



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Üleksit katkısının kum-bentonit karışımlarının mühendislik özelliklerine etkisi

*The effect of ulexite additive on the engineering properties of sand-bentonite mixtures*

*Yazarlar Authors: S.Gizem ALPAYDIN<sup>1</sup>, Yeliz YUKSELEN AKSOY<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-0784-2361*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9145-765X*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Alpaydın S.G. ve Yükselen-Aksoy Y., “Üleksit katkısının kum-bentonit karışımlarının mühendislik özelliklerine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 24(4): 1345-1352, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.627209

# Üleksit Katkısının Kum-Bentonit Karışımlarının Mühendislik Özelliklerine Etkisi

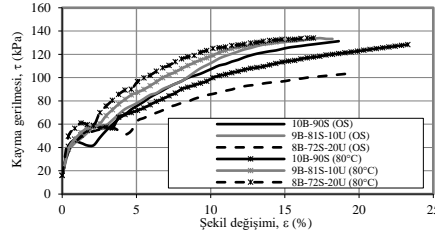
## The Effect of Ulexite Additive on the Engineering Properties of Sand-Bentonite Mixtures

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Üleksit katkılı kum-bentonit karışımlarının içsel sürtünme açıları sıcaklığın 80°C ye artırılmasıyla artar./ The internal friction angles of the ulexite added sand-bentonite mixtures increase by increasing the temperature to 80°C.
- ❖ Üleksit katkısı kum-bentonit karışımlarının maksimum kayma dayanımını 80°C altında artırır./ The ulexite additive increases the maximum shear strength of sand-bentonite mixtures under 80°C.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Şekilde görüldüğü gibi 8B-72S-20U karışımının artan sıcaklık ile maksimum kayma gerilmesinde önemli bir artış gözlenmiştir. / As shown in figure, a significant increase in maximum shear stress of especially the 8B-72S-20U mixture was observed, with increasing temperature.



Şekil. Kayma gerilmesi-eksenel deformasyon grafiği /Figure. (Shear stress- axial deformation graph)

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı üleksit katkılı kum-bentonit karışımlarının kompaksiyon, konsolidasyon (oda sıcaklığında) ve kayma dayanımı (oda sıcaklığında ve 80°C'de) davranışlarını incelemektir. / The aim of this study is to investigate the compaction, consolidation (at room temperature) and shear strength (at room temperature and 80°C) behavior of ulexite-added sand-bentonite mixtures.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sıcaklığı 80°C'ye yükseltmek için özel olarak tasarlanmış ısı çubuğu ve sıcaklığı sabit tutmak amacıyla termostat kullanılmıştır. / To increase the temperature to 80°C, a specially designed heat rod and to keep the temperature constant thermostat were used.

### Özgünlük (Originality)

Kum-bentonit karışımlarına bor katkısı ilave edilmesi literatür açısından bir yeniliktir. / The addition of boron additives to sand-bentonite mixtures is novel in the literature.

### Bulgular (Findings)

Artan sıcaklık altında üleksit katkısı kayma mukavemeti değerlerinde artış sağlamaktadır. / Ulexite additive provides an increase in shear strength values with increasing temperature.

### Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmanın sonuçları, üleksit katkı maddesinin, kum-bentonit karışımlarının 80°C de kayma dayanımı davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. / The results of this study showed that the ulexite additive had a positive effect on the shear strength behavior of sand-bentonite mixtures at 80°C.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Üleksit Katkısının Kum-Bentonit Karışımlarının Mühendislik Özelliklerine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

S. Gizem ALPAYDIN<sup>1\*</sup>, Yeliz YUKSELEN AKSOY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 30.09.2019 ; Kabul/Accepted : 07.05.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 21.05.2020)

## ÖZ

Bentonit ve kum-bentonit karışımları genellikle nükleer atık depolama sahaları, kentsel katı atık depolama alanlarında geçirimsiz bariyer uygulamalarında kullanılırlar. Bu zemin karışımlarının dayanım ve hidrolik iletkenlik gibi mühendislik özellikleri tasarım aşamasındaki değerlerde çok uzun süre değişmeden kalmalıdır. Literatür çalışmaları, yüksek sıcaklık ve termal döngülerin, zeminlerin hidrolik iletkenlik, hacimsel deformasyon ve dayanımı üzerinde olumsuz etkileri olduğunu göstermiştir. Endüstride, malzemelerin termal direncini arttırmak için bor mineralleri kullanılmaktadır. Bu nedenle bir bor minerali olan üleksit, zemin karışımlarının yüksek sıcaklık veya termal döngülere karşı dayanım ve hidrolik iletkenlik özelliklerini geliştirmek için bentonit veya kum-bentonit karışımlarına eklenebilir. Bu çalışmada, üleksit katkılı kum-bentonit karışımlarının kompaksiyon, konsolidasyon, hidrolik iletkenlik ve kayma dayanımı özellikleri oda sıcaklığında, ayrıca üleksit ilave edilmiş kum-bentonit karışımlarının kayma dayanımı davranışı yüksek sıcaklık varlığında (80°C) incelenmiştir. Deneylerde %10 bentonit içeren kum-bentonit karışımlarına %10 ve %20 oranlarında üleksit eklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, üleksit katkısı kum-bentonit karışımlarının optimum su içeriği değerini düşürürken, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini arttırmıştır. Üleksit yüzdesi arttıkça toplam düşey deformasyon (sıkışabilirlik) miktarı artmıştır. Üleksit varlığında kum-bentonit karışımlarının 80°C'de maksimum kayma gerilmesi değeri, genellikle oda sıcaklığındaki değerlerden daha yüksek elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bor , kayma dayanımı, konsolidasyon, kompaksiyon, sıcaklık.

