



Contents lists available at Dergipark

## Journal of Scientific Reports-C

journal homepage: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jsrc>



E-ISSN: 2717-8633

Sayı(Number) 10, Ağustos(August) 2025

### ARAŞTIRMA MAKALESİ/RESEARCH ARTICLE

Geliş Tarihi (Receive Date): 12.06.2025

Kabul Tarihi (Accepted Date): 29.08.2025

## Farklı Kömür Yıkanabilirlik Eğrilerinin Değerlendirilmesi: Erzurum-Oltu Kömürü Örneği

Uğur Demir\*

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, 43100, Türkiye

### Öz

Dünyada ve ülkemizde enerjiye olan talep her geçen gün katlanarak artmakta olup bu talebi karşılamak için geleneksel ve alternative enerji kaynakları kullanılmaktadır. Geleneksel enerji kaynaklarından biri olan kömür, çevresel sorunlara neden olmasına rağmen dünya elektrik enerjisi üretiminin dörtte birini karşılamaktadır. Enerji üretiminde önemli bir yere sahip olan kömürün önemi bugün olduğu gibi gelecekte de devam edecektir. Ülkemizde önemli kömür rezervleri bulunmakta olup, bu rezervler düşük kaliteli linyitlerden oluşmaktadır. Bu nedenden dolayı ülkemizde üretilen kömürün büyük bir bölümü elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Kömürlerin zenginleştirilerek/yıkılarak kullanılması, olası çevresel etkileri en aza indirmektedir. Kömürler oluşumlarından kaynaklanan nedenlerden dolayı farklı yıkanabilirlik özelliklerine sahiptir. Bu çalışmada, Erzurum-Oltu kömürlerinin yıkanabilme özellikleri çeşitli kömür yıkanabilirlik eğrileri (Yüzdürme-batırma testleri, + 0,1 yoğunlukta yüzen malzeme miktarı, Yıkanabilirlik derecesi (N), yıkanabilirlik sayısı (W), yıkanabilirlik indeksi (WI), Yakın yoğunlukta malzeme indeksi (NGMI)) kullanılarak belirlenmeye çalışılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu amaçla temsili olarak alınan kömür numuneleri (-18, -18+1 ve -1 mm) üzerinde laboratuvar ortamında  $ZnCl_2$  kullanılarak 1,3-2,0  $gr/cm^3$  yoğunluklu ortamlarda yüzdürme-batırma testleri yapılmış, elde edilen veriler (miktar ve kül oranı) farklı yıkanabilirlik eğrilerinin çizilmesinde ve hesaplanmasında kullanılmıştır. Neredeyse yıkanabilirlik eğrilerinin tümü, Erzurum-Oltu kömürlerinin zor yıkanabilen kömür özelliği taşıdığını göstermektedir.

© 2023 DPU All rights reserved.

Anahtar Kelimeler: Kömür Yıkama Yöntemleri, Karşılaştırma, Oltu Kömürü

\* Corresponding author.

E-mail address: [ugur.demir@dpu.edu.tr](mailto:ugur.demir@dpu.edu.tr)

# Evaluation of different coal washability curves: Erzurum-Oltu coal sample

## Abstract

The demand for energy in the world and in our country is increasing exponentially every day, and traditional and alternative energy sources are used to meet this demand. Coal used to meet this demand. Coal, one of the traditional energy sources, provides one-quarter of the world's electrical energy production, despite causing environmental problems. The importance of coal, which has an important place in energy production, will continue in the future as it is today. Our country has significant coal reserves, and these reserves consist of low-quality lignite. For this reason, a large part of the coal production in our country is used in the production of electrical energy. The use of coals after washing minimizes possible environmental impacts. Coals have different washability properties due to the reasons arising from their formation. In this study, the washability properties of Erzurum-Oltu coals were examined using various coal washability curves (Float-sink tests, amount of floating material at +0.1 density, Washability degree (N), washability number (W), washability index (WI), near gravity material index (NGMI)) and obtained results were compared. For this purpose, float-sink tests were carried out on representative coal samples (-18, -18+1 and -1 mm) in heavy medium with a density of 1.3-2.0 g/cm<sup>3</sup> using ZnCl<sub>2</sub> in the laboratory, and the obtained data (amount and ash ratio) was used in drawing and calculating different washability curves. Almost all washability curves show that Erzurum-Oltu coals have the characteristics of being difficult to washability coals.

© 2023 DPU All rights reserved.

**Key Words:** Coal Washability Methods, Comparison, Oltu coal

## 1. Giriş

Günümüzde enerjiye olan talep, nüfus ve endüstriyel gelişmeye paralel olarak, sürekli artmaktadır [1]. Bu talebi karşılamak için fosil (petrol, doğalgaz ve kömür) ve alternatif enerji kaynakları (hidrolik, güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle vs.) kullanılmaktadır. Kömür, fosil kökenli bir enerji kaynağıdır ve enerji sektöründe hayati bir öneme sahiptir [2]. Diğer fosil yakıtlara göre ulaşılabilirliğinin kolay olması, stabil bir fiyata sahip olması, taşınması ve depolanmasının kolay olması ve son kullanıcı için düşük maliyetli olması nedeniyle kömür büyük bir öneme sahiptir [3]. Kömür, geçmişte olduğu gibi günümüzde ve hatta gelecekte de önemli olmaya devam edecektir [4]. Mevcut rezervler ve tüketim hızı dikkate alındığında kömürün önümüzdeki 200 yıl daha kullanılacağı ön görülmektedir [1].

