

TAM FAKTÖRİYEL TASARIMIN MGS İLE KÖMÜR ZENGİNLEŞTİRMEYE UYGULANMASI

Semih OLUKLULU^{1*}, Sabiha KOCA²

^{1*}Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Batı Meşelik Yerleşkesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

e-posta : soluklulu@ogu.edu.tr , ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-5338-8251>

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Batı Meşelik Yerleşkesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

e-posta : skoca@ogu.edu.tr , ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-9115-095>

DOI : <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.426696>

Makale Geliş : 24.05.2018
Makale Kabul : 09.10.2018
Araştırma Makalesi

Article Received : 24.05.2018
Article Accepted: 09.10.2018
Research Article

Tam Faktöriyel Tasarımın MGS ile Kömür Zenginleştirmeye Uygulanması

Application of Full Factorial Design to Coal Cleaning by MGS

Öz

Çalışmada düşük ranklı, yüksek kül ve kükürt içerikli Çayırhan Bölgesi linyitlerinin fiziksel yöntemlerden biri olan MGS ile zenginleştirilebilirliği araştırılmıştır. Kullanılan MGS'nin tambur hızı, frekans ve genlik parametrelerinin elde edilen temiz kömürün külü ve yanabilir verimi üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen deneyler tam faktöriyel deney tasarımı ile planlanmış ve deneylerin sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sonucunda, yaklaşık %75 kül içerikli kömüründen, külde yaklaşık %30 oranında azalma ile %52,81 küllü konsantre, %61,65 yanabilir verim ile elde edilmiştir.

Sonuçların istatistiksel analizi ile kül için yaklaşık 0,79, yanabilir verim için 0,98 R² değerleri ile kabul edilebilir modeller elde edilmiştir. Ayrıca hem kül, hem yanabilir verim için tambur hızının, cihazın ayırma etkinliğine en çok katkı sağlayan parametre olduğu görülmüştür. Ancak genliğin, çalışılan seviyelerde ve %95 güven aralığında etkisinin istatistiksel olarak anlamsız olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Multi Gravite Seperatörü, kömür temizleme, faktöriyel dizayn.

Abstract

In this study, physical cleaning of Çayırhan region's low-quality, high ash and sulphur content lignites was investigated. Cleaning of coal was done with MGS and the effects of drum speed, shake frequency and shake amplitude parameters on ash and combustible recovery of obtained clean coal was examined. Experiments carried out in this study was performed with using full factorial design and results were evaluated using statistical methods.

At optimum conditions %52,81 ash content was obtained with %61,65 combustible recovery from about %75 ash contented feed.

With statistical analysis, mathematical models were obtained for both ash and combustible recovery in a good agreement with experimental values. (R² values of 0,79 and 0,98 for ash content and combustible recovery respectively) In addition, for both ash content and combustible recovery, drum speed is the parameter that contributes most to the separation efficiency of the device. However, studied levels of shake amplitude was statistically insignificant at the 95% confidence interval.

Keywords : Multi Gravity Separator, coal cleaning, factorial design

1. Giriş

Ülkemiz, diğer fosil yakıtlardan farklı olarak, zengin linyit kaynaklarına sahiptir. Ancak linyitlerimizin düşük

ısı değerinde, yüksek kül ve kükürt içerikli olması, bu kaynakları değerlendirirken, kül ve kükürt içeriklerinin kabul edilebilir seviyelere indirilmesini zorunlu kılmaktadır (TMMOB MMO, 2015; TKİ, 2016). Bu da

kömürün yakma öncesi süreçlerde, fiziksel, kimyasal ve fiziko-kimyasal yöntemlerle temizlenmesi ile mümkün olmaktadır.

