



## KÖMÜRDEN İNORGANİK KÜKÜRT VE KÜL UZAKLAŞTIRMADA KNELSON KONSANTRATOR ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Uğur DEMİR<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, [ugur.demir@dpu.edu.tr](mailto:ugur.demir@dpu.edu.tr),

*Geliş Tarihi (Received Date): 23.05.2018*

*Kabul Tarihi (Accepted Date): 25.06.2018*

### ÖZ

Özellikle çok ince boyutlarda serbestleşen altın kazanımı için geliştirilen Knelson Konsantratör, son zamanlarda birçok cevherin zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır. Knelson konsantratör santrifüj kuvvet ve yoğunluk farkından yararlanarak ayırma yapan bir cihazdır. Bu çalışmada, kömürde bulunan ve çevresel sorunlara neden olan çok ince boyutta serbestleşen kükürt ve kül oluşturan mineral maddenin uzaklaştırılmasında Knelson Konsantratör kullanılmıştır. Knelson Konsantratör çalışma parametrelerinin (santrifüj kuvvet, su debisi ve tane boyutu) inorganik kükürt ve kül uzaklaştırmaya olan etkileri araştırılmıştır. Hem inorganik kükürt hem de kül uzaklaştırmada etkili olduğu belirlenmiştir. %7,06 toplam kükürt içeren kömürden (%3,55 inorganik kükürt bulunmakta), kükürdün %15,02'si, külün ise %19,45'i uzaklaştırılarak %58,16 yanabilir verimle temiz kömür (90 G santrifüj kuvvet, 1,6 lt/dak su debisi, 0,150 mm tane boyutu çalışma koşullarında) elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** *Kömür, Kükürt uzaklaştırma, kül uzaklaştırma, Knelson Konsantratör, çalışma parametresi*

### EFFECT OF KNELSON CONCENTRATOR OPERATION PARAMETERS ON COAL DESULFURIZATION AND DEASHING

#### ABSTRACT

The Knelson Concentrator, developed especially for finer-sized gold recovery, has recently been used to enrich many ores. The Knelson concentrator is a device that separates by utilizing centrifugal force and density. In this study, a Knelson Concentrator was used to remove sulfur and ash forming mineral matter in coal, which is very fine in size and causes environmental problems. The effects of Knelson Concentrator operating parameters (centrifugal force, water flow and grain size) on inorganic sulfur and ash removal were investigated. Both inorganic sulfur and ash were determined to be effective in removing. % 7.06 total sulfur containing coal (3.55% inorganic sulfur), sulphurane 15.02% and ash 19.45% were removed 58.16% with combustible yields (90 G centrifugal force, 1.6 lt/min water flow and 0.150 mm particle size).

**Keywords:** *Coal, Desulfurization, Deashing, Knelson Concentrator, Operation parameters*

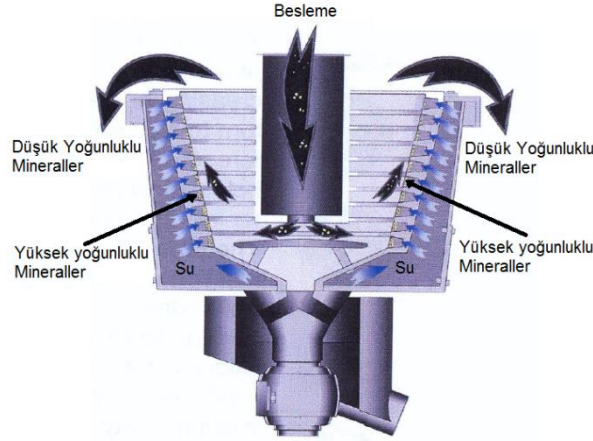
## 1. GİRİŞ

Kömür dünyadaki en önemli enerji hammaddelerinden birisidir. Dünya birincil enerji üretiminin %81,4'ü fosil yakıtlarda %28,1'i ise kömürden elde edilmektedir [1]. Kömür rezervlerinin dünya genelinde yaygın olarak bulunması, geçmişte olduğu gibi gelecekte de kömürün enerji hammaddesi olarak önemini koruyacağını göstermektedir. Kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan kükürt oksitler, azot oksitler, partikül maddeler ve hidrojen sülfidler gibi kirleticilerin herhangi bir önlem alınmadan atmosfere salınmaları, [2-5] başta hava kirliliği, asit yağmurları ve sera etkisi gibi çok ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır.

Bu çevresel sorunların ana kaynaklarından biri kömürde bulunan kükürttür ve kömürde, organik ve inorganik formlarda olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. İnorganik kükürt genel olarak iki ana formda disülfidler (pirit ve markasit) ve sülfatlar (kalsiyum, demir ve baryum sülfat) şeklinde, organik kükürt ise kömürün organik yapısı (matriksi) ile doğrudan bağ yapmış şekilde tioller, sülfidler, disülfidler, tiofenler ve siklik sülfidler şeklinde kendini göstermektedir [2,5-7]. Organik kükürt oranı toplam kükürt içerisinde %50 civarında bulunuyor ise fiziksel yöntemler ile kükürdün uzaklaştırılması mümkün görülmemektedir. Organik kükürdün uzaklaştırılabilmesi için kimyasal yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Fakat kimyasal kükürt uzaklaştırma yöntemleri bugünkü ekonomik koşullarda uygulanabilirliği mümkün değildir. Benzer şekilde kömür içerisinde çok ince boyutlarda dağılmış olan inorganik kükürt ve mineral maddelerin uzaklaştırılması da gravite esaslı ayırma yöntemlerini kısıtlamaktadır [5,6].