Kömür, sedimanter organik bir kayaç olarak tanımlanır ve içeriğinde, kömür kalitesinin bozulmasına neden olan, çeşitli inorganik bileşikler bulunmaktadır. Kömürün tipi, rankı ve kül oranı, kömürün kalitesini belirler. Kömürün tipi ve rankı kömürün organik madde içeriği ile ilgili iken, kömürün kül oranı kömürde bulunan inorganik madde içeriği ile ilgilidir [2]. Kömürde bulunan kül ve kükürdün oranı, kömürün kullanım alanını belirleyen en önemli faktörlerdir. Yüksek kül ve kükürt oranı, kömür kullanımının her aşamasında ciddi operasyonel ve çevresel sorunlara neden olmaktadır [5]. Operasyonel ve çevresel sorun oluşturan kül ve kükürdün kömürden uzaklaştırılması, kömür zenginleştirme/yıkama olarak tanımlanmaktadır. Kömürün içerdiği organik ve inorganik maddeler arasındaki fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özellik farklılıklarından yararlanılarak zenginleştirme/yıkama işlemi gerçekleştirilmektedir [6]. Özellikle yoğunluk farkının ön plana çıktığı ve yerçekiminden de yararlanılan kömür zenginleştirme/yıkama teknikleri, çok yönlü ve düşük maliyetli olması nedeniyle yaygın olarak uygulanmaktadır. Kömürdeki organik ve inorganik içeriklerin birbirinden ayrılması (zenginleştirme/yıkama) ile elde edilen düşük kül ve/veya kükürt içerikli ürün, temiz kömür olarak tanımlanmaktadır [7].

Kömürlerin fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özellik farklılıklarından yararlanılarak geliştirilen çeşitli kömür yıkama teknikleri bulunmaktadır. Kömürde bulunan iri boyuttaki inorganik maddelerin etkili bir şekilde uzaklaştırılması, fiziksel kömür yıkama teknikleri ile mümkündür. Fiziksel kömür yıkama tekniklerinden jigler,

sallantılı masalar, spiraller ve ağır ortam ayırması gibi yoğunluk farkının ön plana çıktığı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [2,8].

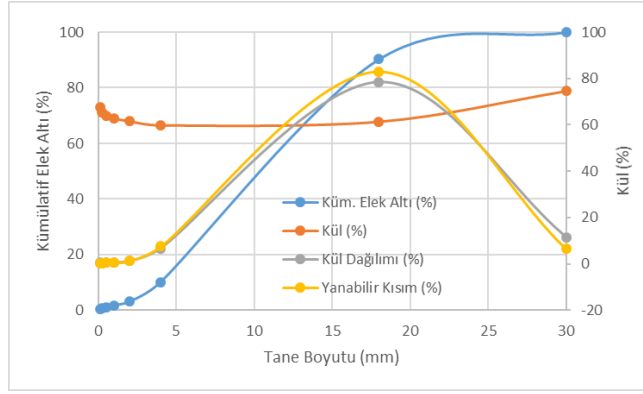
Kömürler oluşumlarından kaynaklanan nedenlerden dolayı farklı yıkanabilme özelliklerine sahiptirler. Kömürleri yıkanabilme özellikleri, kömürün tane boyutu, kül oranı, yüzen ve batan ürünlerin miktarı ve yakın yoğunluktaki malzeme miktarı gibi birçok parametreye bağlıdır [2,9]. En çok tercih edilen kömür yıkanabilme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntem yüzdürme-batırma testleridir [5]. Bu yöntemde 1,3-2,2 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ağır ortamlarda yüzdürme-batırma testleri uygulanarak, yüzen ve batan ürünlerin miktar ve kül oranları belirlenmekte, bu verilerden yararlanarak yıkanabilirlik eğrileri çizilmektedir [6]. Henry Rheinhard (HR) ve Mayer (M) kömür yıkama eğrileri en çok bilinen ve kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlere ilave olarak Sarkar vd. (1962) [10] tarafından geliştirilen Yıkanabilirlik Derecesi (N), yine Sarkar vd. (1977) [11] tarafından geliştirilen Yıkanabilirlik Sayısı (W), Govindarajan ve Rao (1994) [12] tarafından geliştirilen Yıkanabilirlik İndeksi (WI ve GWI) ve Majumder ve Barnwal (2004) [13] tarafından geliştirilen Yakın Yoğunluklu Malzeme İndeksi (NGMI) gibi yeni yaklaşımlar kullanılarak, kömür yıkanabilirliğinin daha iyi anlaşılması sağlanmıştır, geliştirilen bu yöntemlere ilişkin ayrıntılı bilgilere [2,9,13- 16] nolu kaynaklardan ulaşabilmek mümkündür. Korkmaz vd. (2015), Korkmaz ve Bentli (2017), (2018a), (2018b) [9,13,14,15] Malatya-Erguvan, Kahramanmaraş-Elbistan ve Sivas-Kangal kömürlerinin yıkanabilirlik özelliklerini farklı yıkama eğrilerin kullanarak değerlendirmişler, yıkanabilirlik eğrileri arasında farklı sonuçların elde edildiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, Erzurum-Oltu kömürleri 1,3-2,0 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ağır ortamlarda yüzdürme-batırma testlerine tabi tutulmuş, elde edilen deneysel veriler kullanılarak Henry Rheinhard (HR), Mayer (M), Yıkanabilirlik Derecesi (N), Yıkabilirlik Sayısı (W), Yıkanabilirlik İndeksi (WI) ve Yakın Yoğunluklu Malzeme İndeksi (NGMI) hesaplanmış ve yıkanabilirlik eğrileri çizilmiştir. Bu hesaplamalar sonucu elde edilen verilerden yararlanarak kömürün yıkanabilirlik özellikleri belirlenmiş, farklı yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıklar ve benzerlikler ortaya konulmuştur.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan kömür numuneleri Erzurum-Oltu ilçesinde faaliyet gösteren özel bir firmadan temin edilmiştir. Yaklaşık 250 kg olarak alınan ince boyutlu temsili kömür numunesi (-18 mm) üzerinde kömürün özelliklerinin belirlenmesi amacıyla önce azaltılmış daha sonra elek analizi yapılmıştır. Akabinde kül, nem, kükürt ve ısı değer analizleri standartlarda (ASTM D1412, D3173, D3174, D3175) belirtildiği şekilde kuru bazda gerçekleştirilmiştir. Elek analiz sonuçları Şekil 1’de verilirken kısa analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Yapılan elek analizi sonuçları incelendiğinde tüvenan kömürün %90,28’inin 18 mm altında olduğu tespit edilmiştir. %62,67 oranında kül içeriğine sahip olan kömür, tane boyutu ile kül içeriği arasındaki ilişki incelendiğinde, boyut grupları arasında belirgin kül oranı farklılığının bulunmadığı tespit edilmiştir (Şekil 1). Bu durum hem kömür içinde serbest killi yapıların olduğunu hem de kömür içinde killi yapıların nispeten homojen bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Tüvenan kömür kül dağılım oranı ve yanabilir kısım oranları tane boyutuna göre incelendiğinde nispeten iri boyutlarda daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Erzurum-Oltu Kömürleri Elek Altı Oranı ve Kül Oranı eğrileri