Fiziksel yöntemlerden olan gravite ayırması, düşük uygulama maliyetleri ve uygulanabilirliğinin kolay olması gibi sebeplerle özellikle iri kömürlerin temizlenmesinde dünyada uzun yıllardır uygulanmaktadır. Ancak kömür içinde dağılım halinde bulunan başta piritik kükürt ve inorganik safsızlıkların giderilmesi için süreçlerin daha ince tane boyutlarında gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Öz Aksoy vd., 2012; Aksoy vd.,2014; Koca vd., 2017).

Özellikle ince taneli metalik cevherlerin yoğunluk farkı esasına göre zenginleştirilmesi amacıyla, Richard Mozley tarafından geliştirilen Multi Gravite Ayırıcısı (MGS), tipik bir sallantılı masanın dönen bir tambura uygulanması olarak tanımlanmaktadır (Chan vd., 1991, Ozdag vd., 1993; Chan vd., 1994; Özbayoğlu vd., 2000; Roy., 2009; Veglio ve Belardi, 2000). MGS'nin kömür temizlemedeki etkinliğine yönelik araştırmalar ise görece daha yenidir (Luthrell vd., 1995; Aslan, 2007; Çiçek vd., 2008; Öz Aksoy vd., 2012; Chaurasia ve Nikkam, 2017).

MGS cihazının ayırma etkinliği tambur hızı, genlik, frekans, tambur eğim açısı, yıkama suyu miktarı, malzemenin tambura beslenme hızı, beslemenin yüzde katı oranı gibi birçok işlem parametresinin bir bütünlük içinde ayarlanabilmesine bağlıdır ve uygun parametrelerin seçimi çok sayıda test gerektirmektedir (Aslan, 2007; Oz Aksoy vd., 2012).

Az sayıda test ile mümkün olan en fazla veriyi elde etmek ve çıktılar arasındaki karmaşık ilişkileri anlaşılabilir kılmak, süreçleri optimize etmek amacıyla istatistiksel deney tasarımı yöntemleri uzun yıllardır birçok farklı disiplinde uygulanmaktadır. Farklı amaçlara yönelik olarak tercih edilen deney tasarımı yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan biri olan faktöriyel tasarım, parametrelerin ana etkilerine ilave olarak birleşik etkilerini de araştırmak amacıyla özellikle mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Acıtaş ve Şenoğlu, 2010).

Bu çalışmada da MGS'nin işlem parametrelerinden olan tambur hızı, genlik ve frekansın yüksek kül içerikli linyitlerin temizleme performansına etkileri ve bu parametrelerin iç etkileşimleri faktöriyel tasarımdan yararlanılarak irdelenmektedir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.2. Malzeme

Deneylerde kullanılan numuneler Ankara'nın Nallıhan ilçesine bağlı Çayırhan'da faaliyetlerini sürdüren Park Teknik A.Ş.'den temin edilmiştir. İşletmece üretilen

kömürün tamamı, aynı şirkete ait Çayırhan Termik Santralinde elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

İşletmeden alınan tüvenan kömür havada kuru hale getirilerek çıkış açıklığı 10 mm olan çeneli kırıcıda kırılmış, farklı yöntemlerle değerlendirilmek üzere, 5 farklı tane boyut fraksiyonuna ayrılmıştır. Tüvenan kömür %66,71 kül ve %3,98 kükürt içermektedir. Çalışmada, tüvenan malzemenin ağırlıkça %5,11'ini oluşturan -0,300+0,106 mm tane boyut aralığındaki örnek kullanılmıştır. Kullanılan örneğe ait veriler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Çalışılan linyitin özellikleri

Kül (%)	74,87
Toplam Kükürt (%)	3,15
Net Isıl Değer (kcal)	1085

2.3. Yöntem

2.3.1. MGS

Deneyler seçilen katı oranında hazırlanan ve mekanik karıştırıcıyla karıştırılan pülpün peristaltik pompa yardımıyla laboratuvar ölçekli Mozley C900 cihazına beslenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada frekans, genlik, ve tambur hızı parametrelerinin etkisi incelenirken, diğer parametreler sabit tutulmuştur. Çalışma parametrelerinin tümü aşağıda verilmektedir.