Özellikle ince boyutlarda serbestleşen minerallerin yoğunluk farkından yararlanarak yapılan ayırma işlemlerinde, çökelme hızlarının çok yavaş olmaları nedeniyle oldukça uzun zaman almaktadır. Bu durum kullanılan ekipmanın hem ayırma kapasitesini hem de verimini düşürmektedir. Çökelme hızını arttırmak ve böylece daha etkin bir ayırmanın yapılabilmesi amacıyla santrifüj kuvvetten yararlanan birçok cihaz geliştirilmiştir. Bu cihazların arasında Knelson konsantratör, Falcon konsantratör, Altar jigi, Kelsey jigi ve MGS bulunmaktadır. Bu cihazlar ince ve ultra ince tanelerin zenginleştirilmesinde ve kömürün temizlenmesinde son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [8,15].

Knelson konsantratör özellikle ince boyutta serbestleşen altın kazanımında kullanılan, gravite esaslı ayırıcılarından birisidir. Yoğunluk farkı ve santrifüj kuvvetin etkin bir şekilde kullanıldığı bu cihazlarda çeşitli boyut, şekil ve yoğunluktaki minerallerin etkin bir şekilde ayrılabilirdiği belirtilmektedir [11,16,17]. Şekil 1 de Knelson konsantratörün şematik gösterimi bulunmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi dik, içinde olukların bulunduğu ayırma konisi dikey eksen boyunca çok hızlı bir şekilde dönebilmektedir. Bu ayırma konisinin iç kısmında ayırmanın gerçekleştiği oluklar bulunmaktadır. Belirli bir katı konsantrasyonuna sahip olan ayrılacak malzeme, bir besleme borusu yardımıyla ayırma konisinin tabanından verilmektedir. Ayırma konisi içerisinde oluşan santrifüj kuvvet tanelerin kademelere birikmesine neden olmaktadır. Ayırma konisi içindeki kademelerden koni içerisine verilen belirli bir debide su hem ayırma konisi içerisinden aşağıdan yukarı doğru hareket eden akışkan bir tabakanın oluşmasına hem de kademeler arasında birikmiş olan düşük yoğunluğa sahip minerallerin akışkan tabakaya taşınarak sistemi taşarak terk etmesini sağlamaktadır. Yoğunluğu yüksek olan mineraller ise yüksek santrifüj kuvvetin etkisi ile ayırma konisi içindeki oluklar arasında birikmektedir. Her bir olukdan sistem içerisine verilen su, oluklar içinde birikmiş yüksek yoğunluklu minerallerin arasında sıkışmış halde bulunan düşük yoğunluklu minerallerin de akışkan tabakaya karışarak sistemden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır [11,16,18,19]. Knelson konsantratörde ayırma performansına santrifüj kuvvet, su debisi, tane boyutu, besleme hızı ve katı konsantrasyonu gibi çalışma parametreleri etkili olmaktadır.



Şekil 1. Knelson Konsantratör şematik gösterimi [20].

İnce kömürlerin zenginleştirilmesinde (kükürt ve kül uzaklaştırmada), eğer yüzebilirlik özelliği uygun ise, genellikle flotasyon yöntemi kullanılmaktadır. Flotasyon yöntemi, kömür gerekli özellikleri taşıyorsa, ince kömürlerin zenginleştirilmesinde etkin bir yöntem olmasına karşın kullanılan flotasyon kimyasalları hem maliyet açısından hem de çevresel etkiler açısından olumsuzluklar taşımaktadır. Santrifüj kuvvetten yararlanan fiziksel yöntemler ince kömürlerin zenginleştirilmesinde alternatif olma yolunda ilerlemektedir [16,21,22]. İnce kömürlerin zenginleştirilmesinde bu cihazların kullanıldığı birçok çalışma bulunmakta ve bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir. Paul ve Honaker [23] kömürden külün ve piritik kükürdün uzaklaştırılmasında santrifüj kuvvetin etkili olduğu ayırıcıyı kullanmışlar ve külün %57'sini, piritik kükürdün ise %85'ini uzaklaştırabilmişlerdir. Majumder ve arkadaşları [16] yine yaptıkları çalışmada, santrifüj kuvvetten yararlanarak külün %45,38'ini %40 yanabilir verimle uzaklaştırdıklarını belirtmişlerdir. Wang ve arkadaşları [24] ultra ince kömürlerin zenginleştirilmesinde kullandıkları Knelson konsantratöre verilen suyun debisini belirli periyotlarda artırıp azaltarak deneyler gerçekleştirmişler ve bu işlemin kömürün külü ve yanabilir verimi üzerinden beklenen etkiyi gösteremediğini ifade etmişlerdir. Uslu ve arkadaşları [11] yaptıkları çalışmada, yine kömürden piritik kükürdün %67,91'ni, külün ise %39,53'ünü uzaklaştırmıştır. Honaker ve arkadaşları [21] santrifüj kuvvetin etkili olduğu bir diğer cihaz olan Falcon konsantratörü kullanarak kömürden kül ve kükürt uzaklaştırmaya çalışmışlar ve %90'ın üzerinde bir verimler uzaklaştırdıklarını belirtmişlerdir. Aynı araştırmacılar, yaptıkları bir diğer çalışmada [25] iri boyutta kömürün iyileştirilmesinde Knelson konsantratörün daha verimli olduğunu ortaya koymuşlardır. Oruç ve arkadaşları [10] Falcon konsantratör ile yaptıkları çalışmalarda, kömürden %35 verimle külün %66'sını, kükürdün ise %36'sını uzaklaştırdıklarını ifade etmişlerdir. Zhu ve ark. [15] oksitlenmiş ince kömürlerin kazanılmasında flotasyon yöntemi ile Falcon konsantratörün sonuçlarını karşılaştırmış ve Falcon konsantratör ile %53,68 verimle kükürdün %44,53'ünü uzaklaştırdığını belirtmiştir.