Tablo 1: Oltu Kömürünün Kısa Analizi

| İçerik               | %     |
|----------------------|-------|
| Kül                  | 62,67 |
| Nem                  | 22,65 |
| Kükürt               | 1,84  |
| Isıl Değer (Kcal/kg) | 1450  |

Jeolojik olarak bölge incelendiğinde Erzurum-Oltu-Narman havzası Permo-Karbonifer, üst Kratese, Tersiyer ve Kuvarterner yaşlı kaya birimleri yüzeylenmektedir. Permo-karbonifer yaşlı kayalar asidik magmatiklerden oluşmakta iken üst Kratese ise volkano-tortul bir fasiyeste gelişmiştir, bu iki birim tersiyer havzasının temelini oluşturmaktadır. Havza içinde ise tabanda alt-orta Eosen yaşlı iri ve ince kırıntılar ile üst Eosen yaşlı volkano-tortul sığ denizel istifler yüzeylenmektedir. Bunlar üzerine Oligosen, Oligo-miyosen yaşlı değişik boyutlu ve volkanit ara katkılı karasal ve gölsel istifler uyumsuzluklarla gelmektedir. En üstte ise Tersiyer sonu-Kuvarterner başı aralığında gelişmiş volkanitler havza dolgu kayalarını uyumsuzlukla örtmektedir [17]. Tuncalı ve arkadaşları [18] Erzurum-Oltu kömürleri ile yapmış oldukları çalışmada, Oltu kömürlerinin yüksek oranda inorganic madde içerdiği, yaptıkları minerolojik analiz sonucu önemli oranda Kuvars, Pirit, Kalsit az miktarda da Kaolinit, Simektit grubu kil ve jips içerdiğini ifade etmişlerdir. Yaptıkları yüzdürme-batırma test sonuçlarından zor yıkanabilir kömür özelliği taşıdığını ifade etmişlerdir [18].

## 2.2. Yöntem

Elek analiz verileri incelendiğinden temsili kömür numunesinin büyük bir bölümü (%90,28'i) 18 mm boyutun altındadır, az miktarda da olsa -1 mm altıda üründe söz konusudur. Bu nedenle deneysel çalışmalarda kullanılan temsili kömür numunesi -18+1 ve -1 mm olarak sınıflandırılmıştır. -18, -18+1 ve -1 mm boyut grupları ayrı ayrı yüzdürme batırma testine tabi tutulmuştur. 1,3-2,0 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ağır ortamlar ZnCl<sub>2</sub> kullanılarak oluşturulmuştur. Boyut gruplarına yüzdürme-batırma testleri standartlarda belirtildiği şekilde uygulanmıştır. 1,3-2,0 gr/cm<sup>3</sup> ağır ortam yoğunluklarında yüzen ve batan ürünler ayrı ayrı alınmış, yüzeylerindeki ağır ortam yıkanarak uzaklaştırılmış, laboratuvar ortamında kurutulmuştur. Kurutulan kömür numunelerinin ağırlıkları tartılmış ve kül oranları tespit edilmiştir. Tüm hesaplamalar literatürde belirtilen şekilde yapılmıştır [18]. Elde edilen veriler tüm kömür yıkanabilirlik eğrileri ve indekslerinin hesaplanmasında (Henry Rheinhard (HR), Mayer (M), Yıkanabilirlik Derecesi (N), Yıkabilirlik Sayısı (W), Yıkanabilirlik İndeksi (WI), Yakın Yoğunluklu Malzeme İndeksi (NGMI))

