

## İNCE TANE BOYUTLU KÖMÜR NUMUNESİNİN MANYETİK AYIRICI İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Öykü BİLGİN\* 

Alınma: 01.02.2019 ; düzeltme: 09.10.2019 ; kabul: 14.10.2019

**Öz:** İnce tane boyutlu kömürlerin yıkanması ve zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de manyetik ayırıcılarla yapılan manyetik zenginleştirme yöntemidir. Manyetik ayırıcılar genel olarak yaş ve kuru manyetik ayırıcılar şeklinde gruplandırılmaktadır. Kömür uygulamalarında çok yaygın kullanılmasına da, ince taneli kömürün yapısında bulunan piritin ( $FeS_2$ ) uzaklaştırılması veya kömür yıkama tesislerinde ağır ortam sıvısı olarak kullanılan manyetitin uzaklaştırılması için manyetik ayırma yöntemi uygulanmaktadır. Bu çalışmada; deneylerde kullanılan kömür numunesi Erzurum'un Balkaya köyünde faaliyet gösteren kömür ocağından alınmıştır. Alınan kömür numunesinin kimyasal analizlere göre kül oranı %20,38 ile kükürt oranı %3,48 ve kalori değeri alt ısıl değeri 5342kcal'dir. Kömür numunesinin kimyasal analiz ve elek analiz değerleri tespit edildikten sonra, laboratuvar ölçeğinde yüksek alan şiddetli Yaş Manyetik Separatör(HGMS)\* de 9000 Gause, 14000 Gause ve 19000 Gause manyetik alan şiddetinde zenginleştirmeye tabi tutulmuş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Deney sonuçları birbirleri arasında karşılaştırıldığında en iyi zenginleştirmenin 19000 Gause alan şiddetinde %17,48 kül oranı ile elde edildiği belirlenmiştir. Ancak zenginleştirme açısından değerlendirildiği zaman Erzurum/Balkaya kömüründen piritik ( $FeS_2$ ) kükürt içeriğinin azaltılması ekonomik görülmemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kömür, Manyetik ayırma, Zenginleştirme, Manyetik ayırıcı

### Enrichment of the Fine Grained Coal Sample by Magnetic Separator

**Abstract:** One of the methods used for the enrichment of fine size coal is the magnetic enrichment method with magnetic separators. The magnetic separators can generally be grouped into wet and dry magnetic separators. Although this method is not widely used in coal applications, it is applied to remove the pyrite ( $FeS_2$ ) in the structure of fine-grained coal or to remove the magnetite used as heavy medium fluid in coal washing plants. In this study; The coal sample used in the experiments was taken from the coal mine in Balkaya village of Erzurum. According to the chemical analysis, the ash content of the coal sample taken is 20.38%, the sulfur content is 3.48% and the calorific value is lower heat value is 5342kcal. After the chemical analysis and sieve analysis values of the coal sample were determined, they were subjected to enrichment at 9000 Gause, 14000 Gause and 19000 Gause magnetic field strength with high field strength Wet Magnetic Separator (HGMS) on the laboratory scale and the results were interpreted. When the experimental results were compared between each other, it was found that the best enrichment was obtained with ash ratio of 17.48% at 19000 Gause field strength. However, when evaluated in terms of enrichment, the reduction of pyridic ( $FeS_2$ ) sulfur content from Erzurum / Balkaya coal is not considered economic.

**Keywords:** Coal, Magnetic separation, Enrichment, Magnetic separator

\*Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 73000, Şırnak  
İletişim Yazarı: Öykü BİLGİN, ykibilgin@yahoo.com

## 1. GİRİŞ

Kömür; maden ocağından çıkarıldıktan sonra içerisinde istenmeyen safsızlıklar (yan kayaç, demir, tahta vb.) içermektedir. Kömürün kalitesini arttırmak için, içerisindeki istenmeyen parçacıkların uzaklaştırılması ve kül değerinin azaltılması gerekmektedir. Bunun için uygulanan zenginleştirme veya yıkama yöntemleri olarak yaş ve kuru ortamda uygulanan ayırıcılar kullanılmaktadır.

Havali jigler ve masalar, elle ayıklama(triyaj), akışkan yataklı sistemler, FGX kuru ayırıcılar uygulanan yöntemler arasındadır. Ayrıca manyetik ayırma, elektrostatik ayırma ve optik ayırma uygulamaları da mevcuttur (Kademli ve Gülsoy, 2011).

İnce tane boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemler; 3 grupta sınıflandırılmaktadır. Bunlar; aerodinamik sınıflandırıcılar ile ayırma, manyetik ayırıcılar ile ayırma, elektrostatik ve elektrodinamik ayırıcılar ve ile ayırma' dır (Güldan, 2010). Aerodinamik sınıflandırıcılar, boyutlandırılmış besleme malzemesinin özgül ağırlığından faydalanılarak, bir rüzgâr tüneline zenginleştirilmesi esasına göre çalışan cihazlardır. Elektrostatik ve elektrodinamik Ayırıcılar; kömür ve yantaş arasındaki elektriksel özellik farklılıklarına göre ayırma yapmaktadır. Elektrodinamik ayırıcılar için kömür numunelerinde uygun tane boyutu -2 mm altı, elektrostatik ayırıcılar için ise kömür numunelerinde -0.25 mm boyutun altında uygun ayırma yapılmaktadır (Arslan, 2006).