## The Effect of Ulexite Additive on the Engineering Properties of Sand-Bentonite Mixtures

### ABSTRACT

Bentonites and sand-bentonite mixtures are usually used for impervious barriers at nuclear waste repositories, municipal solid waste landfill liners, etc. These mixtures should be able to perform for a long time without changing their strength and hydraulic conductivity properties. The literature studies have shown that high temperature and thermal cycles have negative effects on the hydraulic conductivity and strength of soils. For example, hydraulic conductivity increases in the presence of high temperature. For that reason, the resistivity of bentonites and sand-bentonite mixtures should be increased against high temperatures when they are used in liners. Boron minerals are used in order to increase the thermal resistivity of materials in industry. Hence the boron mineral namely; ulexite can be added to the sand-bentonite mixtures in order to improve strength and hydraulic conductivity properties of these mixtures against high temperature or thermal cycles. In this study, the compaction, consolidation, hydraulic conductivity and shear strength properties of ulexite added sand-bentonite mixtures were investigated at room temperature. Additionally, the shear strength behavior of ulexite added sand-bentonite mixtures was investigated under high temperature (80°C). The sand-bentonite mixtures were prepared which contains 10% bentonite by weight. The 10% and 20% ulexite were added to these mixtures. The mixtures were prepared according to the compaction test results (dry unit weight and optimum water content+2%). According to the test results, as the ulexite additive decreased the optimum water content value and increased the maximum dry unit weight. When the ulexite was added to the sand-bentonite mixtures, amount of the total vertical strain (compressibility) increased as the ulexite percentage increased. The maximum shear stress value of sand-bentonite mixtures in the presence of ulexite at 80°C was generally higher than those of at room temperature.

**Keywords:** Boron, shear strength, consolidation, compaction, temperature.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nükleer atık depo sahaları, enerji kazıkları, jeotermal enerji yapıları, ısı depolama sistemleri, gömülü yüksek voltaj kabloları, CO<sub>2</sub> depolama tesisleri vb. gibi enerji yapıları doğrudan zeminle temas halindedir ve zemin içerisinde sıcaklık değişikliklerine neden olmaktadır. Örneğin, nükleer atık depo sahalarında tasarım limit

sıcaklığı genellikle 100°C olarak alındığından bu sıcaklık değerine kadar olan sıcaklıklarda zeminin davranışını anlamak gerekir [1]. Çöp depolama alanlarında organik bileşiklerin ayrışması ve atıklardaki biyokimyasal sürecin bir sonucu olarak sıcaklık açığa çıkar. Bu tür sıcaklık oluşumu, atık depolama alanlarındaki zeminlerin hidrolik ve mekanik açıdan uzun süreli davranışlarını olumsuz etkileyebilir. Önceki çalışmalar, yüksek sıcaklıkların zeminlerin hidrolik iletkenlik, hacimsel

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : alpaydin.sukrangizem@ogr.deu.edu.tr

deformasyon (sıkışabilirlik-şişme) ve kayma dayanımı parametrelerini etkilediğini göstermiştir [1, 2, 3]. Wang (1990) çalışmasında bentonitin 100°C'ye kadar ısıtıldığında, kohezyon değerinde azalma, içsel sürtünme açısında ise artış olduğunu bildirmiştir [4]. Normal konsolide (NC) kilin ise sıcaklık arttığında veya sıcaklık döngüsüne maruz kaldığında kayma dayanımı artmaktadır [4]. Sıcaklık artışının zeminlerin kayma dayanımı üzerine etkisinin büyüklüğü zeminin yoğunluğuna, su içeriğine, zemin tipine, mineralojik ve kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir [5]. Kil zeminlerin yüksek sıcaklıkta kayma dayanımı Hong vd. (2013) tarafından da araştırılmıştır [6]. Sıcaklığın kilin kayma mukavemeti üzerindeki etkilerinin büyük ölçüde, artan sıcaklık nedeniyle hacim değişikliğine bağlı olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, termal genişlemenin kayma dayanımında bir azalmaya, termal büzülmenin ise dayanımda bir artmaya neden olduğu belirtilmiştir [6]. Hidrolik iletkenlik deneylerinden elde edilen sonuçlara göre; sıcaklığa bağlı olarak akışkan viskozitesindeki değişiklik nedeniyle hidrolik iletkenlik değeri sıcaklık arttıkça artar. Sıkıştırılmış bentonitin 80°C'de hidrolik iletkenliğinin, 20°C'de belirlenen değerlerden 3-4 kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir [3]. Sıcaklığa bağlı olarak zemin davranışındaki değişim, kil parçacıkları arası kuvvetler ve adsorbe edilmiş suyun viskoz kayma direnci ile açıklanmaktadır [7].

Bentonit ve kum-bentonit karışımları çöp depolama alanlarında ve nükleer atık depo sahalarında yaygın olarak kullanılır. Bentonitler mineral oluşumu veya işlenmesi esnasında kil parçacığının yüzeyine adsorbe edilen dış katyon (yani kalsiyum veya sodyum) tipi ile karakterize edilirler. Sodyum bentonit yüksek şişme kapasitesi ve çok düşük hidrolik iletkenliği nedeniyle kalsiyum bentonite göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır [8, 9, 10]. Uygulamalarda bentonitte su içeriği azaldığında büzülme çatlakları oluştuğu için ve buna ek olarak dayanım ve hacim stabilitesini arttırmak amacıyla bentonit kum ile karıştırılır [11]. Nükleer atık depolama alanlarında ve enerji yapılarının çevresinde termal değişimlere karşı dirençli ve dayanıklı zemin tabakalarına ihtiyaç vardır. Bu nedenle, kum-bentonit karışımlarına bor minerallerinden biri olan üleksit ilavesi, bu zemin karışımlarının yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığını artırabilir.