Bu çalışmada Kütahya-Gediz yöresi oldukça ince boyuttaki (-0,15 mm) kömürlerinden inorganik kükürt ve külün uzaklaştırılmasında Knelson Konsantratör kullanılmış ve bu cihazın çalışma parametrelerinin (G kuvveti, su debisi, tane boyut vs.) etkileri incelenmiştir. Knelson konsantratör kullanılarak kömürden kül ve kükürt uzaklaştırmada bu kadar ince boyutlarda bir çalışmaya literatürde rastlanamamıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve DEĞERLENDİRME

### 2.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür örneği, Kütahya merkeze yaklaşık 90 km ve Gediz ilçe merkezine yaklaşık 25 km mesafedeki Gökler kasabasında faaliyet gösteren özel bir şirkete ait kömür ocağından alınmıştır. Temsili olarak alınan kömür numuneleri deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere boyut küçültme işlemine tabi tutulmuş, konileme-dörtleme yöntemi ile azaltma işlemi uygulanmış ve özelliklerinin değişmesinin engellenmesi amacıyla hava geçirmez kilitli poşetlerde depolanmıştır.

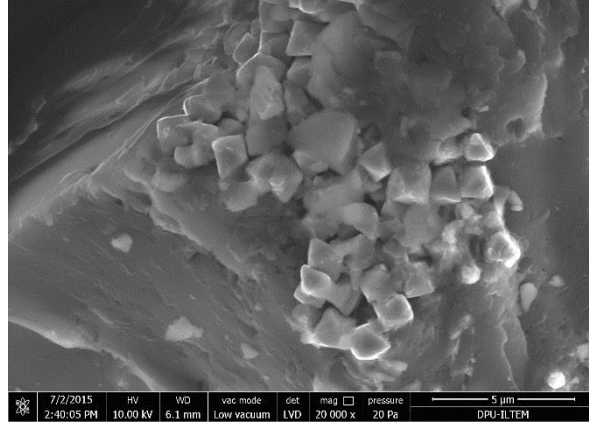
Gediz yöresi kömürleri üzerinde yapılan kısa analiz sonuçları Çizelge 1’de, elementer analiz sonuçları ise Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge 1 ve 2 incelendiğinde yöre kömürlerinin %7,06 toplam kükürt içeriğine sahip olduğu, bu kükürdün ise yarıya yakınının (%2,89) organik kökenli olduğu görülmektedir. Ayrıca, yöre kömürlerinin yüksek oranda kül içermesine (%25,99) rağmen ısı değeri (5607 kcal/kg) yüksek olduğu belirlenmiş (Çizelge 1), bu hali ile yöre kömürleri yapılan petrografik incelemeler sonucu organik yapının büyük bir bölümü vitrinitten (%87) oluştuğu, vitrinite zemin üzerinde inertinit ve az miktarda eksinit olduğu belirlenmiş, ayrıca alt bitümlü kömür sınıfına (Rmax: 0,576) girdiği tespit edilmiştir. Şekil 2’de Gediz yöresi kömürlerinin taramalı elektron mikroskop (SEM) ile 20000 kez büyütülmüş görüntüsü görülmektedir. Şekil 2’den de görüldüğü üzere yöre kömürleri çok ince boyutta pirit tanecikleri içermektedir. Piritin büyük bölümü kömür parçaları içinde kenetli halde, az miktarda kükürt serbest taneler halinde bulunmaktadır. Piritler, kürecikler halinde, öz ve yarı-öz şekilli taneler halinde kendini göstermektedir. Bu pirit taneciklerinin serbestleşme boyutu ise yaklaşık 1-2 mikron civarındadır. Bu kadar ince boyutta serbestleşen piritik kükürdün fiziksel yöntemler ile uzaklaştırılabilmesi oldukça güç görülmektedir.