Manyetik Ayırıcılar; ise kömür ve yantaş arasındaki manyetik duyarlılık farklılıklarından faydalanılarak ayırma yapmaktadır. Birçok kaynağa göre; manyetik ayırma yöntemi ile kömürdeki kül oranının azaltılması üzerine iki yöntem uygulanmaktadır. Birinci yöntemde besleme malı; ön işlemlerden geçirildikten sonra direkt manyetik ayırmaya tabi tutulmaktadır. İkinci yöntemde ise kömüre, ısı işlem uygulandıktan (karbonizasyon), veya mikrodalga ile mineral maddenin etkileşimi sağlandıktan sonra manyetik ayırma yapılmaktadır. Bu yöntemlerde ince tane boyutundaki kömür yüksek bir manyetik alana tabi tutularak mineral maddelerin bir kısmı manyetik alana çekilmek suretiyle kömürden ayrılmaktadır.

Manyetik ayırma, minerallerin manyetik duyarlılığı esasına göre yapılan bir zenginleştirme yöntemidir. Mineraller; manyetik ayırıcılarla zenginleştirilebilirse paramanyetik ve zenginleştirilemez ise diyamanyetik mineraller olarak adlandırılabilirler. Çok kuvvetli manyetik özellikler gösteren paramanyetik mineraller ferromanyetik olarak adlandırılmaktadırlar (<http://www.marbleport.com/madencilik-kulturu/331/cevher-zenginlestirme-yontemleri>).

Organik bileşikler; genelde diyamanyetik özellik gösterir. Kömürün organik içeriği diyamanyetik özellik gösterirken, inorganik içeriği de paramanyetik ve ferromanyetik özellik göstermektedir. Ayrıca kömür içerisindeki minerallerin birçoğunun paramanyetik olduğu belirlenmektedir. Yani kömürün bütün manyetik duyarlılığı ise paramanyetik, diyamanyetik ve ferromanyetik karışımından oluşmaktadır (Çiçek ve diğ., 1996; Seferinoğlu ve Köker, 2003).

Kömür yapısında yer alan minerallerin manyetik duyarlılıklarının, kömürün organik içeriğindeki manyetik duyarlılıktan farklı olması sebebiyle, kömür temizleme/yıkama proseslerinde de manyetik ayırma yöntemlerinin kullanılabilir olmasına imkan sağlamaktadır (Lua ve Boucher, 1990; Kural, 1991; Seferinoğlu ve Köker, 2003).

Oder ve diğ., (2002)' de yapmış olduğu çalışmada; Magmill prosesini (öğütücü ve kuru manyetik ayırıcıdan oluşan bir sistem) pirit ve bazı mineral maddelerin kömürden ayrılması üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde; çekiçli değirmen(hava taşımalı) ve manyetik ayırıcı kullanılarak zenginleştirme yapılmıştır.

Manyetik ayırıcıların yaş ortamda daha başarılı şekilde kömürdeki piriti ayrılabilmesini fakat, kuru ortamda ayırmanın zor olduğunu bazı kaynaklarda belirtilmektedir (Oder ve diğ., 2000; Oder, 2002; Güldan, 2010; Liu ve Lin, 1976; Maxwell ve Kelland, 1978; Kelland, 1982; Arslan, 2006).

Bazı araştırmalara göre; kömür içerisinde yer alan piritin( $FeS_2$ ) manyetik özellikleri, manyetik ayırma yöntemi kullanılması, kömürün mikrodalgada ısıtılması ve nem içeriğinin

arttırılması ile kalorifik enerjisi yükselmekte ve kömür kalitesini arttırmaktadır(Hise ve diğ., 1981; Zhang ve diğ., 2017; Zhang ve diğ., 2018).

