

## Kabaran Yataklı Ayırıcı ile Farklı Minerallerin Zenginleştirilmesi

### *Beneficiation Studies of Different Minerals by Using Teetered Bed Separator*

ÖZGÜR ÖZCAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06800 Ankara

Geliş (received) : 30 Ocak (January) 2017

Kabul (accepted) : 01 Haziran (June) 2017

#### ÖZ

Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli bir kabaran yataklı ayırıcı (KYA) ile sınıflandırma ve zenginleştirme uygulamaları incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, bir spiral zenginleştirme devresinden alınan kromit konsantresi KYA ile dar tane boyu dağılımı elde edecek şekilde sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işleminin ardından KYA ürünlerinden yer çekimi ile zenginleştirme yöntemi kullanılarak yüksek kalitede krom konsantresi elde edilmeye çalışılmıştır. KYA-Sallantılı masa testlerinden alınan sonuçlara göre % 48 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli bir konsantre % 80.02 verim değeri ile kazanılabilmektedir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise nefelinli siyenit cevherinden yüksek alümina ve mümkün olan en düşük demir içerikli yüksek kalite ürün elde etmek amacıyla karakterizasyon ve zenginleştirme çalışmaları yürütülmüştür. KYA ile farklı yıkama suyu miktarlarında zenginleştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. KYA kullanılarak cevherin demir içeriği %0.77 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ten % 0.11 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e kadar düşürülmüştür ve % 20.19 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren bir konsantre elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kabaran yataklı ayırıcı (KYA), kromit, nefelinli siyenit, yerçekimi ile zenginleştirme.

#### ABSTRACT

*In this study, classification and beneficiation applications of a laboratory scale teetered bed separator (TBS) were investigated. In the first part of the study a spiral circuit chromite concentrate subjected to classification in order to obtain narrow size fractions with the TBS. After classification stage, TBS products were upgraded by gravity concentration for producing high grade chromite concentrate. As a result of TBS-shaking table tests a product quality with 48% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content ensuring 80.02% recovery can be obtained.*

*In the second part of the study a nepheline syenite ore has been characterized and concentrated by TBS with the aim to produce a high quality concentrate having high alumina content and the lowest possible iron content. The TBS tests were carried out at different teeter water rates. By using TBS, iron content of the ore was decreased from 0.77% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to 0.11% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and a nepheline syenite concentrate assaying 20.12% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was obtained.*

**Keywords:** Teetered bed separator (TBS), gravity concentration, chromite, nepheline syenite.

\* Ö.Özcan

e-posta: ozgurozcan@hacettepe.edu.tr

## GİRİŞ

Hidrolik sınıflandırıcılar taneleri boyut fraksiyonlarına göre sınıflandırmada, tane boyu dağılımının uygun olması durumunda ise taneler arasındaki yoğunluk farkından yararlanarak cevher zenginleştirmede tarihsel süreç boyunca kullanmıştır.

Günümüzde, özellikle ince boydaki sınıflandırma işlemleri büyük ölçüde konvansiyonel sınıflandırıcılar olan hidrosiklonlar veya mekanik sınıflandırıcılar ile yapılmaktadır. Ancak konvansiyonel sınıflandırıcıların yüksek verimsizlik ve kaçak değerlerinde çalışması öğütme ve zenginleştirme devrelerinin verim kaybına yol açmaktadır. Bu durum aynı zamanda bu alanda yeni sınıflandırıcıların test edilmesi ve kullanılmasının da önünü açmaktadır (Kumar vd., 2009). KYA'lar özellikle dünyanın belirli bölgelerinde kömür yıkama uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak literatürde yapılan sınırlı sayıda çalışmada, kromit tesisi atıklarından kromit kazanımı (Kari vd., 2006), kuvars kumu yıkama ve sınıflandırma (Ozcan ve Ergun, 2015), ince boydaki demir ve mangan cevherlerinden alümina ve silis uzaklaştırılması (Triphaty vd., 2013), demir atıklarından demir kazanımı (Ozcan ve Celik, 2016), fosfat cevherinin zenginleştirilmesi (Schlesinger ve Hutweller, 1992) gibi örnekler yer almaktadır. Bu örnekler KYA'ların sınıflandırma ve zenginleştirme işlemlerinde de kullanım olanağı olduğunu göstermektedir.

Kromit cevherinin zenginleştirilmesinde genellikle kırma öğütme ve sınıflandırmanın ardından farklı yer çekimi ile zenginleştirme devreleri kullanılmaktadır. Ancak devrede mevcut konvansiyonel sınıflandırıcıların verimsizliği nedeniyle hem enerji maliyetleri artmakta hem de cevher verimli şekilde zenginleştirilememektedir. Bu durum ise yeni ekipmanların kullanılması ve yeni akım şemalarının geliştirilmesinin önünü açmaktadır. Ayrıca bilindiği üzere yerçekimi ile zenginleştirme yapan ekipmanların verimi, dar tane boyu dağılımlarında geniş tane boyu dağılımlarına göre daha yüksektir (Ozcan ve Celik, 2016). Tane boyu dağılımının geniş olması, yoğunluğu yüksek ince tanelerin boyut etkisi nedeniyle atığa kaçmasına ve ayırım veriminin düşmesine neden olmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalarda kromit atıklarının değerlendirilmesi amacıyla, sallantılı masa ve yüksek alan şiddetli manyetik ayırma yöntemleri denenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda %21.21  $Cr_2O_3$  tenörlü kromit atıklarından %45.21  $Cr_2O_3$  içerikli nihai konsantre %87.46 verimle elde edilmiştir (Aydın, 2001). Bunun yanı sıra kromit tesisi atıklarından kromit

konsantresi elde etmek amacıyla yüksek alan şiddetli manyetik ayırma ve flotasyon yöntemleri kullanılmış ve %46-48  $Cr_2O_3$  içeren bir konsantre elde edilmiştir (Güney vd., 1996). Ancak manyetik ayırma ve flotasyon gibi yöntemlerin kurulum ve işletme maliyetleri düşünüldüğünde kromit cevherinin zenginleştirilmesinde en uygun devre tasarımının yer çekimi ile zenginleştirme olduğu düşünülmektedir.

Metalik cevherler dışında endüstriyel hammaddeler sınıfında yer alan nefelinli siyenit cevherinin seramik ve cam endüstrisinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bunun nedeni ise, siyenitlerin diğer cam ve seramik hammaddelerine göre bazı üstünlüklere sahip olmasıdır. Nefelinli siyenitlerin, cam ve seramik endüstrisinde kullanımı yanında, alümina üretiminde kullanıldığı da bilinmektedir. Cam ve seramik hammaddelerinde istenmeyen safsızlıkların başında ise demir gelmektedir. Bu nedenle de nefelinli siyenitlerin kullanıma sokulmadan önce demir içeriklerinin belli bir değerin altına indirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla uygulanan zenginleştirme yöntemleri, demir minerallerinin karakterine bağlı olarak, düşük ve yüksek alanlı manyetik ayırma olmakta; bazı durumlarda da flotasyon yöntemine başvurulmaktadır (Zaher ve Tawab, 2014).

