

KÖMÜR YAPISINDAKİ MİNERALLERİN MANYETİK AYIRMA YÖNTEMİ İLE UZAKLAŞTIRILMASI

Meryem SEFERİNOĞLU*, Agah KÖKER

MTA Genel Müdürlüğü, MAT Dairesi Başkanlığı, Yakıt Teknolojisi, Balgat, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, manyetik ayırma yönteminin kömür temizleme proseslerinde uygulanabilirliği ve kömür partikül boyutunun yöntem verimliliği üzerine etkisi incelenmiştir. Manyetik ayırma yönteminde, kömürün inorganik ve organik yapısının manyetik özelliklerinin farklı olması esas alınmaktadır. Deneysel çalışmalarda, üç farklı (-1500+1000, -1000+500 ve -500+100 mikron) partikül boyutuna sahip Manisa-Kula-Pabuçlu ve Çanakkale-Çan kömür örnekleri kullanılmıştır.

-1500+1000 mikron partikül boyutuna sahip Çan kömüründen ayrılan, paramanyetik fraksiyonun içerdiği piridik kükürt miktarının, orijinal kömüre oranla %24 uzaklaştırıldığı bulunmuştur. Manisa kömüründe ise diyamanyetik fraksiyonlarının piridik kükürt içeriğinin arttığı bulunmuştur. -1000+500 mikron partikül boyutuna sahip Manisa kömürünün, diyamanyetik fraksiyonundaki kül içeriğinin, orijinal kömüre oranla yaklaşık %20 azalırken, kalori değerinin yaklaşık % 15 arttığı gözlenmiştir. Çan kömürünün diyamanyetik fraksiyonlarındaki kül içeriğinin kısmen azaldığı, kalori değerinde ise çok az bir artma olduğu bulunmuştur.

ABSTRACT

The perform of the magnetic separation method in the process of cleaning the coal and the effect of the particular size of coal on the effective of method was investigated in this study. The method is based on the fact that coal is weakly diamagnetic, while most of the minerals present are weakly to moderately paramagnetic. In the experimental studies, Manisa-Kula-Pabuçlu and Çanakkale-Çan coals which have three different particular size (1500+1000, -1000+500, -500+100 micron) was used.

For particular size of -1500+1000 micron, paramagnetic fraction which was separated from Çan coal has got %24 pyritic sulphur less than ground coal was found. The amount of pyritic sulphur increased in the diamagnetic fraction of Manisa coal was found. For particular size of -1000+500 micron, diamagnetic fraction which was separated from Manisa coal has %20 ash reduction was achieved while the value of calorie of coal was enhanced %15 according to the ground coal. The amount of ash reduction in the diamagnetic fractions of Çan coal was very low while, the value of calorie of coal was a little enhance.

ANAHTAR SÖZCÜKLER

Kömür, Manyetik Ayırma, Pirit, Kömürün Fiziksel Temizlenmesi.

GİRİŞ

Bugün dünya enerji ihtiyacının dörtte birinden fazlası ve elektrik enerjisinin % 40 'ı kömür ile karşılanmaktadır (Couch, 1998). Ancak kömürün konvensiyonel yakma teknolojisi ile doğrudan yakılması olumsuz çevre etkisinin büyük olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda kömür araştırmacıları temiz kömür teknolojisini geliştirmeye yönelik çalışmalar yapmaya başlamıştır (Rousaki ve Couch, 2000). Türkiye de kullanılabilir temiz enerji kaynaklarının son derece sınırlı olması, kömürün alternatif enerji kaynağı olarak önem kazanmasına neden olmaktadır. Ancak, Türkiye de bulunan kömür rezervlerinin büyük bir bölümünün, kül ve kükürt oranı yüksek olan düşük kaliteli linyitlerden oluştuğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, endüstriyel proseslerde veya enerji kaynağı olarak kullanılacak kömürlerin, öncelikle kömür temizleme proseslerinde hazırlanmasını gerektirmektedir. Kömürlerin efektif olarak kullanılmalari ve çevre kirliliğinin en aza indirilmesi için yapılan çalışmaları, kömürün kullanılmadan önce kalitesinin yükseltilmesi, yanma sırasında bazı önlemlerin alınması veya yanma işleminden sonra çevre kirlenmesinin önlenmesi şeklinde üç grupta toplanmaktadır. Son yıllarda, kömürün kullanılmadan önce kalitesinin yükseltilmesine yönelik çalışmalarda, birçok fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik yöntemler geliştirilmiştir. Ancak, kimyasal ve mikrobiyolojik yöntemlerinin l aboratuvar veya pilot tesis d uzeyinde kalması, ayrıca yöntem maliyetinin yüksek olması endüstriyel proseslerdeki kullanımını engellemektedir (Rousaki ve Couch 2000). Kömür kalitesinin artırılmasında en çok fiziksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde kömür yapısındaki organik ve inorganik bileşiklerin farklı fiziksel ve fizikokimyasal özelliklere sahip olmasından yararlanılmaktadır.

Manyetik ayırma yöntemleri, minerallerin manyetik duyarlılıklarında ki farklılıktan yararlanarak cevherlerden değerli minerallerin uzaklaştırılmasında çok kullanılan bir yöntem olmaktadır. Son yıllarda sürekli yüksek alan şiddeti yaratan ve nadir toprak elementleri içeren yeni magnetlerin keşfi ile elektrik enerjisine gerek kalmadan yüksek alan şiddeti oluştura bilen kuru manyetik ayırıcıların tasarlanması, bu yöntemin endüstriyel ölçekli proseslerde uygulama alanı bulmasına neden olmuştur (Acarkan, 2000). Kömür yapısında bulunan minerallerin manyetik duyarlılıklarının, kömürün organik kısmının gösterdiği manyetik duyarlılıktan farklı olması, kömür temizleme proseslerinde de manyetik ayırma yöntemlerinin kullanılmasına imkan vermektedir (Lua ve Boucher, 1990, Kural,1991).