Bor elementi doğada serbest halde bulunmaz. Oksijenle bağ yapmaya yatkındır ve doğada mineral formunda bulunur. Bor; enerji, metalurji, çimento, cam ve seramik gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Örneğin, ısıya dayanıklı cam üretiminde, elektronik malzemeler ve uzay araçlarında kullanılmak üzere yüksek dayanımlı cam üretiminde bor mineralleri kullanılmaktadır. Bor minerali, camların ısıl genişmesini önemli ölçüde azaltır, camı asit ve çiziklere karşı korur. Bor, yüksek sıcaklığa karşı direnci ile bilinir. Bu nedenle, üleksit eklenmiş kum-bentonit karışımları, yüksek sıcaklıklara ve termal döngülere karşı daha dayanımlı hale gelebilir. Kolemanit, tinkal, üleksit, kernit endüstride yaygın olarak kullanılan bor

minerallerindedir. Bu çalışmada kullanılan ve yapı olarak lif demetlerinden meydana gelen üleksit, sodyum ve kalsiyum mineralleri bakımından oldukça zengin bir bor mineralidir ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ). Üleksitin çözünürlüğü soğuk suda düşükken, sıcak su ve asitte oldukça yüksektir [12]. Üleksit, bor camı üretiminde ve seramik endüstrisinde, ısı direncini ve aşınmaya karşı dayanıklılığı arttırmak gibi özellikleri sayesinde kullanılmaktadır. Üleksit ayrıca sertliği artırıcı özelliğe sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı, üleksit fren balatasının formülasyonuna dahil edilmiştir [13].

Bu çalışmanın amacı, üleksit katkılı kum-bentonit karışımlarının kompaksiyon, konsolidasyon ve kayma dayanımı davranışlarını incelemektir. Bu nedenle çalışmada üleksitin konsolidasyon (oda sıcaklığında) ve kayma dayanımı (oda sıcaklığında ve 80°C'de) davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yazarların daha önce yayınlanan çalışmalarından (Alpaydın ve Yükselen-Aksoy, 2018a; Alpaydın ve Yükselen-Aksoy, 2018b) farklı olarak bu çalışmada karışım oranları farklı şekilde hazırlanmıştır [14, 15]. Ayrıca yazarların yaptıkları çalışmadan (Alpaydın ve Yükselen-Aksoy, 2018b) farklı olarak bu çalışmada 90°C yerine 80°C sıcaklık altında deneyler yapılmış, ve kesme hızı iki kat artırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir [15].

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada kum, Na-bentonit ve bor minerali olarak üleksit kullanılmıştır. Na-bentonit Eczacıbaşı Esan Madencilik Şirketi'nden tedarik edilmiştir. Üleksit, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen verilere göre bu malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan bentonit ve bir bor minerali olan üleksitin XRD analizi Rigaku D/Max-2200/PC X-ray diffractometer cihazı ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1a'ya göre kullanılan üleksit mineralinin yapısı üleksit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) ile %100 uyumludur. Ayrıca kullanılan bentonit büyük oranda kuvars ( $\text{SiO}_2$ ), montmorillonit ( $\text{Na}_0.3(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) ve illit içeriğine sahiptir (Şekil 1b).

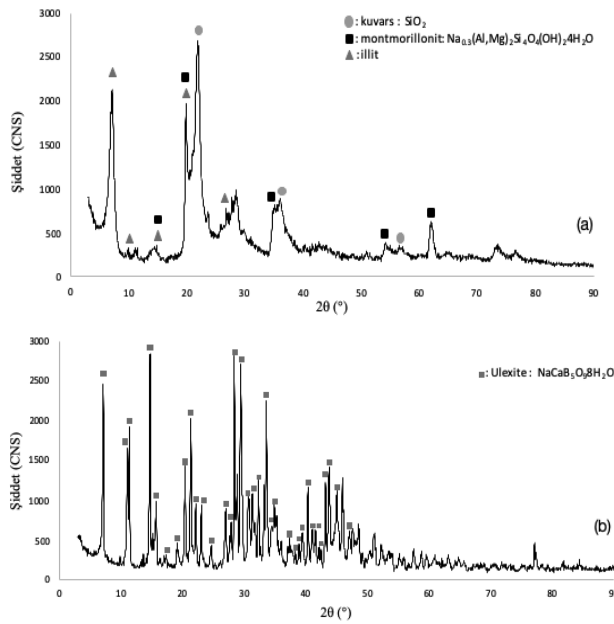
Tüm deneylerde, Na-bentonit ve kum etüvde (105°C) 24 saat kurutulduktan sonra kullanılmıştır. Kum ve bentonit kurutulduktan sonra sırasıyla No.6 (3.35mm) ve No.200 (0.075mm) eleklerden elenmiştir. Üleksitin başlangıç su içeriği değeri her deney için belirlenmiş ve numune hazırlamada bu su içeriği değeri dikkate alınmıştır.

Karışımlarda kullanılan bentonit, kum, üleksit yüzdeleri ve deney programı Çizelge 2'de gösterilmektedir. Karışımlar, bentonitin "B", kumun "S" ve üleksitin "U" olarak kısaltılması biçiminde adlandırılmıştır. Örneğin, 9B-81S-10U karışımı, %9 bentonit, %81 kum ve %10 üleksit içerir. Karışımı hazırlarken, ağırlıkça toplam kuru

**Çizelge 1.** Kum, bentonit ve üleksitin fiziko-kimyasal özellikleri (Physico-chemical properties of sand, bentonite and ulexite)

	Bentonit	Kum	Üleksit
Özgül Ağırlık	2.70	2.63	1.98
Likit Limit (%)	476	-	33
Plastik Limit (%)	70	-	25
Plastisite İndeksi (%)	406	-	8
pH	9.50	-	9.13

karişımın %10'u veya %20'si üleksit, kalan kısmın %10'u bentonit ve %90'ı kum olarak alınmıştır.