Bu çalışmanın iki temel amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, KYA'nın konvansiyonel sınıflandırıcılardan kaynaklanan verimsizlikleri giderme olanaklarının araştırılmasıdır. Bu amaçla Sivas bölgesinde çalışmakta olan bir kromit tesisi spiral devresinden konsantre numunesi alınmıştır. Tesis akım şemasında cevherden hidrosiklonlar ile şlam atılmakta, şlam atılan cevher spiral devresine beslenmektedir. Ancak tesisteki hidrosiklonların verimsizliği nedeniyle büyük miktarda şlam boyutundaki malzeme spiral devresine gelmektedir. Spiral devresi konsantresi ise nihai ürün elde edebilmek amacıyla sallantılı masa devresine beslenmektedir. Ancak hem spiral devresinden hem de masa devresinden istenilen kalite ve verim değerinde ürün alınamamaktadır. Bu çalışmanın ilk aşamasında spiral konsantresinin KYA ile verimli şekilde sınıflandırılması ve ardından sallantılı masa testleri ile nihai ürün elde edilmesi hedeflenmektedir.

Çalışmanın ikinci temel amacı ise, nefelinli siyenitlerin yalnızca KYA kullanılarak zenginleştirilme olanaklarının araştırılması ve ülkemiz cam-seramik endüstrisinde kullanılabilir bir hammadde kaynağının basit ve ucuz bir yöntemle değerlendirilmesini sağlamaktır. Bu amaçla, Kırşehir bölgesinden elde edilen nefelinli

siyenit cevherine detaylı karakterizasyon ve zenginleştirme testleri uygulanmıştır.

### Kabaran Yataklı Ayırıcılar (KYA)

Hidrolik sınıflandırıcılar grubunda yer alan KYA'lar temel olarak yukarı yönde verilen ayırım suyuna karşılık beslemenin yerçekimi etkisi altında ve engelli çökeltme koşulları içerisinde çökeldiği, çökeltme esnasında tanelerin boyut ve yoğunluk farklarından yararlanılarak ayrıldığı ekipmanlardır. Çalışma anında, çökeltme hızı yukarı yönlü su hızına yakın olan taneler ayırıcı içerisinde birikerek ağır ortam gibi davranan akışkan bir malzeme yatağı oluşturmaktadır. Akışkan yatak içerisinde biriken ve ağır ortam gibi davranan bu malzeme yatağının varlığı nedeniyle, ayırıcıya beslenen tanelerin çökeltme hızları da düşmektedir. Sistem içerisinde biriken ve nispeten malzeme yatağının üst bölgelerinde kalan yoğunluğu düşük/ince taneler yıkama suyunun hidrolik taşıma kuvveti ile üst akıma sevk edilirken, malzeme yatağının alt bölgelerinde kalan yoğunluğu yüksek/iri taneler ise hem yatak ağırlığının hem de yerçekiminin etkisi ile alt akımdan alınırlar (Tripathy vd., 2015).

Yukarı yönlü yıkama suyu ayırıcıya konik kısmın hemen üzerine yerleştirilmiş olan dağıtım plakaları ile verilmektedir (Şekil 1). Yukarı yönlü su hızı yıkama suyu miktarının ve kolon kesit alanının bir fonksiyonudur. Yukarı yönlü su akışı tanelerin aşağı yönlü çökeltme hızına karşıdır. Dolayısıyla yukarı yönlü yıkama suyu hızı kesme boyunu/yoğunluğunu belirleyen önemli bir değişkendir (Maharaj, 2005). Kolon içerisindeki akışkan yatak yüksekliği bir basınç sensörü tarafından sürekli ölçülmektedir. İstenilen yatak yüksekliğine ulaşıldığında otomatik bir PID (oransal-integral-türevsel) denetleyicisi yardımıyla alt akım ucunda bulunan hava kontrollü vana açılıp kapatılarak fazla katı alt akımdan sistemi terk eder ve bu sayede yatak yüksekliği sabit kalır. Alt akımdan alınan malzeme yüksek katı içeriğine sahiptir.

KYA'lar altı ana bölgeye ayrılmaktadır (Şekil 2). Bu bölgeler sırasıyla, üst akım toplanma bölgesi (A), üst orta bölge (B), besleme bölgesi (C), alt orta bölge (D), çökeltme bölgesi (E) ve alt akım toplanma bölgesi olarak verilmektedir (F) (Honaker ve Mondal, 1999). Besleme bölgesinde türbülans kaynaklı ekstenel bir karışma mevcuttur. Alt orta bölümde ise akışkan yatak oluşumu gözlenmektedir. Bu bölgede tanelerin yoğunluk/boyut farkına göre ayrılmasını sağlayan bir ağır ortam kendiliğinden oluşmaktadır. Alt orta

bölümün hemen altından sisteme verilen yıkama suyu yukarı yönlü hareket etmektedir. İnce ve yoğunluğu düşük taneler oluşan ağır ortamı geçemeyerek üst akıma yönelirler. İri ve yoğunluğu yüksek taneler ise ağır ortam içerisinde çökerek alt konik kısımda yoğun bir yatak oluştururlar. Oluşan bu yoğun yatağın içerisinde uygulanan yıkama suyu sayesinde yatak kısmi olarak açılır ve hafif taneler üst akıma doğru yığılır.

### MALZEME KARAKTERİZASYONU

Spiral devresinden alınan kromit konsantresinin tane boyu dağılımı yaş elek analizi yöntemi ile belirlenmiştir. Ardından boyut fraksiyonlarına yapılan analiz ile kromitin fraksiyonel dağılımı belirlenmiştir (Çizelge 1).

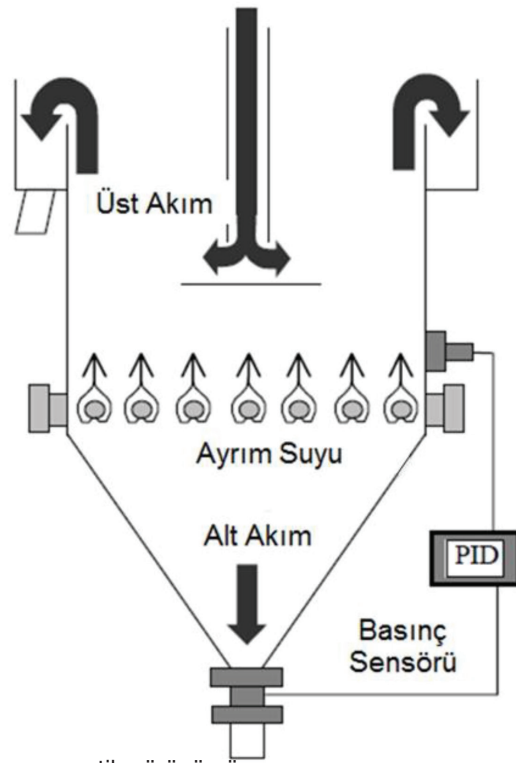
Çizelge 1'e göre kromit konsantresinin tamamı 425 µm'den incedir. Tane boyu fraksiyonlarının ağırlıkça dağılımına bakıldığında ise iri boylardan ince boylara inildikçe malzeme miktarı azalmaktadır. Numuneden şlam atılmış olmasına rağmen spiral konsantresinde dahi 38µm'den ince taneler bulunmaktadır. Bu sonuç tesisteki sınıflandırma problemini de doğrulamaktadır. Aynı zamanda kromitin yaklaşık olarak %80'i de 106 µm'den daha iri boylarda yer almaktadır.

