



Makale / Research Paper

Düşük Kaliteli Bentonitlerin Knelson Konsantratör ile Zenginleştirilmesi

Selçuk ÖZGEN^{1a}

¹Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye
ozgens@tki.gov.tr

Received/Geliş: 10.06.2020

Accepted/Kabul: 13.08.2020

Öz: Türkiye'deki bazı bentonit yataklarının minör derecede safsızlık içermesi çoğu sektörlerde kullanımı için bir problem oluşturmuyorken özellikle ilaç, kozmetik, ağartma toprağı gibi alanlarda yüksek saflıkta bentonitler istenmektedir. Bunun yanında kaliteli bentonit yataklarının tükenmesi de gelecekte bentonit zenginleştirmenin önemini artacaktır. Bu çalışmada, Eskişehir/Sarıcakaya bentonitlerinin knelson konsantratör ile zenginleştirilerek mineralojik ve fizikokimyasal özelliklerinin değişimleri incelenmiştir. Çalışmada knelson konsantratörün çalışma parametrelerinden santrifüj kuvvet, yıkama suyu basıncı ve besleme hızının etkisi araştırılmıştır. Bu parametreler kullanılarak deneylerin gerçekleştirilmesi ve parametrelerin optimize edilmesi için deney tasarımı yöntemleri kullanılmış ve matematiksel modeller oluşturulmuştur. Çalışmalarda %55 smektit içeriğı ve 10 mls/2g şişme indeksine, 57,10 meq/100g kation değişim kapasitesine sahip bentonitler kullanılmış olup knelson konsantratör ile zenginleştirme sonrası sırasıyla %98 smektit içeriğine sahip şişme indeksi 33 mls/2g ve KDK 93,7 meq/100g olan temiz bentonitler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bentonit, Knelson konsantratör, Zenginleştirme, Kation Değişim Kapasitesi, Şişme İndeksi, Smektit İçeriğı.

Purification with Knelson Concentrator of Low-Grade Bentonites

Abstract: The fact that some bentonite deposits in Turkey contain minor impurities is not a problem for use in most sectors. However, high purity bentonites are used especially in fields such as medicine, cosmetics and bleaching earth. In addition, quality bentonite deposits are running out. For this reason, the importance of bentonite enrichment will increase in the future. In this study, Eskişehir / Sarıcakaya bentonites are enriched with knelson concentrator. And the changes of mineralogical and physicochemical properties are studied. In the study, the effect of centrifugal force, washing water pressure and feed rate, which are the working parameters of knelson concentrator, were investigated. Experimental design methods were used to perform experiments and optimize parameters using these parameters. In this , mathematical models were created. Bentonites with 55% smectite content and 10 ml / 2g swelling index, 57.10 meq / 100g cation exchange capacity were used in the studies. After enrichment with knelson concentrator, clean bentonites with 98% smectite content, swelling index 33 mls / 2g and KDK 93.7 meq / 100g were obtained.

Keywords: Bentonite, Knelson Concentrator, Purification, Cation Exchange Capacity, Swelling, Smectite Content

1. Giriş

Bentonit, çoğunluğunu smektit minerallerinin oluşturduğu bir kil mineralidir. Smektit ise montmorillonit, beidellit, hectorit ve saponit mineralleri içeren bir aile adıdır [1]. Bentonit, sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı birçok endüstri dalının vazgeçilmez mineralleri arasına girmiştir [2]. Ticari olarak düşünüldüğünde, suyla temasa geçince şişebilen, asitle aktifleştirilebilen, sondaj çamurlarını koyulaştıran, geniş kullanım alanına sahip ve en az %85 montmorillonit içeren yumuşak koloidal özellikli bir kildir [2, 3]. Bentonitin kalitesini içerdiği

Bu makaleye atıf yapmak için

Özgen, S., "Düşük Kaliteli Bentonitlerin Knelson Konsantratör ile Zenginleştirilmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7(3); 1407-1416.

How to cite this article

Özgen, S., "Purification with Knelson Concentrator of Low Grade Bentonites" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7(3); 1407-1416.

ORCID: ^a0000-0002-2078-5349

smektit miktarı, yan mineraller, katyon değişim kapasitesi ve değişebilen katyon değeri, şişme özelliği ve adsorpsiyon kapasitesi gibi çeşitli fiziksel özellikleri belirler [4-8]. Şişme özelliklerine göre bentonitler, tabakaları arasındaki değişebilir katyon tipine göre; Ca-bentonit, Na-bentonit ve ara tip bentonit olmak üzere üç gruba ayrılır [9].

Teknolojinin gelişmesi kil mineralleri ile birlikte yüksek saflıkta bentonitlerin kullanımını da artırmıştır. Örneğin, yüksek saflıkta bentonitler ağartma toprağı olarak, kozmetik sanayinde ve ilaç sanayinde kullanılmaya başlanmıştır. Hatta son günlerde bentonit kumaş teknolojisi çeşitli yatak firmaları tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Bu yüzden bentonit zenginleştirme önemini daha da artırmıştır [8].