**Çizelge 1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür numunesinin kısa analiz sonuçları.

Kısa analiz	(%)
Nem	3,3
Kül	25,99
Uçucu madde	32,81
Sabit Karbon	37,90
Alt Isıl Değer	5607 kcal/kg

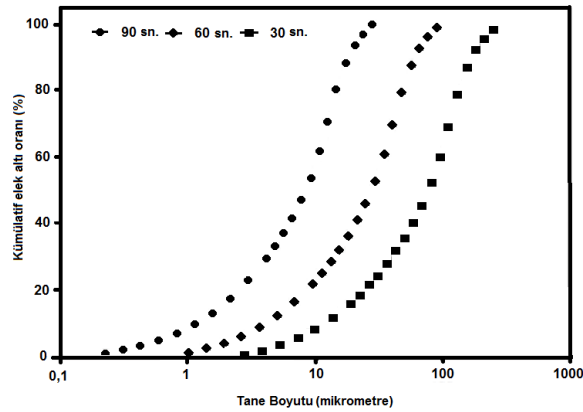
**Çizelge 2.** Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür numunesinin elementer analiz sonuçları.

Elementer Analiz	(%)
Karbon	78,41
Hidrojen	5,12
Azot	1,61
Oksijen (farktan)	7,8
Toplam Kükürt	7,06
Organik Kükürt	2,89
Piritik Kükürt	3,55
Sülfat Kükürdü	0,62



Şekil 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür numunesinin SEM görüntüsü (20000 kez büyütülmüş).

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere hazırlanan temsili numuneler halkalı öğütücü kullanılarak farklı öğütme sürelerinde (30, 60 ve 90 saniye) d80 boyutu 150, 75 ve 38 mikrometre olacak şekilde öğütülmüş ve elde edilen ürünlerin boyut dağılımları Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Öğütme sonrası numune boyut dağılımı.

## 2.2. Yöntem

Deneysel çalışmalarda kullanılan KC-MD3 laboratuvar tipi Knelson konsantratörü Şekil 4’de verilmiştir. Malzeme bölümünde belirtilen temsili kömür numuneleri 500 ml hacimli beherde %20 pülpte katı oranı oluşturulacak şekilde karıştırılmış, katı taneciklerin bütünüyle ıslanması, homojen bir karışım oluşması ve karışımın çökelmesinin engellenmesi amacıyla mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda uygulanan çalışma parametreleri Çizelge 3’de verilmiştir.



Şekil 4. Deneysel çalışmalardan kullanılan KC-MD3 Knelson Konsantratör [20].

Çizelge 3. Deneysel çalışmalarda uygulanan çalışma parametreleri.

Santrifüj Kuvvet (G)	40, 60, 90, 120 ve 150
Su debisi (lt/dak)	1,6- 2- 2,5 ve 3
Tane boyutu (mm)	0,150- 0,075 ve 0,038

Knelson konsantratör önceden belirlenen santrifüj kuvvet ve su debisi ayarlanarak sistem dengeye ulaşıncaya kadar besleme yapılmadan çalıştırılmıştır. Sistem dengeye ulaştıktan sonra peristaltik pompa kullanılarak Knelson konsantratör besleme hunisine sabit debide (1 lt/dak) numune beslenmiş, besleme tamamlandıktan sonra belirtilen debide su beslemesi bir süre daha devam edilerek, ayırmanın tamamlanması sağlanmıştır. Deney bitiminde taşarak uzaklaşan konsantre (temiz kömür) ve ayırma konisi içinde biriken artık ayrı ayrı alınmış, kurutulmuş, tartılmış ve gerekli kükürt ve kül analizleri standartlara uygun olarak yapılmıştır.

Kül uzaklaştırma verimi (%AR), kükürt uzaklaştırma verimi (%SR) ve yanabilir verim (%CR) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Kül analizi Nüve MF120 marka kül fırınında, kükürt analizleri ise Leco SC144 DR kükürt karbon cihazında standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

$$AR(\%) = \frac{M3.A3}{M1.A1} \times 100 \quad (1)$$

$$SR(\%) = \frac{M3.S3}{M1.S1} \times 100 \quad (2)$$

$$CR(\%) = \frac{M2.(100-A2)}{M1.(100-A1)} \times 100 \quad (3)$$

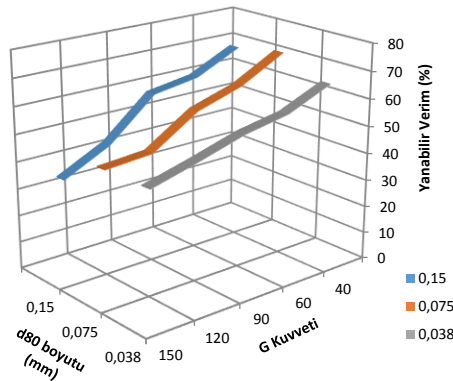
Burada; A1: Beslemenin kül oranı (%), M1: Besleme miktarı (%),S1: Beslemenin kükürt oranı (%),A2: Temiz kömür kül oranı (%), M2: Temiz kömür miktarı (%),S2: Temiz kömür kükürt oranı (%), A3: Artık kül oranı (%), M3: Artık miktarı (%), S3: Artık kükürt oranı (%).