Nefelinli siyenit cevherine ait kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmektedir.

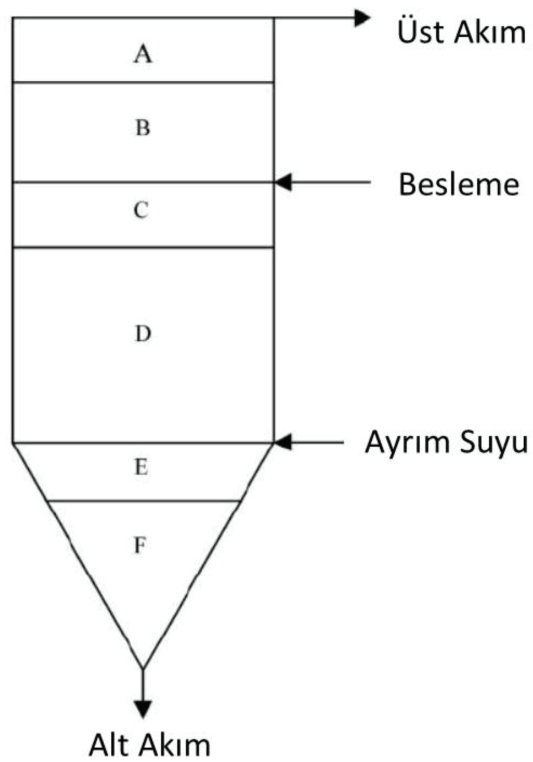
Çizelge 2'den de görüleceği üzere cevher içerisinde safsızlık olarak % 0.77 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve % 0.14 TiO<sub>2</sub> bulunmaktadır. Cevherin büyük bir çoğunluğunu ise SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşturmaktadır. Cevherin mineralojik özellikleri incelendiğinde ise ağırlıklı olarak ortoklas ve albit içerdiği görülmektedir.

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Bu bölümde kromit konsantresi ve nefelinli siyenit cevheri ile yapılan sınıflandırma ve zenginleştirme deneyleri ve sonuçları verilmektedir. KYA testlerinde öncelikle her bir test için istenilen yıkama suyu miktarı ayarlanmıştır. Ardından test malzemesi ayırıcıya beslenerek istenilen basınç değerine ulaşana kadar sistem açık devre çalıştırılmıştır. İstenilen basınç değerinin elde edilmesinin ardından sistem 20 dakika daha çalıştırılarak kararlı duruma gelmesi sağlanmıştır. Sistemin kararlı duruma gelmesinin ardından eş zamanlı olarak besleme, alt ve üst akışlardan 20 dakika boyunca kesikli numuneler alınmıştır. Alınan



Şekil 1. Kabaran yataklı ayırıcının şematik görünümü  
Figure 1. Schematic view of teetered bed separator



Şekil 2. Kabaran yataklı ayırıcı içerisindeki ayırım bölgeleri  
Figure 2. Separation zones in the teetered bed separator

Çizelge 1. Kromit konsantranesine ait tane boyu dağılımı ve kimyasal analiz sonuçları

Table 1. Particle size distribution and chemical analysis results of chromite concentrate

Tane Boyu Fraksiyonu (µm)	Ağırlık (%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Dağılımı (%)
-425+300	13.84	12.53	9.72
-300+212	14.29	20.10	16.10
-212+150	16.41	24.61	22.64
-150+106	16.29	21.19	19.35
-106+75	14.44	17.64	14.28
-75+53	10.77	14.44	8.72
-53+38	6.86	12.51	4.81
-38	7.1	11.02	4.39
Toplam		17.84	100.00

Çizelge 2. Nefelinli Siyenit numunesine ait kimyasal analiz sonuçları

Table 2. Chemical analysis results of nepheline syenite ore

Bileşen	(%)	Bileşen	(%)
SiO <sub>2</sub>	61.51	MgO	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.98	Na <sub>2</sub> O	5.27
TiO <sub>2</sub>	0.14	K <sub>2</sub> O	6.52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.77	SO <sub>3</sub>	0.37
CaO	4.88	Toplam Alkali	11.79

Çizelge 3. Nefelinli Siyenit numunesine ait mineralojik analiz sonuçları

Table 3. Mineralogical analysis results of nepheline syenite ore

Mineralojik Analiz	(%)
Ortoklas	40-45
Albit	39-45
Serbest Kuvars	9-13
Anortit	5-8
Diğerleri	0.50-3

tüm numunelerin tane boyu dağılımları ve katı içerikleri belirlenmiş, ayrıca zenginleştirme testleri için kimyasal analizleri yapılmıştır. Elde edilen verilerden her

bir test için madde denkliği oluşturulmuştur. Madde denkliği sonucunda devre etrafı tane boyu dağılımları ve tenör değerleri istatistiksel olarak hatalardan

arındırılarak düzeltilmiş ve bu değerler kullanılarak sınıflandırma testleri için devredeki tüm kolların akış değerleri (tonajları), zenginleştirme testleri içinse hem kolların akış değerleri, hem de element bazında madde denkliliği ayrı ayrı yapılmıştır.

### Kromit Konsantresi ile Yapılan Çalışmalar

KYA ile yapılan çalışmalarda kromit konsantresinin iri ve ince olmak üzere iki dar tane boyu fraksiyonuna ayrılması ve sonrasında ayrı koşullarda zenginleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, farklı yıkama suyu miktarlarında sınıflandırma testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir test sonucunda KYA ürünlerinden alınan numuneler elek analizine tabi tutulmuş ve tane boyu dağılımı bakımından en uygun numune sallantılı masa ile zenginleştirilerek nihai ürün elde edilmiştir. Kromit konsantresi ile yapılan zenginleştirme çalışmaları esnasında besleme miktarı 300 g/dk., besleme katısı %40, ve basınç set değeri 160 olarak ayarlanmıştır. Yıkama suyu miktarı ise 6, 8 ve 10 l/dk. olarak değiştirilerek her bir koşul için kararlı durumun sağlanmasının ardından numune alma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

KYA test koşulları ve sonuçları Çizelge 4'te farklı su hızlarında elde edilen tane boyu dağılımları ise Şekil 3'te verilmektedir.

