



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.09.2024
Kabul Tarihi : 27.12.2024

Received Date : 16.09.2024
Accepted Date : 27.12.2024

ZEOLİT-BENTONİT KARIŞIMLARININ TERMAL İLETKENLİK DAVRANIŞI

THERMAL CONDUCTIVITY BEHAVIOR OF ZEOLITE-BENTONITE MIXTURES

Esra GÜNERİ^{1*} (ORCID: 0000-0002-1840-2118)

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Esra GÜNERİ, esra_cetinorgu@hotmail.com

ÖZET

Killi zeminlerin mühendislik davranışlarının diğer zemin tiplerine göre oldukça önem taşıdığı bilinmektedir. Kil miktarının artması ile birlikte kayma dayanımı, sıkışabilirlik ve daha birçok parametrenin genel olarak olumsuz etkilendiği yapılan çalışmalarla görülmüştür. Ancak bunun yanında kil yüzdesi arttıkça geçirimsizliğin azaldığı ve bu nedenle kilin, özellikle de "bentonitin" tampon malzeme olarak sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir. Katı atık veya nükleer atık depolama alanları gibi sıcaklığın yükseldiği ve atıkların sızdırmazlığının sağlanması amacıyla bir tampon malzemeye ihtiyaç duyulan bu ve benzeri alanlarda kullanılacak tampon malzemenin, oluşan yüksek sıcaklık varlığında göstereceği termal davranış büyük önem arz etmektedir. Hali hazırda tampon malzeme olarak sadece bentonit (yüksek sızdırmazlık özelliği sebebi ile) ya da kum-bentonit (kumun, bentonitin büzülme miktarını azaltıcı etkisinden yararlanması sebebi ile) kullanılmaktadır. Bu çalışmada, zeolit-bentonit karışımlarının kullanımının yüksek sıcaklık varlığında test edilerek ve kullanımına elverişli sonuçlar elde edilmesi halinde yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında, farklı bentonit oranları kullanılarak oluşturulan zeolit-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında (55°C) termal iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, bentonit oranının ve sıcaklığın karışımların termal özelliklerini nasıl değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Bentonit, sıcaklık, termal iletkenlik, zeolit

ABSTRACT

It is known that the engineering behavior of clayey soils is quite important compared to other soil types. It was observed in studies that shear strength, compressibility and many other parameters are generally negatively affected with the increase in the amount of clay. However, in addition, as the clay percentage increases, permeability decreases and therefore clay, especially "bentonite", is frequently used as a buffer material. In areas such as solid waste or nuclear waste storage areas where the temperature increases and a buffer material is needed to ensure the sealing of the waste, the thermal behavior of the buffer material to be used in the presence of high temperatures is of great importance. Currently, only bentonite (due to its high sealing properties) or sand-bentonite (due to the use of the effect of sand and bentonite in reducing the shrinkage amount) is used as a buffer material. In this study, it is aimed to test the use of zeolite-bentonite mixtures in the presence of temperature and to popularize them if suitable results are obtained. Within the scope of the study, thermal conductivity measurements of zeolite-bentonite mixtures formed using different bentonite ratios were carried out at room temperature and high temperature (55°C). The experimental results revealed how the bentonite ratio and temperature changed the thermal properties of the mixtures.

Keywords: Bentonite, temperature, thermal conductivity, zeolite

GİRİŞ

Enerji insan nüfusunun kaçınılmaz ihtiyaçlarından biridir ve her geçen gün nüfus artışına bağlı olarak enerji ihtiyacı artmaktadır. Var olan enerji kaynaklarına alternatif olarak yeni kaynakların ortaya çıkarılması ya da var olan sistemlerden enerji üretecek şekilde yararlanması araştırılan konular arasındadır. Gömülü güç kabloları, ısı

ToCite: GÜNERİ, E., (2025). ZEOLİT-BENTONİT KARIŞIMLARININ TERMAL İLETKENLİK DAVRANIŞI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 258-265.