Geliştirilmiş manyetik ayırma ekipmanlarının/sistemlerinin kurulumları sayesinde, kömür ayırma işlemleri daha verimli bir şekilde sağlanmaktadır(Dudenhoefer, 2010). Yapılan bazı araştırmalara göre; yüksek alan şiddetli manyetik ayırma yönteminde, serbest haldeki pirit ve diğer demirli minerallerin uzaklaştırılmasında etkin bir yöntem olup, ancak kuvars ve kil gibi diğer minerallerin ayrılmasında yöntem etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, bu yöntem ile kömür içerisinde yer alan piridik kükürdün büyük bir kısmının ayrılabilmesi öne sürülmektedir (Seferinoğlu ve Köker, 2003). Yani, ince tane boyutlu kömürlerde yüksek alan şiddetli manyetik ayırma teknolojisi kullanılarak yapısındaki fiziksel kükürt oranı giderilmektedir (Gerber ve Birss, 1983; Hise ve diğ., 1981; Zhang, Yan ve diğ., 2017). İnce taneli kömürlerin(0,5 mm' den küçük) yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıda hem kül giderilmesi hem de kükürt giderilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Repkova ve diğ., 2016; Zang, Zhu, ve diğ., 2018). Bazı çalışmalarda kömürün içeriğinde yer alan demir sülfür( $FeS_2$ ) yapısı ısı işlemler uygulanarak manyetik hassasiyeti arttırılmakta ve manyetik ayırma ile ayrılabilir (Liu ve Lin, 1976; De Jong ve diğ., 2003; Kademli ve diğ., 2010; Arslan, 2006). İnce taneli kömürlerin temizlenmesi için yüksek alanlı bir manyetik ayırıcının etkili bir yol olduğu belirtilmektedir(Zang, Zhu ve diğ., 2018).

Özbayoğlu (1986) tarafından yapılan bir araştırmada, Aşkale-Erzurum kömüründe yapılan bir deneyde, piridik kükürt uzaklaştırılması için yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı kullanılmış ve 0.3 mm'nin altında öğütülmüş kömürün piridik kükürdünün % 78 'inin uzaklaştırılabildiği ve piridik kükürdün uzaklaştırılmasında, flotasyona oranla daha etkili olduğu ileri sürülmüştür (Seferinoğlu ve Köker, 2003).

Çan kömürü(-1500+1000 mikron) ve Manisa kömürü (-1000+500 mikron) üzerine yapılan manyetik ayırma yöntemine göre; Manisa kömürü için bulunan sonuçlardan, manyetik ayırma yöntemi ile Manisa kömürünün içerdiği minerallerin bir kısmının ve kül içeriğinin azaltılabileceği, kalorisinin artırılabilmesi belirtilmektedir. Çan kömürünün de piridik kükürt ve kül içeriğinin azaltılabileceği ve kömürün kalorisinin artırılabilmesi tespit edilmiştir. Ancak, her iki kömür için elde edilen sonuçların, kömürün içerdiği pirit gibi minerallerin tamamen uzaklaştırılmasında çok etkin ve ekonomik bir yöntem olmadığı sonucuna varılmaktadır (Seferinoğlu ve Köker, 2003).

Genellikle ince tanelerde cevher zenginleştirme amaçlı; yüksek alan şiddetli yaş manyetik tambur separatörler/ayırıcılar tercih edilmektedir. Bu sistemde; malzeme besleyici haznesi üzerinden tambur ayırıcıya beslenmektedir, manyetik duyarlılığı olan malzeme tamburun manyetik alan kuvvetinden etkilenerek tambur yüzeyine tutunur ve tamburun dönüş yönünde manyetik kutuplanma oluşturularak, manyetik mineraller sistem üzerinden ayrılmaktadır. Manyetik olmayan malzemeler de, tambur tarafından yakalanmadığı için çıkış bölümünden ayırıcının atık kısmına ve oradan da dışarıya atılmaktadır. İşlem sonunda manyetik malzeme besleme malından ayrılarak ürün saflığı ve tesis üretkenliği arttırılmaktadır. Kömür maden tesislerinde ağır ortam sıvısı olarak kullanılan manyetitin tekrar geri kazanılması sırasında özellikle bu yöntem tercih edilmektedir (<https://www.manyet.com/cevher-zenginlestirme-cozumleri/>).

Örneğin; hematit, pirit, ilmenit, siderit, krom, manganez, tungsten, çinko, tantal, niyobyum, nikel, molibden ve diğer zayıf manyetik özellik gösteren cevherler olduğundan manyetik olmayan cevherler içerisindeki manyetik özellik gösteren mineraller temizlenebilmektedir. Örneğin cam kumu, apatit, kil, talk, kaolin, feldspat, kömür, barit, grafit, boksit vs. manyetik kirlilikler giderilerek kalitesi yükseltilebilmektedir. Bu manyetik parçacıklar; biyotit ve muskovit, demir lekeli parçacıklar, garnet, demir silikatlar vb. örnek verilebilir. Bununla beraber atıklardaki (altın, platin, krom, manganez vb. temizlenmesi için farklı ek işlemler uygulanabilir. Manyetik Ayırma İşlemi 3 adımda gerçekleştirilmektedir. Bunlar;

1. Yivli plakalar ve düz içinden geçen manyetik olmayan parçacıklar tarafından manyetik alandaki manyetik parçacıkların çekimi.

2. Bir orta halli ürün üretmek üzere sürüklenen herhangi bir manyetik olmayan parçacığı uzaklaştırmak için manyetik kısmın yıkanması.

3. Manyetik ürünün elde edilmesi için nötr bölgedeki manyetik kısmın temizlenmesi.

Manyetik Ayırıcılarda iyi bir manyetik ayırma için gerekli olan faktörler;

• Serbestleşme: Temiz ve yüksek bir ayırma için iyi bir serbestleşme gerekli olmaktadır.  
• Dispersiyon: Topaklanmayı önlemek için özellikle ince tane boyutlarında beslenmesi için bir dağıtma aparatı eklenebilmektedir.