Çizelge 4 incelendiğinde sabit basınç set değerinde yıkama suyu miktarının artması sonucu alt akıma giden malzeme miktarı azalırken, üst akıma giden malzeme miktarında artış görülmektedir. Yıkama suyu miktarının artması sonucu alt akım miktarı %65.29'dan %53.74'e kadar düşmektedir. Tanelerin aşağı yönlü çökme hızına ters yöndeki su hızı, yıkama suyu miktarının ve KYA kolon kesit alanının bir fonksiyonudur. Ayrım bölgesine giren tanelerin çökme hızları yukarı yönlü su hızından düşük olduğu takdirde taneler üst akıma taşınmaktadır. Bu nedenle yıkama suyu miktarının artırılması sonucu aynı yatak

basıncı değerinde daha fazla tane üst akıma taşınmakta ve bu nedenle alt akım miktarı da düşmektedir. Aynı zamanda alt ya da üst akıma gitme şansı eşit olan ve kesme boyu ( $d_{50}$ ) olarak adlandırılan tane boyu değerinin de yıkama suyu miktarındaki artış ile irileştiği görülmektedir.

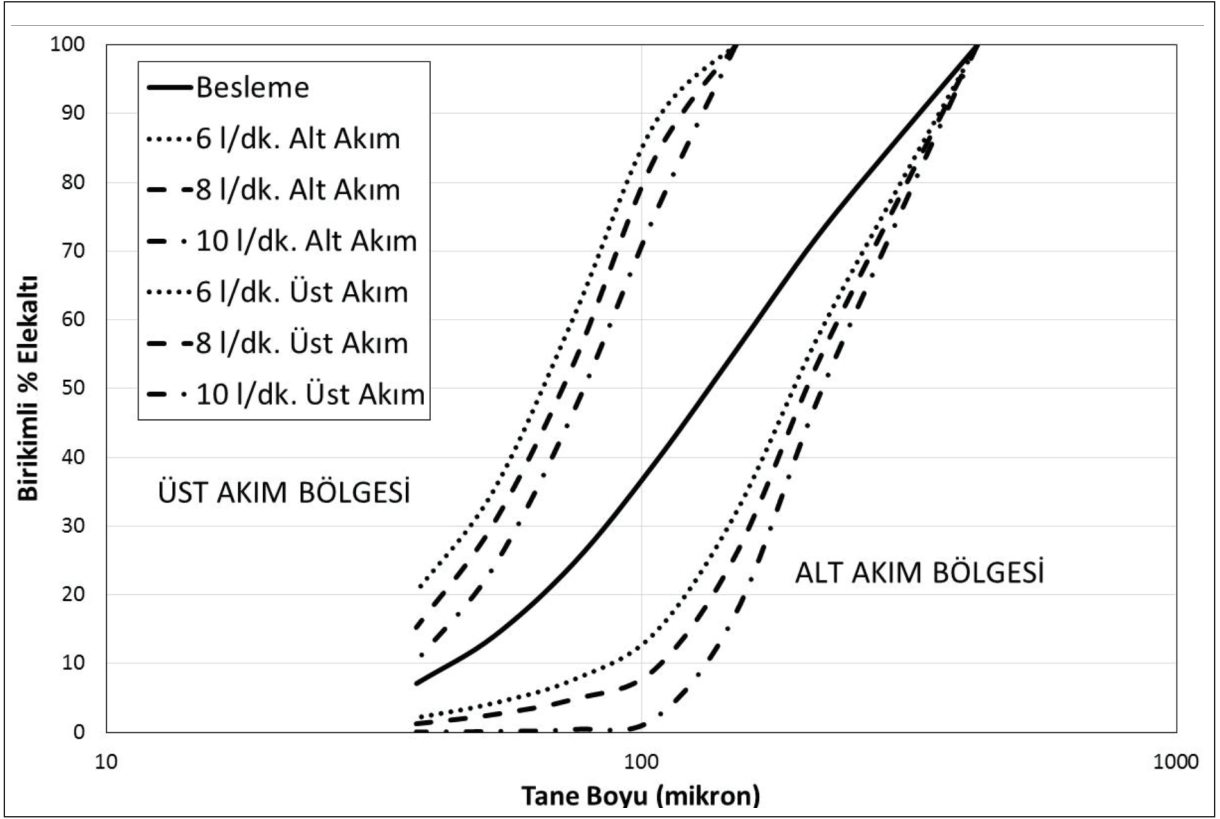
Şekil 3 incelendiğinde yıkama suyu miktarının ve dolayısıyla hızının artması sonucunda alt ve üst akım tane boyu dağılımlarının irileştiği görülmektedir. Yıkama suyu miktarının artması sonucu yukarı yönlü hidrolik taşıma kuvveti de artmaktadır. Bu durum akışkan yatağın daha alt bölgelerinde yer alan iri tanelerin de üst akıma taşınmasına olanak sağlamaktadır. Literatür çalışmalarında da KYA kesme boyunun birincil olarak yıkama suyu hızına bağlı olduğu bildirilmektedir (Remes vd., 2011, Özcan ve Ergun, 2015, Özcan, 2015, Tripathy vd., 2015).

3 numaralı test sonuçları incelendiğinde 10 l/dk.'lık yıkama suyu miktarında alt ve üst akım miktarları yaklaşık olarak eşittir. Ayrıca bu test koşuluna ait alt akım tane boyu dağılımı incelendiğinde 100  $\mu$ m'den ince tanelerin çok verimli şekilde yıkandığı ve alt akımda neredeyse olmadıkları görülmektedir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde 3 numaralı test sonucunda alınan KYA ürünlerinin nihai zenginleştirme testlerinde kullanılmasına karar verilmiştir. Bu koşulda KYA alt akımından alınan ürün iri ürün, KYA üst akımından alınan ürün ise ince ürün olarak adlandırılmıştır. Ürünlerin nihai zenginleştirme testleri laboratuvar ölçekli bir sallantılı masa kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İri ve ince numune için belirlenen test koşulları Çizelge 5'te verilmektedir.