Önceki çalışmalar bentonitler içerisindeki çeşitli safsızlıkların bentonitin endüstriyel uygulamalardaki performansını etkilediğini göstermiştir [10-11]. Örneğin, bentonitin içeriğindeki kil dışı minerallerin varlığı bentonitin şişme özelliğini olumsuz etkilemektedir [7, 10-11]. Bentonitin içerisinde bulunan en önemli kirletici mineraller kuvars ve kalsit gibi minerallerdir. Bu mineraller uzaklaştırılarak bentonitin smektit içeriği artırılabilir. Literatür taramalarında bentonitin saflaştırılması ve smektit içeriğinin artırılması için çeşitli metotlar önerilmektedir. Smektit minerali 2 µm'den küçük olduğu için başta eleme [12-13], manyetik ayırma [12] yada çökme hızına bağlı ayırma yöntemleri kullanılmıştır [14-16]. Bentonitlerin zenginleştirilmesi oldukça basit bir işlem olmasına rağmen zenginleştirme yönteminin maliyet açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Bentonitlerde bulunan şişme özelliği nedeniyle hidrosiklon gibi yaş zenginleştirme yöntemlerinde düşük katı oranları kullanıldığında susuzlandırma sırasında yüksek maliyetler ile karşılaşılmasına neden olur. Bunun yanında dekontasyon gibi yöntemlerle karşılaştırıldığında hidrosiklonun avantajları ön plana çıkmaktadır [17]. Türkiye'deki bentonitlerin zenginleştirilmesinde de bazı araştırmacılar da hidrosiklon kullanmışlardır [8, 18-19]. Özgen ve diğ. [8] üç farklı bentonit kullandığı çalışmada sırasıyla %54, %55 ve %40 smektit içeriğine sahip bentonitleri hidrosiklon ile zenginleştirerek smektit içeriğini %84, %93 ve %73'e yükseltmişlerdir. Son dönemlerde ise gelişmiş gravite cihazlarından falcon konsantratör kullanılarak %55 smektit içeren bentonitten %97,74 smektit içeren bentonit elde edilmiştir [20].

Bu çalışmada ise, endüstride kullanımı uygun olmayan Eskişehir/Sarıcakaya bölgesinden alınmış bentonitlerin gelişmiş gravite cihazlarından knelson konsantratör ile zenginleştirilerek katyon değişim kapasitesi, şişme indeksi ve smektit içeriği artırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında bentonit zenginleştirmeye önemli etkisinin olacağı düşünülen knelson konsantratöre ait üç çalışma değişkeninin optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda başarılı bir şekilde uygulanan Box Behnken deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede matematiksel modeller oluşturularak maksimum katyon değişim kapasitesi, şişme indeksi ve smektit içeriği elde edilebilecek çalışma şartları belirlenmiştir.

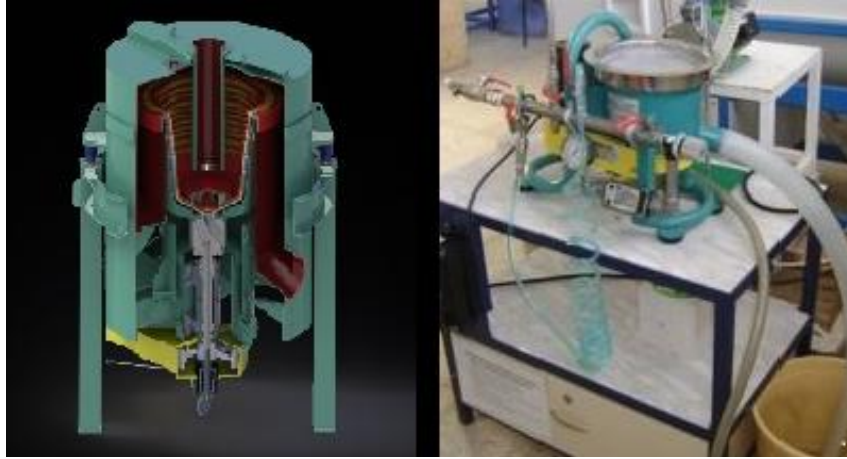
2. Knelson Konsantratör

Knelson konsantratör, Byron Knelson tarafından 1988 yılında Kanada'da patenti alınmış yüksek hızlı santrifüj ayırıcıdır. İlk çıkış amacı damar tipi ve alüvyon altın üretiminde değerli metallere kazanılması olan cihaz daha sonra birçok sektörde minerallerin zenginleştirilmesi için kullanılmaya başlanmıştır [21]. Standart bir knelson konsantratör 6 mm'den daha küçük boyuttaki malzemeler beslenmektedir [22]. Knelson konsantratör, rakip cihazlara göre basit yapısı, kapasitesinin yüksek olması, daha geniş tane aralığında çalışabilmesi, yüksek zenginleştirme verimi elde edilmesi nedeniyle tercih edilmektedir.

Knelson konsantratör, dönme işlemini gerçekleştiren üniteyle birlikte, yüksek hızda dönen bir yataktan oluşur. Üst kısımdan beslenen malzeme içerisindeki ağır taneler santrifüj kuvvetinin

etkisiyle konsantre olarak yatağın oluklarına takılır. Besleme içerisindeki gang mineralleri ise atık olarak üst akışıyla birlikte atılır. Malzeme beslemesi, knelson konsantratörün haznesi içine düşey bir tüp vasıtasıyla yapılmaktadır. Yapılan besleme %0-70 katı yoğunluğunda olabilir. Haznenin alt kısmında beslemeyi dağıtacak olan bir pervane mevcuttur [23]. Knelson konsantratör yerçekimi ivmesinin ortalama 60 katı kadar bir santrifüj kuvvet oluşturabilmektedir [24].