• Besleme pulp yoğunluğu: Besleme malı yoğunluğunun ayırıcının kapasitesi üzerinde doğrudan bir etkisi bulunmaktadır.

• Verim: Gerekli verimin sağlanması, ekipmanın büyüklüğü ile ilişkili olmaktadır.

• Yivli plakaların kalitesi ve boşluk boyutu: Plakaların tipi ve boşluk ayarı, besleme malzemesinin ayrılma derecesi ile belirlenir. Kalite, tasarım ve üretim hassasiyeti kullanım ömrünü ve ayırma kalitesini belirlemektedir.

• Yıkama suyu: Yıkama suyunun miktarı ve basıncı, malzemenin cinsi ve ara ürünlerin miktarı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmaktadır.

• Manyetik alan yoğunluğu: Yerel kontrol dokunmatik ekranı ile tüm ayırma talepleri için kademesiz ayarlanabilmektedir.

• Ayırma aşamaları: İsteğe bağlı olarak, tek bir makinede daha kaba / temizleyici veya kaba temizleyici kombinasyonları ile düzenlenebilmektedir.

Örneğin Jones manyetik ayırıcıları; uygulamaya bağlı olarak çok ince tane boyutlarında (<2 mm) zayıf manyetik malzemeyi manyetik olmayan malzemedan ayırabilen benzersiz tasarlanmış bir yaş yüksek yoğunluklu manyetik ayırıcılardır(WHIMS). Bu cihaz düşük enerji tüketiminde manyetik alanın (15.000 Gauss'a kadar) çok yüksek derecelerini sağlamaktadır ve böylece düşük işletme / bakım, temizleyici ve daha temiz bir evre olarak taleplerinizi karşılayan düşük işletme ve bakım maliyetlerini garanti etmektedir. Kompakt boyut ve benzersiz tasarımı ile ilgili olarak küçük binalarda bir kurulum mümkündür ve yüksek verim oranları elde edilebilmektedir (Jones&Permos, 2019).

Bu çalışmada; çalışılan kömür numunesi; Erzurum iline bağlı Şenkaya ilçesi, Balkaya/Susuzköy mevkiinde faaliyet gösteren kömür ocağından bizzat temin edilmiştir. Kömür numunesinin kimyasal analizleri tespit edildikten sonra yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı ile zenginleştirilebilirliği 9000 Gauss, 14000 Gauss ve 19000 Gauss alan şiddetlerinde araştırılmıştır. Manyetik ayırma ile zenginleştirme yöntemi; Balkaya kömür yapısının içerdiği pirit( $FeS_2$ ) gibi manyetik özellik gösteren minerallerin uzaklaştırılarak kömür kalitesinin artırılması amacı ile yapılmıştır.

## 2. MATERYAL ve YÖNTEM

Balkaya kömür ocakları; 1912 -1976 yıllarına kadar çeşitli özel sektör tarafından yeraltı yer üstü üretim yöntemleri ile işletilmiştir. Maden Tetkik Arama(MTA) tarafından 1980-1990 yılları arasında gerçekleştirilen sondaj verilerine göre; havzanın toplam rezervinin 3.5 milyon ton olduğu tespit edilmiş olsa da sondaj çalışması yapılamayan bölgelerde de kömür damarlarının olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgelerin toplam tahmini rezervinin ise 1.5 milyon ton kadar olabileceği belirtilmektedir. Türkiye Kömür İşletmeleri(TKİ) tarafından yapılan araştırmalara göre ise mevcut 5 milyon ton kömür rezervinin sadece %20 sinin üretildiği tahmin edilmektedir. Havzada halen iki ayrı kömür damarında iki maden ocağı faaliyet göstermektedir. İki ocakta günlük ortalama üretim 260-300 ton arasında değişmektedir (<http://www.oltukomur.com.tr/>). Tablo 1' de kömür numunesinin koordinat değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 1. Kömür numunesi koordinatları**

Numune	Y	X	Yükseklik
1	38T 266 562 D	45 214 8 K	1467 m
2	38T 266 341 D	45 214 9 K	1467 m
3	38T 266 128 D	45 214 1 K	1467 m
4	38T 266 259 D	45 214 3 K	1467 m
5	38T 266 397 D	45 214 7 K	1467 m

Tablo 2' de kömür numunesinin kimyasal analiz sonuçları verilmektedir. Buna göre; orijinal bazda %20,38 kül, % 6,36 nem, %3,48 toplam kükürt ve 5342 kcal alt ısıl değeri elde edilmektedir. Yapılan incelemelere göre; Balkaya kömür numunesi içerisinde ayrıca pirit, kalsit, kuvars ve amorf malzemelerin varlığı tespit edilmektedir.