Frekans	:	4,5 – 5 cps
Genlik	:	10 – 15 mm
Tambur hızı	:	225 – 245 d/d
Tambur eğim açısı	:	0°
Yıkama suyu	:	1 l/dk
Besleme hızı	:	3 l/dk
Besleme katı oranı	:	% 20

Parametre seviyelerinin seçiminde daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Öz Aksoy ve arkadaşlarının 2012 yılında yaptıkları çalışmada frekans ve tambur hızındaki artışın külü azaltırken, genlikteki artışın tersi bir etki yaptığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu sebeple, cihaz üzerinde 4, 4,5, 5 olmak üzere üç ayarla sınırlı olan frekansın üst iki değeri, yine 10, 15, 20 mm ile sınırlı olan genliğin ise alt iki değeri seçilmiştir. Cihazın ölçülen maksimum tambur hızı 245 d/d'dir. Yapılan ön çalışmalarda 225 d/d'den düşük dönüş hızlarında temizleme gerçekleşmemiştir. Bu nedenle tambur hızı 225 ve 245 d/d olarak seçilmiştir.

2.3.2. İstatistiksel Yöntem

Deneyler, parametreler arasındaki ilişkileri de ortaya koymak amacıyla iki seviyeli tam faktöriyel dizayn şeklinde planlanmıştır.

Etkisi incelenen 3 faktörün 2 seviyesi için deney sayısı $2^3=8$ olarak hesaplanmaktadır. Parametreler ve seviyeleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Faktöriyel tasarım için seçilen parametreler ve seviyeleri

Parametre	Gösterim	Kodlanmış Seviyeler	
		Düşük (-1)	Yüksek (1)
Frekans (cps)	A	4,5	5
Genlik (mm)	B	10	15
Tambur Hızı (d/d)	C	225	245

Faktöriyel tasarımın yanıt değişkenleri kül ve yanabilir verimdir. Deneyler sonucunda elde edilen konsantre ve artık ürünler susuzlandırıldıktan sonra, etüvde kurutulmuş ve tartılarak, ASTM D3174-12 standartlarına uygun olarak kül analizleri yapılmıştır ve Eşitlik (1)'e göre yanabilir verim değerleri hesaplanmıştır.

$$Y. Verim (\%) = \frac{m_K x (100 - K_B)}{100 - K_B} \quad (1)$$

Bu eşitlikte K_B ve K_K sırasıyla besleme ve konsantrenin kül içeriklerini, m_K ise konsantrenin beslemeye göre ağırlıkça yüzdesini simgelemektedir.

Elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde Design Expert 7.0 Trial versiyonu kullanılmıştır. Sonuçlar, kül ve yanabilir verim değerleri için ayrı ayrı varyans analizine (ANOVA) tabi tutulmuştur. Terimlerin anlamlılığı %95 güven aralığında incelenmiş ve p değeri 0.05'dan küçük olan terimler seçilerek, kül ve yanabilir verim için modeller oluşturulmuştur. Modeller oluşturulurken matematiksel hiyerarşi korunmuştur. İstatistiksel olarak anlamsız olan terimler modele dahil edilmemiştir.

3. Bulgular

Deneyler sonucunda elde edilen kül ve yanabilir verim değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Aşağıda her bir yanıt değişkeni için sonuçların istatistiksel analizleri ve elde edilen modeller ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

Tablo 3. Parametrelere göre deney sonuçları

Test No	Kodlanmış Parametreler			Yanıtlar	
	A Frekans(cps)	B Genlik(mm)	C Tambur Hızı (d/d)	Y ₁ Kül(%)	Y ₂ Y. Verim(%)
1	-1	-1	-1	69,22	96,78
2	-1	-1	1	62,02	80,93
3	-1	1	-1	70,82	98,11
4	-1	1	1	63,50	84,93
5	1	-1	-1	62,48	83,66
6	1	-1	1	61,16	61,84
7	1	1	-1	66,70	89,82
8	1	1	1	52,81	61,65

3.2. Kül Analizleri

Kül değerlerine ait ANOVA tablosu aşağıda gösterilmektedir (Tablo 4).