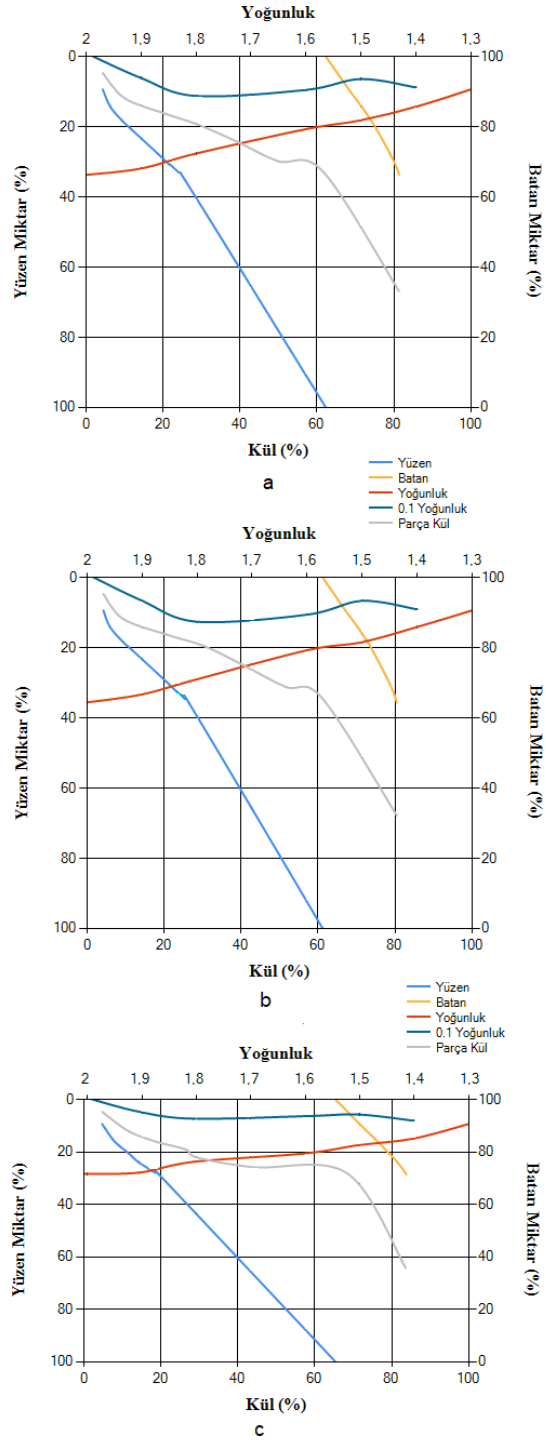
kullanılmıştır. Kömür yıkanabilirlik eğrileri ve indeksleri hakkında kısa bilgiler sonuçlar bölümünde verilmiş, ayrıntılı bilgilere [2,5,9,13,15] nolu kaynaklardan ulaşılabilmektedir.

### 3. Sonuçlar

#### 3.1. Henry Rheinhard (HR) Kömür Yıkama Eğrileri:

Kömür yıkanabilirlik özelliklerinin belirlenmesinde en sık kullanılan yöntem olan Henry Rheinhard yıkanabilirlik eğrileri, hem eğrilerin diklik ve eğiklik durumu dikkate alınarak hem de  $\pm 0,1$  yoğunluklu malzeme (yakın yoğunluktaki malzeme) miktarları dikkate alınarak kömürün kolay veya zor yıkanabilirliği hakkında bilgi vermektedir. Yüzen ve batan eğrileri y eksenini boyunca ne kadar dik bir şekil alırsa ve yataya ne kadar keskin bir dönüş yaparsa, kömür yıkanabilirliğinin o denli kolay olduğu belirtilirken, eğri yataya ne kadar geniş bir şekilde dönerse kömürün yıkanabilirliğinin o denli zor olduğu belirtilmektedir.  $\pm 0,1$  yoğunluklu malzeme miktarı (yakın yoğunluklu)

% 0-7 arasında ise kömürün yıkanabilirliği oldukça kolay, %7-10 arasında kolay-zor, %10-15 arasında zor, %15-20 arasında oldukça zor, %20-25 arası çok zor ve %25'den daha fazla olması durumunda kömür yıkamanın ağır ortamla mümkün olamayacağı ifade edilmektedir [19]. Tüvenan (-18), -18+1 ve -1 mm boyutların yüzdürme-batırma (HR) eğrileri sırasıyla Şekil 2a, 2b ve 2c'de verilmiştir.



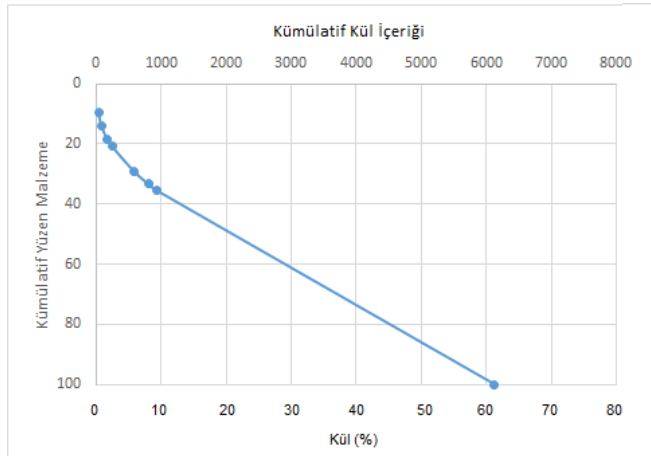
Şekil 2. -18 mm (a), -18+1 mm (b) ve -1 mm (c) boyutlarındaki kömür yıkama eğrileri.

Şekil 2a, 2b ve 2c incelendiğinde, Erzurum-Oltu kömürlerinden tüvenan ve -18+1 mm boyutta  $\pm 0,1$  yoğunluklu malzeme miktarının %10-15 arasında olduğu, -1 mm boyutta ise %5-10 arasında değişen değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler -18+1 mm boyuttaki kömürlerin oldukça zor-zor yıkanabilir nitelikte olduğunu, -1 mm kömürlerin ise kolay-zor (orta) yıkanabilir nitelikte olduğunu göstermektedir. Bu çalışma ile elde edilen bu sonuçların diğer yıkanabilirlik indeksleri ile uyumlu olup olmadıkları değerlendirilmiştir. Tüvenan ve -18+1 mm boyut gruplarından elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakın olduğu için çalışmanın ilerleyen bölümlerinde sadece -18+1 mm ve -1 mm boyut gruplarının sonuçları kullanılmıştır.