Sallantılı masa testlerinden elde edilen ürünler kurularak gerekli tartımlar alınmış ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Sallantılı masa testlerinden elde edilen veriler doğrultusunda her iki test için de madde denkliliği oluşturulmuştur. Oluşturulan madde denkliliği sonucu elde edilen ağırlık, tenör ve verim değerleri Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 4. KYA test sonuçları  
Table 4. TBS test results

Test No.	Su Hızı (l/dk.)	Basınç Set Değeri	Alt Akım (%)	Üst Akım (%)	Kesme boyu ( $\mu$ m)
1	6	160	65.29	34.71	128
2	8	160	60.57	39.43	139
3	10	160	53.74	46.26	150



Şekil 3. Farklı su hızlarında elde edilen KYA ürünlerine ait tane boyu dağılımları  
Figure 3. Particle size distributions of TBS products obtained at different teeter water rates

Çizelge 5. Sallantılı masa test koşulları  
Table 5. Shaking table test conditions

Test koşulları	İri Ürün	İnce Ürün
Besleme katısı (%)	30	30
Yıkama Suyu miktarı (l/dk.)	10	7
Masa Eğimi (°)	5	3

Çizelgeye göre iri ürünün ana beslemeye göre ağırlıkça %16.62'si konsantre olarak alınırken, bu değer ince ürün için %8.98 olarak hesaplanmıştır. Konsantre tenörleri ele alındığında her iki tenörde %50'nin üzerindedir. Bu sonuçlar her iki üründen de oldukça kaliteli bir kromit konsantresinin elde edilebileceğini göstermektedir. Atık tenörleri ise her iki ürün için %2 seviyelerindedir. Her iki ürüne ait masa ara ürün tenörleri oldukça yüksektir. Bu ürünlerin atık olarak atılması hem tesisin hem de ülke ekonomisinin kaybına

olacaktır. Masa ara ürünlerinin değerlendirilmesi amacıyla bu ürünlere serbestleşme analizi uygulanmıştır. Sonuç olarak her iki numunede de ara ürüne gelen kromit tanelerinin büyük ölçüde serbest taneler olduğu görülmüştür. Bu sonuç doğrultusunda ise ara ürünlerin tekrar masa devresine döndürülebileceği düşünülmektedir.

Sallantılı masa testlerinden elde edilen konsantre tenörleri satılabilir değerlerin oldukça üzerindedir. Bu nedenle Çizelge 6'daki veriler kullanılarak iri ve ince

Çizelge 6. Sallantılı masa test sonuçları (Madde denkleği sonrası)  
Table 6. Shaking table test results (After mass balancing)

Masa Ürünü	Sallantılı Masa Beslemesine Göre					
	Miktar (%)		Kromit Tenörü (%)		Kromit Verimi (%)	
	İri ürün	İnce ürün	İri ürün	İnce ürün	İri ürün	İnce ürün
Besleme	100.0	100.0	19.24	15.43	100.0	100.0
Konsantre 1	14.42	7.78	55.74	53.65	41.77	27.05
Konsantre 2	16.50	11.63	44.97	51.31	38.56	38.65
Ara Ürün	10.93	13.73	22.51	26.58	12.78	23.65
Atık	58.15	66.86	2.28	2.46	6.89	10.66

Masa Ürünü	KYA Beslemesine Göre					
	Miktar (%)		Kromit Tenörü (%)		Kromit Verimi (%)	
	İri ürün	İnce ürün	İri ürün	İnce ürün	İri ürün	İnce ürün
Besleme	53.74	46.26	19.24	15.43	59.16	40.84
Konsantre 1	7.75	3.60	55.74	53.65	24.71	11.05
Konsantre 2	8.87	5.38	44.97	51.31	22.81	15.79
Ara Ürün	5.87	6.35	22.51	26.58	7.56	9.66
Atık	31.25	30.93	2.28	2.46	4.08	4.35

ürünlerin ağırlıkları oranında oluşturulan kümülatif tenör verim değerleri hesaplanmıştır. Kümülatif tenör verim ilişkisi Şekil 4'te verilmektedir.

Şekil 4 kullanılarak %48 kromit tenörlü bir konsantre elde edilmesi durumunda beslemenin hangi verim değeri ile ne kadarının konsantre olarak elde edilebileceği hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre %48 tenör değerine sahip bir konsantre elde edilmesi durumunda beslemenin ağırlıkça %35.29'u konsantre olarak alınabilmektedir. Kromitin ise %80'i konsantreye alınmaktadır.

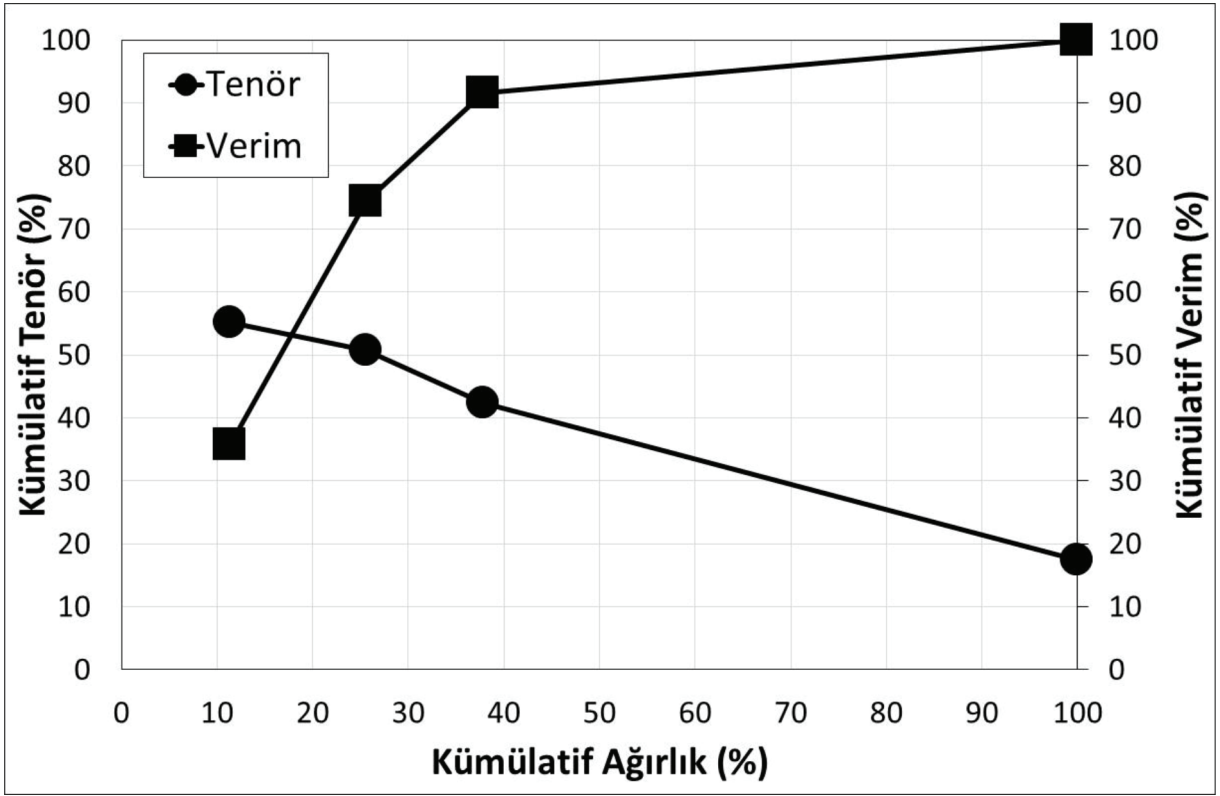
#### Nefelinli Siyenit Cevheri ile Yapılan Çalışmalar