Organik bileşiklerin çoğu diyamanyetik özellik göstermektedir. Bu nedenle, kömürün organik kısmı diyamanyetik özellik gösterirken, kömürün içerdiği inorganik kısım paramanyetik ve ferromanyetik olabilir. Bununla birlikte, kömürdeki minerallerin çoğunun paramanyetik olduğu saptanmıştır (Gluskoter, 1975, Finkelman ve Stanton, 1978). Kömürün bütün manyetik duyarlılığı ise diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik karışımıdır. Mineral maddesi giderilmiş kömürün manyetik özelliğinin, $-0,5 \times 10^{-6}$ ile $-0,6 \times 10^{-6}$ cgs birimi arasında değiştii saptanmıştır. Pirit minerallerinin manyetik s septibilitesi $0,3 \times 10^{-6}$ emu/g iken kömürün manyetik suseptibilitesi $-0,4 \times 10^{-6}$ ile $-0,8 \times 10^{-6}$ emu/g arasında değişmektedir ( i ek ve arkadaşları, 1996, Kuleli, 1991).

Manyetik ayırma yöntemi, belli bir manyetik alan içerisine giren farklı manyetik duyarlılıktaki partiküllerin farklı şekilde hareket etmelerinden yararlanarak yapılan ayırma olarak tarif edilmektedir. Burada esas olan manyetik duyarlılıklarına göre, bir indüksiyon manyetik alanı şiddetinde, duyarlılığı yüksek olan mineraller manyetik özellik kazanıp manyetik çekim kuvveti yönünde hareket ederken, manyetik özellik kazanmayan diğer mineraller manyetik çekim kuvveti dışındaki kuvvetlerin (gravite sürtünme vs) bileşkesi doğrultusunda hareket etmeleridir (Acarkan, 2000, Kural, 1991).

Son yıllarda yapılan çalışmalardan, High Gradient Magnetic Separation (HGMS) yönteminin, serbest haldeki pirit ve diğer demirli minerallerin ayrılmasında etkin bir yöntem olduğu, ancak kuvar ve kil gibi diğer minerallerin ayrılmasında yöntem etkinliğinin azaldığı bulunmuştur. Ayrıca, HGMS yöntemi ile kömürdeki piridik kükürdün büyük bir kısmının, daha farklı işlemlere maruz kalmadan uzaklaştırılabileceği, hatta yüzdürme-batırma yöntemi kadar iyi sonuç verdiği ileri sürülmektedir (Couch, 1991, İammartino , 1974).

Özbayoğlu (1986) tarafından yapılan bir çalışmada, Aşkale-Erzurum linyitinden, piridik kükürt uzaklaştırılmasında, HGMS tekniğinin uygulanabilirliğini incelemiştir. 0.3 mm'nin altında öğütülmüş kömürle yapılan bu deneylerde, kömürdeki piridik kükürdün % 78 'inin uzaklaştırılabildiği ve piridik kükürdün uzaklaştırılmasında HGMS tekniğinin, Flotasyona oranla daha etkili olduğu ileri sürülmüştür.

Bu çalışmada, kömür içindeki minerallerin, kömürün organik yapısından farklı manyetik özelliğe sahip olmasından yararlanarak, kömürden pirit gibi manyetik özelliğe sahip minerallerin manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılarak kömür kalitesinin yükseltilmesi, partikül boyutunun manyetik ayırma yöntem verimliliği üzerine etkisi ve bu yöntemin kömür temizleme proseslerine uygulanabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Manyetik ayırma yönteminin getireceği mali yükün düşük olması ve endüstriyel boyutta uygulama alanına sahip olması nedeniyle, bu yöntemin kömür temizleme prosesleri açısından önemli olabilir.

MATERYAL VE METOD

Kömür Örneklerin Hazırlanması

Bu çalışmada, Manisa-Kula-Pabuçlu ve Çanakkale-Çan yörelerinden alınan kömür örnekleri kullanılmıştır. Kömür partikül boyutu aralıkları, manyetik ayırma yönteminin etkin olabildiği en küçük partikül boyutu ile pülverize yakma, akışkan yatak ve briketleme gibi endüstriyel proseslerde kullanılan partikül boyutu aralıkları esas alınarak, -1500+1000, -1000+500 ve -500+100 mikron olarak belirlenmiştir. Kömür örnekleri, lâboratuar ortamında 48 saat bekletilerek nem içeriğinin dengeye gelmesi sağlandıktan sonra, pülverizatör ile kırma ve öğütme işlemi yapılarak -2 mikron boyutuna indirilmiştir. Buradan elde edilen kömür örnekleri, eleme işlemi ile -1500 +1000, -1000 +500 ve +500 -100 mikron partikül boyutu aralığında üç alt fraksiyonlarına ayrılmıştır. Farklı partikül boyutuna sahip orijinal kömür örneklerinin mineralojik analizleri, Leitz marka cevher mikroskobu ile yapılmıştır.

Manyetik Ayırma Yöntemi

Bu çalışmada, Permoll marka manyetik ayırma cihazın kullanılarak, üç farklı partikül boyutu aralığında hazırlanan Manisa ve Çan kömürleri paramanyetik ve diyamanyetik olmak üzere iki alt-fraksiyona ayrılmıştır. Kömür örnekleri (100 g), 20 g/min besleme hızında ince bir bant yardımı ile tambur dönme hızı 10 devir/min olan 10000 gauss'luk manyetik alana sokulmaktadır. Manyetik alana giren kömürde, manyetik duyarlılığı yüksek olan partiküller sabit manyetik alana sahip tambura yapışarak bantla birlikte hareket eder ve tamburun alt kısmında manyetik etkiden kurtulup paramanyetik toplama kabına düşmektedir. Diyamanyetik partiküller ise manyetik alandan etkilenmedikleri için bant üzerinde parabolik hareket yaparak diyamanyetik toplama kabına düşmektedir. Buradan elde edilen paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyonlar ve orijinal kömür örneklerinin kimyasal analizleri yapılmıştır. Bütün kömür örneklerin içerdiği kükürt formlarının tayini TS 329 - ISO 157 standardına göre yapılmıştır.