**Şekil 1.** XRD analiz sonuçları: a) bentonit, b) üleksit (XRD analysis results: a) bentonite, b) ulexite)

geçirmez plastik torbaya yerleştirilmiş ve homojenliği sağlamak için 24 saat bekletilmiştir. Otomatik kompaktör vasıtasıyla Standart Proctor enerjisi uygulanması için karişım 2 tabaka olarak 305 mm'den 2.5 kg'lık tokmak düşürülerek sıkıştırılmıştır. Standart Proctor enerjisini elde etmek için her tabakaya 43 darbe uygulanmıştır. Deney tamamlandıktan sonra, sıkıştırılmış zemin kalıptan hidrolik kriko ile çıkarılmıştır. Deneyin sonunda, sıkıştırılmış zeminden temsili numune alınmış ve su içeriği tespiti için etüvde (105°C) kurumaya bırakılmıştır.

Konsolidasyon deneyleri ASTM D2435 (2011) [17] standardına uygun olarak yapılmıştır. Konsolidasyon deneyleri için, numuneler optimum su içeriğinin %2 ıslak tarafında ve bu su içeriğine karşılık gelen kuru birim hacim ağırlık değerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numune, ahşap bir tokmak ile sıkıştırılarak ring içine yerleştirilmiştir. Ring, suyla dolu hücreye yerleştirilmiş ve 24 saat boyunca oturma basıncı (seating pressure) (6.86 kPa) uygulanmıştır. Daha sonra yükleme başlatılmıştır. Deformasyonlar ihmal edilebilir seviyeye ulaştığında bir sonraki yükleme kademesine geçilmiştir. Yük artış oranı (LIR) 1.0 olarak uygulanmıştır. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra numunenin üzerindeki basınç önce 196 kPa değerine, ardından 49 kPa değerine azaltılmıştır. Her boşaltma adımında şişme

**Çizelge 2.** Deney programı (Experimental programme)

Deney numunesi	Kompaksiyon Deneyleri	Konsolidasyon Deneyleri	Hidrolik İletkenlik Deneyleri	Direk Kesme Deneyleri	
	Oda sıcaklığında	Oda sıcaklığında	Oda sıcaklığında	Oda sıcaklığında	80°C'de
100U	✓	✓	-	✓	✓
10B-90S	✓	✓	✓	✓	✓
9B-81S-10U	✓	✓	✓	✓	✓
8B-72S-20U	✓	✓	✓	✓	✓

Kompaksiyon deneyleri, ASTM D698 (2012) [16] standardına uygun olarak yapılmıştır. İlk önce, kuru malzemeler belirtilen oranlarda hazırlanmış ve bir kap içerisinde karişırılmıştır. Daha sonra su püskürtme yöntemiyle ilave edilmiş ve karişım homojen olarak harmanlanmıştır. Karişımlar, her deney için dört farklı su içeriğinde hazırlanmıştır. Daha sonra, numuneler hava

(kabarma) deformasyonları tamamlanuncaya kadar beklenmiştir.

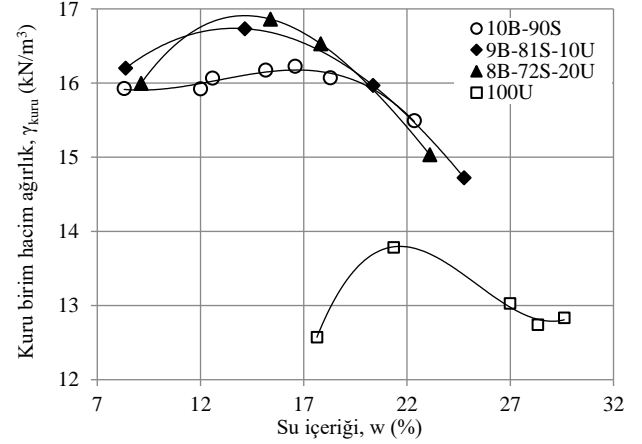
Bu çalışmada konsolidasyonlu-drenajlı (CD) koşullarda direk kesme deneyleri yapılmıştır [18]. İlk önce kuru malzemelerin önceden belirlenmiş yüzdelere göre ağırlıkları tartılmış, daha sonra su eklenmiş ve karişım homojen olarak karişırılmıştır. Hazırlanan numune,

Standart Proctor deneyinden elde edilen parametrelere göre ( $w_{opt} \pm \%2$  ve bu değere karşılık gelen kuru birim hacim ağırlık değerinde) ahşap tokmak ile üç tabaka halinde sıkıştırılarak kare (6cm×6cm) kalıba yerleştirilmiştir. Kalıp, numunenin suya doymuş hale gelmesini sağlamak için suyla dolu bir metal kap içerisinde 24 saat bekletilmiş ve şişmeyi önlemek amacıyla numunenin üzerine 25 kPa basınç uygulanmıştır. Daha sonra, numune dikkatlice kesme kutusuna yerleştirilmiş ve konsolidasyon aşaması tamamlandıktan sonra kesme deneyi başlatılmıştır. Deneylerde uygulanan normal gerilmeler (49.1, 98.1, 196.2 kPa) literatürdeki benzer konudaki çalışmalarda uygulanan gerilmelere benzer olarak seçilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan deneylere ek olarak tüm deneyler aynı şartlarda hazırlanan yeni numuneler ile 80°C sıcaklık altında yeniden gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığı 80°C'ye yükseltmek için özel olarak tasarlanmış ısı çubuğu ve sıcaklığı sabit tutmak amacıyla termostat kullanılmıştır. Zeminin ve suyun sıcaklıkları iki farklı K-tipi termokupl ile ölçülmüştür. Termokupullar sıcaklık verilerini kaydeden dijital termometreye bağlanmıştır.

