



Termal Değişimlerin Tinkal Katkılı Kum-Bentonit ve Zeolit-Bentonit Karışımlarının Kayma Dayanımına Etkisi

Effect of Thermal Changes on the Shear Strength of Tincal Added Sand-Bentonite and Zeolite-Bentonite Mixtures

Sukran Gizem Alpaydin^{1*}, Yeliz Yukselen Aksoy²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: alpaydin.sukrangizem@ogr.deu.edu.tr

Öz

Atık depolama alanları ve enerji geo-yapılarında geçirimsiz mühendislik bariyeri olarak kullanılan bentonit içerikli karışımlar zamanla termal etkiler altında değişimlere maruz kalabilirler. Zeminlerin, bu termal değişimler altında mühendislik özelliklerinin bozulmadan uzun süre korunması enerji geo-yapısının performansı ve çevre ve insan sağlığı için oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, sıcaklığın (25 ve 80 °C) ve sıcaklık döngülerinin sıkıştırılmış kum-bentonit ve zeolit-bentonit karışımlarının kayma dayanımı davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca sıcaklığa karşı direnci yüksek bir bor minerali olan tinkal, karışımlara ilave edilmiş ve bu katkının yüksek sıcaklıklarda karışımların kayma davranışına etkisi incelenmiştir. Karışımların kayma dayanımı genel olarak artan sıcaklıkla %5-%15 aralığında artış göstermiştir. Ayrıca tinkal ilavesi özellikle kum-bentonit karışımları için kayma dayanımı açısından faydalı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bentonit, Tincal, Kesme kutusu, Kayma dayanımı, Yüksek sıcaklık

Abstract

Bentonite-containing mixtures, which are used as an impermeable engineering barrier in waste disposal facilities and energy geo-structures, are exposed to thermal changes over time. It is very important for the performance of energy geo-structures and environment and human health that the soils are maintained for a long time without deterioration of their engineering properties under these thermal changes. In this study, the effects of temperature (20 and 80 °C) and temperature cycles on the shear strength behavior of compacted sand-bentonite and zeolite-bentonite mixtures were investigated. In addition, tincal, which is a boron mineral and has high temperature resistance, was added to these mixtures and its effect on the shear behavior of these mixtures at high temperatures was investigated. The shear strength of the mixtures generally increased between 5% and 15% with increasing temperature. In addition, the addition of tincal was found to be beneficial in terms of shear strength, especially for sand-bentonite mixtures.

Keywords: Bentonite, Tincal, Shear box, Shear strength, High temperature

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Engineering barriers are used to prevent leachate from landfills or radionuclides from nuclear waste repositories from entering groundwater. Bentonite, a montmorillonitic clay, is generally preferred as a barrier material due to its low permeability, good water retention capacity, and high swelling potential [1, 2, 3, 4]. In the Swiss concept for the disposal of low- and medium-level nuclear waste, sand-bentonite mixtures with 20-30% bentonite content were selected as possible backfill materials due to their low water permeability, good water retention capacity, and swelling potential [5].

Zeolites are aluminosilicate minerals formed by alteration of volcanic material under various geochemical conditions [7]. Zeolite-bentonite mixtures are recommended as an alternative to

sand-bentonite mixtures because they are not affected by water content changes and have low hydraulic conductivity [9].

In order to maintain the long-term stability of energy geo-structures, it is very important to investigate the effect of temperature changes on the mechanical and hydraulic behavior of barrier materials to prevent undesirable conditions such as settlement, shear failure, and increased hydraulic conductivity.

According to the results of triaxial compression tests performed at high temperature for normally consolidated kaolin clay, it was reported that the shear strength at the critical state was independent of temperature, but the peak shear strength increased with increasing temperature [13]. Lahoori et al. [16] reported that no significant change was observed in the shear strength parameters of compacted sandy clay when the temperature was increased from 20 °C to 50 °C and temperature

cycles were applied. Zheng et al. [17] investigated the effect of high temperatures (100 °C and 200 °C) on bentonite backfill and clay bedrock in a radioactive waste disposal repository. In general, it was reported that the illitization of bentonite increased with increasing temperature. However, De Bruyn and Thimus [19] reported that the mechanical strength of Boom clay decreased when the temperature increased up to 80 °C. In another study, it was observed that the strength of the buffer material (sand-bentonite) decreased when the temperature was increased to 100 °C [20].

The soil surrounding the energy geo-structures undergo thermal changes due to high temperatures, which can cause damage to these structures, the environment, and human health. Therefore, it is necessary to maintain the properties of the barrier material at high temperatures. Additives with low thermal expansion such as boron may be used to increase the thermal resistance of the buffer material.

In this study, the shear strength behavior of compacted sand-bentonite (SB) and zeolite-bentonite (ZB) mixtures in the presence of tincal additive was investigated under high temperature and thermal cycles.

Materials and Methods

In this study, sand, sodium (Na)-bentonite, zeolite and tincal were used. Sand-bentonite (SB) and zeolite-bentonite (ZB) mixtures were mixed at a ratio of 80:20 and 10% tincal was added to these mixtures. Sand and bentonite were classified as well-graded sand (SW) and high-plasticity clay (CH), respectively [23]. Some physico-chemical properties of the materials are given in Table 1.

Bentonite and zeolite were then sieved through No.200 sieve (0.075 mm) and sand through No.6 sieve (3.35 mm). The tincal particles were less than 0.425 mm in diameter. The mixtures were named using the initials of the materials. For example, SBT refers to tincal-added sand-bentonite mixture. The shear box tests were performed in accordance with ASTM D3080 [25]. The mixtures were compacted in three layers according to the compaction parameters (Table 2) and placed in a shear mold (6 cm x 6 cm). The prepared samples were submerged in water for 24 h to get saturation. Three different normal stresses (49, 98, 196 kPa) were applied in the tests and the samples were consolidated under these stresses.