**Tablo 2. Kömür numunesi kimyasal analiz sonuçları**

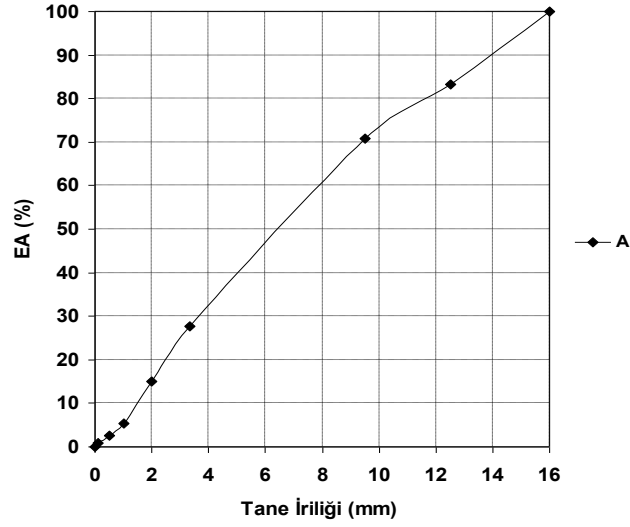
	Orijinal Baz	Havada Kuru Baz	Kuru Baz
Nem(%)	6,36	6,10	-
Kül(%)	20,38	20,45	21,36
Uçucu Madde(%)	32,56	32,64	36,06
Sabit Karbon(%)	40,7	40,81	42,58
Toplam	100,00	100,00	100,00
Toplam Kükürt(%)	3,48	3,49	3,67
Alt Isı Değeri(kcal/kg)	5342	5365	5687
Üst Isı Değeri(kcal/kg)	5709	5725	6113

Kömür numunesine ait elek analiz sonuçları Tablo 3' de ve Şekil 1' de gösterilmektedir. Buna göre, malzemenin yaklaşık % 43' ünün -9,51+3,35mm tane boyutları arasında yoğunluk gösterdiği ve yine malzemenin yaklaşık toplam %28' inin -3,35 mm altında olduğu anlaşılmaktadır. Elek altına geçen miktar -2,0+1,0mm' de ağırlığın %15,04 iken, -1 mm altında malzemenin ise %5,34'ü olduğu tespit edilmektedir.

**Tablo 3. Kömür numunesi elek analiz tablosu**

Tane Boyutu (mm)	Ağırlık (%)	Artan Elek Altı (%)	Artan Elek Üstü (%)
+12,5	16,77	100,00	16,77
-12,5+9,51	12,35	83,23	29,12
-9,51+3,35	43,20	70,88	72,31
-3,35+2	12,65	27,69	84,96
-2,0+1,0	9,70	15,04	94,66
-1+0,5	2,79	5,34	97,46
-0,5+0,106	1,68	2,54	99,13
-0,106	0,87	0,87	100,00
TOPLAM	100		

Bilgin Ö.: Kömür Numunesinin Manyetik Ayrıcı ile Zenginleştirilmesi.



**Şekil 1:**  
Kömür numunesi elek analiz grafiği

Deneysel çalışmalar; Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü cevher hazırlama ve kimya laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2' de deneylerde kullanılan laboratuvar çaplı yaş manyetik ayırıcı zenginleştirme cihazı(HGMS)' in resmi görülmektedir. Bu cihaz ince taneli manyetik mineral içeren cevherlerin zenginleştirilme testlerinde kullanılmaktadır. Yüksek alan şiddetli ve yaş ortamda çalışan cihazın besleme kapasitesi 50-250 gr, manyetik alan şiddeti 0-20000 Gauss aralığında olup, maksimum besleme malı tane boyutu 0,5 mm' dir.



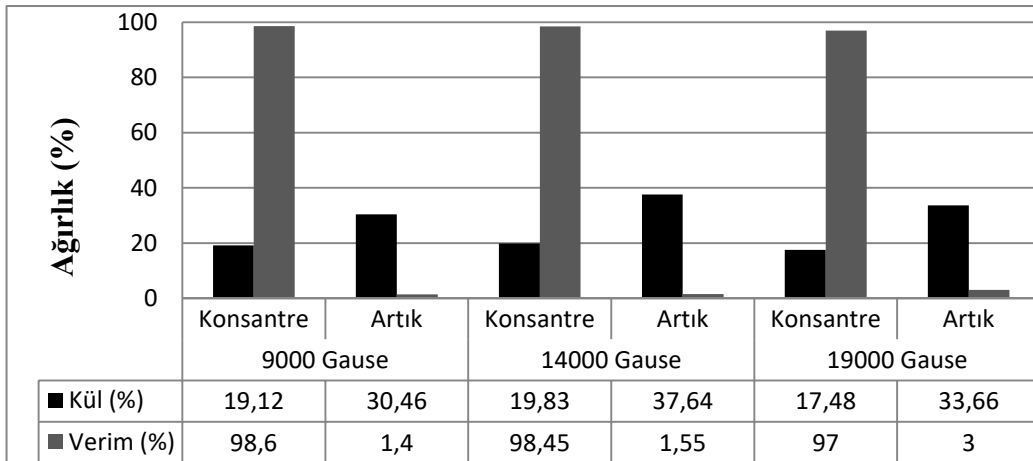
**Şekil 2:**  
Laboratuvar çaplı yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı zenginleştirme cihazı