Knelson konsantratör haznesinin bulunan paralel olukların içerisindeki küçük deliklerden basınçlı su verilerek malzemenin yıkanması ve haznenin alt tarafında toplanması sağlanır [25]. Knelson konsantratörün sürekli (Continuous) ve yarı kesikli (Semi-Continuous) modelleri mevcuttur. Bu çalışmada da 65 ml sepet kapasitesi bulunan KC-MD3 yarı kesikli modeli kullanılmıştır. Kullanılan knelson konsantratör ve iç şematik resmi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan knelson konsantratör.

3. Materyal ve Metot

3.1 Materyal

Knelson konsantratör ile yapılan zenginleştirme çalışmalarında önemli bentonit oluşumlarının bulunduğu Eskişehir ilinin Sarıcakaya ve Mihalgazi ilçeleri arasındaki bentonit yataklarından alınan numune kullanılmıştır. Bölgedeki bentonit yataklanmasına ait uydu görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’de verilen sarı alandaki değişik stratigrafik seviyelerden örnekler toplanmıştır. Yapılan incelemelerde çalışma alanındaki bentonitlerin andezitik ve riyodasitik/dasitik bileşimli volkanik kayaların ayrışmasıyla oluştuğu gözlenmiştir. Bölgedeki jeolojik çalışmalarda söz konusu bentonit oluşumları jeolojik özelliklerine göre üç grupta toplanmaktadır. Bunlar; andezitik ve riyodasitik/dasitik bileşimli lavların ayrışmasıyla oluşmuş bentonitler (Grup 1), andezitik bileşimli aglomeraların ayrışmasıyla oluşmuş bentonitler (Grup 2) ve riyodasitik/dasitik bileşimli tüflerin ayrışmasıyla oluşmuş bentonitler (Grup 3) şeklindedir [26]. Bu çalışmada da Grup 2 olarak adlandırılan andezitik bileşimli aglomeraların ayrışmasıyla oluşan bentonitler kullanılmıştır. Temin edilen numunelerin XRF analizi Rigaku marka ZSX primus II model cihazda yapılmış ve sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Bentonitlerin kimyasal analiz sonuçları.

Örnek	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MnO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	LOI	Total
Bentonit	1,35	3,83	16,18	52,80	0,15	1,68	2,93	0,07	0,84	6,27	14,00	100,00

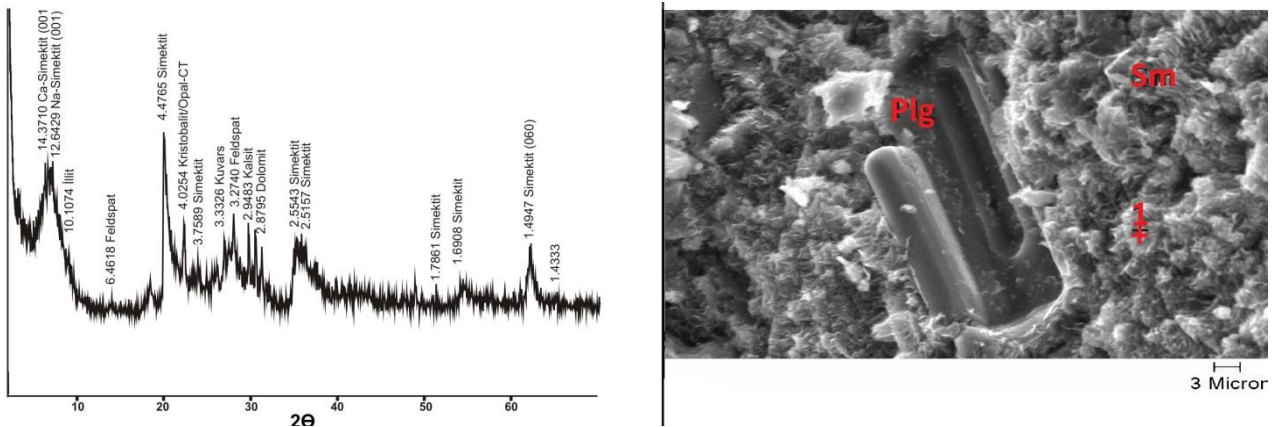
Bentonit örneklerinin mineralojik incelemeleri ise Shimadzu marka X-ışını difraktometre cihazı (Ni Filtreli, CuK α radyasyonlu) ile yapılmıştır. Tüm çalışmalarda tarama hızı 2 %dk’dır. XRD analizleri

-250 μm tane boyutundaki örneklerde yapılmıştır. Bentonitlerde bulunan kil dışındaki minerallerin yarı kantitatif mineralojik analizi Gündoğdu [27] tarafından önerilen yöntemle yapılmıştır.



Şekil 2. Bentonit örneklerinin toplandığı alan.