KYA ile zenginleştirme testleri esnasında farklı yıkama suyu miktarları kullanılarak demir içeren tanelerin alt akımdan alınması amaçlanmıştır. Testler esnasında yıkama suyu miktarının zenginleştirme performansı üzerine olan etkisini net bir şekilde ortaya ko-

bilmek için ekipmanın diğer tüm değişkenleri sabit tutulmuştur. Ekipmanın içerisinde birikecek malzeme miktarını ve dolayısıyla oluşacak akışkan yatak miktarını belirleyen değişken basınç set değeridir. Bu değer ekipman içerisinde engelli çökeltme koşullarını oluşturması ve yoğunluk farkına göre ayrımı sağlanması amacıyla mümkün olan en yüksek değerde tutulmuştur. Ekipmanın saydam gövdesi akışkan yatak yüksekliğinin net şekilde görülmesine olanak sağlamaktadır. Akışkan yatak mümkün olduğunca yükseltilmiş ve uygun bir noktada sabitlenmiştir.

Nefelinli siyenit cevheri ile yapılan zenginleştirme çalışmaları esnasında besleme miktarı 500 g/dk., besleme katısı %30, ve basınç set değeri 150 olarak ayarlanmıştır. Yıkama suyu miktarı ise 4, 7 ve 10 l/dk. olarak değiştirilerek her bir koşul için kararlı durumun sağlanmasının ardından numune alma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Nefelinli siyenit cevheri ile gerçekleştirilen test sonuçları Çizelge 7'de verilmektedir.





Şekil 4. KYA ürünlerine ait sallantılı masa kümülatif verim-tenör ilişkisi  
Figure 4. Cumulative shaking table grade recovery curve of TBS products

Çizelge 7 incelendiğinde yıkama suyu miktarının artması sonucu KYA alt akımına gelen malzeme miktarının yaklaşık olarak %10'dan, %4'e kadar düştüğü görülmektedir. En yüksek su hızı olan 10 l/dk.'lık koşulda besleme malzemesinin neredeyse tamamı üst akımdan alınmaktadır. Yıkama suyu miktarına bağlı olarak KYA alt akım demir tenöründeki değişim Şekil 5'te verilmektedir.

Şekil 5 incelendiğinde, yıkama suyu miktarının artması alt akım demir tenörünü önemli miktarda artırmaktadır. Özellikle en yüksek yıkama suyu miktarı olan 10 l/dk.'lık koşulda alt akım demir tenörü en yüksek değerlerine ulaşarak %16.79 değerini almaktadır. Bu koşulda alt akım demir verimi ise %86.44 olarak gerçekleşmiştir. En yüksek yıkama suyu miktarında demirin cevherden etkin şekilde uzaklaştırıldığı ve KYA üst akım demir içeriğinin %0.77'den %0.11'e kadar düşürüldüğü görülmektedir.

Bu koşulda alınan alt akım ve üst akım numunesindeki demirin tane boyu fraksiyonlarına ne şekilde dağıldığı da incelenmiştir. 10 l/dk. yıkama suyu miktarında KYA alt akımına ait fraksiyonel  $Fe_2O_3$  tenörleri

Çizelge 8'de, üst akımına ait fraksiyonel  $Fe_2O_3$  tenörleri ise Çizelge 9'da verilmektedir.

Çizelge 8 incelendiğinde alt akımda iri fraksiyonlardan ince fraksiyonlara doğru inildikçe malzeme miktarının azaldığı, buna karşılık demir içeriğinin ise arttığı görülmektedir. Bu durum iri fraksiyonlarda demir içeren tanelerle birlikte iri kuvars ya da alümina parçalarının da kütleleri nedeniyle alt akıma geldiği ancak tane boyu incelidikçe yukarı yönlü yüksek su hızı ve yoğun akışkan yatak nedeniyle sadece demir içeren tanelerin alt akıma gelebildiği şeklinde yorumlanmaktadır.

KYA üst akımı iri ve ince iki fraksiyon şeklinde incelendiğinde 212  $\mu m$ 'den iri tanelerde demir tenörünün daha düşük olduğu, 212  $\mu m$ 'den ince fraksiyonda ise demir tenörünün yükseldiği görülmektedir. Bu durum demir içeren ince boydaki tanelerin de üst akıma gelebildiğini göstermektedir. Ancak bu tanelerin kesin boyut aralığı eldeki veriler ile belirlenememiştir. Üst akıma gelen 212 mikrondan ince tanelerin demir tenörünün besleme demir tenörüne göre oldukça düşük olması, demir içeren tanelerin nispeten iri

Çizelge 7. Nefelinli siyenit cevheri test sonuçları  
Table 7. Nepheline syenite ore test results

Yıkama Suyu Miktarı (l/dk.)	Ürün	Miktar (%)	Tenör (%)				
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Toplam Alkali
	Besleme	100.0	61.51	19.98	0.14	0.77	11.79
4	KYA Alt Akım	10.62	57.43	17.69	0.21	2.13	12.29
	KYA Üst Akım	89.38	61.99	20.26	0.13	0.61	11.73
7	KYA Alt Akım	7.02	53.62	16.21	0.44	7.10	9.77
	KYA Üst Akım	92.98	62.10	20.27	0.11	0.30	11.94
10	KYA Alt Akım	3.99	48.40	15.01	0.72	16.79	6.73
	KYA Üst Akım	96.01	62.05	20.19	0.11	0.11	12.00

Yıkama Suyu Miktarı (l/dk.)	Ürün	Miktar (%)	Verim (%)				
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Toplam Alkali
	Besleme	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
4	KYA Alt Akım	10.62	9.92	9.40	16.53	29.19	11.07
	KYA Üst Akım	89.38	90.08	90.60	83.47	70.81	88.93
7	KYA Alt Akım	7.02	6.12	5.69	22.58	64.31	5.82
	KYA Üst Akım	92.98	93.88	94.31	77.42	35.69	94.18
10	KYA Alt Akım	3.99	3.14	3.00	21.18	86.44	2.28
	KYA Üst Akım	96.01	96.86	97.00	78.82	13.55	97.72

boylarda yer aldığını ve bu tanelerinde üst akıma gelemediğini göstermektedir.