Hidrolik iletkenlik deneyleri ASTM D5084-16a (2016) standardına göre gerçekleştirilmiştir [19]. Bu deneylerde esnek duvarlı permeametreler kullanılmış ve düşen seviyeli yöntem ile hidrolik iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Deneylerde karışımlar, tıpkı konsolidasyon ve kesme kutusu deneylerinde olduğu gibi  $w_{opt} \pm \%2$  su içeriği değerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler hava almayacak şekilde poşetlere konulup, 24 saat bekletilerek numunenin deneye hazır hale gelmesi sağlanmıştır. Standart Proctor enerjisiyle sıkıştırılan numune, hidrolik kriko yardımıyla dikkatli bir şekilde kalıptan çıkarılmıştır. Numune permeametreye yerleştirilirken, numunenin alt ve üst kısmına poröz taş yerine 15 cm çapında geotekstiller konulmuştur. Daha sonra numunenin çevresine sızmayı engellemek için lateks membran ve O-ringler yerleştirilmiştir. Lateks membran numuneyi çevreleyecek şekilde takıldıktan sonra, alt ve üst başlıklara üçer tane O-ring takılmıştır. Ardından, permeametre su ile doldurulmuştur. Yapılan bu deneyler için geri basınç uygulanmamıştır. Su akışı yukarıdan aşağıya doğru gerçekleştirilmiştir. Su 50 ml'lik cam büretlerden verilmiş ve çıkış sıvısı 100 ml'lik cam mezürlerde toplanmıştır. Hidrolik iletkenlik deneyleri, zeminin boşluk hacmi cinsinden akış miktarı (BHCAM) olarak ifade edilmiştir. Deneyler için hücre basıncı yaklaşık 50 kPa olarak uygulanmıştır. Hücre basıncı uygulandıktan sonra borulardaki havalar alınmış ve akış başlatılmıştır.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

10B-90S karışımlarının kompaksiyon parametreleri, %10 ve %20 üleksit varlığında belirlenmiştir. Şekil 2'de 10B-90S karışımlarının üleksit varlığında kompaksiyon deneyi sonuçları gösterilmektedir.



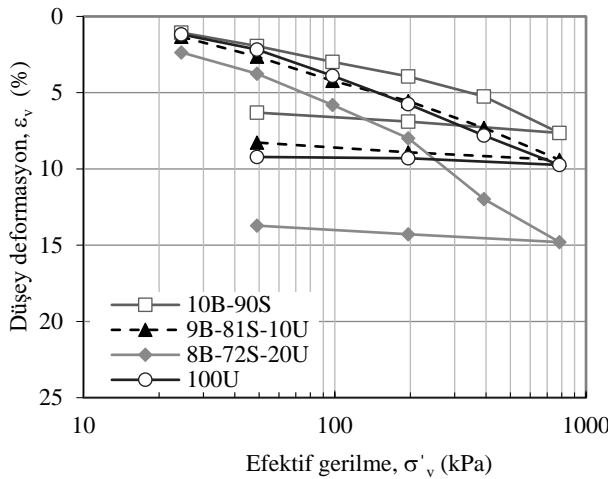
Şekil 2. Kum-bentonit karışımının ve farklı oranlarda üleksit katkı katkılı kum-bentonit karışımlarının kompaksiyon eğrileri (Compaction curves of sand-bentonite mixture and ulexite-added sand-bentonite mixtures)

Şekil 2'de gösterildiği gibi, 10B-90S karışımlarına üleksit ilavesi, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ( $\gamma_{d,max}$ ) arttırırken optimum su içeriğini ( $w_{opt}$ ) azaltmıştır. Karışımda üleksit katkı yüzdesi arttıkça, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri de bir mikar artmıştır. Kum bentonit karışımına ilave edilen her iki üleksit katkı yüzdesinin de (%10 ve %20) optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değerini düşürdüğü açıkça görülmektedir. Ancak,  $w_{opt}$  değerindeki en fazla düşüş %10 üleksit varlığında görülmüştür. Ayrıca saf üleksitin kompaksiyon parametreleri de elde edilmiştir. Deney sonucunda üleksitin  $\gamma_{d,max}$  değeri 13.83 kN/m<sup>3</sup>,  $w_{opt}$  değeri %21.5 elde edilmiştir (Şekil 2). Üleksitin  $w_{opt}$  değeri 10B-90S karışımına göre daha yüksek iken,  $\gamma_{d,max}$  değeri daha az elde edilmiştir. Kompaksiyon deneylerinden elde edilen kompaksiyon parametreleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Üleksit ve kum-bentonit-üleksit karışımlarının kompaksiyon parametreleri (Compaction parameters of ulexite and sand-bentonite-ulexite mixtures)

Numune	$w_{opt}$ (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )
100 U	21.5	13.83
10B-90S	16.5	16.19
9B-81S-10U	13.5	16.78
8B-72S-20U	14.2	16.87

10B-90S karışımlarının konsolidasyon deneyi sonuçları e-log -  $\sigma'$  eğrileri yerine deformasyon ( $\Delta H/H_0$ ) – efektif gerilme ( $\log \sigma'$ ) eğrileri olarak sunulmaktadır. Üleksit katkısı 10B-90S karışımına eklendiğinde, düşey deformasyon miktarının arttığı açıkça görülmektedir (Şekil 3). 10B-90S karışımının toplam düşey deformasyon miktarı (sıkışma), %10 üleksit katkısı varlığında %6.6'dan %8.1'e ve %20 üleksit ile ise %12.4'e yükselmiştir.



