besleme basıncının artması kül içeriğinde artışa neden olmaktadır. Besleme basıncının artması ile kül içeriğinde meydana gelen artış, regresyon modeli ile de doğrulanmaktadır.



Şekil 6 a) Kül oranı üzerine Vorteks ve Apeks değişkenlerinin etkisi b) Besleme Basıncı ve Katı Oranının etkisini gösteren yüzey grafikleri

Pülpün katı oranı artışının temiz kömürün kül içeriğine etkisi marjinaldir. Aslında hidrosiklonlarda pülp yoğunluğu etkisi oldukça kompleks bir konudur. Pülp yoğunluğu artışına bağlı olarak, besleme malında çok ince boyut dağılımı gösteren kil minerallerinin varlığı ve bunun sonucunda pülpün efektif viskozitesinin artması nedeniyle siklon içerisinde engelli çökme şartları bozulmaktadır.

3.2.1.2. Kömür kazanma verimi regresyon modeli

Kömür kazanma verimi için hazırlanan regresyon modeline göre Çizelge 7'deki sonuçlar elde edilmiştir. Vorteks*Vorteks ilişkisinin yetersiz bulunduğu modelde 10 ayrı parametrede %20 Anlamlılık Düzeyi (p)'de bağımlı ve bağımsız değişken sayıları ile deney gözlem sayıları yeterli ve güvenilir olduğu görülmektedir.

Çizelge 7. Kömür kazanma verimi için model özeti.

| Parametre | Katsayı | Standart Sapma | T | Anlamlılık Düzeyi (p) |
|------------|---------|----------------|--------|---------------------------|
| Sabit Sayı | 33,4921 | 1,5145 | 22,114 | 0,000 |
| Vorteks | 7,0588 | 0,6587 | 10,716 | 0,000 |

| | | | | |
|----------------------------|---------|--------|--------|-------|
| Apeks | -5,9750 | 0,8965 | -6,665 | 0,000 |
| Katı Oranı | 2,7374 | 0,8996 | 3,043 | 0,008 |
| Besleme Bas. | -1,4702 | 0,9043 | -1,626 | 0,124 |
| Apeks * Apeks | 1,7896 | 1,3719 | 1,304 | 0,211 |
| Katı Oranı * Katı Oranı | 1,8030 | 1,3467 | 1,339 | 0,199 |
| Besleme Bas.* Besleme Bas. | -1,6671 | 1,3132 | -1,270 | 0,222 |
| Vorteks*Apeks | 0,9302 | 0,8848 | 1,051 | 0,309 |
| Vorteks*Katı Oranı | -0,3739 | 0,8878 | -0,421 | 0,679 |
| Vorteks*Besleme Bas. | -0,7244 | 0,8920 | -0,812 | 0,429 |
| Apeks*Katı Oranı | -3,8441 | 1,2444 | -3,089 | 0,007 |
| Apeks*Besleme Bas. | 0,0817 | 1,2507 | 0,065 | 0,949 |
| Katı Oranı* Besleme Bas. | -0,0039 | 1,2553 | -0,003 | 0,998 |

*Kömür kazanma verimi: Bağımlı değişken

Regresyon modeli aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir.

$$X_{\text{kömür kazanma verimi}} = 33,4921 + (7,0588 * X_{\text{vorteks}}) - (5,9750 * X_{\text{apeks}}) + (2,7374 * X_{\text{katı oranı}}) - (1,4702 * X_{\text{besleme basıncı}}) + (1,7896 * X_{\text{apeks}} * X_{\text{apeks}}) + (1,8030 * X_{\text{katı oranı}} * X_{\text{katı oranı}}) - (1,6671 * X_{\text{besleme basıncı}} * X_{\text{besleme basıncı}}) + (0,9302 * X_{\text{vorteks}} * X_{\text{apeks}}) - (0,3739 * X_{\text{vorteks}} * X_{\text{katı oranı}}) - (0,7244 * X_{\text{vorteks}} * X_{\text{besleme basıncı}}) - (3,8441 * X_{\text{apeks}} * X_{\text{katı oranı}}) + (0,0817 * X_{\text{apeks}} * X_{\text{besleme basıncı}}) - (0,0039 * X_{\text{katı oranı}} * X_{\text{besleme basıncı}})$$

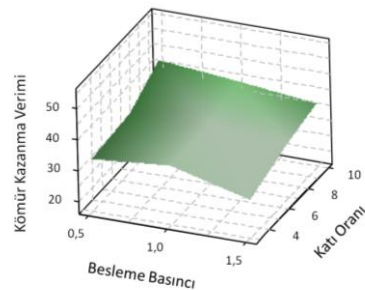
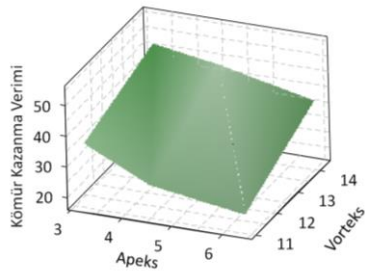
$$X_{\text{vorteks}} * X_{\text{apeks}} - (0,3739 * X_{\text{vorteks}} * X_{\text{katı oranı}}) - (0,7244 * X_{\text{vorteks}} * X_{\text{Besleme Basıncı}}) - (3,8441 * X_{\text{apeks}} * X_{\text{katı oranı}}) + (0,0817 * X_{\text{apeks}} * X_{\text{Besleme Basıncı}}) - (0,0039 * X_{\text{katı oranı}} * X_{\text{Besleme Basıncı}})$$