X-Ray Diffraction (XRD) Analizi

Bu çalışmada, partikül boyutu -1500+1000 mikron olan orijinal ve manyetik ayırma yöntemi ile elde edilen paramanyetik Manisa kömürünün ve Orijinal Çan kömürünün içerdiği mineral bileşenlerinin belirlenmesi amacıyla XRD analizleri yapılmıştır.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Mineralojik Analiz

Farklı partikül boyutu aralığına sahip orijinal Manisa ve Çan kömürlerinin pirit içeriğinin kömür yapısındaki dağılım formları ve serbestleşme derecesinin belirlenmesi amacıyla mineralojik analizleri yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Orijinal Çanakkale Çan ve Manisa Kula Pabuçlu yörelerinden alınan kömür örneklerinin değişik partikül boyutlarına karşılık mineralojik analiz sonuçları

Partikül Boyutu (mikron)	Çanakkale Çan	Manisa Kula Pabuçlu
-1500 + 1000	%5 Oranında pirit içermektedir. İnce taneli ve saçılı formda gözlenen piritlerin tamamı kömüre bağlı haldedir.	%13,1 Oranında pirit içermektedir. İnce taneli, saçılı ve framboidal formda gözlenen piritlerin %43'ü kömüre bağlı, %57'si serbest haldedir. Serbest haldeki piritlerin boyutu 1080-1440 mikron arasında değişmektedir.
-1000 + 500	%5 Oranında pirit içermektedir. İnce taneli ve saçılı formda gözlenen piritlerin tamamı kömüre bağlı haldedir.	%10.6 oranında pirit içermektedir. İnce taneli, saçılı, framboidal ve çatlak dolgusu olarak gözlenen piritlerin %53'ü kömüre bağlı, %47'si serbest haldedir. Serbest haldeki piritlerin boyutu 594-687 mikron arasında değişmektedir.
-500 +100	%3 Oranında pirit içermektedir. Piritlerin %50'si serbest, %50'si kömüre bağlıdır. Serbest haldeki piritlerin boyutu 144-180 mikron arasında değişmektedir.	%9,9 Oranında pirit içermektedir. İnce taneli, saçılı, framboidal ve çatlak dolgusu olarak gözlenen piritlerin %55'i kömüre bağlı, %45'i serbest haldedir. Serbest haldeki piritlerin boyutu 126-450 mikron arasında değişmektedir.
-160 + 0	% 97 oranında organik madde içermektedir. % 2 oranında saçılı formda ve %1 oranında Kristal formda pirit içermektedir. Toplam %3 oranında piritlik kükürt içermektedir.	% 81 oranında organik madde içermekte. %3 oranında Framboidal, %1 oranında çatlak dolgusu, %9 oranında saçılı formda ve % 6 oranında kristal formda pirit bulunmaktadır. Toplam %19 oranında piritlik kükürt içermektedir.

Çan kömürünün mineralojik analiz sonuçlarında, -500+100 mikron partikül boyutu aralığına sahip kömürün içerdiği pirit minerallerinin % 50'sinin öğütme işlemi sırasında serbest hale geçtiği, buna karşılık partikül boyutu 500 mikronun üzerindeki kömür örneklerinde ise pirit minerallerinin tamamının kömüre bağlı olduğu bulunmuştur. Bu da, Çan kömüründe bulunan

pirit minerallerinin tamamının serbest hale geçmesi için kömürün çok küçük partikül boyutlarına kadar indirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Manisa kömürünün mineralojik analizleri, kömür partikül boyutu -1500+1000 mikrondan, -500+100 mikrona gidildikçe, serbest hale geçen pirit miktarının % 57' den % 45' e düştüğü ve kömürün içerdiği pirit miktarının partikül boyutuna bağlı olarak % 13,1' den % 9,9'a düştüğü bulunmuştur. Buna karşılık -100+0 mikron partikül aralığına sahip kömürün içerdiği pirit miktarının diğer fraksiyonlara göre çok yüksek olduğu (%19) görülmüştür. Bu sonuca göre, Manisa kömüründe, partikül boyutunun 100 mikrondan küçük olan pirit minerallerinin daha fazla bulunduğu, buna bağlı olarak da kömürün kırma/eleme işlemi sırasında -100+0 mikron tane boyutu aralığındaki fraksiyonda birikme olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, kömür partikül boyutunun azaltılmasına bağlı olarak, 100 mikrondan daha küçük partikül boyutuna sahip pirit minerallerinin daha fazla serbest hale geçtiği ve eleme işlemi sırasında -100+0 mikron partikül boyutu aralığındaki fraksiyon içinde toplandığı bu nedenle, kömürün partikül boyutu -1500+1000 mikron aralığından -500+100 mikron aralığına inildikçe pirit içeriğinin azaldığı düşünülmektedir.