The shear box tests were performed under three different conditions: room temperature, 80 °C and thermal cycle (20-80-20 °C). The conventional shear box device was modified to perform the tests at high temperatures (Figure 1). The modified experimental system consists of a conventional shear box, heat rod, thermostat, and K-type thermocouple. The heat rod was placed inside the cell and indirectly heated the sample by heating the water. The thermostat kept the temperature constant at 80 °C and continuous temperature recording was provided by K-type thermocouples connected to a digital thermometer.

For the tests performed under thermal cycling, the samples were consolidated at a normal stress of 196 kPa for 24 h. At this stage, the specimen was exposed to 80 °C for 8 h, followed by 16 h at 20 °C. Thus, the sample was subjected to one thermal cycle, then the test was conducted at room temperature in the saturated state.

Results and Discussion

The variation of shear stress versus horizontal displacement of SB and ZB mixtures at room temperature, 80 °C and after exposure to one thermal cycle for $\sigma_n = 196$ kPa was investigated. The shear strength of SB mixtures increased in the presence of tincal at both temperatures (Figure 2a). There was a slight

increase in the peak and residual shear strength for both SB and SBT when the temperature was increased to 80 °C. However, the temperature increase did not have a significant effect on the stress-displacement range in which the soil showed elastic deformation.

The shear stress values of ZB mixtures decreased at both temperatures in the presence of tincal, in contrast to SB mixtures (Figure 2b). In addition, the residual and peak shear strengths of ZB and ZBT increased with increasing temperature. The positive effect of high temperature on shear stress was more pronounced in ZB mixtures. As the temperature increases, the smectite mineral transforms into a more stable silicate phase by cementation and illitization [14]. As a result, the water retention capacity of the clay decreases. When the water retention capacity of clay (smectite) decreases, its strength is expected to increase. Wang et al. [28] reported that under the same consolidation stress, the viscosity of adsorbed water decreases as the temperature increases and the porosity decreases accordingly. Thermal contraction of the soil at high temperatures leads to an increase in shear strength [29]. In addition, it was reported that the clay showed hardening behavior as temperature increased [30]. When the temperature was increased, the shear strength of ZB mixtures showed a higher increase compared to SB mixtures. This is because the shrinkage behavior of zeolite is more pronounced with increasing temperature. A large part of the zeolite skeleton shows a shrinkage of its cellular dimensions in the presence of high temperatures [31].

The shear strength of SB increased with the tincal addition under both temperatures. Boron minerals are strongly held by the aluminum or silicon tetrahedron present in the bentonite structure [32]. As a result of boron adsorption, the shear strength of the SB mixtures increased. Another reason for this may be the material replacement. Because the sand-bentonite ratio was reduced as much as the tincal added to the mixture. Bentonite is a material with low strength and high swelling potential. By reducing the bentonite ratio in the mixture and adding tincal with low swelling potential instead, the strength may increase.

In general, the internal friction angles of ZB mixtures were higher than SB mixtures at both temperatures. Temperature increase and tincal addition generally decreased the c' values of the mixtures (Table 3). For example, the c' value of SBT, which was 32.9 kPa at room temperature, decreased to 10.1 kPa when the temperature was increased. Similarly, it was reported in previous studies that the cohesion decreased linearly with increasing temperatures (20-60 °C) [33]. The shear box tests of SB and ZB mixtures under 196 kPa vertical stress were performed after a thermal cycle (20-80-20 °C). The maximum shear stress of SB after one thermal cycling was determined as 192.8 kPa (Table 4). The maximum shear stress of the ZB after one thermal cycling was 130.1 kPa. The shear strength values of the samples subjected to the thermal cycle were significantly higher compared to the shear strength of the specimens tested at room temperature and 80 °C. The strength of the additive-free SB increased up to three times. This is due to both the exposure of the specimens to higher temperatures and the reduction of the shear rate by up to 100 times. With the reduced shear rate, the pore water pressures were allowed to be fully drained. It is expected that the strength of the drained specimen would increase. It is thought that the amount of plastic shrinkage in the soil increased with the increase of the exposure time to temperature up to 10 times.

Conclusion

According to the shear box test results, the residual and peak shear strengths for all mixtures increased with increasing temperature. Tincal additive had an increasing effect on the shear strength of SB at both temperatures (20 and 80 °C), but decreased the shear strength of ZB mixtures.

As the temperature of all mixtures was increased to 80 °C, the internal friction angles increased and cohesion values decreased. The addition of tincal under thermal cycle had a decreasing effect on the shear strength. However, tincal addition was found to be beneficial in terms of shear strength at 80 °C, especially for SB mixtures.

1. Giriş

Atık depolama alanlarındaki sızıntı sularının veya nükleer atık depolarındaki radyonüklitlerin yer altı suyuna karışmasını önlemek için mühendislik bariyerleri kullanılır. Montmorillonitik bir kil olan bentonit, geçirgenliğinin düşük ve şişme potansiyelinin yüksek olması nedeniyle genellikle bariyer malzemesi olarak tercih edilmektedir [1, 2, 3, 4]. Sıkıştırılmış bentonitin su içeriğinin azalması durumunda çatlaklar oluşabilmekte ve bu durum bariyerin uzun vadeli performansını olumsuz etkilemektedir. Düşük ve orta seviyeli nükleer atıkların bertaraf için, düşük su geçirgenlikleri, iyi su tutma kapasiteleri ve şişme potansiyelleri nedeniyle %20-30 bentonit içeriğine sahip kum-bentonit karışımları olası dolgu malzemeleri olarak seçilmiştir [5]. Bu nedenle farklı oranlarda kum ve bentonit içeren kum-bentonit karışımları bariyer malzemesi olarak tercih edilmektedir [6].