**Şekil 3.** Kum-bentonit karışımının ve farklı oranlarda üleksit katkıli kum-bentonit karışımlarının düşey deformasyon-log  $\sigma'$  grafikleri (Vertical deformation-log  $\sigma'$  graphs of sand-bentonite mixture and ulexite-added sand-bentonite mixtures)

10B-90S karışımlarına üleksit eklendiğinde, konsolidasyon deneyinde boşaltma yapıldığında oluşan şişme (kabarma) deformasyonunun miktarının azaldığı görülmektedir. Toplam şişme miktarı, %1.34 değerinden %10 üleksit varlığında %1.14'e, %20 üleksit varlığında %1.09'a düşmüştür. Üleksit miktarının %10'dan %20'ye artırılması şişme miktarını önemli ölçüde değiştirmemiştir. Sıkışma ve şişme deneylerindeki tüm yükleme veya boşaltma sonucunda toplam düşey deformasyon değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

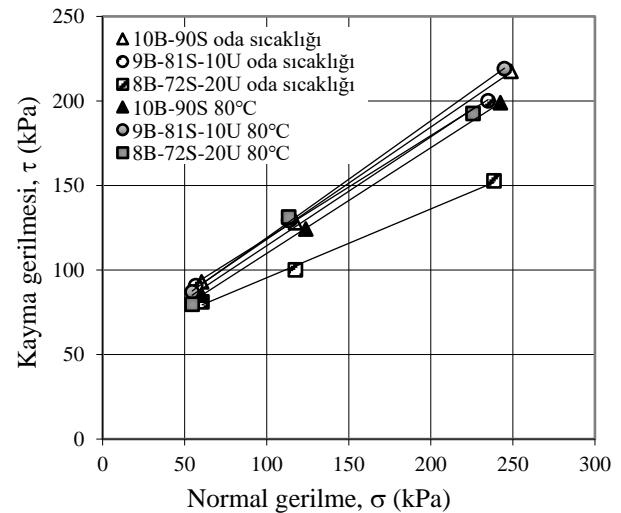
**Çizelge 4.** Deney numunelerinin toplam düşey deformasyon değerleri (Total vertical strain values of the test samples)

Numune	Toplam düşey deformasyon (sıkışma) (%)	Toplam düşey deformasyon (şişme) (%)
10B-90S	6.58	1.34
9B-81S-10U	8.07	1.14
8B-72S-20U	12.44	1.09
100U	8.57	0.53

10B-90S karışımlarının kayma dayanımı parametreleri, üleksit varlığında oda sıcaklığında ve 80°C sıcaklık altında belirlenmiştir (Şekil 4). Çizelge 5 direk kesme deneylerinden elde edilen kayma dayanımı parametrelerini oda sıcaklığında ve 80°C'de göstermektedir. Oda sıcaklığında 21.2° olan üleksitin içsel sürtünme açısı değeri, 80°C altında 35.4°'ye yükselmiştir, bu da artan sıcaklıkla üleksitin içsel sürtünme açısı değerinde belirgin bir artış olduğunu

göstermektedir. Üleksitin 26.8 kPa olan kohezyon değeri 80°C altında 12.1 kPa'ya düşmüştür.

Direk kesme deneylerinde, üleksit katkı maddesi 10B-90S karışımlarına eklendiğinde, oda sıcaklığında içsel sürtünme açısı değerleri azalırken, kohezyon değerleri artmıştır. 10B-90S karışımının oda sıcaklığında 33.6° olan içsel sürtünme açısı, %10 üleksit ile 31.3°'ye, %20 üleksit ile 22.1°'ye düşmüştür. 10B-90S karışımının içsel sürtünme açısı değeri yüksek sıcaklık (80°C) altında azalmıştır. Kum-bentonit karışımlarının içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, yüksek sıcaklıkta (80°C) üleksit ilavesiyle artmıştır. Alpaydin ve Yukselen Aksoy (2018b) tarafından daha önce yapılan çalışmada da, karışım yüzdeleri ve deney koşulları farklı olmasına rağmen, üleksit katkısının kum-bentonit karışımlarının kayma dayanımı davranışı üzerinde benzer etkiler gösterdiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada üleksit katkısı, kum-bentonit karışımının içsel sürtünme açısını oda sıcaklığında azaltırken, 90°C sıcaklık altında arttırmıştır. Ayrıca sıcaklık 90°C ye artırıldığında %10 üleksit katkıli kum-bentonit karışımının içsel sürtünme açısı oda sıcaklığında elde edilen değere göre artmıştır [15].

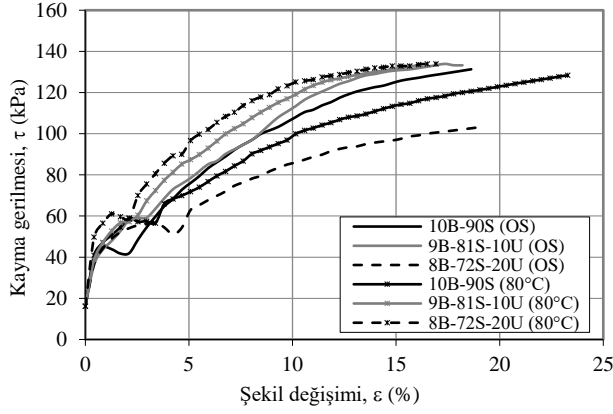


**Şekil 4.** Üleksit katkıli %10 kum-bentonit karışımlarının oda sıcaklığında ve 80°C sıcaklık altında kayma gerilmesi-normal gerilme grafiği (Shear stress-normal stress graph of ulexite added sand-bentonite mixtures at room temperature and 80°C)

**Çizelge 5.** Üleksit katkıli kum-bentonit karışımlarının oda sıcaklığında ve 80°C altında kayma dayanımı parametreleri (The shear strength parameters of ulexite-added sand-bentonite mixtures at room temperature and 80°C)

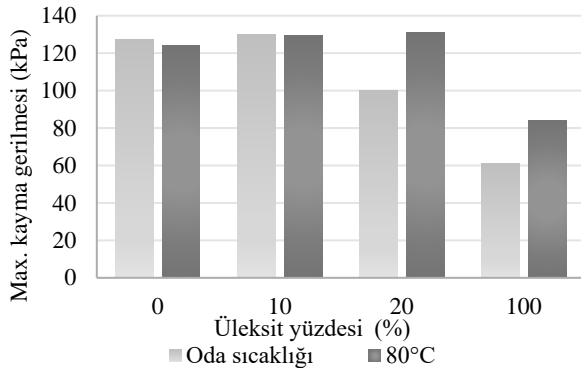
Numune	Oda sıcaklığı		80°C	
	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)
10B-90S	33.6	51.7	32.0	47.3
9B-81S-10U	31.3	57.8	34.7	49.8
8B-72S-20U	22.1	54.8	32.8	50
100U	21.2	26.8	35.1	12.1

Şekil 5 üleksit katkılı 10B-90S karışımlarının 98.1 kPa normal gerilme altında oda sıcaklığında ve 80°C sıcaklıkta kayma gerilmesi-yatay deformasyon ilişkisini göstermektedir.