1,6 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta -18+1 mm boyutlu kömürde yapılacak olan bir yıkama işleminde %20,7 oranında temiz kömür %11,75 kül oranı ile elde edilebildiği, yanabilir verimin ise %47,13 seviyelerinde kaldığı tespit edilmiştir. -1 mm boyutlu kömür 1,6 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ortamda yıkama işlemine tabi tutulduğunda ise %20,5 oranında temiz kömür %11,72 kül oranı ile elde edilmekte, buna karşılık yanabilir verimin ise %52,51 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Her iki boyutta oldukça düşük kül içerikli kömürler elde edilebilmekte fakat yanabilir verimler oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu sonuçlar Erzurum-Oltu kömürlerinin hem yanabilir verim hem de  $\pm 0,1$  yoğunluklu malzeme miktarları incelendiğinde düşük yoğunluklarda (1,4 ve 1,5 gr/cm<sup>3</sup>) zor yıkanabilir olduğunu, yüksek yoğunluklarda (>1,6 gr/cm<sup>3</sup>) daha kolay yıkanabileceğini göstermektedir. 1,6 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluk yöre kömürlerinin yıkanması için en uygun yoğunluk olarak belirlenmiştir. Tuncalı ve arkadaşlarının [18] Erzurum-Oltu kömürleri ile yapmış oldukları çalışmadan elde ettikleri sonuçlara uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

### 3.2. Mayer Eğrileri (M):

Üç ürünlü yıkama sonuçlarının tek bir eğri üzerinden değerlendirilebilmesi bakımından Mayer Eğrileri, Henry Rheinhard eğrilerine kıyasla daha pratik sonuçlar vermektedir. Kömürlerin harmanlanarak yıkanması durumunda oluşabilecek sonuçların tahmin edilmesinde Mayer Eğrileri avantaj sağlamaktadır. Mayer eğrileri ile ilgili ayrıntılı bilgilere [16] ve [19] nolu kaynaklardan ulaşılabilir. Erzurum-Oltu kömürlerinin yüzdürme-batırma test sonuçları dikkate alınarak çizilen Mayer eğrisi Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Oltu kömürlerinin Mayer eğrisi.

Mayer eğrisinin dik olması kül içeriğinin düşük olduğunu belirtirken, Şekil 3’de görüldüğü gibi eğrinin yatık olması kömürün kül oranının yüksek olduğunu (%62,67) göstermektedir. Bu durum tane boyutuna bağlı olarak kömürün kül içeriğinde önemli bir değişimin olmadığını bir kanıtı şeklindedir. Ayrıca eğrinin sağa doğru ötelenmesi serbest kayaç olduğunu gösterirken, eğrinin geniş bir yay çizmesi kömürün heterojen bir yapıya sahip olduğunu belirtmektedir [19]. Şekil 1’de tane boyutuna bağlı olarak kül oranında belirgin bir değişimin gözlenmemesi, kül oluşturan mineral

maddelerin kömür içerisinde nisbeten eşit olarak dağılması, kömürün yıkanabilirliğinin zor olduğunu göstermektedir. Henry Rheinhard eğrisinde elde edilen sonuçlara benzer şekilde 1,6 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yapılan yıkama işlemi sonucunda %21 oranında elde edilen temiz kömür %11,5 oranında kül içermektedir. 1,8 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta ikinci kademe yıkama işlemi yapılırsa %12,58 oranında %50,28 kül içeriğine sahip ara ürün ve %66,72 oranında %78,08 küllü atık elde edilebileceği Mayer eğrisinden (Şekil 3) belirlenebilmektedir. Elde edilen bu sonuçlar ve eğrinin durumu HR eğrilerinde olduğu gibi Erzurum-Oltu kömürlerinin zor yıkanabilir karakterde olduğunu göstermektedir.

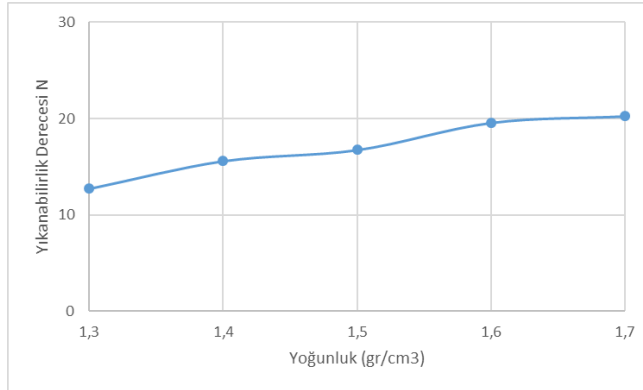
### 3.3. Yıkanabilirlik Derecesi (N):

Sarkar vd. (1962) [10] tarafından geliştirilen yıkanabilirlik derecesi (N) denklem 1'e göre hesaplanmaktadır.

$$N = w(a - b)/b \quad (1)$$

Burada a: tüvenan kömür kül oranı (%), b: belirtilen yoğunlukta temiz kömür kül oranı (%), w: belirtilen yoğunlukta temiz kömürün miktarı (%)'dır.