Zeolitler, tektosilikatlar sınıfına ait, çeşitli jeokimyasal koşullar altında volkanik malzemenin değişmesiyle oluşan alüminosilikat minerallerdir [7]. Zeolitik tüfler genellikle yumuşak, ufalanabilir ve hafiftir ve genellikle %50-95 oranında reaksiyona girmemiş volkanik cam ve kuvars, K-feldspat, kalsit ve jips gibi diğer mineral fazlar ile bir arada var olabilen bir veya daha fazla zeolit içerir [8]. Zeolit yapısı SiO_4 ve AlO_4 tetrahedronlarından oluşan çerçeveden oluşur. Zeolit yapısında bulunan Al^{3+} 'nin Si^{4+} ile yer değiştirmesi, zeolitlerin yüzeyinin genellikle negatif yüklü olmasına neden olur. Zeolit, düşük hacimsel büzülme potansiyeli nedeniyle atık depolama alanlarında bir bariyer malzemesi olarak kabul edilir. Zeolit-bentonit karışımları, su içeriği değişimlerinden etkilenmediği ve hidrolik iletkenliği düşük olduğu için kum-bentonit karışımlarına alternatif olarak önerilmektedir [9]. Zeolit hidrolitik iletkenlik değerinin atık depolama alanlarında örtü uygulamaları için yeterli olduğu bildirilmiştir [10].

Nükleer atık depolama alanlarında kimyasal ve radyoaktif bozunma sebebiyle meydana gelen termal değişimler, anakaya üzerinde termal gerilmelere neden olabilir. Bu nedenle anakaya yüzeylerindeki sıcaklık her zaman 100 °C'nin altında olmalıdır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan zeminler ve geçirimsiz mühendislik bariyeri uygulamalarında kullanılan tampon malzemeler (katı atık ve nükleer atık depolama alanları, enerji kazıkları, ısı depolama tesisleri vb.) mühendislik özelliklerini uzun süre boyunca değişmeden muhafaza etmelidir. Zeminin mühendislik özelliklerinin yüksek sıcaklıklarda değişiklik gösterdiği önceki çalışmalardan bilinmektedir [11, 12]. Enerji yapılarının uzun dönemli stabilitesini koruyabilmek için oturma, kayma göçmesi, hidrolik iletkenliğin artması gibi istenmeyen durumların önlenmesi için sıcaklık değişimlerinin bariyer malzemelerinin mekanik ve hidrolik davranışlarına etkisinin araştırılması oldukça önemlidir.

Normal konsolide kaolin kili için yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre, kritik durumdaki kayma dayanımının sıcaklıktan bağımsız olduğu ancak artan sıcaklıkla pik kayma dayanımının arttığı bildirilmiştir [13]. Normal konsolide yumuşak Bangkok kili için

de benzer sonuçlar elde edilmiştir [14]. Normal konsolide yumuşak Bangkok kili üzerinde 90 °C sıcaklığa kadar gerçekleştirilen üç eksenli deneyler sonucunda, daha yüksek sıcaklıklarda daha yüksek pik deviyör gerilmeler rapor edilmiştir. Normal konsolide kaolinin yüksek sıcaklıkta (22-60 °C) hem kritik hem de pik kayma dayanımının artan sıcaklıkla birlikte arttığı bulgulanmıştır [15]. Lahoori vd. [16], sıcaklık değişimleri altında sıkıştırılmış kumlu kilin kayma dayanımı parametrelerinde sıcaklık 20 °C'den 50 °C'ye artırıldığında ve sıcaklık döngüleri uygulandığında önemli bir değişiklik gözlenmediğini bildirmiştir. Zheng vd. [17], yüksek sıcaklıkların (100 °C ve 200 °C) bir radyoaktif atık bertaraf deposundaki bentonit dolgu ve kil anakaya üzerindeki etkisini araştırmıştır. Genel olarak sıcaklık arttıkça bentonitin illitleşmesinin arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte; yüksek sıcaklığın kalkerli ve kuvars kumunun kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için drenajlı kesme deneyleri yapılmıştır [18]. Sıcaklık artışı, kumun maksimum içsel sürtünme açısını azaltıcı yönde etki göstermiştir. De Bruyn ve Thimus [19], sıcaklık 80 °C'ye kadar arttığında Boom kilinin mekanik dayanımının azaldığını bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada, sıcaklık 100 °C'ye çıkarıldığında tampon malzemenin (kum-bentonit) mukavemetinin azaldığı görülmüştür [20]. Killi zemin üzerinde yapılan bir çalışmada, sıcaklık 50 °C'ye artırıldığında killi zeminin yapısal dayanımı azalmış ve ısıtma sonrası zeminde termal yumuşama davranışı gözlenmiştir [21]. Ayrıca ısıtma-soğutma döngüsü (20-30-40-50-40-30-20°C) sonrasında zeminin mukavemetinde iyileşme rapor edilmiştir.

Enerji yapılarını çevreleyen zeminlerde yüksek sıcaklık etkisiyle yapıların performansını düşürecek değişimler oluşabilir ve bu durum enerji yapısına, çevreye ve insan sağlığına zarar verebilir. Bu nedenle bariyer malzemesinin mühendislik özelliklerinin yüksek sıcaklıklarda korunması gerekmektedir. Tampon malzemenin termal dayanıklılığını arttırmak için bor gibi termal genişmesi düşük katkı malzemeleri kullanılabilir. Bor, farklı oranlarda bor oksit içeren doğal bir bileşiktir. Borun erime noktası 2190 ± 20 °C, kaynama noktası ise 2250 °C'dir. Endüstride en çok kullanılan bor minerallerinden bazıları tincal, kolemanit ve üleksittir. Bor mineralleri, kil yapısındaki alüminyum veya silikon tetrahedron tarafından güçlü bir şekilde tutulur [22].