Manyetik Ayırma Verimi

Manyetik ayırma yöntemi ile, Manisa ve Çan kömürlerinin içerdiği pirit gibi manyetik özellik gösteren minerallerin kömür yapısından uzaklaştırılarak kömür kalitesinin artırılmasına çalışılmıştır. Manyetik ayırma yöntemi ile Manisa ve Çan kömürlerinden ayrılan paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyon verimleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu çalışmada, Çan kömürünün manyetik alandan ayrılan yüzde paramanyetik fraksiyon veriminin, Manisa kömürüne göre daha az olduğu bulunmuştur. Bu sonuca göre, Çan kömürünün içerdiği minerallerin, Manisa kömürüne oranla daha az paramanyetik özelliğe sahip bileşiklerden oluştuğu düşünülmektedir. Tuncalı ve arkadaşları (2003), tarafından yapılan bir çalışmada Manisa kömürünün %16,5 Fe₂O₃, %15,7 SiO₂, %5,5 Al₂O₃, %1,1 MgO ve %0,9 CaO mineralleri içerdiği ileri sürülmüştür. Buna karşılık Çan kömürünün major elemen analiz sonuçlarından, %1,8 Fe₂O₃, %13,6 SiO₂, %7,82 Al₂O₃, %0,196 MgO ve %1,26 CaO mineralleri içerdiği bulunmuştur. Bu da, Manisa kömürünün daha fazla manyetik özellik gösteren mineraller içerebileceği sonucunu desteklemektedir. Bu sonuçlara göre, Manisa kömürünün manyetik özellik gösteren bazı minerallerinin bir kısmı kömürün mineral yapısı içinde bulunurken bir kısmının da kömür organik yapısına bağlı olduğu varsayılmaktadır. Böylelikle, kömürün bir organik bileşenlerinin ve/veya manyetik özelliğe sahip olmayan bir kısım minerallerinde manyetik fraksiyon olarak ayrılabilmesi düşünülmektedir. Elektromanyetik ayırıcılar ile yapılan bir çalışmada, külden Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, CuO ve MgO gibi minerallerin bir kısmı manyetik fraksiyon olarak ayrılabilmesi ve bu çalışmada, işlem görmemiş kömürden elde edilen kül içinde % 11.5 oranının da bulunan Fe₂O₃ in, manyetik fraksiyon içinde % 24.3 ve manyetik olmayan fraksiyon içinde % 5.6 azaldığı ileri sürülmüştür (Sloss ve arkadaşları, 1996).

Genel olarak, her iki kömür örneğinde, partikül boyutu azaldıkça paramanyetik fraksiyon veriminde belirgin bir artış olduğu ve özellikle bu artışın -500+100 mikron partikül boyutu aralığındaki kömür örneklerinin diğerlerine göre çok büyük olduğu görülmüştür. Burada, kömür partikül boyutu azalmasına bağlı olarak, manyetik özelliğe sahip minerallerin serbestleşme derecesinin arttığı düşünülmektedir.

Tablo 2. Manisa-Kula-Pabuçlu ve Çanakkale-Çan kömürlerinin, manyetik ayırma yönteminden elde edilen paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyon verimi.

Partikül Boyutu Aralığı (Mikron)	Manisa Kula Pabuçlu		Çanakkale Çan	
	Paramanyetik Fraksiyon (%)	Diyamanyetik Fraksiyon (%)	Paramanyetik Fraksiyon (%)	Diyamanyetik Fraksiyon (%)
-1500 +1000	63,9	36,1	4,9	95,1
-1000 +500	69,1	30,9	7,2	92,8
-500 +100	89,4	10,6	43,4	56,6

Bu çalışmada, Manisa kömüründe paramanyetik fraksiyon veriminin beklenenin tersine diyamanyetik fraksiyondan çok daha fazla olduğu gözlenmiştir. Burada, Manisa kömürünün mineral yapısında, pirit dışında farklı paramanyetik özelliğe sahip minerallerin bulunduğu ve bu minerallerin manyetik alandan paramanyetik fraksiyon olarak ayrıldığı düşünülmektedir.

Manisa ve Çan kömürünün XRD analiz sonuçlarına bakıldığında (Tablo 3), her iki kömüründe benzer mineraller içerdiği, ancak Manisa kömürünün mineral yapısında mika grubu mineraller ile plajiyoklaz minerallerin bulunmasına karşılık, Çan kömürünün bu iki mineral grubunu içermediği görülmüştür. Burada, Manisa kömürünün içerdiği mika grubu minerallerin pirit ile birlikte paramanyetik fraksiyon içinde ayrılacağı düşünülmektedir.

Tablo 3. Manisa -Kula-Pabuçlu ve Çanakkale-Çan kömürünün XRD sonuçları

Mineral Türleri	Kimyasal Formülleri	Manisa-Kula-Pabuçlu Mineral Türleri	Çanakkale-Çan Mineral Türleri
Jips	CaSO ₄ .2H ₂ O	Jips	Jips
Kuvars	SiO ₂	Kuvars	Pirit
Mika	Tablo 8	Mika	Kuvars
Simetit Grubu Kil		Simetit Grubu Kil	Kaolinit
Plajiyoklaz	NaAlSi ₃ O ₈ -CaAlSi ₂ O ₈	Plajiyoklaz	Simetit Grubu Kil
Pirit	FeS ₂	Pirit	-
Kaolinit	[Si ₄ O ₁₀ / (OH) ₈]Al ₄	Kaolinit	-

Tablo 4' de bakıldığında, biyotite, annite ve ferrimuskovite gibi mika grubu mineral türlerinin bir çoğunun demir içerdiği görülmektedir. Minerallerin içerdiği demir iyonlarının yapı içindeki dağılımında bir denge olmadığında manyetizma oluşmaktadır. Demirin Fe⁺² ve Fe⁺³ olmak üzere iki temel iyon hali bulunmaktadır. Fe⁺² ve Fe⁺³ iyonları farklı atomik yarı çapa sahip olmaları, kristal yapı içinde farklı pozisyonlara yerleşmesine neden olmaktadır. Böylelikle, kristal yapı içinde elektronlar Fe⁺² iyonlarından Fe⁺³ iyonlarına doğru hareket ederek kısmen manyetik alan oluşturmaktadır. Dolayısıyla, Manisa kömürün mineral yapısında biyotite, annite, zinnwaldite ve ferrimuskovite gibi demir içeren mika grubu minerallerin bulunmasının paramanyetik fraksiyon veriminin, diyamanyetik fraksiyon veriminden fazla olmasına neden olan önemli parametrelerden biri olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4. Mika grubu minerallerin kimyasal formülleri (Raubault, 1963);