Kil minerallerinin yarı kantitatif mineralojik analizinde ise pik alanı yöntemi kullanılmıştır [28-29]. Morfolojik ve mineralojik çalışmalar EDS ekipmanlı LEO VP-1431/Kore tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmaya ait sonuçlar Şekil 3'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre ana mineralin smektit olduğu belirlenmiştir. Bunun dışındaki kil minerallerinin illit ve klorit olduğu gözlenmiştir. Ayrıca örneklerde kil dışı mineral olarak kristobalit/opal-CT, kuvars, feldspat, kalsit ve dolomit görülmüştür. XRF-XRD verilerine göre zenginleştirme deneylerinde kullanılacak bentonit örneklerinin Na-Ca bentonit bileşimli olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Bentonit örneğine ait XRD grafiği ve SEM görüntüsü.

Çalışmada kullanılan bentonitlerin yarı kantitatif olarak hesaplanan mineral içerikleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre bentonitin kullanım performansını etkileyen smektit %55 olarak

hesaplanmıştır. Smektit dışındaki diğer önemli mineral olan feldspat %32, kristobalit/opal-CT ise %5 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Bentonitlerin yarı kantitatif mineralojik analiz sonuçları

Örnek	Smektit	İllit	Klorit	Kristobalit/Opal-CT	Kuvars	Feldspat	Kalsit	Dolomit
Bentonit	55	0	0	5	2	32	3	3

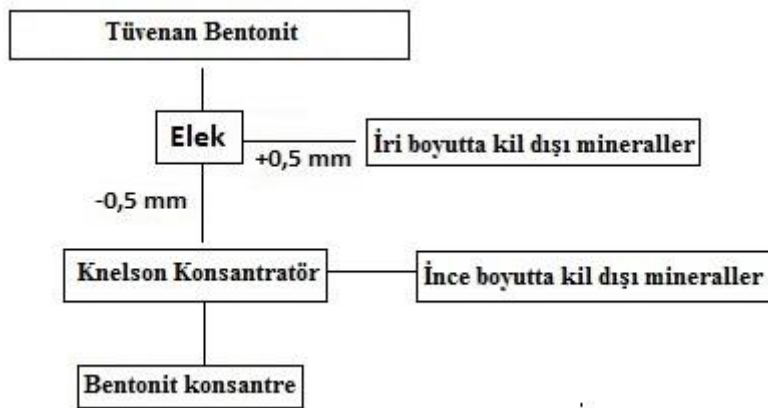
Şişme deneyleri Özkan [30] tarafından önerilen şekliyle yapılmış olup her deneyde 2 gr örnek kullanılmıştır. İçerisinde 100 ml saf su bulunan 100 ml'lik mezürlere her seferinde yaklaşık 0,1 gr olacak şekilde 10-20 dk aralıklar ile bentonit ilave edilmiştir. 2 gr bentonit tamamen ilave edildikten 24 saat sonra mezürde okunan hacim değeri (ml) şişme indeksi olarak kabul edilmiştir. Bentonitlerin katyon değişim kapasiteleri (KDK) ise metilen mavisi yöntemiyle ASTM 837 C standardına göre yapılmıştır. Bentonit örneklerine ait şişme indeksi ve KDK değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Bentonitlerin şişme indeksi ve KDK test sonuçları.

Örnek	Şişme İndeksi (2gr/100ml)	KDK (meq/100gr)
Bentonit	10,0	57,10

3.2. Metot

Çalışmalarda kullanılacak bentonit örneklerinin tamamı zenginleştirme işlemi öncesinde 60 °C'de kurutulmuş ve kurutulan örnekler %20 katı oranı sağlayacak şekilde suda bir gün bekletildikten sonra 4 saat pervaneli karıştırıcıda dağıtılmıştır. Bu işlem sonrasında elde edilen bentonit-su karışımı 500 mikronluk elekten geçirildikten sonra elek altı Knelson konsantratöre peristaltik pompa ile beslenerek zenginleştirme işlemi yapılmıştır (Şekil 4). Daha elde edilen konsantr ve atık ürünler toplanarak filtre edilmiş, kurutulmuş ve analizleri (smektit, şişme indeksi ve KDK) yapılmıştır.



Şekil 4. Deneysel akım şeması.

Knelson konsantratör deneylerinde besleme katı oranı sabit tutularak santrifüj kuvveti (G), yıkama suyu basıncı (P) ve besleme hızı (H) değiştirilmiştir. Bu değişkenlere ait seviyeler Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Knelson konsantratör deney parametreleri.

Parametre	Birim	Seviyeler
G Kuvveti (G)	kg.m/s ²	60-100-140
Yıkama Suyu Basıncı (P)	psi	1-3-5
Besleme Hızı (H)	lpm	1-3-5

3.3. Deney Tasarımı

Son yıllarda bilimsel araştırmaların vazgeçilmez bir parçası olan deney tasarım yöntemleri minimum zaman ve kaynak harcayarak maksimum anlamlı veriler elde etmek için kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerde deney sayısının fazla olması hem malzeme ve analiz maliyetlerini yükseltmekteydi hem de deneysel çalışmaların uzun zaman almasına neden olmaktadır. Bu yöntemlerde her bir parametrenin deney üzerindeki etkisini araştırmak için diğer bütün parametreler sabit tutulmakta ve her defasında farklı bir parametre denenmektedir. Bu yüzden bu yöntemlerle yapılacak çalışmalarda parametreler ve seviyeleri sınırlı tutulmakta ve sonuca ulaşmak zorlaşmaktadır. Bu şekilde hem deney sayısı artmakta hem de parametreler arası iç etkileşim gözardı edilmektedir. Deney tasarımı her sektörde olduğu gibi madencilik sektöründe yapılan çalışmalarda da kullanılmaktadır [31].