Bu çalışmada, sıkıştırılmış kum-bentonit (SB) ve zeolit bentonit (ZB) karışımlarının tincal katkısı varlığında kayma dayanımı davranışları yüksek sıcaklık ve termal döngüler altında incelenmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Malzeme karakterizasyonu

Bu çalışma kapsamında zemin olarak kum, sodyum (Na)-bentonit, zeolit ve katkı malzemesi olarak da bir bor minerali olan tincal kullanılmıştır. Kum-bentonit (SB) ve zeolit-bentonit (ZB) karışımları 80:20 oranında karıştırılmış ve bu karışımlara %10 tincal katkısı ilave edilmiştir. Kum, zeolit ve bentonit yerel şirketlerden tedarik edilmiştir. Tincal, Türkiye Eti Madencilik Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Kum ve bentonit sırasıyla iyi derecelenmiş kum (SW) ve yüksek plastisiteli kil (CH) olarak

sınıflandırılmıştır [23]. Kullanılan malzemelerin bazı fiziko-kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Table 1. Malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri

	Kum	Zeolit	Bentonit	Tinkal
Özgül ağırlık	2,63	2,30	2,70	1,67
Likit limit(%)	-	-	476,0	61,0
Plastik limit(%)	-	NP*	70,1	43,0
-No.200(%)	0,4	100,0	100,0	91,3
pH	-	8,50	9,50	9,12

*NP: Plastiklik özelliği göstermeyen

Kum, zeolit ve bentonit, deneylerde kullanılmadan önce etüvde (105 °C) 24 saat boyunca kurutulmuştur. Daha sonra bentonit ve zeolit No.200 elekten (0,075 mm) ve kum No.6 elekten (3,35 mm) elenerek kullanılmıştır. Tinkal mineralinin, yüksek sıcaklıkta yapısı değiştiği için kurutma işlemi uygulanmamıştır. Bu yüzden deneylerden önce tinkalin doğal su içeriği belirlenmiş ve karışımlar hazırlanırken yapılan hesaplamalarda dikkate alınmıştır. Çalışmada kullanılan en büyük tinkal çapı 0,425 mm olarak belirlenmiştir. Numuneler, Standart Proctor deneyinden [24] elde edilen kompaksiyon parametrelerine göre sıkıştırılmıştır (Tablo 2). Karışımlar adlandırılırken malzemelerin İngilizce isimlerinin baş harfleri kullanılmıştır. Buna göre bentonit B, kum S, zeolit Z, tinkal T olarak kısaltılmıştır. Örneğin SBT tinkal katkılı kum-bentonit karışımını ifade etmektedir.

Table 2. Karışımların kompaksiyon parametreleri

Karışım	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)
SB	15.89	16.8
SBT	15.79	18.5
ZB	10.20	42.0
ZBT	10.79	43.5

2.2. Kesme kutusu deneyi

Kesme kutusu deneyleri ASTM D3080 [25] standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Karışımlar kompaksiyon parametrelerine uygun olarak üç tabaka halinde sıkıştırılmış ve 2 cm yüksekliğinde kare (6 cm x 6 cm) bir kesme kalıbına yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler, doymun hale gelmesi için 24 saat boyunca suya batık durumda bekletilmiştir. Kesme kutusu deneylerinde üç farklı normal gerilme (49, 98, 196 kPa) uygulanmış ve numuneler bu gerilmeler altında konsolide edilmiştir.

Deneylerde kesme hızı 0,5 mm/dk olarak uygulanmıştır. Kesme kutusu deneyleri oda sıcaklığı, 80 °C ve termal döngü (20-80-20 °C) altında olmak üzere üç ayrı termal koşulda gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yüksek sıcaklıkta yapılabilmesi için geleneksel kesme kutusu cihazı modifiye edilmiştir. Modifiye edilmiş deneysel sistem, geleneksel bir kesme kutusu, ısı çubuğu, termostat ve K tipi termokupludan oluşur. Isı çubuğu hücrenin içine yerleştirilerek hücre suyunu ısıtarak dolaylı olarak numuneyi ısıtmıştır. Termostat, sıcaklığı 80 °C'de sabit tutmuştur ve dijital termometreye bağlı K tipi termokupllar ile sürekli

sıcaklık kaydı sağlanmıştır. Yüksek sıcaklık için kesme kutusu deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmektedir.

Termal döngü altında gerçekleştirilen kesme kutusu deneyleri için numuneler 24 saat boyunca 196 kPa normal gerilme altında su altında konsolide edilmiştir. Bu aşamada numune 8 saat boyunca 80 °C sıcaklığa maruz bırakılmış, ardından 16 saat boyunca 20 °C'de bekletilmiştir. Böylece numune bir termal döngüye maruz bırakılmış olup, ardından deney doymun durumda, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Termal döngüye maruz kalan numunelerden kum içeren karışımlar 0,004 mm/dk, zeolit içeren karışımlar ise 0,02 mm/dk kesme hızı ile kesilmiştir [26].

3. Bulgular ve Tartışma

SB, SBT, ZB ve ZBT karışımlarının oda sıcaklığı, 80 °C ve termal döngü (20-80-20 °C) altında yapılan kesme kutusu deneylerinin sonuçları bu bölümde verilmiştir. SB ve ZB karışımlarının oda sıcaklığında ve 80 °C'de $\sigma_n=196$ kPa için yatay yer değiştirmesine (deplasmanına) karşı kayma gerilmesinin değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir.

Her iki sıcaklıkta da tinkal katkısı varlığında SB karışımlarının kayma dayanımı artmıştır (Şekil 2a). Tinkal katkısı varlığında aynı kayma gerilmesine karşılık gelen kayma yer değiştirmesi azalmıştır. Sıcaklık, oda sıcaklığından 80 °C'ye yükseltildiğinde hem SB hem de SBT için pik ve rezidüel kayma dayanımında hafif bir artış olmuştur. SB karışımının pik kayma dayanımı oda sıcaklığında 63,1 kPa iken 80 °C'de 65,6 kPa değerine yükselmiştir. SBT karışımının kayma gerilmesi ise sıcaklık artışıyla birlikte yaklaşık %8 artarak 102,6 kPa değerine ulaşmıştır. Bununla birlikte, sıcaklık artışının, zeminin elastik deformasyon gösterdiği gerilme-yer değiştirme aralığı üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

ZB karışımlarının kayma gerilmesi değerleri, SB karışımlarının aksine, tinkal varlığında her iki sıcaklıkta da azalmıştır. Ek olarak, ZB ve ZBT karışımlarının rezidüel ve pik kayma dayanımları sıcaklığın artmasıyla birlikte artmıştır. Örneğin ZB karışımının maksimum kayma gerilmesi artan sıcaklıkla birlikte 103,7 kPa değerinden 118,5 kPa değerine %14 oranında artış göstermiştir. Yüksek sıcaklığın kayma gerilmesi üzerindeki olumlu etkisi ZB karışımlarında daha belirgin olmuştur. Ayrıca ZB karışımlarında göçme daha küçük kayma yer değiştirmesi değerlerinde meydana gelmiştir (Şekil 2b).