### 3. SONUÇLAR

#### 3.1. Santrifüj Kuvvetin Kükürt ve Kül Uzaklaştırmaya Etkisi

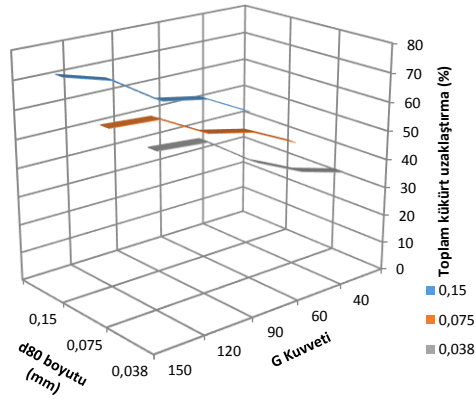
Knelson konsantratörün en önemli özelliklerinden biri olan santrifüj kuvvet, ince ve ultra ince taneciklerin yoğunluk farkından yararlanarak süspansiyon içerisindeki çökeltme hızlarını arttırmaktadır. Bilindiği gibi süspansiyon içindeki iri boyutlu tanecikler, yoğunluk farkının ön plana çıkması ile etkin bir şekilde birbirinden ayrılırken, tane boyutu küçüldükçe, yoğunluk farkının etkisi azalmakta ayırma hassasiyeti belirgin bir şekilde düşmektedir. Yoğunluk farkının yeniden ön plana çıkarılması için dışarıdan bir etkinin yani santrifüj kuvvetin uygulanma zorunluluğu doğmaktadır. Knelson konsantratörler yerçekimi ivmesinin 100-200 katı kadar bir kuvvet uygulayabilmektedir [25]. Deneysel çalışmalarda kullanılan KC-MD3 tipi Knelson konsantratör en fazla 150 G kuvvetine kadar santrifüj kuvvet uygulayabilmektedir.

Farklı santrifüj kuvvetin etkisi altında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 5-7'de verilmiştir. Şekil 5'de farklı tane boyutlarındaki numuneler ile farklı santrifüj kuvvet (40-150 G) altında yanabilir verimde meydana gelen değişim görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde, yanabilir verimde, artan santrifüj kuvvete karşın sürekli olarak bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum artan santrifüj kuvveti ile birlikte yoğunluğu yüksek tanecikler ile birlikte düşük yoğunluklu taneciklerinde santrifüj kuvvetten etkilenecek ayırma konisi içerisindeki oluklar arasında kalmasına neden olmaktadır. Düşük santrifüj kuvvetlerde sabit yıkama suyu (1,6 lt/dk) ile yapılan deneylerde, oluklar arasında (yüksek yoğunluklu tanecikler arasında) kalan düşük yoğunluklu tanecikler akışkan tabakaya karışarak (ötelenerek) sistemi taşarak terk etmesi sağlanmaktadır. Bu durum sistemi taşarak terk eden ürünün (temiz kömür) hem kül oranının düşmesine hem de inorganik kükürt oranının düşmesine neden olmaktadır. Yanabilir verimde meydana gelen sürekli düşüş, birçok araştırmacı tarafından da belirtildiği gibi artan santrifüj kuvvetin etkisi ile hemen hemen tüm taneciklerin ayırma konisi içindeki oluklarda birikmesine neden olmakta, taşarak sistemi terk eden ürün miktarının da sürekli olarak azalmasına neden olmaktadır.

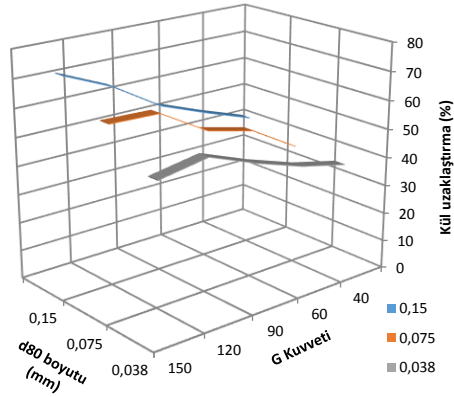


Şekil 5. Farklı santrifüj kuvvet değerlerinin yanabilir verim üzerine etkisi.

Şekil 6’da yine 40, 60, 90, 120 ve 150 G santrifüj kuvvetlerinde yapılan deneyler sonucunda kükürt uzaklaştırma verimi, Şekil 7’de kül uzaklaştırma verimi verilmektedir. Şekil 6 ve 7 incelendiğinde santrifüj kuvvet arttıkça hem kül hem de kükürt uzaklaştırma oranlarında tüm tane boyutlarında önce sürekli olarak bir artış gerçekleşirken, 90 G değerinden sonra yataya yakın bir seyir izlediği görülmekte, daha yüksek G kuvvetlerinin uygulanmasının kükürt ve kül uzaklaştırmada olumlu yönde etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle en uygun olarak belirlenen 90 G santrifüj kuvvette %58,16 yanabilir verim ile uzaklaştırılan kükürt oranı %56,76 seviyelerinde iken kül uzaklaştırma verimi ise %54,38 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Farklı santrifüj kuvvet değerlerinin kükürt uzaklaştırma verimi üzerine etkileri.



Şekil 7. Farklı santrifüj kuvvet değerlerinin kül uzaklaştırma verimi üzerine etkileri.