Mika Mineral Türleri	Kimyasal Formüllü
Paylogobite (Kahverengi Mika)	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{OH})_2] \text{KMg}_3$
Biotite (Kara Mika)	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{OH})_2] \text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3$ (%6,44 Fe)
Lepidomelan	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{OH})_2] \text{K}(\text{Fe}, \text{Mg})_3$
Annite	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{OH})_2] \text{KFe}_3$ (%32,67 Fe)
Eastonite	$[\text{Si}_5\text{Al}_3\text{O}_{20} / (\text{OH})_4] \text{K}_2\text{Mg}_5 \text{Al}$
Siderophllite	$[\text{Si}_5\text{Al}_3\text{O}_{20} / (\text{OH})_4] \text{K}_2\text{Fe}_5 \text{Al}$
Moscovite	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{OH})_2] \text{KAl}_2$
Ferrimuscovite	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{OH})_2] \text{K Fe}^{3+} \text{Al}$
Phengite	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{OH})_4] \text{K}_2(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Al}_3$
Paragonite	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{OH})_2] \text{NaAl}_2$
Lepidolite	$[\text{Si}_3(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_{10} / (\text{OH}, \text{F})_2] \text{KAl}(\text{Li}, \text{Fe}, \text{Al})$
Zinnwaldite	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10} / (\text{F}, \text{OH})_2] \text{KLiAlFe}$

Kimyasal Analizi

Bu çalışmada, farklı partikül boyutuna sahip orijinal Çan ve Manisa kömürleri ve bu kömürlerden manyetik ayırma yöntemi ile elde edilen paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyonlarının kimyasal analizleri yapılmıştır. Buradan elde edilen analiz sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5'e bakıldığında, Manisa kömürünün, manyetik ayırma yöntemi ile ayrılan paramanyetik fraksiyondaki toplam kükürt içeriğinin, orijinal kömüre göre tüm fraksiyonlarda azalma gözlenirken, diyamanyetik fraksiyonda belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Bu da, Manisa kömüründe organik kükürt miktarının, piridik ve sülfat kükürdü formundan daha fazla olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, kömür yapısındaki organik kükürt miktarına bağlı olarak diyamanyetik fraksiyonun içerdiği toplam kükürt değeri artmaktadır. Bu kömür örneğinin kül içeriğine bakıldığında ise mineral madde bakımından zengin kısımların paramanyetik fraksiyona ayrıldığı görülmüştür. Dolayısıyla, diyamanyetik fraksiyonun organik madde içeriği zenginleşmekte ve organik kükürde bağlı olarak da toplam kükürt içeriği artmaktadır. Ayrıca, uçucu madde, sabit karbon ve kalori değerlerinin de diyamanyetik fraksiyonda artıyor olması, bu fraksiyon içindeki organik yapının arttığını göstermektedir.

Çan kömürünün toplam kükürt içeriğine bakıldığında, partikül boyutu azaldıkça orijinal kömürde belirgin bir artış olduğu, buna karşılık manyetik ayırma yöntemi ile elde edilen paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyonların toplam kükürt içeriğinde belirgin bir ayrışma olmadığı bulunmuştur (Tablo 5).

Manisa kömürünün sülfat kükürt formunun analizinden, kömür yapısında bulunan sülfat kükürt içeriğinin, kömür partikül boyutuna veya manyetik ayırma yöntemine göre belirgin bir değişim olmadığı bulunmuştur (Tablo 5).

Tablo 5'de Çan kömürünün sülfat kükürt içeriğine bakıldığında, orijinal kömür örneğinin, kömür partikül boyutuna göre düzensiz bir değişim gösterdiği, kömür partikül boyutunun küçülmesiyle, sülfat kükürt miktarı önce azalıp sonrada arttığı gözlenmiştir. Çan kömürünün manyetik ayırma yönteminden elde edilen fraksiyonların sülfat kükürt içeriğinde belirgin bir değişim olmamakla birlikte, -500+100 mikron partikül boyutu aralığına sahip orijinal kömürün sülfat kükürt miktarının %1,40 dan, paramanyetik fraksiyonda %1,52'ye yükseldiği, diyamanyetik fraksiyonda %1,26'ya düştüğü bulunmuştur (Tablo 5).

Tablo 5. Manisa kula pabuçlu ve Çanakkale Çan kömür örneklerinin orijinal, paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyonlarının kimyasal analiz sonuçları

Analiz Tipleri (%)	Partikül Boyutu Mikron	Orijinal	Paramanyetik	Diyamanyetik
Manisa Kula Pabuçlu				
Toplam S (KB)	-1500+1000	5,90	4,51	7,02
Toplam S (KB)	-1000+500	5,38	4,67	8,24
Toplam S (KB)	-500+100	5,19	4,78	12,37
Çanakkale Çan				
Toplam S (KB)	-1500+1000	4,44	4,58	4,46
Toplam S (KB)	-1000+500	4,66	3,28	4,68
Toplam S (KB)	-500+100	4,73	4,40	5,06
Manisa Kula Pabuçlu				
Sülfat S (KB)	-1500+1000	2,01	2,07	2,07
Sülfat S (KB)	-1000+500	2,05	2,09	2,09
Sülfat S (KB)	-500+100	2,22	2,21	2,29
Çanakkale Çan				
Sülfat S (KB)	-1500+1000	1,18		1,08
Sülfat S (KB)	-1000+500	1,06	1,03	1,17
Sülfat S (KB)	-500+100	1,40	1,52	1,26
Manisa Kula Pabuçlu				
Piridik S (KB)	-1500+1000	0,95	0,89	1,22
Piridik S (KB)	-1000+500	1,18	0,62	1,37
Piridik S (KB)	-500+100	1,27	0,83	1,85
Çanakkale Çan				
Piridik S (KB)	-1500+1000	0,29	0,75	0,22
Piridik S (KB)	-1000+500	0,29	0,20	0,25
Piridik S (KB)	-500+100	0,28	0,44	0,22
Manisa Kula Pabuçlu				
Kül (KB)	-1500+1000	34,06	43,41	31,05
Kül (KB)	-1000+500	37,79	42,15	30,28
Kül (KB)	-500+100	42,12	43,27	43,19
Çanakkale Çan				
Kül (KB)	-1500+1000	26,29	38,48	24,89
Kül (KB)	-1000+500	22,8	33,31	21,36
Kül (KB)	-500+100	24,75	24,23	21,34
Manisa Kula Pabuçlu				
Uçucu Madde (KB)	-1500+1000	39,66	34,68	40,43
Uçucu Madde (KB)	-1000+500	36,86	35,05	42,26
Uçucu Madde (KB)	-500+100	36,24	34,35	39
Çanakkale Çan				
Uçucu Madde (KB)	-1500+1000	36,47	34,1	37,95
Uçucu Madde (KB)	-1000+500	38,78	35,97	41,07