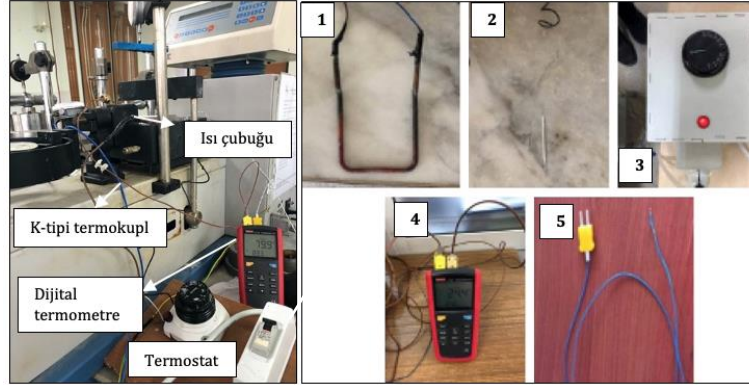
Sıcaklık arttırıldığında tüm karışımların kayma dayanımları artmıştır. Sıcaklık arttıkça smektit minerali çimentolaşma ve illitizasyon ile daha kararlı olan silikat fazına dönüşür [14]. Bunun sonucunda kilin su tutma kapasitesi azalır. Kilin (simektit) su tutma kapasitesi azaldığında dayanımının artması beklenir. Wang vd. [28] yaptıkları çalışmada aynı konsolidasyon gerilmesi altında sıcaklık arttıkça adsorbe edilen suyun viskozitesinin azaldığını ve buna bağlı olarak da porozitenin azaldığını rapor etmişlerdir. Yüksek sıcaklıkta zeminde meydana gelen termal büzülme sonucunda kayma dayanımında artış olmaktadır [29]. Ayrıca artan sıcaklıkta kilin kayma gerilmesi incelendiğinde kilin pekleşme davranışı gösterdiği bildirilmiştir [30].

Sıcaklık arttırıldığı zaman ZB karışımlarının kayma dayanımları, SB karışımlarına kıyasla daha yüksek artış göstermiştir. Bunun nedeni, zeolit artan sıcaklıkla büzülme davranışının daha belirgin olmasıdır. Zeolit iskeletinin büyük bir kısmı, yüksek sıcaklık varlığında hücresel boyutlarında bir büzülme gösterir [31].

SB karışımının kayma dayanımı tinkal ilavesiyle hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta artmıştır. Bor mineralleri, bentonit yapısında bulunan alüminyum veya silikon tetrahedron

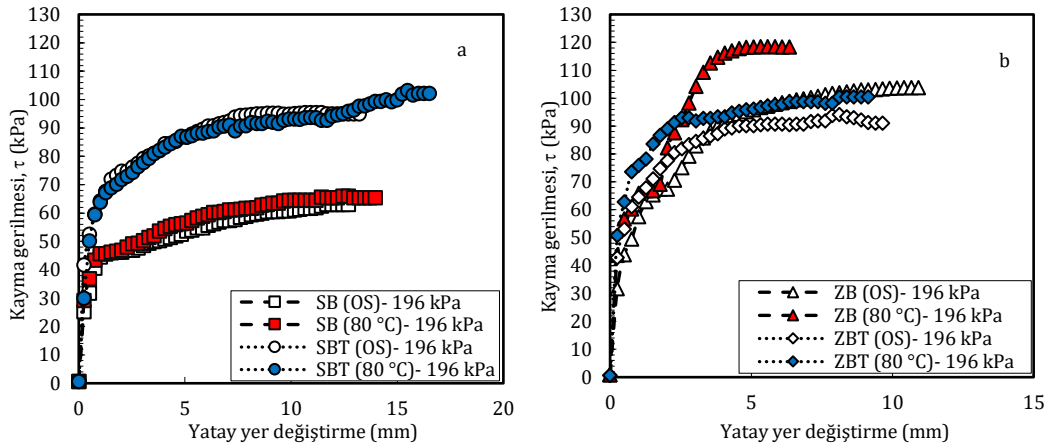
tarafından güçlü bir şekilde tutulur [32]. Bor adsorpsiyonunun bir sonucu olarak, kum-bentonit karışımının kesme dayanımı dolaylı olarak artmıştır. Bunun bir başka nedeni de malzeme

değişimi olabilir. Çünkü karışıma eklenen tinkal minerali kadar kum-bentonit oranı azaltılmıştır.



Şekil 1. Modifiye edilmiş deney düzeneği (1: ısı çubuğu, 2: termostat, 3: termostat kutusu, 4: dijital termometre, 5: K-tipi termokupl)

Figure 1. Modified experimental set-up (1: heat rod, 2: thermostat, 3: thermostat box, 4: digital thermometer, 5: K-type thermocouple)



Şekil 2. Yüksek sıcaklığın kayma gerilmesi-yer değiştirme üzerindeki etkisi a) SB, b) ZB karışımları

Figure 2. Effect of high temperature on the shear stress-horizontal displacement a) SB, b) ZB mixtures

Bentonit, düşük dayanıma ve yüksek şişme potansiyeline sahip bir malzemedir. Karışımdaki bentonit oranının düşürülmesi ve onun yerine şişme potansiyeli düşük olan tinkal ilavesi ile dayanım artabilir. SB ve ZB karışımlarının oda sıcaklığı ve 80 °C'de kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3'ten elde edilen kayma dayanımı parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