**Şekil 5.** Üleksit varlığında %10 kum-bentonit karışımlarının oda sıcaklığında ve 80°C sıcaklık altında kayma gerilmesi-eksenel deformasyon grafiği (Shear stress-axial deformation graph of 10% sand-bentonite mixtures in the presence of ulexite at room temperature and 80°C)

Şekil 5'te gösterildiği gibi, özellikle 8B-72S-20U karışımının artan sıcaklık ile maksimum kayma gerilmesinde önemli bir artış gözlenmiştir. Bununla birlikte, oda sıcaklığında üleksit katkı yüzdesi arttıkça, 10B-90S karışımlarının maksimum kayma gerilmesi değerleri azalmıştır. Fakat maksimum kayma gerilmesi değerlerinin üleksit katkısıyla 80°C'de arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, genel olarak, %10 üleksit katkı maddesi içeren karışımın maksimum kayma gerilmesi değeri, %20 üleksit içeren karışımından daha yüksektir. Şekil 6, oda sıcaklığında ve 80°C'de maksimum kayma gerilmesi ile karışımların üleksit yüzdesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Artan sıcaklık altında üleksit katkısı kayma mukavemeti değerlerinde artış sağlamaktadır.



**Şekil 6.** Oda sıcaklığında ve 80°C de maksimum kayma gerilmesi-üleksit yüzdesi ilişkisi (Maximum shear stress-ulexite percentage relationship at room temperature and 80°C)

Önceki çalışmalar sıcaklıktaki artış ile killerin kayma dayanımının arttığını göstermektedir. Sıcaklık artışıyla killerin kayma dayanımının değişimi büyük ölçüde artan sıcaklığın sebep olduğu hacim değişimine bağlıdır [6]. Sıcaklık artışıyla meydana gelen hacim değişimi artan sıcaklığın kil tanecikleri arası kuvvetler üzerindeki etkileri ve kil parçacıklarının yapı değişimine karşı direncini etkileyen adsorbe edilmiş suyun viskoz kayma dayanımı ile açıklanabilir [7]. Wang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada aynı konsolidasyon gerilmesi altında sıcaklık arttıkça adsorbe edilen suyun viskozitesinin azaldığı ve buna bağlı olarak porozitenin de azaldığı bildirilmiştir [21]. Buna göre yüksek sıcaklıkta killerin hacimsel olarak büzüldüğü sonucuna varılabilir. Hong vd. (2013) yaptıkları çalışma sonucunda termal büzülmenin kayma dayanımını arttırdığını gözlemlenmiştir [6]. Bununla birlikte, bu çalışmanın sonuçlarına göre, kum-bentonit karışımının kayma dayanımı, sıcaklık 80°C'ye yükseltildiğinde bir miktar azalmıştır. Bu farklılık bu çalışmada kullanılan kum-bentonit karışımındaki %10 kil oranının yanısıra karışımın %90 lık kısmını kumun oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları, kum-bentonit karışımının kayma direncinin, üleksit ile arttığını göstermiştir. Kum-bentonit karışımının kesme dayanımı, hem bor adsorpsiyonu hem de malzeme değişimi sonucunda artmıştır. Bor, kil yapısındaki alüminyum veya silis tetrahedron kısmı ile kuvvetli bir şekilde tutulur (adsorbe edilir) [20]. Malzeme değişimi ise karışıma kuru ağırlıkça ilave edilen üleksit oranında kum ve bentonit oranı azaltıldığı için gerçekleşmiştir. Örneğin; %10 bentonit %90 kum karışımına katkı maddesi olarak %10 üleksit ilave edildiğinde; toplam kuru ağırlığın %10'u üleksit olarak alınmıştır ve kalan %90'lık kuru karışımın %10'u bentonit (yani %9), yüzde 90'ı ise (yani %81) kum olarak alınmıştır. Yani azalan kum-bentonit oranında karışıma üleksit ilave edilmiştir. Yani üleksit numuneye eklendiğinde hem bentonit hem de kum içeriği azaltılmıştır. Kum-bentonit karışımı içerisine çok düşük termal genişleme değerine sahip olan bor minerali eklenmiştir. Bu nedenle, malzeme değişimi yüksek sıcaklıkta üleksit varlığında kum-bentonit karışımlarının kayma mukavemetindeki artışın başka bir nedenidir.

10B-90S karışımının hidrolik iletkenlik değerleri üleksit varlığında belirlenmiştir. Çizelge 6'da karışımların hidrolik iletkenlik değerleri verilmiştir. 10B-90S karışımının hidrolik iletkenlik değeri %10 üleksit varlığında yaklaşık 3.5 kat artarken, %20 üleksit varlığında önemli bir değişiklik göstermemiştir.