Bu çalışma kapsamında da istatistiksel deney tasarım yöntemlerinden faydalanılarak knelson konsantratör ile bentonitlerin zenginleştirilmesi araştırılmıştır. Zenginleştirme deneylerinde merkezi kompozit tasarımı olan Box-Behnken deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede bentonitin zenginleştirmesini tanımlayan modeller üretilmiştir. Deney tasarımı ve bu işlemleri tanımlayan bütün işlemler Minitab® 16 bilgisayar programı ile yapılmıştır. Bu program kullanılarak hazırlanan 15 deney (3 merkez nokta) seti Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Zenginleştirme deney seti

Deney No	Değişkenler			Deney No	Değişkenler			Deney No	Değişkenler		
	G	P	H		G	P	H		G	P	H
1	60	3	1	6	100	3	3	11	140	3	1
2	100	3	3	7	60	5	3	12	140	3	5
3	100	1	1	8	60	1	3	13	140	1	3
4	140	5	3	9	100	1	5	14	60	3	5
5	100	3	3	10	100	5	1	15	100	5	5

3. Sonuçlar ve Tartışma

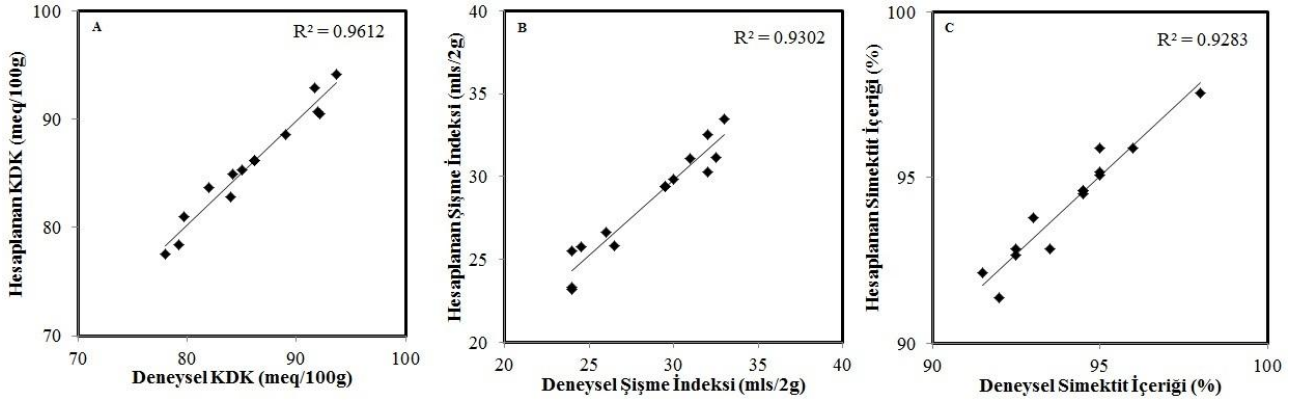
Tablo 5'te verilen deney programına uygun olarak yapılan 15 adet knelson konsantratör zenginleştirme deneylerine ait sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. 15 deneyden elde edilen bentonit konsantrlerine KDK, şişme ve smektit analizleri yapılmıştır. Buna göre en iyi sonuçlara 13 nolu deneyde ulaşılmış olup bu deneyden elde edilen ürüne ait KDK, şişme indeksi ve smektit sonuçları sırasıyla 93,7 meq/100g, 33 mls/2g ve %98'dir.

Elde edilen sonuçlar ile parametrelerin sonuçlar üzerine etkilerini belirlemek için 2. derece denklemler oluşturulmuş ve Denklem 1-3'de verilmiştir. Bu denklemlerde yola çıkarak hesaplanan değerler de Tablo 6'ya yerleştirilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak deneysel veriler ve hesaplanan veriler arasındaki korelasyon belirlenmiş ve ilişkileri gösteren grafikler Şekil 5'te verilmiştir. Buna göre KDK için 0,9381 korelasyon katsayısı (R^2) elde edilirken, şişme indeksi için 0,9146 R^2 ve smektit içeriği için 0,9134 R^2 elde edilmiştir.

$$KDK(\text{meq}/100\text{g}) = 76,06 - 0,02G + 4,43P + 0,21H + 6,33G^2 \cdot 10^{-4} - 0,31P^2 - 0,059H^2 - 0,0059GP + 0,014GH - 0,81PH \quad (1)$$

$$\text{Şişme}(\text{mls}/2\text{g}) = 17,2 + 0,117G + 2,65P - 0,41H - 1,95G^2 \cdot 10^{-4} - 0,27P^2 - 0,11H^2 - 0,0047GP + 9,37GH \cdot 10^{-3} - 0,25PH \quad (2)$$

$$\text{Smektit}(\%) = 88,67 + 0,027G + 1,53P + 0,78H + 1,95G^2 \cdot 10^{-4} - 0,11P^2 - 0,14H^2 - 7,8GP \cdot 10^{-3} - 3,27GH \cdot 10^{-3} - 0,125PH \quad (3)$$



Şekil 5. Deneysel ve hesaplanan sonuçların korelasyonu.