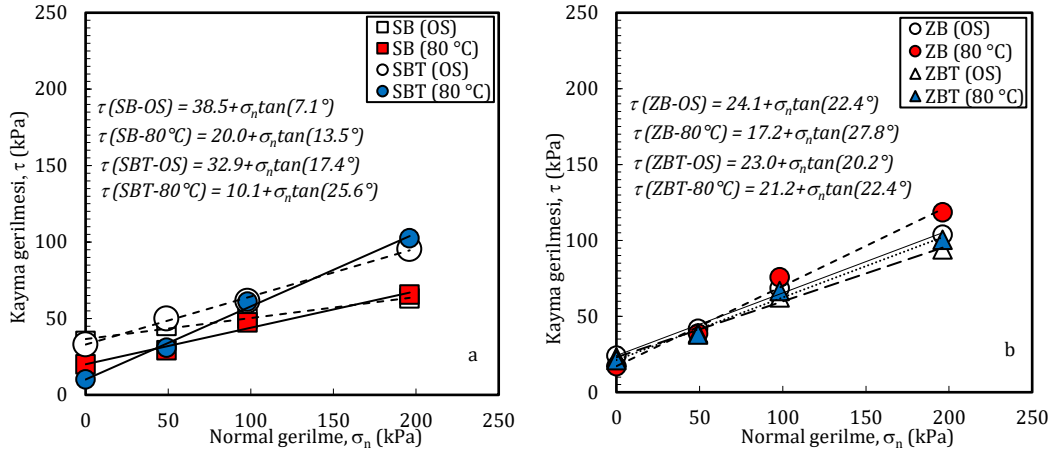
Tablo 3. Karışımların OS ve 80 °C'deki kayma dayanımı parametreleri

Table 3. Shear strength parameters of the mixtures at RT and 80 °C

Karışım	Oda sıcaklığı		80 °C	
	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)
SB	7,1	38,5	13,5	20,0
SBT	17,4	32,9	25,6	10,1
ZB	22,4	24,1	27,8	17,2
ZBT	20,2	23,0	22,4	21,2

Genel olarak ZB karışımlarının içsel sürtünme açıları her iki sıcaklıkta da SB karışımlarından daha yüksek elde edilmiştir. SB karışımına oda sıcaklığında ve 80 °C'de tinkal ilave edildiğinde içsel sürtünme açısı (ϕ') artarken kohezyon (c') değeri azalmıştır. Tinkal katkısı ile içsel sürtünme açısı oda sıcaklığında ve 80 °C'de yaklaşık iki kat artarak sırasıyla 17,4° ve 25,6° değerlerine yükselmiştir.

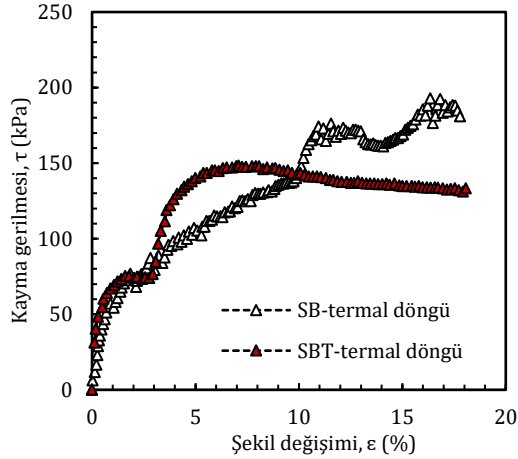
ZB karışımlarının ϕ' değerleri tinkal katkısı varlığında her iki sıcaklıkta da bir miktar azalmıştır. Ancak her bir karışım için ϕ' değerleri, sıcaklık 80 °C'ye artırıldığında %25'e kadar artış göstermiştir. Karışımlar arasında her iki termal koşul için de en yüksek ϕ' değeri (27,8°) 80 °C'de ZB karışımı için elde edilmiştir. Sıcaklık artışı ve tinkal ilavesi genel olarak karışımların c' değerlerini azaltıcı etki yapmıştır. Örneğin SBT karışımının oda sıcaklığında 32,9 kPa olan c' değeri, sıcaklık artırıldığında 10,1 kPa değerine azalmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda benzer olarak artan sıcaklıklarla (20-60 °C) kohezyonun lineer olarak azaldığı bildirilmiştir [33]. Ayrıca hem yüksek sıcaklık hem de tinkal katkısının SB'nin kayma dayanımı parametreleri üzerindeki etkisi ZB'ye kıyasla çok daha belirgin olmuştur.



Şekil 3. Oda sıcaklığı ve 80 °C'de kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri a) SB, b) ZB karışımları

Figure 3. Shear stress against effective normal stress at RT and 80 °C a) SB, b) ZB mixtures

SB ve ZB karışımlarının 196 kPa düşey gerilme altında, bir termal döngü (20-80-20 °C) uygulandıktan sonra kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Termal döngü aşamasında zemin 8 saat 80 °C'ye maruz bırakılmış, daha sonra sıcaklık oda sıcaklığına azaltılarak 16 saat bekletilmiştir. SB karışımlarının termal döngü altında kayma gerilmesi-şekil değişimi grafiği Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Tincal katkılı kum-bentonit karışımlarının termal döngü altında kayma gerilmesi-şekil değişimi grafiği

Figure 4. Shear stress-strain of tincal added sand-bentonite mixtures under thermal cycle

SB karışımının maksimum kayma gerilmesi 192,8 kPa olarak belirlenmiştir. SB karışımının maksimum ve rezidüel kayma dayanımı tincal katkısıyla %30 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, tincal katkılı karışım pik kayma dayanımına daha düşük şekil değişiminde ulaşmıştır. ZB karışımının bir termal döngüye maruz bırakıldıktan sonra maksimum kayma gerilmesi 130,1 kPa olarak belirlenmiştir.