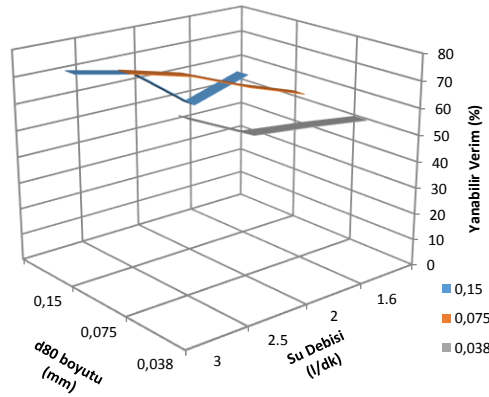
Farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen deneylerden görülmektedir ki tane boyutundaki değişimler ile yanabilir verim, kükürt uzaklaştırma oranı ve kül uzaklaştırma verimlerinde benzerlikler



görülmektedir. Nispeten iri tane olan 0,150 mm tane boyutunda elde edilen sonuçlar ince boyutlara göre daha yüksek seviyelerdedir.

### 3.2. Su Debisinin Kükürt ve Kül Uzaklaştırmaya Etkisi

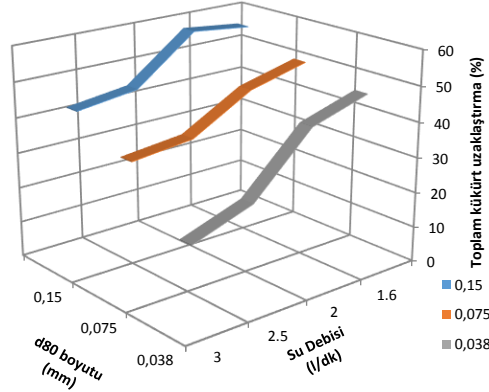
Knelson konsantratörün ayırma konisi içerisindeki olukların dış yüzeyindeki deliklerden verilen su, sistem içerisinde iki önemli etki oluşturmaktadır. Bunlardan birinci, Knelson konsantratör içerisinde aşağıdan yukarı doğru hareket eden akışkan bir tabakanın oluşmasıdır. Bu akışkan tabaka düşük yoğunluklu ürünlerin sistem dışarısına taşarak alınmasını sağlamaktadır. İkinci önemli etkisi ise, ayırma konisi içinde birikmiş olan yüksek yoğunluklu tanecikler arasında sıkışmış olan düşük yoğunluklu taneciklerin bulunduğu ortamdan çıkararak sistemi terk etmesini sağlamaktadır [16,26]. En uygun santrifüj kuvvet olarak 90 G belirlendikten sonra farklı tane boyutlarındaki numuneler ile 1,6-3,0 lt/dak su debisi ile yapılan deneylerden elde edilen yanabilir verim, kükürt uzaklaştırma ve kül uzaklaştırma verim sonuçları sırası ile Şekil 8, 9 ve 10'da verilmektedir. Şekil 8 incelendiğinde artan su debisine bağlı olarak yanabilir verimde sürekli olarak bir artış elde edilmektedir. Artan su debisi ayırma konisi içerisindeki oluklar arasında santrifüj kuvvet etkisi ile biriken yüksek yoğunluklu tanecikleri, düşük yoğunluklu tanecikler ile birlikte akışkan tabakaya sürüklemekte böylece, ortamdan taşarak uzaklaşan malzeme miktarında bir artış meydana gelmekte bu durum da yanabilir verimin sürekli olarak artmasına neden olmaktadır.



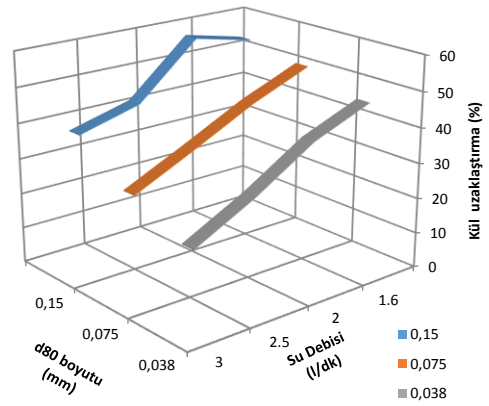
Şekil 8. Farklı su debisinin yanabilir verim üzerine etkileri.

Şekil 9 ve 10 incelendiğinde artan su debisine bağlı olarak hem uzaklaştırılan kükürt verimi hem de kül veriminde belirgin bir azalmanın olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi artan su debisi ayırma konisi içerisindeki oluklarda biriken hem düşük yoğunluklu hem de yüksek yoğunluklu taneciklerin bir kısmının da akışkan tabakaya karışarak ortamdan uzaklaşmasına neden olmakta, bu durumda etkin ayırmanın gerçekleşmesini engellemektedir. Ortamı taşarak terk eden temiz kömürün hem kükürt hem de kül oranlarında belirgin artışların neden olmasını sağlamaktadır. Düşük su debilerinde daha düşük yanabilir verim buna karşın daha yüksek uzaklaştırma verimleri elde edilmektedir. 1,6-3,0 lt/dak su debilerinde yanabilir verim %58,16 ile %72,73 arasında değişirken, kükürt uzaklaştırma oranları %43,29 ile %58,58 arasında, kül uzaklaştırma oranları ise %38,28 ile %58,05 arasında değişmektedir. Bu nedenle en düşük su debisi olan 1,6 lt/dak en uygun çalışma şartı

olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar su debisinin de santrifüj kuvvet kadar önemli bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Yine farklı tane boyutlarında elde edilen sonuçlar benzerlik göstermekte iri boyutlarda daha yüksek uzaklaştırma oranları elde edilmektedir.