Model özetinde (Çizelge 7) $R^2=0,9232$; Düzeltilmiş $R^2=0.8609$ olup, bağımsız değişkenler ile kömür kazanma bağımlı değişkenine dayalı tahmin modeli, arasındaki değişimi 3,56818 düzeyinde bir standart sapma ile açıklama kabiliyetine sahiptir. Buna göre iyi düzeyde bir korelasyon bulunmaktadır. Modelde apeks ve besleme basıncı değişimlerinin kömür kazanma verimi sonucuna etkisi negatif yönlüdür. Katı oranı ve vorteksin artmasıyla, kömür kazanma verimine pozitif yönde bir etki olduğu görülmektedir. Bu ilişkileri en iyi kömür kazanma verimini etkileyen faktörlerin bileşke grafiklerinden takip edebiliriz (Şekil 7). Model uygulanarak kömür kazanma verimi çıktılarının tahmini değerlerine ulaşılmıştır (Çizelge 8). Buna göre; vorteks (14,3 mm), apeks (3,2 mm), katı oranı (%10) ve besleme basıncı (0,5 bar) olduğunda kömür kazanma verimi %50,57 olarak belirlenmiştir.

Vorteks ve katı oranındaki artışın kömür kazanma verimi üzerindeki etkisinin pozitif, aynı şekilde apex ve besleme basıncının artmasının ise negatif olduğu görülmektedir.

Çizelge 8. Kömür kazanma verimi için regresyon modeli.

*Kömür kazanma verimi: Bağımlı değişken



Şekil 7 a) Kömür Kazanma Verimi üzerine Vorteks ve Apeks değişkenlerinin etkisi b) Besleme Basıncı ve Katı Oranının etkisini gösteren yüzey grafikleri

| Model | R | R ² | Düzeltilmiş R ² (adj-R ²) | Standart Sapma (S) | PRESS |
|-------|--------|----------------|--|--------------------|---------|
| 2 | 0,9608 | 0,9232 | 0.8609 | 3,56818 | 842,425 |

Çizelge 9'da, 44 mm çapındaki hidrosiklonunda gerçekleştirilen optimizasyon deneyleri ve bu deneyler sonucunda elde edilen temiz kömüre ait kül ve kömür kazanma verim değerleri verilmiştir. Sonuçlar, kül içeriği bakımından değerlendirildiğinde, en düşük kül oranının %38,91 olduğu görülmektedir. Çizelge 8'da verilen modelde önerilen denkleme uygun olarak girdiler değerlendirildiğinde, bulunan kül miktarı ise %39,74'dür. Bu modelin kül içeriği için yüksek güvenlikte bir sonuç verdiği, zira belirlenen kül miktarının hidrosiklon optimumuna çok yakın olduğu ve sonucun güvenilirliğinin yüksek olduğu görülmektedir. Düşük küllü temiz kömüre ait parametrelerin hemen hemen tamamı (vortex çapı, apeks çapı ve katı oranı) modelleme sonucunda elde edilen en düşük küllü temiz kömürün parametreleri ile uyumlu olup, sadece besleme basıncında bir farklılık oluşmuştur. Nitekim bu farklılık Çizelge 8'da besleme basıncı için anlamlılık düzeyi değerinde de görülmektedir. Anlamlılık düzeyi verilerinde standart sapma değerinin yüksek çıkması, bu parametrenin optimizasyonunda doğruluğunun düşük olduğuna işaret etmektedir.

Çizelge 10'de zenginleştirme öncesi ve sonrası Soma kömür atığına ait analiz sonuçları topluca verilmiştir.

4. Sonuçlar




Bu çalışmada Soma kömür atığından ince boyutlu kömürün kazanılması amaçlanmıştır. Kül miktarının azaltılmasında artık içindeki mineral maddelerin özelliklerini bilmek, uygulanacak zenginleştirme işleminin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. XRD sonuçlarından kuvars, smektit, illit, kaolinit, dolomit, feldspat, kristobalit ve kalsit minerallerinin varlığı tespit edilmiştir. İnce boyuttaki malzemenin (-38 µm) kül içeriğinin yüksek oluşu (%67,56) ve elek analizi sonucunda ince boyutlara doğru belirgin bir kül artışının gözlenmesi,

safsızlıkların çok ince boyut dağılımı gösterdiğine işaret etmektedir.