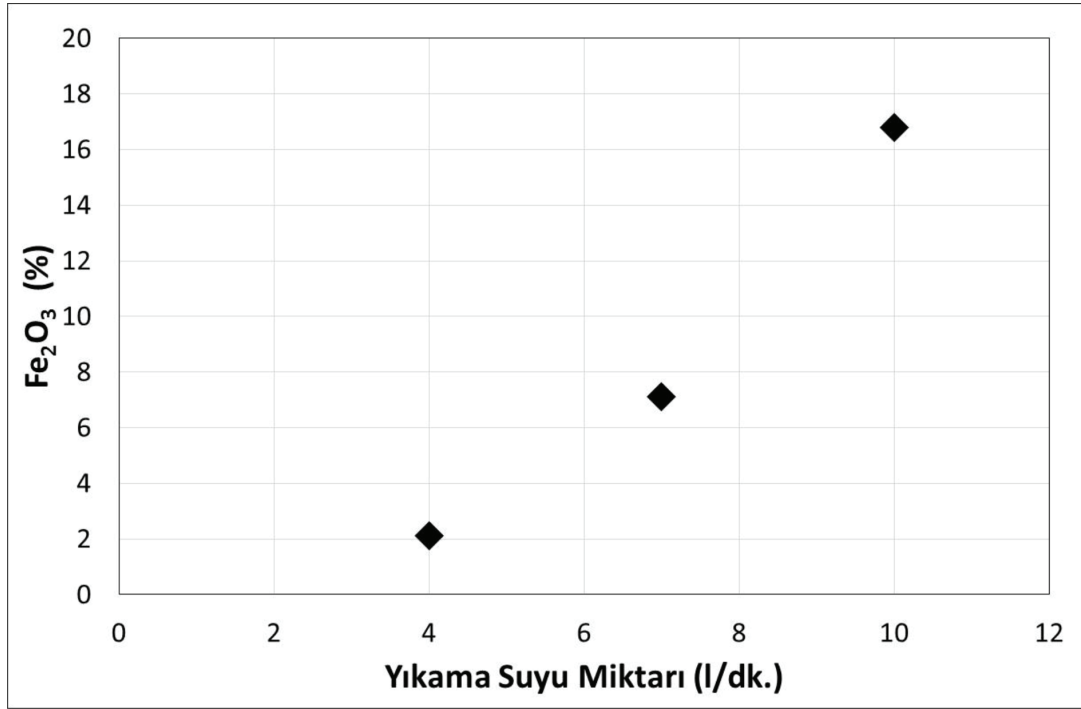
Yıkama suyuna karşılık alt akımda toplam alkali, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlerindeki değişim Şekil 6'da verilmektedir.

Şekil 6 incelendiğinde yıkama suyu miktarındaki artış sonucu alt akımda alkaliler, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum alt akımdan nispeten daha yoğun tanelerin alındığını ve yıkama suyu miktarındaki artışın üst akım ürün kalitesini arttırdığını göstermektedir.

En iyi koşulda elde edilen nefelinli siyenit konsantresinin kimyasal bileşimi ile farklı bölgelerden elde

edilen satılabilir nefelinli siyenit konsantresinin karşılaştırılması Çizelge 10'da verilmektedir (Bayhan ve Girgin 1993, Zaher ve Tawab, 2014).

Çizelge 10 incelendiğinde KYA kullanılarak elde edilen nefelinli siyenit konsantresinin safsızlık değerleri diğer satılabilir konsantreler ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve alkali değerleri de oldukça yakındır. Sonuç olarak yalnızca KYA kullanılarak bir nefelinli siyenit konsantresi elde edilebileceği görülmektedir. Yıkama suyu miktarı dışındaki işletme değişkenlerinin de optimize edilmesi ile daha yüksek tenör değerlerinde konsantreler elde edilebileceği de öngörülmektedir.



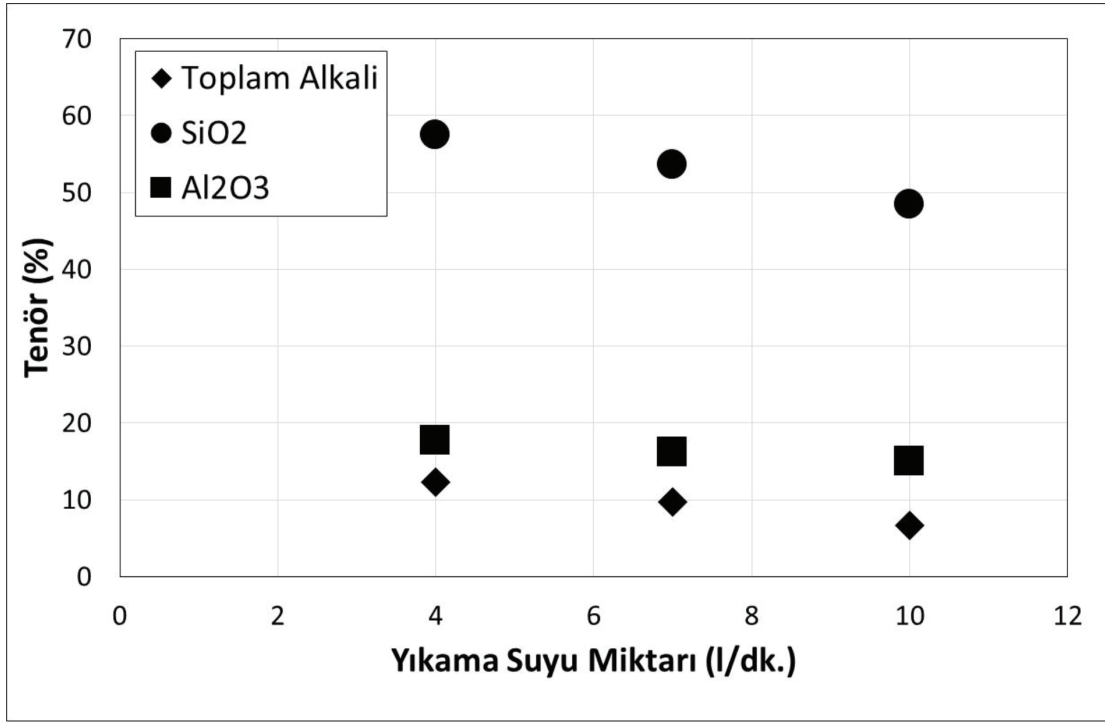
Şekil 5. Yıkama suyuna karşılık alt akımda demir tenöründeki değişim  
Figure 5. Underflow iron content against teeter water

Çizelge 8. KYA alt akımına ait fraksiyonel Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörleri (10 l/dk.)  
Table 8. Fractional Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grades of TBS underflow (10 lpm)

Tane Boyu Fraksiyonu (µm)	Ağırlık (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
-600+425	56.03	12.90
-425+300	36.04	19.13
-300	7.94	29.61
TOPLAM	100	16.47
ANALİZ	-	16.79

Çizelge 9. KYA üst akımına ait fraksiyonel Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörleri (10 l/dk.)  
Table 9. Fractional Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grades of TBS overflow (10 lpm)

Tane Boyu Fraksiyonu (µm)	Ağırlık (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
+212	59.70	0.08
-212	45.70	0.18
TOPLAM	100.0	0.12
ANALİZ	-	0.11