Şekil 9. Farklı su debisinin kükürt uzaklaştırma oranı üzerine etkileri.



Şekil 10. Farklı su debisinin kül uzaklaştırma oranı üzerine etkileri.

### 3.3. Tane Boyutunun Kükürt ve Kül Uzaklaştırmaya Etkisi

Önemli çalışma parametrelerinden bir diğeri olan tane boyutunun kükürt ve kül uzaklaştırmadaki etkisinin belirlenmesi amacıyla farklı öğütme sürelerinde elde edilen kömür numuneleri kullanılmıştır. Öğütme amacıyla halkalı değirmen kullanılmış, 30, 60 ve 90 saniyelik öğütme sürelerinde elde edilmiş ürünlerin d80 boyutları sırası ile 150, 75 ve 38 mikrometre olarak tespit edilmiştir. 90 G santrifüj kuvvet ve 1,6 lt/dak su debisi ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4'de verilmiştir. Çizelge 4 incelendiğinde tane boyutu küçüldükçe yanabilir verimde, kükürt uzaklaştırma ve kül uzaklaştırma oranlarında beklenenin aksine bir azalma meydana gelmekte

benzer durum Uslu ve ark. [11] tarafından yapılan çalışmada da görülmektedir. Bu durum malzeme ve yöntem kısmında da belirtildiği gibi, Gediz yöresi kömürlerinin içerdiği pritik kükürt ve kül oluşturan mineral maddelerin çok ince boyutlarda dağılmış halde bulunmasıdır. Farklı tane boyutlarındaki kömür numunelerinin mikroskop altındaki incelemelerinde çok ince boyuttaki pritik kükürt tanecikleri kısmi serbestleşmeden dolayı kömür tanecikleri ile birlikte hareket etmekte ve temiz kömürün kül ve kükürt oranlarının yükselmesine neden olmaktadır. Bu nedenle 0,150 mm tane boyutu en uygun çalışma boyutu olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 4.** Farklı tane boyutlarında elde edilen yanabilir verim, kükürt uzaklaştırma ve kül uzaklaştırma oranları.

d80 Boyutu (mm)	Yanabilir Verim (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Kül uzaklaştırma verimi (%)
0,150	58,16	56,76	54,38
0,075	57,16	51,22	51,50
0,038	55,14	47,56	46,62

SEM analiz sonuçları kömür numunesinin içerdiği inorganik kükürdün çok ince boyutlarda (yaklaşık 1-2 mikron) serbestleşebileceğini göstermektedir. Bu kadar küçük boyutlara kadar numunenin öğütülmesi (serbestleştirilmesi) hem teknolojik açıdan hem de ekonomik açıdan mümkün görülmemektedir. Elde edilen yanabilir verim, kükürt uzaklaştırma ve kül uzaklaştırma oranlarındaki düşük seviyeler kömürün yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elde edilen sonuçlar toplu olarak değerlendirildiğinde Kütahya-Gediz kömürlerinin Knelson konsantratör kullanılarak kükürt ve külünün uzaklaştırılabilmesi mümkün olarak görülmekte fakat arzu edilen derecelere ulaşamadığını göstermektedir. İstenilen uzaklaştırma oranlarına ulaşılamamasının başında yöre kömürlerinin içerdiği hem kükürdün hem de kül oluşturan mineral maddelerin kömür içerisinde çok ince boyutlarda dağılmış olması gelmektedir. Yöre kömürleri linyit ile taş kömürü arasında bir yapıdadır. Tüvenan kömürün kül oranının (%25,99) yüksek olmasına rağmen kalorifik değeri gayet yüksektir (5600 kcal/kg). İçerdiği toplam kükürt yöre kömürlerinin tüvenan olarak kullanımını kısıtlamaktadır.

Yapılan Knelson konsantratör deneylerinde Gediz yöresi kömürlerinde bulunan kükürdün %56,76'sı, külün %54,38'i %58,16 yanabilir verim ile 90 G santrifüj kuvveti, 1,6 lt/dak su debisi ve 0,150 mm tane boyutunda yapılan deneylerde uzaklaştırılabilmektedir. Uzaklaştırma verimlerinin düşük olması yöre kömürlerinin içerdiği mineral madde ve kükürdün çok ince boyutlarda olmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmada Knelson konsantratör çalışma parametrelerinin hepsinin hem kül hem de kükürt uzaklaştırmada oldukça etkili olduğu görülmektedir. Kendi aralarında değerlendirildiğinde santrifüj kuvvetin diğer parametrelere göre etkisinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Knelson konsantratör ince kömürlerin zenginleştirilmesinde halen yaygın olarak kullanılan flotasyon yöntemine alternatif olarak kullanılabilecek duruma gelmektedir. Düşük maliyetli olması, kimyasal

kullanılmaması, kontrolünün kolay ve değişkenlerin daha efektif olarak kontrol altında tutulması Knelson konsantratörün öne çıkan avantajları olarak görülmektedir.