Artıkta 425 mikrondan iri malzeme oranı %17,6 ve bu malzemeye ait kül içeriği %26,7 olup toplam kükürt miktarı %0,6'dır. Kül ve toplam kükürt miktarları dikkate alındığında bu boyut grubundaki kısım, zenginleştirme işlemine ihtiyaç duyulmaksızın sadece sınıflandırılarak satılabilir niteliktedir.

Hidrosiklonun 14,3 mm vorteks ve 3,2 mm apeksle, %10 katı oranı, 0,5 bar besleme basıncında çalıştırılması sonucunda, %54,87 kül içeriği ve 1754 kcal/kg alt ısı değerine sahip tesis atığından %55,75 kömür kazanma verimi ile %42,60 kül içeriğine sahip temiz kömür elde edilmiştir. Temiz kömürün alt ısı değeri ise 2573 kcal/kg'dır.

Çizelge 10. Zenginleştirme öncesi ve sonrası Soma kömür atığına ait veriler.

| Numune adı | Numune | Kül oranı (%) | Uçucu madde (%) | Yanıcı kükürt (%) | Toplam kükürt (%) | Üst ısı kcal/kg | Alt ısı kcal/kg |
|-------------------------|---|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| Beslenen Kömür (-500µm) |  | 54,82 | 28,92 | 0,01 | 0,48 | 2212 | 1754 |
| Hidrosiklon Üst Akım |  | 70,22 | 22,77 | 0,07 | 0,23 | - | - |
| Hidrosiklon Alt akım |  | 42,60 | 34,66 | 0,05 | 0,59 | 3056 | 2573 |

Zenginleştirme deneylerinde hidrosiklon işletme parametrelerinden apeks açıklığı ve besleme basıncının artması kül miktarında artışa, vorteks ve katı oranının artması ise kül miktarında azalmaya neden olmuştur. Kömür kazanma verimi açısından, apeks ve besleme basıncı negatif bir etki oluştururken, vorteks ve katı oranı ise pozitif bir etki yaratmıştır. Bu etkilerin net olarak görülmesi için düzenlenen çok eksenli yüzey grafikleri oldukça faydalı olmuştur.

Sonuç itibarıyla elde edilen temiz kömür termik santraller, çimento ve/veya tuğla fabrikalarına

satılabilir. Kil minerallerince zengin hidrosiklon üst akımının ise çimento sektöründe kullanılabilirliği araştırılabilir.

Teşekkür

Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (10.MUH.05) projesine verdiği destekten ötürü teşekkürler.

Kaynaklar

Abd Elrahim, F.H., 2003, Carrier flotation for desulfurization and deashing of difficult to float El-Maghara Coal, *Ore Dressing*, **10**(5), 10-17.

Arslan, N., Canbazoglu, M. ve Ulusoy, U., 1999, Yeniçubuk Gemerek linyit kömürlerinin MGS ile yıkanabilirliğinin araştırılması, *Türkiye 16. Madencilik Kongresi ve Sergisi*, Ed: Ü. Atalay, C. Hiçyılmaz, S. Ersayın ve E. Tercan, Ankara, 321-326.

Box G., Behnken D., 1960, Some new three level designs for the study of quantitative variables, *Technometrics*, 2, 455–475.

Çiçek, T., Cöcen, İ., Engin, V.T. ve Demir, S., 2002, “Recovery of Fine Coal From Tailings of Coal Washing Plants”, *IXth International Mineral Processing Symposium*, Ed: Prof. Dr. S. Özkol, v.d., Cappadocia-Turkey, pp.198.

Çiçek, T., Cöcen, İ., Engin, V.T., Cengizler, H., 2008. An efficient process for recovery of fine coal from tailings of coal washing plants, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 30(18), 1716-1728.

Kempnich, R. J., Coal Preparation—A World Review, In *Proceedings of the XX International Coal Preparation Conference*, Lexington, KY, Primedia, Stamford, Connecticut 2003, 17–39.

Li, B., Tao, D., Ou, Z. ve Liu, J., 2003, Cyclomicrobubble column flotation of fine coal, *Separation Science of Technology*, 38(5), 1125-1140.

TS-ISO 1171 Katı minereal yakıtlar-kül miktarı tayin, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

Yıldırım, İ., Ateşok, G. ve Çelik, M.S., 1995, Laboratuvar-Pilot Tip Multi Gravite Cihazı İle Kömür-Su Karışımları İçin Süper Düşük Küllü Kömür Üretimi, *Türkiye 14. Madencilik Kongresi*, 6-9 Haziran, 443-448.

Yüce, A.E., Kangal, O., Özer, M., Kökkılıç, O., Güney, A., Önal, G., 2007. Evaluation of coal fines from tailings, XII. Balkan Mineral Processing Congress, 347-351.

İnternet kaynakları

1-<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
(07.05.2018)

2- <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/>,
(07.05.2018)