(KB)					
Uçucu Madde (KB)		-500+100	37,76	40,28	43
Manisa Kula Pabuçlu					
Sabit (KB)	Karbon	-1500+1000	26,28	21,91	28,52
Sabit (KB)	Karbon	-1000+500	25,35	22,8	27,46
Sabit (KB)	Karbon	-500+100	21,64	22,38	17,81
Analiz Tipleri (%)	Partikül Boyutu Mikron		Orijinal	Paramanyetik	Diyamanyetik
Çanakkale Çan					
Sabit (KB)	Karbon	-1500+1000	37,24	27,42	37,16
Sabit (KB)	Karbon	-1000+500	38,42	30,72	37,57
Sabit (KB)	Karbon	-500+100	37,49	35,49	35,66
Manisa Kula Pabuçlu					
Nem Baz)	(Orijinal)	-1500+1000	14,64	13,86	14,55
Nem Baz)	(Orijinal)	-1000+500	14,61	13,91	13,73
Nem Baz)	(Orijinal)	-500+100	14,24	14,44	11,92
Çanakkale Çan					
Nem Baz)	(Orijinal)	-1500+1000	8,46	8,29	8,54
Nem Baz)	(Orijinal)	-1000+500	8,9	8,97	8,91
Nem Baz)	(Orijinal)	-500+100	9,1	10,02	9,06
Manisa Kula Pabuçlu					
Yukarı (Kcal/Kg)	kalori	-1500+1000	3102	2502	3428
Yukarı (Kcal/Kg)	kalori	-1000+500	2902	2575	3335
Yukarı (Kcal/Kg)	kalori	-500+100	2549	2529	2652
Çanakkale Çan					
Yukarı (Kcal/Kg)	kalori	-1500+1000	4406	3351	4449
Yukarı (Kcal/Kg)	kalori	-1000+500	4664	3717	4678
Yukarı (Kcal/Kg)	kalori	-500+100	4382	4185	4569

Tablo 5'de Manisa kömürünün piridik kükürt içeriğindeki değişimler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada orijinal kömüre oranla, paramanyetik fraksiyonun piridik kükürt içeriğinde azalma olurken, diyamanyetik fraksiyonda artmakta olduğu bulunmuştur. Bu sonuca göre, Manisa kömürünün içerdiği piridik kükürt minerallerinin, inorganik yapıdan daha çok organik yapı içinde saçılı formda bulunduğu söylenebilir. Dolayısıyla, piritin zayıf paramanyetik özelliğe sahip olması ve organik yapı içinde saçılı formda bulunması, pirit minerallerinin manyetik alandan etkilenmeden diyamanyetik fraksiyonda birikmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Genel olarak, Çan kömüründen, manyetik ayırma yöntemi ile elde edilen paramanyetik fraksiyonun piridik kükürt içeriğinin, orijinal kömüre oranla, belirgin bir artış olduğu, diyamanyetik fraksiyonda ise azalma olduğu görülmüştür (Tablo 5). Paramanyetik fraksiyon verimine bakıldığında en büyük partikül boyutu aralığında % 4,9 olurken, en küçük partikül boyutu aralığında % 43,4 olduğu bulunmuştur (Tablo 2). Dolayısıyla, -1500+1000 mikron partikül boyutu aralığına sahip Çan kömürünün manyetik alandan % 95.1 verim ile elde edilen diyamanyetik fraksiyonun piridik kükürt içeriğinin, orijinal kömüre oranla % 24 azalmasına karşılık, diğer partikül boyutu aralıklarında ise sırasıyla, % 14 ve % 21 'inin manyetik ayırma yöntemi ile diyamanyetik fraksiyondan uzaklaştığı bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, manyetik ayırma yönteminin, diğer partikül boyutlarına göre, en etkin olduğu kömür partikül boyutu aralığının -1500+1000 mikron olduğu söylenebilir. Orijinal Manisa kömürünün ve manyetik ayırma yönteminden elde edilen paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyonlarına ait yüzde kül içeriğinin ve kalori değerlerinin partikül boyutuna göre değişimi Şekil 1'de verilmiştir. Orijinal Manisa kömürünün partikül boyutu küçüldükçe kül içeriğinin arttığı bulunmuştur. Kalori değerlerine bakıldığında, kömürün kül içeriği ile orantılı olarak partikül boyutu azaldıkça kalori değerinin de azaldığı görülmüştür. Burada, kömürü kırma işlemi sırasında serbest hale geçen minerallerin küçük partikül boyutuna sahip olması nedeniyle, partikül boyutu küçüldükçe kömürün kül içeriğinin arttığı, buna bağlı olarak da kalori değeri azaldığı varsayılmaktadır.