Manyetik zenginleştirme deneyleri için deneyde kullanılan yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcının maksimum besleme tane boyutu 0,5mm olduğundan, kömür numunesi öncelikle 500 Mikron(0,5mm) ve altı olacak şekilde 3 halkalı, titreşimli değirmende öğütülmüştür. Her deney için 300 ml su ile 100 gr. kömür numunesi toplam 100 gr besleme malı olacak şekilde, doğrudan yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcıya beslenmiştir. Deneyler, 9000 Gause, 14000 Gause ve 19000 Gause manyetik alan şiddetinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deney sonuçlarından elde edilen konsantre ve artık ürünleri, kimyasal analizlerde sabit tartıma gelmesi amacı ile 105°C sabit sıcaklığa ayarlı etüvde bekletilerek kurutulmuş ve daha sonra kimya analiz laboratuvarı'nda %kül ve %S(kükürt) değerleri tespit edilmiştir.

**Tablo 4. Kömür numunesi manyetik zenginleştirme deney sonuçları**

Güçü (Gauss)	Deney Ürünü	Ağırlık (%)	Kül (%)	S(%)	İçerik (Kül)	Kül Verim(%)	Yanabilir Kül Verim(%)
9000 Gauss	Konsantre	99,10	19,12	3,44	1895	98,60	99,22
	Artık	0,90	30,46	3,86	27	1,40	0,78
	Toplam	100	19,22	3,47	1922	100	100
14000 Gauss	Konsantre	99,17	19,83	3,32	1967	98,45	99,36
	Artık	0,83	37,64	3,86	31	1,55	0,64
	Toplam	100	19,98	3,47	1998	100	100
19000 Gauss	Konsantre	98,42	17,48	3,24	1720	97	98,72
	Artık	1,58	33,66	3,86	53,18	3	1,28
	Toplam	100	17,73	3,47	1773	100	100

Tablo 4’de kömür numunesi manyetik zenginleştirme deney sonuçları verilmektedir. Buna göre; 9000 Gause alan şiddetinde; konsantrede kül değeri %19,12, kükürt değeri %3,44 ve kül verimi %98,60 olarak belirlenmektedir. 14000 Gause alan şiddetinde; konsantrede kül miktarı %19,83, kükürt miktarı %3,32 ve kül verimi %98,45 değerleri hesaplanmaktadır. 19000 Gause alan şiddetinde yapılan deneyde ise; konsantrede kül %17,48, kükürt %3,24 ve kül verimi %97 oranları ile tespit edilmektedir.

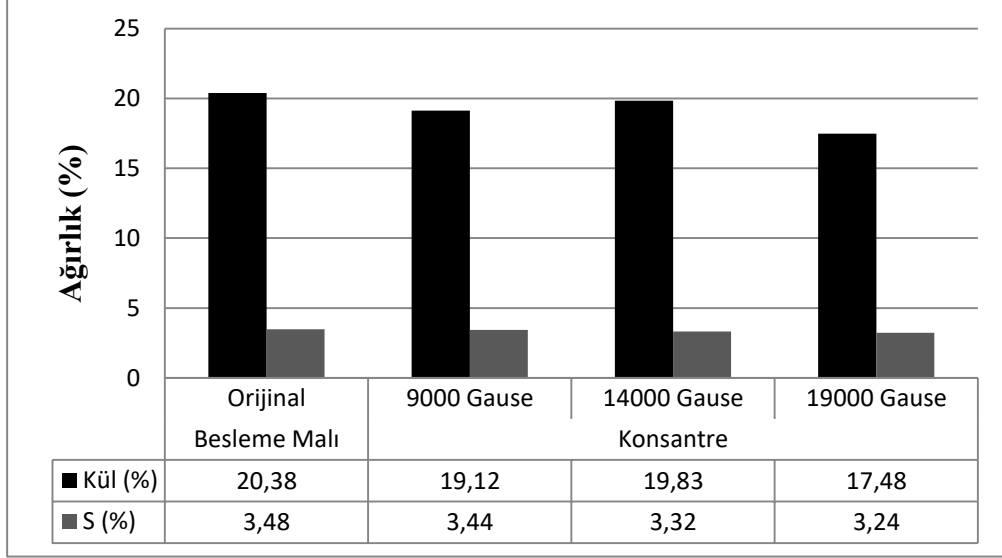


**Şekil 3:**

*Kömür numunesi manyetik zenginleştirme %kül ve %verim grafiği*

Şekil 3’ de kömür numunesi manyetik zenginleştirme kül ve verim grafiği gösterilmektedir. Buna göre tüm deney şartlarında %verim oranları %97-%98,6 arasında değişmektedir. Deneylerin kendi içerisinde değerlendirildiğinde en iyi ayırmanın %17,48 kül oranı ile 19000

Gauss manyetik alan şiddetinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Ancak bu azalma zenginleştirme açısından değerlendirildiğinde çok da kayda değer bir oran olmamaktadır.