Hesaplanan N değeri ne kadar yüksek ise kömürün yıkanabilme kabiliyeti de artmaktadır. N değeri ile kömür ile birlikte bulunan mineral maddelerin jeolojik oluşum şartları hakkında da bilgiye sahip olmak mümkündür, saikin jeolojik ortamda oluşan kömür damarları daha az mineral madde içerirken, hareketli jeolojik ortamlarda oluşan kömür damarlarının daha yüksek oranda mineral madde içerdiği belirtilmektedir [2,14,15]. Oltu kömürleri için hesaplanan N değerleri ile yoğunluk arasındaki ilişki Şekil 4'de verilmektedir. Oltu kömürlerinde 1,6 ve 1,7 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklarında hesaplanan N değeri 20'nin biraz üzerindedir ve yöre kömürlerinin zor yıkanabilir özellikte olduğuna işaret etmektedir. Bu değer Korkmaz ve Bentli (2018) [14]'nin çalışmalarındaki veriler ile kıyaslandığında düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu sonuç çalışmanın önceki kömür yıkama eğrilerinde elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğunu yani Erzurum-Oltu kömürlerinin zor yıkanabilir kömür sınıfına dahil olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Yıkanabilirlik Derecesi (N) ve yoğunluk arasındaki ilişki.

### 3.4. Yıkanabilme Sayısı (W):

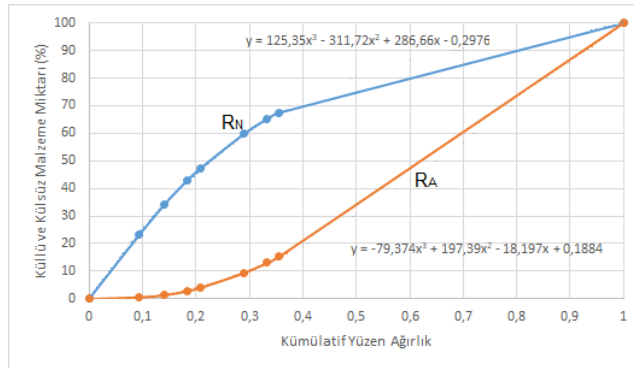
Sarkar vd. (1977) [11] tarafından geliştirilen Yıkanabilme Sayısı (W) en uygun seviyede yıkanabilirlik derecesinin ( $N_{opt}$ ) temiz kömür külüne ( $b_{opt}$ ) oranı ile hesaplanmaktadır (Denklemler 2). Bu sayı (W) 0 ile 100 arasında olan bir değerdir ve değer 100'e yaklaştıkça kömürün yıkanabilirliğinin arttığı/kolaylaştığı belirtilmektedir.

$$W = \frac{10(N_{opt})}{b_{opt}} \quad (2)$$

Yapılan hesaplama sonucunda  $1,6 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluktaki W değeri Erzurum-Oltu tüvenan kömürü için 14,24 olarak belirlenmiştir, bu değer 0-100 arasında ve 0 değerine daha yakın olması nedeniyle oldukça zor yıkanabilir kömür özelliği taşıdığını göstermektedir. Hesaplanan W değeri Henry Rheinland ve Mayer eğrilerinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında, benzer şekilde zor yıkanabilir özellikte bir kömür olduğu görülmektedir.

### 3.5. Yıkanabilme İndeksi (WI):

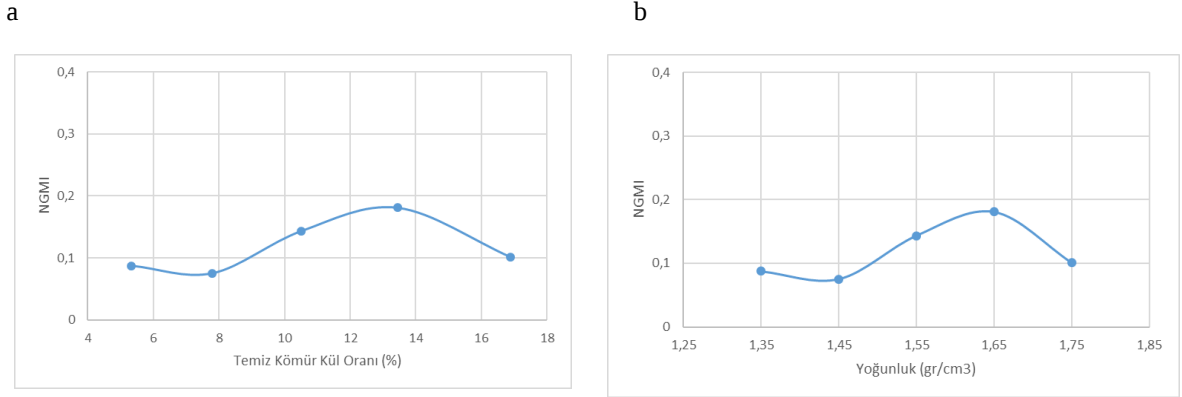
Yıkanabilirlik İndeksi (WI), Govindarajan Yıkanabilirlik Endeksi (GWI) olarak da bilinmektedir. WI değerinin 0 ile 100 arasında bir değer olması gerektiği ve bu değer 0'dan 100'e doğru arttıkça zor yıkanabilen kömürden kolay yıkabilen kömüre doğru değiştiği belirtilmektedir [12]. Yıkanabilirlik İndeksi (WI) [2,9,13,15] nolu kaynaklarda bulunan denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Erzurum-Oltu kömürleri için yapılan hesaplamalar sonucu Şekil 5'de görülen Küllü ( $R_N$ ) ve Külsüz ( $R_A$ ) malzeme miktarı eğrileri çizilmiş, bu eğrilerin denklemlerinden yararlanarak WI değeri 45,98 olarak hesaplanmıştır. Bu değer belirtilen değerlerin hemen hemen ortalarına yakın olması Erzurum-Oltu kömürlerinin, diğer eğrilerde olduğu gibi kolay yıkanabilir özellikte olmadığını teyit etmektedir.