Varyans analizi sonucunda elde edilen kül modelinde p değeri 0,0203 ile kabul edilen 0,05'ten küçüktür. Bu da oluşturulan model ile terimler ve yanıt değişkeni arasında istatistiksel açıdan kabul edilebilir bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Küle ait R^2 değerinin 0,7894 olması, model ile hesaplanan değerlerin deneysel değerler ile uyumlu

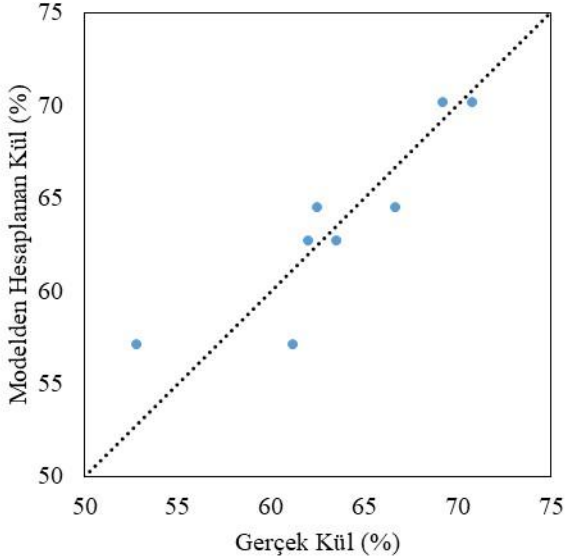
olduğunu göstermektedir. Elde edilen matematiksel modeller kodlanmış ve gerçek değerlere göre sırasıyla Eşitlik (2)-(3)'de verilmiştir. Şekil 1'de ise elde edilen model ile hesaplanan kül değerleri ve deneysel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir.

$$Y_1 (\%) = 63,58875 - 2,80125 x A - 3,71625 x C \quad (2)$$

$$Kül (\%) = 204,1444 - 11,205 x Frekans - 0,37163 x Hız \quad (3)$$

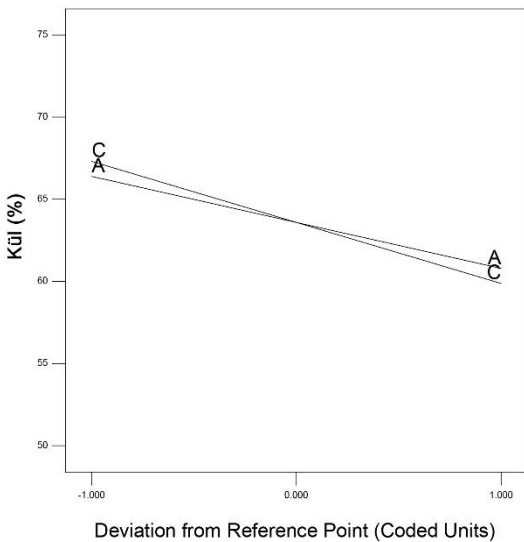
Tablo 4. Kül değerlerine ait ANOVA tablosu

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Anlamlı Kareler	F Değeri	P Değeri	
Model	2	173,2601	86,63006	9,375515	0,0203	
A-Frekans	1	62,77601	62,77601	6,793917	0,0479	
C-Hız	1	110,4841	110,4841	11,95711	0,0181	
Artık	5	46,20016	9,240033			
Total	7	219,4603				
R ² = 0,7894		Düzeltilmiş R ² = 0,7053				