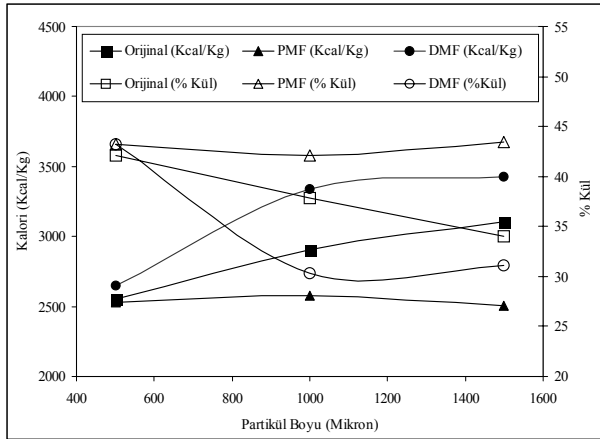
Şekil 1'de Manisa kömür örneklerinin partikül boyuna göre değişimi verilmiştir. Bu çalışmada, manyetik alanda ayrılan paramanyetik fraksiyonun yüzde kül içeriğinin diyamanyetik fraksiyona göre daha yüksek olduğu, buna karşılık paramanyetik fraksiyonun kalori değerinin, diyamanyetik fraksiyona göre azaldığı bulunmuştur (Şekil 1). Bu sonuçlara göre, Manisa kömürünün mineral yapısı içersinde manyetik özellik gösteren pirit dışında başka minerallerin olduğu varsayılmaktadır. XRD analizinden elde edilen veriler bu sonuçları desteklemektedir. XRD sonuçlarına bakıldığında, Manisa kömürünün yüksek oranda mika mineralleri içerdiği bulunmuştur. Mika grubu mineral içerisinde de biotite, ferrimuscovite gibi demir içeren mika mineralleri bulunması nedeniyle, bu tür minerallerin manyetik alanda paramanyetik fraksiyon içinde ayrılabilceği ve mineral miktarına bağlı olarak da kül içeriğinin arttığı kabul edilmektedir. Şekil 1'e bakıldığında, Manisa kömürünün partikül boyutu küçüldükçe paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyonun içerdiği yüzde kül miktarının birbirine yaklaştığı görülmektedir. En küçük partikül boyutu aralığında, her iki fraksiyonun yaklaşık %43 kül içerdiği buna bağlı olarak da sabit karbon içeriğinin, kömür partikül boyutu azaldıkça azaldığı ve en küçük partikül boyutu aralığında yaklaşık %17,8'e düştüğü bulunmuştur. Ayrıca, bu kömürün uçucu madde içeriğinin kül ve sabit karbon içeriğine bağlı olarak değiştiği bulunmuştur (Tablo 5). Kömürün kül içeriği artıkça, sabit karbon ve uçucu madde içeriği azalmaktadır.

Manisa kömürünün manyetik alanda ayrılan paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyonlarının kalori değerlerinin (Şekil 1), orijinal kömürlere göre, paramanyetik fraksiyonda belirgin bir azalma olduğu, buna karşılık, diyamanyetik fraksiyonda belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Burada, en büyük partikül boyutu aralığındaki diyamanyetik fraksiyonun sahip olduğu kalori değerinin, orijinal kömüre oranla yaklaşık % 10,5 arttığı (3428 Kcal/Kg) bulunmuştur. Buna karşılık, -1000+500 mikron partikül boyutu aralığında diyamanyetik fraksiyonun kalori değerinin, orijinal kömüre oranla % 15 artışla 3335 Kcal/Kg'a yükseldiği görülmüştür. Bütün bu sonuçlara karşılık, en küçük partikül boyutu aralığına sahip paramanyetik ve diyamanyetik fraksiyonlarının kalori değerlerinde belirgin bir farklılık olmadığı gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre, manyetik ayırma yöntemi ile Manisa kömürünün içerdiği minerallerin yaklaşık %10-15 oranında azaltılabileceği ve kömürün kalorifik değerlerinin kısmen artırılabilceği söylenebilir. Ayrıca, -1000+500 mikron partikül boyutu aralığındaki diyamanyetik fraksiyonun sahip olduğu kül içeriğinin, orijinal kömüre göre yaklaşık %20 azaltılması ve kalorifik değerinin de yaklaşık %15 artmış olması, bu partikül boyutu aralığında manyetik ayırma yönteminin, diğer partikül boyutu aralıklarına göre daha etkin olduğu söylenebilir. Ancak, diyamanyetik fraksiyonunun piridik kükürt içeriğinin artması, kömür yapısından pirit minerallerinin uzaklaştırılmasında etkin bir yöntem olmadığı söylenebilir. Sonuç olarak, Manisa kömürünün piridik kükürt içeriğinin azaltılması ve kömür temizleme proseslerinde manyetik ayırma yönteminin verimli ve ekonomik bir yöntem olduğu söylenemez.

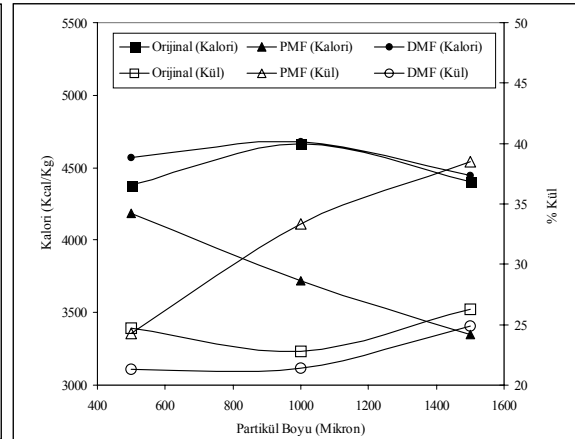
Şekil 2'de Çan kömür örneklerinin yüzde kül içeriklerinin ve kalori değerlerinin partikül boyutuna göre değişimi görülmektedir. Burada, orijinal kömürün kül içeriğinde ve kalori değerlerinde bütün partikül boyu aralıklarında belirgin bir değişim olmadığı görülmüştür. Buna bağlı olarak, kömürün sabit karbon ve uçucu madde içeriğinde de belirgin bir değişim olmamıştır (Tablo 5).

Manyetik ayırma işlemi sonucu, Çan kömüründen ayrılan paramanyetik fraksiyonlarının orijinal kömüre göre kül içeriklerinde belirgin bir artış olduğu, buna karşılık diyamanyetik fraksiyonda çok az bir azalma olduğu bulunmuştur. Bu sonuca göre, manyetik ayırma yöntemi ile Çan kömüründen bazı manyetik özelliğe sahip minerallerin uzaklaştığı ve bu minerallerinde paramanyetik fraksiyonun kül içeriğini arttırdığı söylenebilir. Ancak, diyamanyetik fraksiyonun içerdiği kül miktarının çok az azalması, Çan kömürünün kül içeriğinin azaltılmasında manyetik ayırma yönteminin etkin bir yöntem olmadığını göstermektedir.