kazıkları, katı atık depolama alanları, nükleer atık depolama alanları ve jeotermal tesisler gibi yapılar ve elemanlar enerji yapılarının başında gelmektedir. Örnek verilen bu enerji yapılarının her birinin çalışma prensibi kendine has olmakla beraber, zeminlerin sıcaklıkla olan ilişkisi bakidir. Zeminlerin mühendislik özelliklerini etkileyen birçok parametre mevcut olup, bunlardan en temel olanları boşluk oranı, zemin cinsi, doygunluk derecesi, su içeriği, sıcaklık olarak sayılmaktadır. Zeminlerin sıcaklık varlığında mühendislik parametrelerinin değişerek başlangıç aşamasında yani tasarım sırasında hesaplanan parametrelerden farklılaştığı yapılan çalışmalarda görülmüştür (Gray, 1936; Youssef vd., 1961; Paaswell, 1967). Sıcaklık arttıkça zeminlerin genellikle hidrolik iletkenlik değerinin viskozitenin azalmasına bağlı olarak arttığı, sıkışabilirlik özelliğinin artış gösterdiği, kayma dayanımının genellikle azalarak olumsuz etkilendiğine dair araştırmacılar tarafından birçok sonuç ortaya konmuştur (Fleureau, 1979; Robinet vd., 1996; Laloui, 2001). Daha önceki çalışmalarında, bor katkılı (kolemanit, üleksit ve tinkal) kum-bentonit karışımları, enerji geo-yapıları etrafındaki yüksek sıcaklık ve sıcaklık döngülerinin varlığında kullanımı için test edilmiştir (Alpaydın, 2019) ve ayrıca cam elyafı, perlit, pomza (Çirkin ve Yükselen Aksoy, 2022) katkı malzemeleri de kum-kaolin karışımlarında kullanılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan alternatif katkı malzemelerinin bir kısmı hidrolik iletkenlik davranışı açısından yeterli bulunurken, bir kısmı da sıkıştırılabilirlik, şişme ve kesme dayanımı davranışları gibi farklı mühendislik parametreleri açısından yeterli bulunmuştur.

Katı atık depolama alanları, kullanım ömürleri boyunca birçok atığı depolamaktadır. Bu atıkların miktarı zamanla değişmekle birlikte istifleme yoğunlukla gıda atığı, sentetik tekstiller, ahşap, kağıt ve plastik gibi biyomalzemelerden oluşmaktadır. Atıklar ayrıştırıldığında %50 CH₄, %50 CO₂ ve sıcaklık ortaya çıkmaktadır. Katı atıkların bakteriler tarafından ayrıştırılması için gereken optimum sıcaklık, bakteri türüne bağlı olarak 35-40 °C ile 50-60 °C arasında olmalıdır (Tchobanoglous vd., 1993). Çoklu katı atık depolama alanları için belirtilen genel sıcaklık değeri ise 55 °C civarındadır (Hanson vd., 2010).

Nükleer atık depolama alanlarında radyoaktif atıkların, zemin yüzeyinden ülkelerin belirledikleri konseptler dahilinde yaklaşık 500 metre aşağıda ana kayanın içerisine istiflendikleri bilinmektedir (Sellin ve Leupin, 2013). Radyoaktif atıkların bozunması sonucunda 100°C'yi bulan hatta geçebilen sıcaklık değerlerinin oluştuğu bilinmektedir (Sellin ve Leupin, 2013). Atıkların gömüldükten sonra etrafını saracak, oluşacak radyoaktivitenin yeraltı suyuna sızmasını engellemek ve yine oluşacak yüksek sıcaklık değerinin atıkların depolandığı bakır kaptan (canister) ana kayaya doğru uzaklaştıracak bir tampon malzeme kullanılmaktadır. Burada kullanılan bariyer sistemi tekli ya da çoklu olabilmektedir; tekli kullanılan sistemlerde tampon malzeme oluşan yüksek sıcaklığı nükleer atıktan ana kayaya doğru hızla uzaklaştırılmalıdır. Bunun için gerekli olan tampon malzemenin gereken termal özelliklere sahip olması önemlidir. Bunlara ilaveten, tampon malzemenin birincil özelliğinin sızdırmazlığının düşük olması ve kullanım ömrü boyunca sızdırmazlığını muhafaza edebilmesi çok önemlidir.