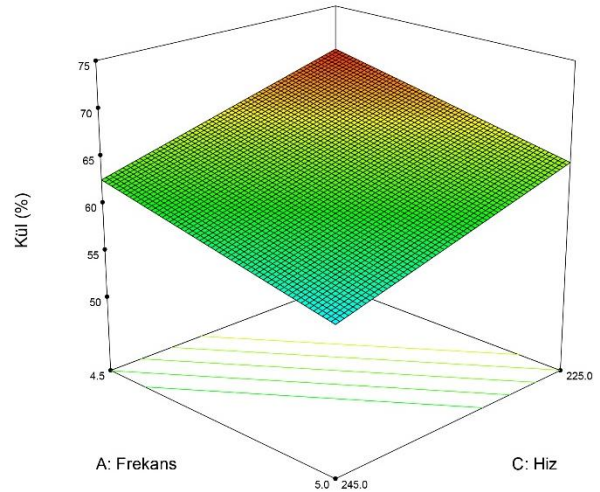
Şekil 1. Kül değerlerinin hesaplanan ve gerçek değerler karşılaştırması

Yapılan varyans analizinde, A ve C terimlerinin p değerlerinin 0,05'ten küçük olduğu, B teriminin ise 0,05'ten büyük p değeri verdiği görülmüştür. Ayrıca modele, C teriminin A teriminden daha fazla etki ettiği söylenebilir. Şekil 2'de faktörlerin kül üzerindeki ana etkilerini gösteren grafik yer almaktadır. Şekilden görüleceği üzere frekans (A) ve tambur hızının (C) artması külü azaltmıştır.



Şekil 2. Faktörlerin kül ana etkileri

Şekil 3'te, kül üzerinde frekans (A) ve tambur hızının (C) etki grafiği üç boyutlu cevap yüzeyi olarak verilmiştir.



Şekil 3. Frekans (A) ve tambur hızının (C) kül üzerinde etkisi

3.3. Yanabilir Verim Sonuçları

Yanabilir verim için ANOVA tablosu aşağıdaki gibidir (Tablo 5).

Yanabilir verim için, 0,0008'lik p değeri ile istatistiksel olarak kabul edilebilir bir model elde edilmiştir. Küle benzer olarak burada da etkisi anlamlı terimler A ve C olmakla beraber, verim için AC bileşik etkisi de anlamlıdır. Yine B teriminin etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir.

Modelin R²'si 0,9797'dir ve model ile tahmin edilen değerler ve gerçek değerler arasında kuvvetli bir uyumluluktan bahsetmek mümkündür. Eşitlik (4) ve (5)'te oluşturulan modeller sırasıyla kodlanmış ve gerçek değerler için verilmektedir. Şekil 4'te bu modeller ile elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların uyumu grafiksel olarak verilmiştir.

$$Y_2 (\%) = 82,21523 - 7,97087 \times A - 9,8779 \times C - 2,62106 \times A \times C \quad (4)$$

$$Y. Verim (\%) = -704,509 + 214,4957 \times Frekans + 3,992215 \times Hız - 1,04842 \times Frekans \times Hız \quad (5)$$

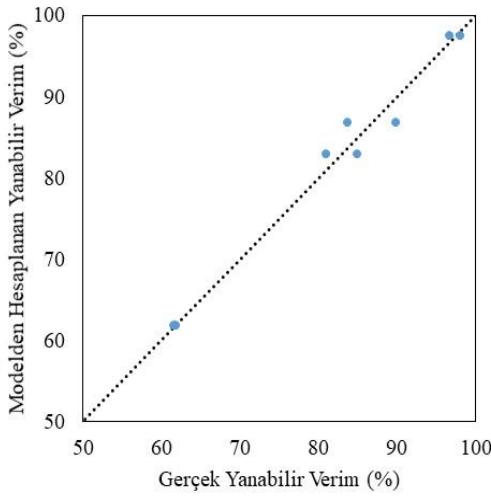
ANOVA tablosuna göre terimlerin etki sırası kül ile benzerlik göstermektedir. Büyükten küçüğe doğru

yanabilir verimi en çok etkileyen parametreler C, A ve AC'dir.