Tablo 6. Zenginleştirme deney sonuçları

Deney No	KDK, meq/100g		Şişme, mls/2g		Smektit, %	
	Deneysel	Hesaplanan	Deneysel	Hesaplanan	Deneysel	Hesaplanan
1	84,0	85,14	26,5	27,48	93,5	93,45
2	86,2	86,13	29,5	29,40	94,5	94,54
3	85,0	84,66	30,0	29,03	94,5	94,48
4	89,0	89,77	31,0	30,93	95,0	94,92
5	86,2	86,13	29,5	29,40	94,5	94,54
6	86,2	86,13	29,5	29,40	94,5	94,54
7	79,2	80,24	24,0	24,32	92,0	92,76
8	82,0	81,09	24,5	24,33	92,5	92,65
9	84,2	86,45	26,0	27,50	93,0	93,74
10	91,7	89,34	32,0	30,27	95,0	94,34
11	92,0	93,37	32,0	33,35	96,0	96,86
12	92,2	90,91	32,5	31,31	95,0	95,12
13	93,7	92,51	33,0	32,45	98,0	97,31
14	79,7	78,20	24,0	22,45	92,5	91,71
15	78,0	78,17	24,0	24,74	91,5	91,60

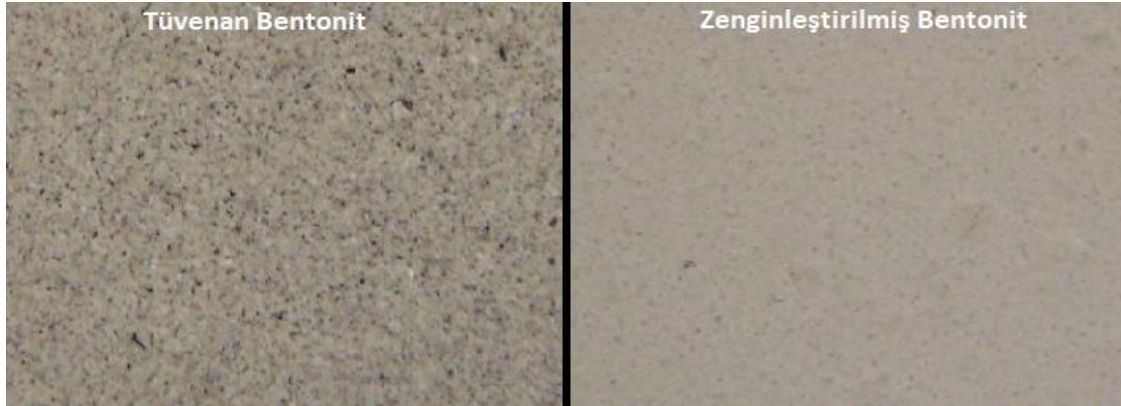
3.1. Knelson konsantratör değişkenlerinin optimizasyonu

Bu çalışmanın temel amaçlarından birisi en temiz seviyede bentonit konsantresi elde etmektir. Bunun için geliştirilen matematiksel modeller kullanılarak maksimum KDK, şişme indeksi ve smektit içeriği elde edilecek knelson parametreleri belirlenerek Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Parametrelerin optimizasyonu

Optimizasyon	Knelson Konsantratör Değişkenleri			Maksimum Değerler		
	G	P	H	KDK, meq/100g	Şişme, mls/2g	Smektit, %
Maksimum KDK	140	1	5	94,29	-	-
Maksimum Şişme İndeksi	140	3	1	-	33,35	-
Maksimum Smektit	140	1	3	-	-	97,31

Knelson konsantratör deneylerinde taşan kısım kil mineralini (smektit), kanallar içerisine yapışan taneler kil dışı mineralleri oluşturduğu için merkezkaç kuvvetinin maksimum seviyede olması maksimum smektit içeriği elde edilmesine neden olmaktadır. Smektit içeriğinin doğrudan KDK ve şişme indeksi üzerine etkili olması da maksimum KDK ve şişme indeksi elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yüzden maksimum KDK, şişme ve smektit içeriği maksimum G kuvvetinde elde edilmektedir. Yıkama suyu basıncı ise daha temiz bir konsantre elde edilmesini sağladığı gibi fazla yüksek olması kanallardaki kil dışı minerallerin temiz konsantreye kaçmasını engellemektedir. Bu yüzden optimum değerlerde uygulanması daha temiz konsantre elde edilmesini sağlayacaktır. Matematiksel modellerden elde edilen sonuçlara bakılırsa en temiz bentonit 1 ve 3 psi basınçta elde edilmektedir. Besleme hızı ise sisteme giren tane ile ilişkilidir ve sistemde kalış zamanını etkiler. Yüksek besleme hızlarında taneler daha hızlı sistemi terk eder ve doğru bir ayırım yapılamaz. Matematiksel modelde korelasyon katsayı %100 olmadığı için ufak farklar ile besleme hızı farklılıkları gözlenmiştir. Burada dikkate alınması gereken değer smektit içeriğinin maksimum elde edildiği 3 lpm'dir. Çünkü deneysel çalışmalarda da en iyi sonuçların elde edildiği 13 nolu deneyde 3 lpm besleme hızında çalışılmıştır. 13 nolu deneyden elde edilen bentonit ve tüvenan bentonitin resimleri Şekil 6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi bentonit içerisindeki kirletici mineraller büyük ölçüde uzaklaştırılmış ve daha saf bentonit temiz bir bentonit elde edilmiştir.