Şekil 5. Erzurum-Oltu kömürlerinin küllü ve külsüz malzeme verimleri eğrisi

### 3.6. Yakın Yoğunlukla Malzeme İndeksi (NGMI):

Yakın yoğunluktaki malzeme miktarı dikkate alınarak geliştirilen bu yöntemde hesaplanan değer 0 ile 1 arasında olması gerekmektedir. Değer sıfıra yakın ise kolay yıkanabilir, 1'e yakın ise zor yıkanabilir kömür olarak tanımlanmaktadır [5,13]. [2,5,9,13,15] nolu kaynaklarda bu değer nasıl hesaplandığına dair ayrıntılı bilgi yer almaktadır. Erzurum-Oltu kömürleri için NGMI değeri 0,18 olarak hesaplanmış, 0'a daha yakın olması nedeni ile kömürün diğer indekslerden farklı olarak nisbeten kolay-orta yıkanabilme özelliği olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Erzurum-Oltu kömürlerinin NGMI-temiz kömür kül oranı (a) ve NGMI-yoğunluk (b) arasındaki

ilişki NGMI-yoğunluk ve NGMI-temiz kömür kül oranı değerlerinden yararlanılarak Şekil 6a ve 6b'deki

tüvenan kömür

(-18 mm) için eğriler çizilmiştir. Şekil 6b'de görüldüğü gibi 1,65 gr/cm<sup>3</sup> de en yüksek NGMI değeri elde edilmiştir. Bu yoğunlukta elde edilen temiz kömürün kül oranı %12 seviyelerinde iken yapılan hesaplamalarda yaklaşık %52 yanabilir verim ile elde edilebilmektedir (Şekil 6a). Şekil 6b'de en düşük NGMI değeri en düşük yoğunluk olan 1,35- 1,45 gr/cm<sup>3</sup> değerlerinde elde edilmiş, bu durum Erzurum-Oltu kömürlerinin belirtilen yoğunluklarda yıkanması gerektiğini göstermektedir.

## 4. Sonuçlar ve Öneriler

Kömürlerin yıkanabilirlik özelliklerinin belirlenmesi, hem kömür yıkama tesislerinin tasarımında hem de kömür kullanım şartlarının belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada Erzurum-Oltu kömürlerinin yıkanabilirlik özellikleri farklı yıkanabilirlik eğriler (Henry Rheinhard, Mayer, Yıkanabilirlik Derecesi, Yıkanabilme Sayısı, Yıkanabilme İndeksi, Yakın Yoğunluklu Malzeme İndeksi) kullanılarak belirlenmeye çalışılmış, yöntemler arasındaki farklılıklar ve benzerlikler ortaya konulmuştur.

İlk olarak Erzurum-Oltu kömürü kısa analiz ile %62,67 kül, %22,65 nem, %1,84 kükürt içerdiği ve 1450 kcal/kg ısı değere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu analiz sonuçları yöre kömürlerinin oldukça düşük kaliteli olduğunu göstermektedir. Kömür numunesi boyut gruplarına ayrılmış (-18+1 ve -1 mm) ve 1,3-2,0 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluk arasındaki ortamlarda yüzdürme-batırma testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonucunda yüzen ve batan ürünlerin miktar ve kül oranları belirlenmiştir. Tüm yıkanabilirlik eğrilerinde bu yüzdürme-batırma testleri sonucu elde edilen veriler kullanılmış, kömürlerin yıkanabilirlik özellikleri (kolay veya zor) tespit edilmiştir.

Çizilen Henry Reinhard eğrileri incelendiğinde, yöre kömürleri için en uygun ayırma yoğunluğunun 1,6 gr/cm<sup>3</sup> olduğu tespit edilmiştir. 1,6 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta  $\pm$  0,1 yoğunluklu malzeme miktarı -18, -18+1 ve -1 mm boyut grupları için değerlendirildiğinde, sırasıyla %12-18 arasında oldukça zor yıkanabilen, %10-15 arasında zor yıkanabilen ve %8- 12 kolay-zor (orta) yıkanabilen kömürler olduğu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca benzer sonuçlar yüzen ve batan eğrilerinin konumları dikkate alınarak da söylenebilir. -18 ve -18+1 mm boyut

gruplarından elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakın olduğu için ilerleyen bölümlerinde sadece -18+1 mm ve -1 mm boyut gruplarının sonuçları değerlendirilmiştir.

Mayer eğrisi üzerinde yapılan değerlendirmeler, eğrinin dikliği ve yatıklığı dikkate alındığında, Erzurum-Oltu kömürünün (-18 mm) kül oranının yüksek olması ve mineral maddelerin kömür bünyesinde homojen bir şekilde dağılmış olması sebebiyle, yöre kömürlerinin oldukça zor yıkanabilir özelliğe sahip olduğu belirlenmiştir.

Erzurum-Oltu kömürlerinin Yıkanabilirlik derecesi (N) hesaplanmış ve 20,6 olarak belirlenmiştir. N değerinin, 100'e yaklaştıkça yıkanabilirlik özelliğinin arttığı dikkate alındığında, N değerinin 100'den oldukça küçük olmasından dolayı Oltu kömürlerinin oldukça zor yıkanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan hesaplama sonucunda Yıkanabilirlik sayısı (W), 1,6 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluk için 14,24 olarak belirlenmiştir. Erzurum-Oltu tüvenan kömürü için W değerinin 0-100 arasında olması gerektiği ve 100'e yaklaştıkça yıkanabilme özelliğinin arttığı dikkate alındığında, Oltu kömürlerinin zor yıkanabilir özellikte olduğu söylenebilir.