**Çizelge 6.** Üleksit katkısı varlığında kum-bentonit karışımlarının hidrolik iletkenlik değerleri (Hydraulic conductivity values of sand-bentonite mixtures in the presence of ulexite)

Numune	Hidrolik İletkenlik k(m/s)
10B-90S	$1.7 \times 10^{-11}$
9B-81S-10U	$5.9 \times 10^{-11}$
8B-72S-20U	$1.6 \times 10^{-11}$

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, üleksit katkılı kum-bentonit karışımlarının mühendislik özellikleri incelenmiştir. Kayma dayanımı davranışı ise oda sıcaklığında ve 80°C'de belirlenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre üleksit katkısı kum-bentonit karışımlarının  $\gamma_{d,max}$  değerinde artışa ve  $w_{opt}$  değerinde azalmaya sebep olmuştur. Ayrıca, kum-bentonit karışımlarına üleksit eklendiğinde, üleksit yüzdesi arttıkça toplam düşey sıkışabilirlik miktarı da artmıştır. Bununla birlikte, üleksit katkılı numunelerde şişme miktarı azalmıştır. Ancak üleksit katkısı oranındaki %10'dan % 20'ye artış, şişme değerinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Hidrolik iletkenlik deney sonuçlarına göre %10 üleksit katkısının 10B-90S karışımının hidrolik iletkenliğini artırdığı görülmüştür. Direk kesme deneyi sonuçlarına göre, kum-bentonit karışımları 80°C'ye ısıtıldığında, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri azalmıştır. Fakat üleksit katkısının ilave edilmesiyle içsel sürtünme açısı oda sıcaklığında düşmesine rağmen, 80°C'de artmıştır. Ayrıca, 80°C'de üleksit varlığında kum-bentonit karışımlarının içsel sürtünme açısı değerleri, oda sıcaklığındaki kum-bentonit-üleksit karışımlarınınkinden ve 80°C'deki katkısız kum-bentonit karışımınınkinden daha yüksektir. Ek olarak, 80°C'de üleksit katkılı kum-bentonit karışımlarının maksimum kayma gerilmesi değeri oda sıcaklığındaki maksimum kayma gerilmesi değerlerinden genellikle daha yüksektir. Ayrıca kum-bentonit karışımlarının yüksek sıcaklıkta azalan maksimum kayma dayanımı üleksit katkısıyla artmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, üleksit katkı maddesinin, kum-bentonit karışımlarının 80°C de kayma dayanımı davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ancak üleksit ilave edilmiş kum-bentonit karışımlarının yüksek sıcaklıklardaki uzun dönem davranışları konusunda çalışmaların da yapılması gereklidir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje no: 217M553). Yazarlar bu destek için minnettedir. Bor minerali üleksit malzeme destekleri için Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Şükran Gizem ALPAYDIN:** Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Yeliz YÜKSELEN-AKSOY:** Deneylerin sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Abuel-Naga H.M., "Experimental evaluation of engineering behavior of soft Bangkok clay under elevated temperature", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(7): 902- 910, (2006).
- [2] Pusch R., "General microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays", *SKB Technical Report*, 90-43, Stockholm, Sweden (1990).
- [3] Cho W.J., Lee J.O., and Chun K.S., "The temperature effects on hydraulic conductivity on compacted bentonite", *Applied Clay Science*, 14: 47-58, (1999).
- [4] Wang M.C., "The effect of heating on engineering properties of clays", *Physico-Chemical Aspects of Soil and Related Materials*, ASTM STP 1095, Philadelphia, 139-158, (1990).
- [5] Mitchell J. K., "Temperature effects on the engineering properties and behavior of soils", *Proceeding of International Conference on the Effects of Temperature and Heat on Engineering Behaviour of Soils*, 9(6): 9–28, (1969).
- [6] Hong Z. S., Bian X., Cui Y. J., Gao Y. F., and Zeng L. L., "Effect of initial water content on undrained shear behaviour of reconstituted clays", *Geotechnique*, 63(6): 442–450 (2013).
- [7] Abuel-Naga H.M., "Effect of temperature on shear strength and yielding behavior of soft Bangkok clay", *Soils and Foundations*, 47(3): 423–436, (2007).
- [8] Alther G.R., "The role of bentonite in soil sealing applications", *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 19(4): 401-409, (1982).
- [9] Alther G.R., "The qualifications of bentonite as a soil sealant", *Engineering Geology*, 23(3-4): 177-191, (1987).
- [10] Reschke A.E., and Haug M.D., "The physico-chemical properties of bentonites and the performance of sand-bentonite mixtures", in Proc. *44th Canadian Geotechnical Conf.*, Calgary, Alberta, Sept. 29 - Oct 2, 62-1 to 62-10, (1991).

- [11] Kleppe J. H., and Olson R.E., “Desiccation cracking of soil barriers”, *ASTM, Special Technical Publication*, 874: 263-275, (1985).
- [12] Özkan Ş. G., Çebi H., and Delice M. D., “Bor minerallerinin özellikleri ve madenciliği”, *2 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 224-228, (1997).
- [13] Sugoza I., Mutlu I., and Sugoza K. B., “The effect of ulexite to the tribological properties of brake lining materials”, *Polymer Composites*, 39(1), (2018).
- [14] Alpaydın Ş.G., and Yukselen-Aksoy Y., “The effects of colemanite and ulexite additives on the geotechnical index properties of bentonite and sand-bentonite mixtures” In: Wu W., Yu HS. (eds) *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham, (2018a).
- [15] Alpaydın Ş.G., and Yukselen-Aksoy Y., “The effect of colemanite and ulexite additives on the shear strength behavior of sand-bentonite mixtures under high temperature” *International Symposium on Energy Geotechnics* (SEG-2018). Lausanne- Switzerland (2018b).
- [16] ASTM D4318-98, “Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA (1999).
- [17] ASTM D2435/D2435M-11, “Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA (2011).
- [18] ASTM D3080/D3080M-11, “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA (2012).
- [19] ASTM D5084 - 16a, “Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA, 1–24 (2016).
- [20] Keren R., and Mezuman U., “Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation”, *Clay and Clays Minerals*, 29: 198-204, (1981).
- [21] Wang S., Zhu W., Qian X., Xu H., and Fan X., “Applied clay science temperature effects on non-darcy flow of compacted clay”, *Applied Clay Science*, 135: 521–525 (2017).