**Şekil 4:**

*Kömür numunesi manyetik zenginleştirme %kül ve %kükürt grafiği*

Şekil 4’ de kömür numunesinin manyetik zenginleştirme kül ve kükürt grafiği gösterilmektedir. Buna göre, orijinal besleme malının kül oranı %20,38 iken zenginleştirme sonuçlarına göre 9000 Gause şiddetinde %19,12 olduğu, 14000 Gause şiddetinde %19,83 değeri ve 19000 Gause şiddetinde %17,48 değerine azaldığı görülmektedir. Bununla beraber orijinal besleme malı kükürt oranı %3,48 iken, zenginleştirme sonuçlarına göre bu değer %3,24 oranına kadar azaldığı tespit edilmektedir. Bu sonuçlara göre zenginleştirme sonunda elde edilen oran kömür kalitesinin artırılması için yeterli değildir.

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

İnce taneli kömürlerin zenginleştirilmesi üzerine manyetik zenginleştirme/ayırma yöntemleri çok tercih edilmese de bu konu üzerine yapılmış pek çok çalışma ve kaynak bulunmaktadır. Bu çalışmada da kullanılan kömür numunesinin yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı ile hem %kül hem de %kükürt oranında belli oranda azalma olduğu görülmüştür. 9000Gause, 14000Gause ve 19000Gause manyetik alan şiddetinde yapılan deneylerin sonucuna göre; 14000Gause şiddetinde elde edilen kül oranı %19,83 ve kükürt oranı %3,32 iken, 19000 Gause şiddetinde kül oranı %17,48 ve kükürt oranı %3,24 değerine azaldığı belirlenmiştir. Zenginleştirme konsantre kül verimleri birbirleriyle karşılaştırıldığında, yaklaşık %97-%99 oranları arasında değişmektedir. Konsantre yanabilir kül verimleri de bu oranlar arasında yer almaktadır. Ancak manyetik alan şiddetleri arasında bir doğru orantının olmadığı anlaşılmıştır. Sonuç olarak; kömür numunesi kül oranı %20,38 iken zenginleştirme sonunda en az kül oranı %17,48 değerine, toplam kükürt oranı da %3,48 iken zenginleştirme sonunda en az %3,24 oranında tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre kömür içeriğindeki kükürt miktarındaki azalma dikkate değer olmadığından zenginleştirme sonuçları başarılı olamamıştır. Sonuç olarak, Erzurum/Balkaya kömürünün piridik( $FeS_2$ ) kükürt içeriğinin azaltılması ve kömür temizleme yöntemlerinden olan manyetik ayırma ile zenginleştirme ekonomik ve uygulanabilir bir yöntem olduğu söylenemez.