Tampon malzeme olarak halihazırda bentonit ya da kum-bentonit karışımları sıklıkla kullanılmaktadır. Bentonitin, su tutma kapasitesinin oldukça yüksek bir kil grubu ve bu alanlarda gereken seviyede şişme basıncını sağlayabilecek potansiyele sahip olması gibi nedenler kullanımını desteklemektedir (Smith vd., 1980; Cho vd., 1999). Kum-bentonit karışımlarında ise bentonitin bünyesindeki su miktarının azalmasına bağlı olarak gerçekleşebilecek bir büzülme durumunda kumun, davranışı dengeleyici davranarak çatlakları önleyebilmesi, ayrıca dayanımı artırıcı bir etkiye sahip olması kullanımında ön plana çıkan özellikler arasındadır (Dixon vd., 1985; Pakbaz ve Khayat, 2004; Akgün vd., 2015). Sıcaklık arttıkça, termal iletkenliğin artarak ısı iletimini artırması ve ısı kaynağında oluşan yüksek sıcaklığı aslında birincil tampon görevini üstlenen ana kayaya doğru iletmesi aday tampon malzemenin beklenen en temel özellikler arasındadır. Yoon ve diğerleri (2021), oda sıcaklığından 80-90 °C'ye kadar değişen sıcaklıklarda bentonitin termal iletkenliğini ölçerek, termal iletkenliğin sıcaklıkla arttığını ortaya koymuşlardır. Ancak, bir başka çalışma termal iletkenlik katsayısının 100-150 °C sıcaklık değerlerine ulaşıldığında, 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bentonit katmanları arasına adsorbe olan suyun uzaklaştırılmasına bağlı olarak ihmal edilebilir ölçüde azaldığını göstermiştir (Yoon vd., 2022).

Bu çalışma kapsamında zeolit-bentonit karışımlarının, tampon malzeme olarak kullanımının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda en temel parametrelerden biri olan termal iletkenlik katsayısının (λ), sıcaklık varlığında kullanıma uygun olup olmadığının incelenmesi amacı ile oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında (55 °C) Termal iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Deneyler kapsamında ilk olarak kompaksiyon deneyi gerçekleştirilmiş olup, buradan elde edilen parametrelerde termal iletkenlik ölçüm numuneleri hazırlanmıştır. Dört farklı bentonit oranı kullanılarak, bentonit değişiminin de ısıl iletkenliği nasıl etkilendiği incelenmiştir.