**Şekil 6.** Tüvenan ve zenginleştirilmiş bentonit görüntüleri.

4. Sonuçlar

Teknolojinin gelişmesiyle bentonit minerali her alanda kullanılmaya başlamış ve bentonit kaynakları hızla tükenmektedir. Özellikle ağartma toprağı olarak, kozmetik sanayinde ve ilaç sanayinde yüksek saflıkta bentonit kullanılması bentonitin zenginleştirilmesini ön plana çıkarmaktadır. Eskişehir/Sarıcakaya bölgesinden temin edilen bentonitlerin knelson konsantratör ile zenginleştirildiği bu çalışmada Box-Behnken deney tasarımı kullanılarak çalışma parametrelerinin matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Çalışmalar kapsamında KDK, şişme indeksi ve smektit içerikleri artırılmaya çalışılarak bu modeller sayesinde elde edilecek maksimum değerlerin elde

edileceği deney şartları belirlenmiştir. %55 smektit içeriğine, 10 mls/2g şişme indeksine ve 57,10 meq/100g KDK değerine sahip olan bentonitlerin kullanıldığı çalışmada toplam 15 deney yapılmış ve 13 nolu deneyde (G=140, P=1, H=3) en iyi sonuç elde edilmiştir. Bu deneyden elde edilen temiz bentonitin %98 smektit içeriği ve şişme indeksinin 33 mls/2g, KDK 93,7 meq/100g olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre %55 olan smektit içeriği %98'lere kadar çıkarılarak çok iyi oranlarda bir zenginleştirme sağlandığı görülmüştür. Bu sayede yüksek saflıkta bentonit kullanılan sektörlerin ihtiyacı da büyük ölçüde karşılanabilecektir.

Knelson konsantratör parametrelerinin KDK, şişme indeksi ve smektit içeriği üzerine etkisini hesaplamak için ikinci derece matematiksel modeller kurulmuş ve bu modellerin korelasyon katsayısı %90 üzerinde hesaplanmıştır. Ayrıca KDK, şişme indeksi ve smektit içeriğinin maksimum olduğu deney şartları hesaplanmıştır. Buna göre maksimum değerler için en yüksek G kuvvetinde çalışılması gerektiği, yıkama suyu basıncının ve besleme hızının kullanılan cevhere göre optimize edilmesinin daha doğru olacağı, ancak bu iki parametrenin çok yüksek değerlerde kullanılmaması gerektiği görülmüştür. Bu sayede sektörün istediği daha temiz bentonitler knelson konsantratör ile başarılı bir şekilde üretilebilecektir. Bu çalışma sonucunda tek dezavantaj olarak prosesin yaş bir yöntem olması, zenginleştirme sonucunda üretilecek konsantre ürünlerin susuzlaştırılmasının ek maliyet oluşturması olduğu görülmüştür. Literatür taramalarında da bentonitlerin susuzlaştırılmasıyla ilgili çok çalışma görülmemiş olup sonraki araştırmalarda zenginleştirme ve susuzlandırma konularının birlikte değerlendirilmesinin doğru olacağı düşünülmüştür.

Kaynaklar

- [1]. Grim, R.E., "Clay Mineralogy", Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1968, 596 pp.
- [2]. Grim, R.E. and Güven, N., "Bentonites: geology, mineralogy, properties and uses. Developments in Sedimentology", 24. Elsevier Publishing Company, New York, 1978, 256
- [3]. İpekoğlu, B., Kurşun, İ., Bilge, Y., Barut, A., "Türkiye Bentonit Potansiyeline Genel Bir Bakış", 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 1997, 51-57, İzmir.
- [4]. Luckham, P.F. and Rossi, S., "The colloidal and rheological properties of bentonite suspension", Advances in Colloid Interface Science, 1999, 82:43-92.
- [5]. Murray, H.H., "Traditional and new applications for kaolin, smectite and polygorskite: a general overview", Applied Clay Science, 2000, 17:207-221.
- [6]. Önal, M., "Swelling and cation exchange capacity relationship for the samples obtained from a bentonite by acid activations and heat treatments", Applied Clay Science, 2007, 37:74-80.
- [7]. Yıldız, A. and Kuşcu, M., "Mineralogy, chemistry and physical properties of bentonites from Başören, Kütahya, W -Anatolia", Clay Minerals, 2007, 42:403-418.
- [8]. Özgen, S., Yıldız, A., Çalışkan, A. and Sabah, E., "Modeling and optimization of hydrocyclone processing of low grade bentonites", Applied Clay Science, 2009, 46:305-316.
- [9]. Bain, J.A., Morgan, D.J., "Laboratory separation of clays by hydrocycloning. Clay Minerals, 1982, 18:33-47.
- [10]. Christidis, G. and Scott, P.W., "Laboratory evaluation of bentonites", Industrial Minerals, 1993, 311:51-57.
- [11]. Allo, W.A. and Murray, H.H., "Mineralogy, chemistry and potential applications of a white bentonite in San Juan province", Applied Clay Science, 2004, 25:237-243.
- [12]. Chipera, S.J., Guthrie Jr., G.D., and Bish, D.L, "Preparation and purification of mineral dusts", Health Effects of Mineral Dusts (Jr., G.D. Guthrie, B.T. Mossman, editors). Chapter 6:28, 1993, USA.
- [13]. Ottner, F., Gier, S., Kuderna, M., and Schwaighofer, B., "Results of an inter-laboratory comparison of methods for quantitative clay analysis", Applied Clay Science, 2000, 17:223-243.