Ayrıca tüm karışımların oda sıcaklığı, 80 °C ve termal döngü altında maksimum kayma gerilmesi değerleri Tablo 4'te sunulmaktadır. Termal döngüye maruz kalmış numunelerin kayma dayanımları, oda sıcaklığı ve 80 °C'de deneyleri gerçekleştirilmiş numunelerin kayma dayanımlarına kıyasla önemli derecede yüksek elde edilmiştir.

Katkısız SB karışımında dayanım üç kata kadar artmıştır. Bunun sebebi hem numunelerin daha fazla yüksek sıcaklığa maruz bırakılması hem de kesme hızının 100 kata kadar azalmasıdır.

Azalan kesme hızıyla birlikte zemindeki boşluk suyu basınçlarının tamamen sönmülmesine izin verilmiştir. Drene olan numunenin dayanımının artması beklenen bir durumdur. Sıcaklığa maruz kalma süresinin de 10 kata kadar artmasıyla zeminin plastik büzülme miktarının arttığı düşünülmektedir.

Tablo 4. Tüm karışımların oda sıcaklığı, 80 °C ve termal döngü altında maksimum kayma gerilmesi

Table 4. Maximum shear stress of all mixtures at room temperature, 80 °C and thermal cycle

Karışım	Kayma Dayanımı, τ (kPa)		
	Oda sıcaklığı	80°C	Termal döngü (20-80-20°C)
	$\sigma_v = 196,1 \text{ kPa}$		
SB	63,1	65,6	192,8
SBT	95,4	102,5	148,3
ZB	103,8	118,5	130,1
ZBT	94,1	100,4	160,2

4. Sonuçlar

Kum-bentonit (SB) ve zeolit-bentonit (ZB) karışımlarının tincal katkısı varlığında kesme kutusu deneyleri oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık (80 °C) altında gerçekleştirilerek, kesme dayanımı parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca termal döngüler (20-80-20 °C) altında karışımların 196 kPa düşey gerilme altında kayma gerilmeleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına dayanarak katkı malzemesi ve sıcaklık değişimlerinin kayma dayanımı davranışı üzerine etkileri incelenmiştir.

Kesme kutusu deney sonuçlarına göre, artan sıcaklıkla birlikte tüm karışımlar için rezidüel ve pik kayma dayanımları artmıştır. Tincal katkı maddesinin her iki sıcaklıkta da (20 ve 80 °C) SB karışımının kayma dayanımı üzerinde artırıcı etkisi vardır, ancak; ZB karışımlarının kayma dayanımını azaltmıştır. Kum-bentonit karışımlarına tincal ilavesi oda sıcaklığındaki ve 80 °C'deki içsel sürtünme açılarını arttırırken, kohezyon değerlerini azaltıcı olarak etkide bulunmuştur.

Tüm karışımların sıcaklığın 80 °C'ye arttırılmasıyla birlikte içsel sürtünme açıları artmış, kohezyon değerleri azalmıştır. Termal döngü altında kayma dayanımları, oda sıcaklığı ve 80 °C'de elde edilen değerlere göre oldukça yüksek bulunmuştur. Termal

döngüler altında tinkal katkısı ise kayma dayanımını azaltıcı yönde etki etmiştir. Ancak tinkal ilavesi özellikle kum-bentonit karışımları için 80 °C'de kayma dayanımı açısından faydalı bulunmuştur.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje no: 217M553). Yazarlar bu destek ve SGA'nın 100/2000 Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Doktora Bursu için minnettardır.

Yazar katkılarının beyanı

Şükran Gizem Alpaydin: Deneysel araştırma, Metodoloji, Yazma – orijinal taslak. Yeliz Yükselen-Aksoy: Metodoloji, Yazma – inceleme ve düzenleme, Finansman temini, Proje yönetimi.