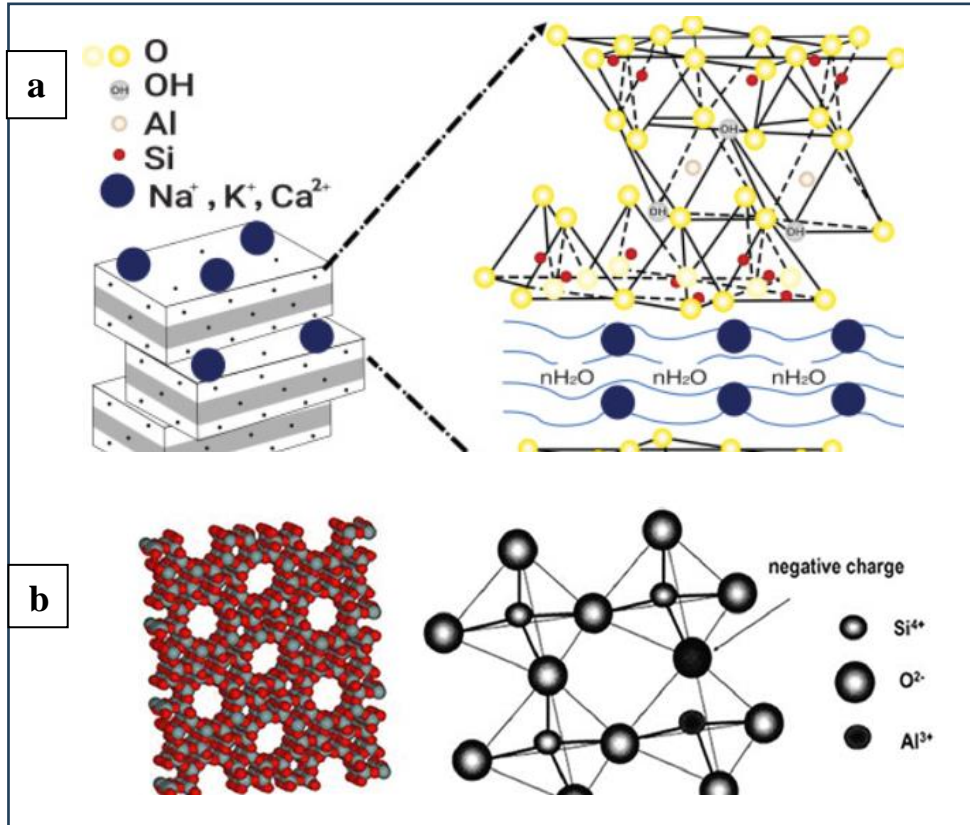
MALZEME VE YÖNTEM

Malzeme Karakterizasyonu

Bu çalışma kapsamında zeolit-bentonit karışımları kullanılmıştır. Zeolit ve bentonit yerel firmalardan temin edilmiştir (Şekil 1). Zeolit ve bentonit No. 40 elekten elenerek kullanılmıştır. %90 zeolit-%10 bentonit karışımlarının bentonit oranı %10 arttırılarak dört farklı karışım oluşturulmuştur. Karışımlara isim verilirken kısaltmalar kullanılmıştır. Örneğin; 80Z-20B, %80 zeolit ve %20 bentoniti temsil etmektedir. Malzemelere ait fiziko-kimyasal özellikler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde Kullanılan a. Zeolit b. Zeolit-Bentonit Karışımı



Şekil 2. a. Bentonitin ve b. Zeolitin Atomik Yapısının Şematik Gösterimi (Zendelska vd.; 2015, Pourhakkak vd., 2021)

Bentonit, genellikle silika katmanları arasına yerleştirilmiş bir gibsit tabakası ve montmorillonit içeren saf olmayan önemli bir kil, aynı zamanda alüminyum fillosilikat adsorbanıdır (Pourhakkak vd., 2021). Yer değiştirmeler özellikle oktahedral katman içinde ve az derecede silikat katmanı arasındadır (Şekil 2.a). Kilin yapısı esas olarak hidroksil-alüminosilikat yapısıyla ilişkilidir. Silika ve alümino oktahedral levhaların tetrahedral katmanları arasındaki ilişki, killerin kristal çerçevesini oluşturmaktadır. Yapılarında, Mg^{2+} veya Fe^{2+} kısmen Al^{3+} kanyonlarını değiştirir ve bu yer

değiştirmeyi yük dengesi sağlayan Na, K, Mg veya Ca gibi metallerin dahil edilmesi izlemektedir (Pourhakkak vd., 2021).

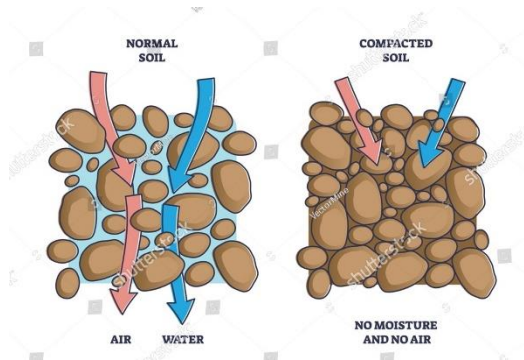
Tablo 1. Kullanılan Malzemelerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri

Özellik	Zeolit	Bentonit
Özgül ağırlık	2.50	2.40
Likit limit (%)	50.0	476.0
Plastik limit (%)	N.P.	70.1
pH	7.6	9.5

Gözenekli malzemelerin özellikleri hem malzemenin kimyasına hem de gözenek yapılarına bağlıdır (Şekil 2.b). Zeolitler gibi son derece spesifik fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerin, (yüksek gözenekliliğe ve benzersiz yapıya sahip) çoğu doğal mineral olarak bulunmaktadır ancak sentetik olarak da üretilmektedir. Kullanım amaçları ticari olabilirken, kimyalarını incelemek için bilim insanları tarafından da kullanılabilir. Mevcut durumda, tanımlanmış 191 benzersiz zeolit çeşidi bulunmaktadır (Baerlocher vd., 2007) ve zeolitlerin tanınan üyelerinden bazıları analsim, şabazit, gismondin, harmotom, heulandit, natrolit ailesi ve stilbit ailesidir (Zendelska vd., 2015).