- [14]. Ammann, L., “Cation exchange and adsorption on clays and clay minerals”, Ph.D thesis, Univ. Christian-Albrechts, Germany, 2003, 119 pp.
- [15]. Dontsova, K.M., Norton, L.D., Johnston, C.T., and Bigham, J.M., “Influence of Exchange cations on water adsorption by soil clays”, *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 1218-1227.
- [16]. Sato, H., “Effects of the orientation of smectite particles and ionic strength on diffusion and activation enthalpies of I^- and Cs^+ ions in compacted smectite”, *Applied Clay Science*, 2005, 29(3–4):267-281.
- [17]. Bloodworth, A.J., Morgan, D.J., Briggs, D.A., “Laboratory processing trials on kaolinbearing sandstones from Pugu, Tanzania, using conventional and new hydrocyclone bodies”, *Clay Minerals*, 1989, 24:539–548.
- [18]. Boylu, F., Çinku, K., Çetinel, T., Erkan, İ., and Demirer, N., “The separation efficiency of Reşadiye Na-Bentonite by hydrocyclone”, XIII. National Clay Symposium (M. Kuşçu, O. Cengiz and E. Şener, editors), 2007, Isparta, Turkey.
- [19]. Özgen, S., and Yıldız, A., “Application of Box–Behnken design to modeling the effect of smectite content on swelling to hydrocyclone processing of bentonites with various geologic properties”, *Clays and Clay Minerals*, 2010, 58:431–48.
- [20]. Özgen, S., “Purification with Falcon Gravity Concentrator Processing of Low Grade Bentonites and Modelling”, *Particulate Science and Technology*, 2016, 35(3), 346-354.
- [21]. Celep, O., Alp, İ., Deveci, H., Vıçıl, M. ve Yılmaz, T., “Knelson santrifüj gravite ayırıcısıyla Mastra (Gümüşhane) cevherinden altın kazanımı”, *Yerbilimleri Dergisi*, 2006, 19(2):175-182.
- [22]. Patchejieff, B., Gaidarjiev, S. ve Lazarov, D., “Opportunities for Fine Gold Recovery from a Copper Flotation Circuit using a Knelson Concentrator”, *Minerals Engineering*, 1995, 7(2/3):405-409.
- [23]. Knelson, B. ve Jones, R., “A New Generation of Knelson Concentrators a Totally Secure System Goes on Line”, *Mineral Engineering*, 1993, 7:201-207.
- [24]. Huang, L., “Upgrading of Gold Gravity Concentrates: A Study of the Knelson Concentrator”, Doktora Tezi, Department of Mining and Metallurgical Engineering, 1996, McGill University, Montreal.
- [25]. Zhang, B., “Recovering Gold from High Density Gangues with Knelson Concentrator”, Yüksek Lisans Tezi, 1998, McGill Üniversitesi, Kanada.
- [26]. Yıldız, A., Kibici, Y., Çoban, F., Bağcı, M., Dumlupınar, İ., Kocabaş, C., Arıtan, E. and Bilge Y., “The investigation of the geological properties of Mihalgazi (Eskişehir) bentonite and evaluation of bentonite as industrial raw material”, The Scientific and Technical Research Council of Turkey (TÜBİTAK) Project No: 104Y160 Technical Report, 2008, Turkey.
- [27]. Gündoğdu, M.N., “Geological, mineralogical and geochemical investigation of the Bigadiç Neogene volcana-sedimentary basin. Ph. D. thesis, Univ. Hacettepe, Ankara, 1982, Turkey, 386 pp.
- [28]. Biscaye, P.E., “Mineralogy and sedimentation of recent deep sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans”, *The Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76:803-832.
- [29]. Johns, W.D., Grim, R.E. and Bradley, W.F., “Quantitative estimations of clay minerals by diffraction methods”, *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, 24:242-251.
- [30]. Özkan, T. Ö. ve Erkalfa, H., “Türkiye’deki ticari bentonit kellerinin özellikleri ve kullanım alanlarının tespiti, TÜBİTAK Projesi No: 04–7652–1, 1977, Adapazarı.
- [31]. Zhao, J.L., Zhang, Y.Y., Chen, Q., and Fu, Q., “Study on Removal of Organic Sulfur from Coal by Glacial Acetic Acid–Hydrogen Peroxide Oxidation Process”, *Environ Prot Chem Ind.*, 2002, 22(5):249-253.