Kaynaklar

- [1] Cho, W.J., Lee, J.O., Chun, K.S., Hahn, D.S. 1999. Basic Physicochemical Properties of Domestic Bentonite for Use as a Buffer Material in a High-Level Radioactive Waste Repository, *Journal of the Korean Nuclear Society*, Cilt. 31, s. 39-50.
- [2] Karnland, O., Birgersson, M. 2006. Montmorillonite Stability with Respect to KBS-3 Conditions. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden. Technical Report, No. SKB-TR-06-11.
- [3] Villar, M.V., Lloret, A. 2008. Influence of Dry Density and Water Content on the Swelling of a Compacted Bentonite, *Applied Clay Science*, Cilt. 39(1-2), s. 38-49. DOI: 10.1016/j.clay.2007.04.007
- [4] Komine, H., Watanabe, Y. 2010. The Past, Present and Future of the Geo-Environment in Japan, *Soils and Foundations*, Cilt. 50(6), s. 977-982.
- [5] Nagra. 2008. Effects of Post-Disposal Gas Generation in a Repository for Low- and Intermediate-Level Waste Sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland, Technical Report 08-07. Wetingen, Switzerland: Nagra. Cilt. 41(10), 175s.
- [6] Mollins, L.H., Stewart, D., Cousens, T.W. 1996. Predicting the Properties of Bentonite-Sand Mixtures, *Clay Minerals*, Cilt. 31(02), s. 243-252. DOI: 10.1180/claymin.1996.031.2.10
- [7] Karakaya, M.Ç., Karakaya, N., Yavuz, F. 2015. Geology and Conditions of Formation of the Zeolite-Bearing Deposits Southeast of Ankara (Central Turkey), *Clays and Clay Minerals*, Cilt. 63(2), s. 85-109. DOI: 10.1346/CCMN.2015.0630202
- [8] Mumpton, F.A. 1999. La Roca Magica: Uses of Natural Zeolites in Agriculture and Industry, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Cilt. 96(7), s. 3463-3470. DOI: 10.1073/pnas.96.7.346
- [9] Kaya, A., Durukan, S., Oren, A.H., Yükselen, Y. 2006. Determining the Engineering Properties of Bentonite-Zeolite Mixtures, *Teknik Dergi*, Cilt. 17(3), s. 3879-3892.
- [10] Yükselen-Aksoy, Y. 2010. Characterization of Two Natural Zeolites for Geotechnical and Geoenvironmental Applications, *Applied Clay Science*, Cilt. 50, s. 130-136. DOI: 10.1016/j.clay.2010.07.015
- [11] Burghignoli, A., Desideri, A., Miliziano, S. 2000. A Laboratory Study on the Thermomechanical Behaviour of Clayey Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Cilt. 37, s. 764-780. DOI: 10.1139/cgj-37-4-764
- [12] Sultan, N., Delage, P., Cui, Y.J. 2002. Temperature Effects on the Volume Change Behaviour of Boom Clay, *Engineering Geology*, Cilt. 64, s. 135-145. DOI: 10.1016/S0013-7952(01)00143-0
- [13] Cekerevac, C., Laloui, L. 2004. Experimental Study of Thermal Effects on the Mechanical Behaviour of a Clay, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Cilt. 28, s. 209-28. DOI: 10.1002/nag.332
- [14] Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Ramana, G.V., Grino, L., Rujivipat, P., Thet, Y. 2006. Experimental Evaluation of Engineering Behavior of Soft Bangkok Clay under Elevated Temperature, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Cilt. 132(7), s. 902-910. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:7(902)
- [15] Maghsoodi, S., Cuisinier, O., Masrouri, F. 2018. Thermal Effects on Mechanical Behaviour of Soil-Structure Interface, *Canadian Geotechnical Journal*, Cilt. 57(1), s. 32-47. DOI: 10.1139/cgj-2018-0583
- [16] Lahoori, M., Rosin-Paumier, S., Masrouri, F. 2021. Effect of Monotonic and Cyclic Temperature Variations on the Mechanical Behavior of a Compacted Soil, *Engineering Geology*, Cilt. 290 s. 106195. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106195
- [17] Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J.T., Liu, H.H. 2015. On the Impact of Temperatures up to 200°C in Clay Repositories with Bentonite Engineer Barrier Systems: A Study with Coupled Thermal, Hydrological, Chemical, and Mechanical Modeling, *Engineering Geology*, Cilt. 197, s. 278-295. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.08.026
- [18] He, S.H., Shan, H.F., Xia, T.D., Liu Z.J., Ding, Z., Xia, F. 2021. The Effect of Temperature on the Drained Shear Behavior of Calcareous Sand, *Acta Geotechnica*, Cilt. 16, s. 613-33. DOI: 10.1007/s11440-020-01030-7
- [19] De Bruyn, D., Thimus, J.F. 1996. The Influence of Temperature on Mechanical Characteristics of Boom Clay: The Results of an Initial Laboratory Programme, *Engineering Geology*, Cilt. 41(1-4), s. 117-126. DOI: 10.1016/0013-7952(95)00029-1
- [20] Lingnau, B.E., Yarechewski, D., Tanaka, N., Gray, M.N. 1996. Effects of Temperature on Strength and Compressibility of Sand-Bentonite Buffer, *Engineering Geology*, Cilt. 41(1-4), s. 103-115. DOI: 10.1016/0013-7952(95)00028-3
- [21] Gu, K., Tang, C., Shi, B. 2014. A Study of the Effect of Temperature on the Structural Strength of a Clayey Soil Using a Micropenetrator, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Cilt. 73(3), s. 747-758. DOI: 10.1007/s10064-013-0543-y
- [22] Privett, K. 1987. *J.E. Gillott Clay in Engineering Geology*, 2nd Edition. (Developments in Geotechnical Engineering, 41.) Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 474s.
- [23] ASTM D2487-17. 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified soil classification system), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, s. 1-10. DOI: 10.1520/D2487-17
- [24] ASTM D698-12. 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, s. 1-13. DOI: 10.1520/D0698-12E02
- [25] ASTM D3080/D3080M-18. 2018. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, s. 1-9. DOI: 10.1520/D3080
- [26] ASTM D2435/D2435M-11. 2020. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, s. 1-15. DOI: 10.1520/D2435_D2435M-11
- [27] Wersin, P., Johnson, L.H., Snellman, M. 2006. Impact of Iron Released from Steel Components on the Performance of the Bentonite Buffer: A Preliminary Assessment within the Framework of the KBS-3H Disposal Concept, Cambridge, MRS Online Proceedings Library, 932, 1171. DOI: 10.1557/proc-932-117.1
- [28] Wang, S., Zhu, W., Qian, X., Xu, H., Fan, X. 2017. Temperature Effects on Non-Darcy Flow of Compacted Clay, *Applied Clay Science*, Cilt. 135, s. 521-525. DOI: 10.1016/j.clay.2016.09.025
- [29] Hong, Z. S., Bian, X., Cui, Y. J., Gao, Y. F., Zeng, L. L. 2013. Effect of Initial Water Content on Undrained Shear Behaviour of Reconstituted Clays, *Géotechnique*, Cilt. 63(6), s. 441-450. DOI: 10.1680/geot.11.p.114
- [30] Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J.-M., Hassen, G. 2016. Effect of Temperature on the Shear Strength of Soils and the Soil-Structure Interface, *Canadian Geotechnical Journal*, Cilt. 53(7), s. 1186-1194. DOI: 10.1139/cgj-2015-0355
- [31] Tschauferer, P., Parker, S.C. 1995. Thermal Expansion Behavior of Zeolites and AlPO₄s, *The Journal of Physical Chemistry*, Cilt. 99(26), s. 10609-15. DOI: 10.1021/j100026a026
- [32] Keren, R., Mezuman, U. 1981. Boron Adsorption by Clay Minerals Using a Phenomenological Equation, *Clay and Clays Minerals*, Cilt. 29, s. 198-204. DOI: 10.1346/CCMN.1981.0290305
- [33] Shi, J., Shu, S., Ai, Y., Jiang, Z., Li, Y., Xu, G. 2021. Effect of Elevated Temperature on Solid Waste Shear Strength and Landfill Slope Stability, *Waste Management & Research*, Cilt. 39(2), s. 351-359. DOI: 10.1177/0734242X20958065