#### KAYNAKÇA

- [1] Key world energy statistics, (2017), International energy agency (IEA)
- [2] Jorjani, E., Rezai, B., Vossoughi, M., Osanloo, M., Abdollahi, M., (2004), Oxidation pretreatment for enhancing desulfurization of coal with sodium butoxide, Minerals Engineering, 17, 545-552.
- [3] Jorjani, E., Rezai, B., Vossouhgi, M., Osanloo, M., (2004), Desulfurization of Tabas coal with microwave irradiation/peroxyacetic acid washing at 25, 55 and 85 °C, Fuel, 83, 943-949.
- [4] Jorjani, E., Yperman, J., Carleer, R., Rezai, B., (2006), Reductive pyrolysis study of sulfur compounds in different Tabas coal samples (Iran), Fuel 85, 114–120.
- [5] Demir, U., (2017), Characterization and desulfurization possibilities of high sulfur gediz-turkey coal, Journal of Environmental Science and Engineering A, 6(1), 31-38.
- [6] Kawatra, S. K., and Eisele, T. C., (2001), Coal desulfurization, high-efficiency preparation methods, Printed by Edwards Brothers, Ann Arbor, Taylor & Francis Inc. 349.
- [7] Demir, U., Aydın, A., (2016), Desulfurization of high sulfur coal by Electron Transfer Method, XV. Mineral Processing Symposium (IMPS) Istanbul, Turkey
- [8] Honaker, R. Q., Wang, D., Ho, K., (1996), Application of the falcon concentrator for fine coal cleaning. Minerals Engineering, 9(2), 1143-1156.
- [9] Honaker, R., Das, A., Nombe, M., (2005), Improving the separation efficiency of the Knelson concentrator using air injection, Coal Preparation, 25, 99–116.
- [10] Oruç, F., Özgen, S., Sabah, E., (2010), An enhanced-gravity method to recover ultra-fine coal from tailings: Falcon concentrator, Fuel, 89, 2433–2437.
- [11] Uslu, T., Sahinoglu, E., Yavuz, M., (2012), Desulphurization and deashing of oxidized fine coal by Knelson concentrator, Fuel Processing Technology 101, 94–100.
- [12] Boylu, F., (2013), Modeling of free and hindered settling conditions for fine coal beneficiation through a falcon concentrator, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 33, 277–289.
- [13] Boylu, F., (2014), Autogenous medium fine coal washing through falcon concentrator. Separation Science and Technology, 49, 627-633.

- [14] Meshram, P., Purohit, B. K., Sinha, M. K., Sahu, S. K., Pandey, B. D., (2015), Demineralization of low grade coal – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 745–761.
- [15] Zhu, X., Tao, Y., Sun, Q., Man, Z., Xian, Y., (2016), Deashing and desulphurization of fine oxidized coal by falcon concentrator and flotation, *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 52(2), 634–646.
- [16] Majumder, A. K., Tiwari, V., Barnwal, J. P., (2007), Separation characteristics of coal fines in a Knelson concentrator—a hydrodynamic approach, *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 27, 126–137.
- [17] Ghaffari, A., Farzanegan, A., (2017), An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling, *Minerals Engineering* 112, 57–67.
- [18] Öney, Ö., Tanrıverdi, M., (2016), Optimization and modeling of fine coal beneficiation by knelson concentrator using central composite design (CCD), *The Journal of ORE DRESSING*, 14(27), 11-19.
- [19] Kökkılıç, O., Langlois, R., Waters, K. E., (2015), A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator, *Minerals Engineering* 72, 73–86.
- [20] Knelson Konsantrator., (2012), KC MD3, Kullanım Kılavuzu
- [21] Honaker, R. Q., Paul, B. C., Wang, D. and Ho, K., (1995), Enhanced gravity separation: an alternative to flotation, *High Efficiency Coal Preparation: An International Symposium*, SME, Littleton, Colorado, 70-78.
- [22] Majumder, A. K., and Barnwall, J. P., (2011), Processing of coal fines in a water-only cyclone, *Fuel*, 90, 834–837.
- [23] Paul, B. C., Honaker, R. Q., (1994), Production of illinois base compliance coal using enhanced gravity separation, DOE Final Technical Report, DE-FC22-92PC92521
- [24] Wang, X., Nick, J. M., and Kingman, S., (2008), Segregation of ultrafine particles in a centrifugal fluidized bed separator, *Advanced Powder Technology*, 19, 335–348.
- [25] Luttrell, G. H., Honaker, R. Q., and Phillips, D. I., (1995), Enhanced gravity separators: new alternatives for fine coal cleaning, 12th International Coal Preparation and Conference, Lexington, K.Y., 282-292.
- [26] McLeavy, M., Klein, B., and Grewal, I., (2001), Knelson continuous variable discharge concentrator: analysis of operating variables, International Heavy Minerals Conference, Fremantle, WA.