Şekil 6. Yıkama suyuna karşılık alt akımda toplam alkali, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlerindeki değişim  
Figure 6. Underflow total alkali, SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content against teeter water

Çizelge 10. Elde edilen nefelinli siyenit özelliklerinin satılabilir konsantre özellikleri ile karşılaştırılması  
Table 10. Comparison of obtained nepheline syenite and marketable concentrates

Ürün	Tenör (%)				
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Toplam Alkali
KYA Üst Akım	62.05	20.12	0.11	0.11	11.93
Bayındır-Akpınar	69.96	22.19	0.08	0.16	15.09
North Cape	57.00	23.80	0.10	0.10	16.90
Mısır	60.23	21.10	0.33	0.20	14.53

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, yeni nesil hidrolik sınıflandırıcılardan olan laboratuvar ölçekli bir kabaran yataklı ayırıcının (KYA), sınıflandırma ve zenginleştirme uygulamalarında kullanılabilirliği incelenmiştir. Kromit konsantresi ile yapılan sınıflandırma çalışmaları sonucunda, yukarı yönlü su hızını belirleyen yıkama suyu miktarındaki artışın KYA alt akımına gelen malzeme miktarını azalttığı, aynı zamanda ekipmanın kesme boyunu ( $d_{50}$ ) irileştirdiği belirlenmiştir. Özellikle en yüksek yıkama suyu miktarında alt akım tane boyu dağılımı incelenmiş ve 100  $\mu$ m'den ince tanelerin alt akımda olmadıkları görülmüştür. KYA ve konvansiyonel

sınıflandırıcılar bu özelliği ile karşılaştırıldığında ince tanelerin su ya da mekanik yollarla alt akıma kaçak sorununun büyük ölçüde azaldığı görülmektedir. Kaçak miktarındaki azalma ise hem sınıflandırma hem de zenginleştirme devrelerinin performansında artışa sebep olmaktadır. Tesis koşullarında elde edilemeyen %48 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre KYA-Sallantılı masa devresi ile yüksek verim değerinde elde edilmiştir.

Nefelinli siyenit cevheri ile yapılan zenginleştirme çalışmaları sonucunda taneler arasındaki yoğunluk farkından yararlanılarak cevher içerisindeki demir içeriği %0.77'den %0.11'e kadar düşürülmüştür. Alt akımdaki demir içeriği yıkama suyu miktarı ile birlikte artış

göstermiştir. Benzer cevherlerden demir uzaklaştırmak için kullanılan manyetik ayırma ve flotasyon gibi yöntemler ele alındığında ise KYA kullanılarak benzer özellikte bir konsantrenin daha düşük maliyet ile elde edilebileceği düşünülmektedir.

Deneysel çalışmalar sırasında incelenen tek işletme değişkeni yıkama suyu miktarıdır. Literatürde yapılan çalışmalarda yukarı yönlü su hızının ekipman performansı üzerinde birincil derecede etkili olduğu bildirilmektedir (Maharaj, 2005, Ozcan, 2015). Ancak diğer bir işletme değişkeni olan basınç set değerinin de farklı uygulamalar için farklı değerlere optimize edilmesi ekipman verimini arttıracaktır.

### KATKI BELİRTME

Yazar, makalenin değerlendirme sürecinde gösterdikleri ilgiden dolayı Hacettepe Yerbilimleri Dergisi Editörlüğüne ve yapıcı eleştirileri ile katkı sağlayan hakemlere teşekkür eder.

### KAYNAKLAR

- Abdel-Zaher M. A., Abdel-Tawab A. N., (2014). Characterization and Beneficiation of an Egyptian Nepheline Syenite Ore, *International Journal of Mineralogy*, Cilt 2014, s 1-9.
- Aydın, M.E., (2001). Etibank Guleman Kef Konsantratör Tesisi Kromit Artıklarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Bayhan, H. ve Girgin, İ., (1993). Bayındır - Akpınar (Kaman) Nefelinli Siyenitlerinin Zenginleştirilmesi, *Madencilik Dergisi*, Cilt 32, no. 2, s. 21-26.
- Guney A., Sirkesi A. A., Gurkan V., and Onal G., (1996). "The recovery of chromite fines from the tailings of Uckopru chromium plant using HIWMS." *Changing scopes in mineral processing*, pp 149-154.
- Honaker, R. Q. and Mondal, K., (1999). Dynamic Modelling of Fine Particle Separations in a Hindered Bed Classifier, *Coal Prepar.*, Cilt. 21, s. 211-232.
- Kari, C., Kapure, G., Rao, S.M.; Rao, N.D., (2006). Predicting the Chromite Mineral Upgradation in Floatex Density Separator Using Hindered Settling Models. *The Iron and Steel Institute of Japan International*, Cilt 46, s. 966-973.
- Kumar, C.R., Tripathy, S.K., Rao D.S., (2009). Characterization and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density separator. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Cilt. 8, s. 367-378.
- Maharaj, L., (2005). An Investigation of the Hydrodynamics of the Teetered Bed Separator for Fine Coal Recovery, MSc. Thesis, University of Kwazulu-Natal, Durban.
- Ozcan, O. (2015) Performance of Teetered Bed Separators for Non-Coal Applications, PhD. Thesis, Hacettepe University, Department of Mining Engineering, Ankara/TURKEY.
- Ozcan, O. and Ergun, L., (2015). Classification Performance Evaluation of a Teetered Bed Separator for Silica Sand, *Proceedings of the 14th European Symposium on Comminution & Classification*, s. 240-244, Gothenburg.
- Ozcan, O. and Celik, I., (2016). Beneficiation routes for upgrading iron ore tailings with a teetered bed separator, *Separation Science and Technology*, Cilt 51:17, s. 2844-2855.
- Remes, A., Tuikka, A., Kivio, H., (2011). Simulation and pilot experiments on pyrite concentrate separation in a Floatex density separator, *Minerals and Metallurgical Processing*, Cilt 2, no. 28, s. 62-70.
- Schlesinger, L. and Hutwelker, J., (1992). Preliminary Desliming Tests NC Phosphate Using a Pilot-Scale Linatex Hydrosizer, *North Carolina State Minerals Research Laboratory*, North Carolina.
- Tripathy, S.K., Mallick M.K., Singh V., Murthy R.M., (2013). Preliminary studies on teeter bed separator for separation of manganese fines, *Powder Technology*, Cilt 239, s. 284-289.
- Tripathy, S. K., Bhoja, S. K., Kumar C. R., Suresh, N., (2015). A short review on hydraulic classification and its development in mineral industry, *Powder Technology*, Cilt 270, s. 205-220.
- Zaher, M.A., Tawab, A.N., (2014). Characterization and Beneficiation of an Egyptian Nepheline Syenite Ore, *International Journal of Mineralogy*, Cilt 2014, s. 1-9.