Tablo 5. Yanabilir verim değerlerine ait ANOVA tablosu

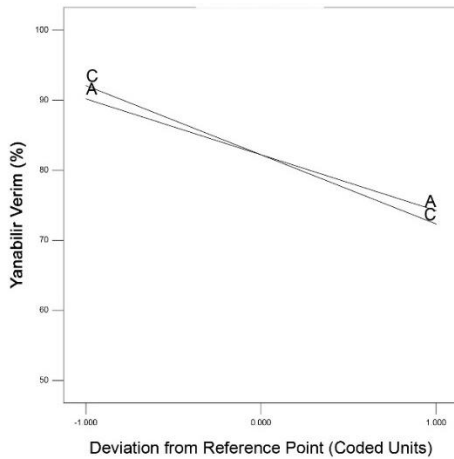
Varyasyon	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Anlamlı Kareler	F Değeri	p Değeri
Model	3	1343,8217	447,9406	64,3172	0,0008
A-Frekans	1	508,2782	508,2782	72,9807	0,0010
C-Hiz	1	780,5840	780,5840	112,0795	0,0005
AC	1	54,9595	54,9595	7,8913	0,0484
Residual	4	27,8582	6,9646		
Cor Total	7	1371,6799			

R² = 0,9797 Düzeltilmiş R² = 0,9646



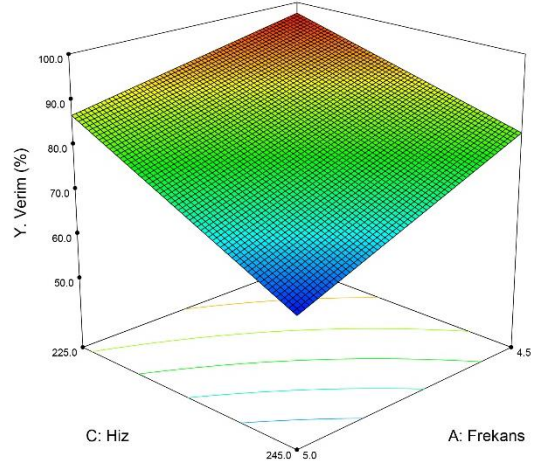
Şekil 4. Yanabilir verim değerlerinin hesaplanan ve gerçek değerler karşılaştırması

Şekil 5.'te faktörlerin yanabilir verim üzerindeki ana etkilerini gösteren grafikten görüleceği üzere frekans (A) ve tambur hızındaki (C) artış yanabilir verimde kayba neden olmaktadır.



Şekil 5. Faktörlerin yanabilir verime ana etkileri

Şekil 6'da ise model üzerinde etkili olan frekans (A) ve tambur hızının (C) yüzey cevap grafiği yer almaktadır. Üç boyutlu yanıt yüzeyi incelendiğinde; frekanstaki artışın, her iki hız seviyesinde de yanabilir verim üzerinde azalmaya yol açtığı görülmektedir. Ancak, düşük hız seviyesinde frekansı artırmak yanabilir verimde hafif bir düşüşe yol açarken, yüksek tambur hızında frekansı artırmak yanabilir verimde önemli bir azalmaya neden olmuştur. Bu eğilim farkı, bahsedilen iki terim arasındaki etkileşimi göstermektedir.



Şekil 6. Frekans ve tambur hızının yüzey cevap grafiği

4. Sonuçlar

Çayırhan bölgesi linyitleriyle yapılan çalışmada yaklaşık %75 kül içerikli linyitin temizlenebilirliğine, MGS parametrelerinden frekans, genlik ve tambur hızının etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş, kül ve yanabilir verim için parametrelere bağlı matematiksel modeller oluşturulmuştur.