Yıkanabilirlik indeksi (WI) çizilen eğriler ve yapılan hesaplamalar sonucu 45,98 olduğu belirlenmiştir. 0-100 arasında olması beklenen WI değerinin 100 yakın olması yıkanabilirliğin kolay olduğunu ifade etmektedir. Elde edilen yıkanabilirlik indeksinin ortalama bir değere sahip olması, yöre kömürlerinin yine kolay yıkanabilir özellikte olmadığı sonucunu ortaya koymaktadır.

Erzurum-Oltu kömürleri için Yakın Yoğunluklu Malzeme İndeksi (NGMI), yapılan hesaplamalar sonucu 0,18 olarak tespit edilmiştir. 0-1 arasında olması gereken değer 0'a daha yakın olması, bu kömürün diğer yöntemlerden farklı olarak kolay-orta yıkanabilme özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Tüm yıkanabilme eğrilerinin sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde, hemen hemen tüm yöntemlerde (NGMI dışında) Erzurum-Oltu kömürlerinin oldukça zor ve zor yıkanabilir bir özellik taşıdığı görülmektedir. Bu durum yapılan elek analizi ve boyuta bağlı kül analiz sonuçlarında da görüldüğü gibi, kül oluşturan mineral maddelerin tüm boyutlarda benzer oranlarda ve kül yapıcı mineral maddelerin kömür içerisinde neredeyse homojen olarak bulunmasından kaynaklanmaktadır. Kömür içerisinde mineral madde miktarının bu şekilde bulunması, kömürün yataklanması sırasında havzanın oldukça sarsıntılı bir jeolojik süreçten geçtiği konusunda bilgi vermektedir.

## Teşekkür

Deneyisel çalışmalarda kullanılan numunenin temininde yardımcı olan Maden Mühendisi Onur Umar'a teşekkür ederim.

## Kaynaklar

- [1] G. Ateşok, "Kömür Hazırlama ve Teknolojisi", *Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları*, İstanbul, 376 s. 2009
- [2] G.G. Sarkar, R.N. Bose, S.K. Mitra, A. Lahiri, "An index for the comparison and correlation of washability characteristics of coal". *IVth Coal Preparation Congress*, Harrogate, paper E 4. 1962
- [3] G.G. Sarkar, H.P. Das, A. Ghose, "Sedimentation patterns: do they offer clues to coal quality?" *World Coal*, 10-13. 1977
- [4] B. Govindarajan, T.C. Rao, "Indexing the washability characteristics of coal" *International Journal of Mineral Processing* 42, 285-293. 1994
- [5] A.K. Majumder, J.P. Barnwal "Development of a new washability index" *Minerals Engineering* 17, 93-96, 2004
- [6] M. O. Kangal, M. Özer, F. Burat, S. Akın "Evaluation of thrace ragion fine coal tailings" *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 157, 207-215 2018
- [7] J. Sokolovic, I. Ilic, M. Trumic, G. Bogdanovic, Z. Stirbanovic, "Determination of washability characteristics of anthracite coal by index of washability and near gravity material index – a case study" *International Journal of Coal Preparation And Utilization*, DOI: 10.1080/19392699.2023.2210501, 2023
- [8] U. Demir, "Kömürden inorganik kükürt ve kül uzaklaştırmada Knelson konsantratör çalışma parametrelerinin etkisi" *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sayı: 14, 35-47, 2018
- [9] A., A. Korkmaz, İ. Bentli, H. Sis, "Malatya-Arguvan Linyitlerinin Gravite Yöntemleriyle Zenginleştirilmesi" *Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Bildiriler Kitabı*, 676-681, 14-17 Nisan 2015
- [10] S. Bothoko, Q. P. Campbell, M. Roux, F. Nakhaei, "Washability Analysis of Coal Using RhoVol: A Novel 3D Image-based Method" *Mineral Processing And Extractive Metallurgy Review*, vol: 44, No: 2, 125-137, 2023

- [11] W. Adinugraha, N. Sulaksana, Herdarnawan, B. Santoso, D., F. Umar, F. Amalia, "Washing test of Kendilo coal using a sink-float method to improve its quality" *Indonesian Mining Journal*, Vol: 21, No:1, 35-44, 2018
- [12] E. Hosseini, "Fine coal washability determination using image analysis" *The University of New South Wales*, Thesis of pHD, Australia, 1996
- [13] A. A. Korkmaz, İ. Bentli, "Determination of washability characteristics of Arguvan- Malatya lignite by different washability index methods" *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, Vol: 39, No:14, 1572-1580, 2017
- [14] A. A. Korkmaz, İ. Bentli "Elbistan linyitlerinin ağır ortam yöntemi ile yıkanabilirlik indekslerinin belirlenmesi" *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol:21, No: 4, 295-304, 2018a
- [15] A. Korkmaz, İ. Bentli, "Assessment of washability features of Kangal lignite by using different indexes" *International Conference on Innovative Engineering Applications*, CIEA 2018, Proceeding Book, 126-133, 2018b
- [16] A. I. A. Salama, "Coal washability characteristics index utilizing the M-curve and the CM-curve" *International Journal of Mineral Processing*, Vol: 55, 139-152, 1998
- [17] C. Bozkuş, "Oltu-Narman tersiyer havzası kuzeydoğusunun (Kömürlü) stratigrafisi" *Türkiye Jeoloji Bülteni*, vol: 33, 47-56, 1990
- [18] E. Tuncalı, B. Çiftci, N. Yavuz, S. Toprak, A. Köker, Z. Gencer, H. Ayçık, N. Şahin, "Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri" *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) yayınları*, 2002
- [19] M. Kemal, V. Arslan, "Kömür Teknolojisi (Genişletilmiş 3. Baskı)", *DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları* No: 33, 97-105, 1999