Bazı kaynaklara göre özel durumlarda kömürün içeriğindeki demir sülfür yapısı ısı işlemler tarafından değiştirilerek manyetik alınganlık artırılmakta ve manyetik ayırma yöntemi ile ayrılabilir (Liu and Lin, 1976; De Jong vd, 2003; Arslan, 2006; Kademli vd, 2010). Bu çerçevede; Balkaya kömürlerinde manyetik zenginleştirme uygulanmadan önce ısı işlemlere tabi tutularak kömür numunesinin manyetik duyarlılığı artırılabilir ve deneylerden elde edilen ürünlerin tekrar manyetik ayırma işlemine verilir, süpürme ve temizleme işlemlerine tabi tutulabilir. Ayrıca malzeme tane boyutu 500-300 Mikron, 300-150 Mikron ve 150 Mikron altı şeklinde gruplandırılmalar yapılarak zenginleştirme kalitelerinin karşılaştırılmasına yönelik yeni çalışmaların yapılması önerilebilir. Çalışmalar daha da genişletilerek farklı kömür yataklarında bu zenginleştirme yöntemi ile nasıl sonuçların elde edilebileceği araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Arslan V. (2006) Kuru kömür hazırlama yöntemleri, *Madencilik Dergisi*, Cilt 45, Sayı 3, s. 9-18.
2. Çiçek, B., Bigesü, A.Y., Şenelt, M.A. and Pamuk, V. (1996) Desulphurization of coals by flash phrolysis followed by magnetic separation, *Fuel Processing Thecnology*, Vol.46, No. 2, pp. 133-142. doi:10.1016/0378-3820(95)00055-0
3. De Jong, T.P.R., Mesina, M.B. and Kuilman, W. (2003) Electromagnetic de-shaling of coal, *Physical Separation in Science and Engineering*, Vol.12, No. 4, pp.223-236. doi:10.1080/14786470410001665802
4. Dudenhofer B. (2010) Manager-separation products, *Clean Coal Processing, Today's Energy Solutions Magazine*, pp. 34.
5. Gerber, R. and Birss, R. (1983) High gradient magnetic separation (Magnetic Materials and Their Applications), *Research Studies*, John Wiley & Sons, Chichester, UK. pp. 219, ISBN: 0835761401, 9780835761406.
6. Güldan G. (2010) Zonguldak Taşkömürünün Kuru Zenginleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, s.108.
7. Hise, E., Holman, A., ve Friedlaender, F. (1981) Development of high-gradient and opengradient magnet separation of dry fine coal, *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol.17 No. 6, pp. 3314-3316. doi: 10.1109/TMAG.1981.1061625
8. <https://www.manyet.com/cevher-zenginlestirme-cozumleri/> Erişim Tarihi:10.01.2019, Konu: *Cevher Zenginleştirme*.
9. <http://www.oltukomur.com.tr/> Erişim Tarihi:20.01.2019, Konu: *Oltu Kömürleri*.
10. Jones W. and Permos M. Magnetic Separation Technology, *Coal&Minerals Technology, Jones&Permos Magnetic Separation Brochure*, pp.1-28. [https://www.mbe-cmt.com/fileadmin/user\\_upload/Download\\_Produktflyer/mbe\\_MagSep\\_e\\_RZ\\_120305.pdf](https://www.mbe-cmt.com/fileadmin/user_upload/Download_Produktflyer/mbe_MagSep_e_RZ_120305.pdf) Erişim Tarihi:30.01.2019.
11. Kademli M. ve Gülsoy Ö.Y.(2011) Ülkemiz kömür yataklarının kuru zenginleştirilmesine yönelik havalı ayırıcı tasarımı, *Tübav Bilim Dergisi*, Cilt 4, Sayı 2, s. 82-91.
12. Kademli M., Kalyon D. ve Gülsoy Ö.Y. (2010) Linyitlerin kuru zenginleştirmesinde tabla türü havalı ayırıcının işlem değişkenlerinin etkisinin incelenmesi, *Madencilik*, Cilt 49, s. 45-56.
13. Kelland, D.R. (1982) A review of HGMS methods of coal cleaning, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.18, No.3, 841-846. doi: 10.1109/TMAG.1982.1061940

14. Kural, O. (1991) Linyit ve kullanım alanları, *Kömür Kitabı*, 12. Bölüm (Ed. Orhan Kural), s. 294-332.
15. Liu, Y.A. ve Lin, C. J. (1976) Assessment of sulfur and ash removal from coals by magnetic separation, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.12, No. 5, September. pp. 538-550. doi: 10.1109/TMAG.1976.1059084
16. Lua A. C. and Boucher R. F. (1990) Sulphur and ash reduction in coal by high gradient magnetic separation, *Coal Preparation*, Vol.8, No.1/2, pp.61-71. doi:10.1080/07349349008905173
17. Maxwell, E. and Kelland, D.R. (1978) High gradient magnetic separation in coal Desulfurization, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 14, No. 5, September, pp. 482-487. doi: 10.1109/TMAG.1978.1059826
18. Oder, R. R., Jamison R. E., and Brandner, E. D. (2000) Dry coal cleaning with a magmill, *SME Annual Meeting*, Feb. 28-Mar. 1, Salt Lake City, Utah.
19. Oder, R.R. (2002) An evaluation of the alpha prototype magmill tm for dry coal cleaning, *Coal Preparation*, Vol. 22, pp. 323-341. doi:10.1080/07349340216018
20. Özbayoğlu, G. (1986) Desulphurization of lignites by high gradient magnetic separation, *International Mineral Processing Symposium*, İzmir. Vol. II, pp. 636-645.
21. Repkova, J., Lesnak M., Lunacek, J., Jandacka, P., Dvorsky, R., Zivotsky, O. and Prochazka J. (2016) An experimental verification of particle flow ratio of high gradient magnetic separation. *Adv. Sci. Lett.* Vol. 22, pp. 611-615. doi: 10.1166/asl.2016.6912
22. Seferinoğlu, M., ve Köker A. (2003) Kömür yapısındaki minerallerin manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılması, *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü V. Ulusal Sempozyumu*, 10-12 Eylül 2003, İzmir, s. 312-324.
23. Zhang, B., Yan G., Zhao Y., Zhou C. and Lu Y. (2017) Coal pyrite microwave magnetic strengthening and electromagnetic response in magnetic separation desulfurization process, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 168, pp. 136-142. doi:10.1016/j.minpro.2017.10.004
24. Zhang, B., Zhu, G., Lv, B., Dong, L., Yan, G., Zhu, X. and Luo, Z. (2018) A novel high-sulfur fine coal clean desulfurization pretreatment : Microwave magnetic separation, high-gradient effect and magnetic strengthen, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 202, pp. 697-709. doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.088
25. Zhang, B., Zhu G., Sun, Z., Yan, G. and Yao, H. (2018) Fine coal desulfurization and modeling based on high-gradient magnetic separation by microwave energy, *Fuel*, Vol. 217, pp. 434-443. doi:10.1016/j.fuel.2017.12.089