Deneysel sonuçlarda üç parametrenin en yüksek

seviyesinde olduğu koşulda, külde yaklaşık %30 azalma ile %52,81 küllü ürün, %61,65 verimle elde edilmiştir.

Deneylerin planlanmasında faktöriyel tasarım kullanılmış ve sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilerek kül için 0,79 ve yanabilir verim için 0,98 R²'ye sahip, yüksek temsil kabiliyeti olan modeller elde edilmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda cihazın ayırma performansına en çok katkı sağlayan parametrenin tambur hızı olduğu görülmüştür. Genliğin her iki yanıt değişkeni için istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi yoktur.

Yanabilir verim sonuçlarında AC teriminin etkisinin anlamlı çıkması, bu tür çalışmalarda parametre etkilerinin yanında bu parametrelerin kendi aralarındaki etkileşimlerin de, sürecin iyi tanımlanması için önemli olduğunu göstermektedir.

Kaynaklar

Acıtaş, Ş. ve Şenoğlu B., *İstatistiksel deney tasarımı: sabit etkili modeller*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2010.

Aksoy, D. O., Aytar, P., Toptaş, Y., Çabuk, A., Koca, S., ve Koca, H. (2014). Physical and physicochemical cleaning of lignite and the effect of cleaning on biodesulfurization. *Fuel*, 132, 158-164.

Aslan, N. (2007). Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a Multi-Gravity separator for coal cleaning. *Fuel*, 86, 769-776.

Chan, B.S.K., Mozley, R. ve Childs G.J.C. (1991). Extended trials with the high tonnage multi gravity separator, *Minerals Engineering*, 4, 489-496

Chan B.S.K., Mozley, R., ve Childs, J.C. (1994). Multi gravite ayırıcı, (Çev. E. Yüce), *Madencilik*, 33(1), 33-41.

Chaurasia, R. C., Nikkam, S. (2017). Optimization Studies on a Multi-Gravity Separator Treating Ultrafine Coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 37(4), 195-212.

Çiçek. T., Cöcen, İ., Engin V.T. ve Cengizler, H. (2008). An efficient process for recovery of fine coal from tailings of coal washing plants, *Energy Sources*, 30, 1716-1728.

Koca, S., Aksoy, D. O., Cabuk, A., Celik, P. A., Sagol, E., Toptaş, Y., Oluklulu S., Koca, H. (2017). Evaluation of combined lignite cleaning processes, flotation and microbial treatment, and its modelling by Box Behnken methodology. *Fuel*, 192, 178-186.

Luthrell, G.H., Honaker R.Q. ve Philips D.I. Enhanced gravity separators: new alternatives for fine coal

cleaning, *Proceedings of the 12th International Coal Preperation Conference*, Lexington, 1995

Ozdog, H., Ucbas, Y. ve Koca, S. (1993). Enrichment of chromite ore by means of multi-gravity separator, *Geosound*, 23, 167-176.

Oz Aksoy, D., Koca, S. ve Koca, H., 2012, The effects of drum speed, shake frequency and shake amplitude combinations on cleaning of lignite fines by multi gravity separator, *Proceedings of the XIII. International Mineral Processing Symposium*, Bodrum, 2012

Özbayoğlu, G., ve Atalay, M. Ü. (2000). Beneficiation of bastnaesite by a multi-gravity separator. *Journal of alloys and compounds*, 303, 520-523.

Roy, S. (2009) Recovery improvement of fine iron ore particles by multi gravity seperation, *The Open Mineral Processing Journal*, 2, 17-30.

TMMOB MMO, Enerji ve Kömür Raporu, 2015.

TKİ, 2015 Kömür (Linyit) Sektör Raporu, 2016.

Veglio, F. ve Belardi, G. (2000) Multivariate analysis supporting factorial experiments: a case study in the physical separation of chromite fines by a multigravity separator, *Seperation Science and Technology*, 35(1), 109-132.