Çan kömürünün paramanyetik fraksiyonunun kalori değerlerinin, kömürün kül içeriği ile orantılı olarak değiştiği bulunmuştur. Burada, paramanyetik fraksiyonun kalori değerinde genel olarak bütün partikül aralığında belirgin bir azalma gösterdiği, buna karşılık diyamanyetik fraksiyonda ise çok az bir artış olduğu bulunmuştur. Çan kömürünün paramanyetik fraksiyonun sahip olduğu uçucu madde miktarı ve sabit karbon içeriğinde belirgin bir azalma olduğu buna karşılık diyamanyetik fraksiyonda belirgin bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Bütün bu sonuçlara göre, Çan kömür kalitesinin artırılmasında, Manyetik ayırma yönteminin etkin bir yöntem olmadığı, bunun ile birlikte diyamanyetik fraksiyonun piridik kükürt içeriğinin orijinal kömüre göre, partikül boyutu değişimine bağlı olarak % 14-24 arasında azalma olduğu bulunmuştur. Burada, Manyetik ayırma yöntemi ile, Çan kömüründen bir miktar pirit minerallerinin uzaklaştırılabileceğini bununla birlikte, yöntem etkinliğinin düşük olduğunu görülmüştür.



Şekil 1. Manisa-Kula-Pabuçlu kömürünün a) orijinal, b) paramanyetik c) diyamanyetik fraksiyonlarının yüzde kül miktarı ve kalori değerlerinin partikül boyutuna göre değişimi.



Şekil 2. Çanakkale-Çan kömürünün a) orijinal, b) paramanyetik c) diyamanyetik fraksiyonlarının yüzde kül miktarının ve kalori değerlerinin partikül boyutuna göre değişimi.

SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Bu çalışmada, manyetik ayırma yöntemi ile Manisa kömüründen elde edilen paramanyetik fraksiyon veriminin, beklenilenin tersine diyamanyetik fraksiyondan fazla olduğu, Çan kömüründe ise diyamanyetik fraksiyon veriminin paramanyetik fraksiyon veriminden fazla olduğu bulunmuştur. Kömürlerin XRD analizlerinden, Manisa ve Çan kömürlerinin benzer mineral yapıya sahip olduğu ancak, Manisa kömürünün, çan kömüründen farklı olarak yüksek oranda mika grubu ve plajiyoklaz mineralleri içerdiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre Manisa kömürünün biotite, ferrimuscovite gibi demir içeren mika grubu mineraller içerdiği düşünülmektedir.

Kömürlerin içerdiği manyetik özelliğe sahip minerallerin uzaklaştırılmasında, kömür partikül boyutunun manyetik ayırma yöntem verimliliği üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Burada, manyetik ayırma yönteminin, Çan kömürü için -1500+1000 mikron ve Manisa kömürü için -1000+500 mikron partikül boyutlarında etkin olduğu bulunmuştur.

Manisa kömürü için bulunan sonuçlardan, manyetik ayırma yöntemi ile Manisa kömürünün içerdiği minerallerin bir kısmının ve kül içeriğinin azaltılabileceği, kalorifik değerinin kısmen artırılabilirliği söylenebilir. Çan kömürü için de, manyetik ayırma yöntemi ile kömürün piridik kükürt ve kül içeriğinin azaltılabileceği bununla birlikte çok azda olsa kömürün kalori değerinin artırılabilirliği söylenebilir. Ancak, her iki kömür için elde edilen sonuçlardan, manyetik ayırma yönteminin, kömürün içerdiği pirit gibi minerallerin tamamen uzaklaştırılmasında etkin ve ekonomik bir yöntem olduğu söylenemez.

KAYNAKLAR

- Acarkan N., 2000, Cevher ve Kömür Hazırlamada Yenilikler Proses-Tesis İşletme, Denetim ve Maliyet Kontrolü. Çallı L., *Yurt Madenciliği Geliştirme Vakfı*, 29, 2000.
- Couch G., R., 1998, Adding Value to Coal Cleaning Wastes, *IEA Coal Research The Clean Coal Center, Report*, London, April 1998.
- Courch, G. R., Advanced coal cleaning technology, *IEA Coal Research, The Clean Coal Center, Report*, London, 1991,
- Çiçek, B., Bigesü, A. Y., Şenelt, M. A., Pamuk, V., Desulphurization of coals by flash phrolysis followed by magnetic separation, *Fuel Processing Thecnology*, 46, 133 1996.
- Finkelman, F., Stantion, R. W. Identification and significance of accessory from a bituminous coal, *Fuel*, 57, 1978.
- Gluskoter, H. J. Mineral matter and trace elements in coal, *Trace Elements in Fuel, American Society Advanced series*, No. 141, 1975.
- Küçükbayrak, S., Kadioğlu, E., Kemal, M., Kömürün Fiziksel ve Diğer Bazı Teknolojik Özellikleri, Bölüm 3, *Kömür*, ed Kural, O.,75-97, 1991.
- Lua A. C., Boucher R. F., 1990, 'Sulphur and ash reduction in coal by high gradient magnetic separation.' *Coal Preparation* 8., (1/2); 61-71 1990.
- Özbayoğlu, G. Desulphurization of lignites by high gradient magnetic separation, *International Mineral Processing Symposium*, İzmir, 1986.
- Raubaut, M: Fabries J., Touret, J. Weisbrod, A.,. Caractères optiques des micas, *Determination Des Minéraux Des Roches; au microscope polarisant*; Paris, 1963.
- Rousaki K., & Couch G., 2000, Advanced Clean Coal Technologies and Low Value Coals. *IEA Coal Research, The Clean Coal Center. Report*, London, é November 2000.
- Tuncalı, E., *Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri*, Ankara, 2002.
- Sloss, L. L., Smith, M. I., Adams, D. M. B., Pulverised coal ash-requirements for utilisatin, *IEA Coal Researc h, report*, london, june, 1996.