Deneysel Yöntemler

Bu çalışma kapsamında, zeolit-bentonit karışımlarının kompaksiyon deneyleri ve termal iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Termal iletkenlik ölçümleri hem oda hem de 55°C altında yapılmıştır. 10B-90Z, 20B-80Z, 30B-70Z ve 40B-60Z olmak üzere dört farklı bentonit oranına sahip karışım oluşturulmuştur. Kompaksiyon deneyleri ASTM: D698'e göre yapılmıştır (ASTM: D698). Kompaksiyon zeminin mevcut boşluk oranını azaltmak ve böylece zeminin geçirimsizliğini azaltmak, zeminin taşıma gücünü artırmak ve zeminin sıkışabilirliğini minimuma indirmek gibi birçok mühendislik parametresini optimize etmektedir. Numuneler önce kuru halde tartılıp, bir kaba alındıktan sonra dört farklı su içeriğinde hazırlanarak 24 saat boyunca ağzı kapalı bir şekilde bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda suyun karışım içerisindeki homojen dağılımı sağlanmıştır. Deney sonunda optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_{dry,max}$) değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 3. Kompaksiyon Deneyi Öncesi ve Sonrası Şematik Zemin Görşelleri (Shutterstock, 2024)

Termal iletkenlik ölçümleri "Tempos" cihazı ile yapılmıştır. Ölçümleri gerçekleştirilecek numuneler Standard Proctor kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine göre hazırlanarak ölçüm kabında sıkıştırılmıştır. Termal iletkenlik ölçümü için kullanılan yaklaşık 7 cm uzunluğunda bir probdan yararlanılmıştır (Şekil 4). Özgül ısı gibi farklı termal parametreler için kullanılacak probsa ayrı olarak tasarlanmış ancak bu çalışma kapsamında kullanılmamıştır.

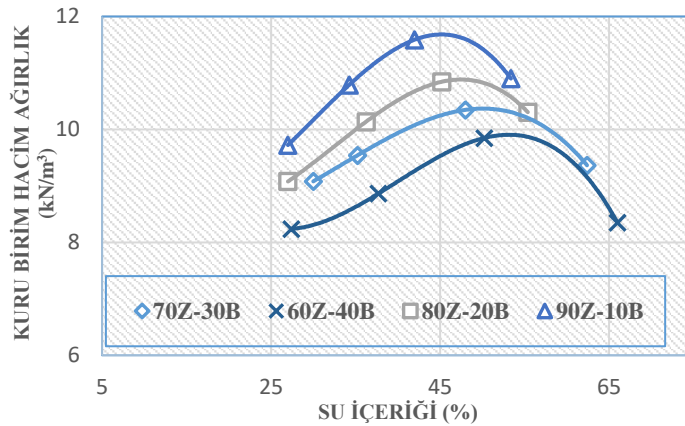
Ölçümler oda sıcaklığı ve 55 °C'de bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleşen deneylerde, numuneler hazırlanıp sıkıştırıldıktan sonra ölçümler her numunede üç kez gerçekleştirilmiş olup, ortalama değerler kullanılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış ve termal iletkenlik değerleri elde edilmek istenen numuneler, kalıpta sıkıştırıldıktan sonra etrafı hava almayacak şekilde sarılarak 55 °C sıcaklığa sahip etüvde yaklaşık 48 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler etüvden çıkartılarak, prob yardımıyla termal iletkenlik değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4. Termal İletkenlik Ölçüm Ekipmanları

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarının kompaksiyon deneyleri ve termal iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Termal iletkenlik deneyleri oda sıcaklığı ve 55 °C altında yürütülmüştür. Şekil 5’de karışımlara ait kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Deney sonuçları, beklendiği üzere bentonit miktarının artması ve zeolit miktarının azalmasına bağlı olarak maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığını ve optimum su içeriğinin arttığını göstermektedir. %10 bentonitli karışımın sırasıyla w_{opt} ve $V_{dry,max}$ değerleri %42 ve 11.5 kN/m³ iken bu değerler %40 bentonitli karışımında %53 su içeriği değerine yükselirken, kuru birim hacim ağırlık değeri azalarak 9.9 kN/m³ değerine düşmüştür. Bentonitin özgül ağırlığının zeolitinkine göre daha düşük olması, karışımdaki bentonit miktarının artması sonucu birim hacim ağırlık değerinin azalışının nedenini oluştururken, bentonitin yüksek su tutma kapasitesine sahip olması ise karışımların artan su içeriği değerlerinin dayandığı esası açıklamaktadır.



Şekil 5. Karışımlara ait Kompaksiyon Eğrileri

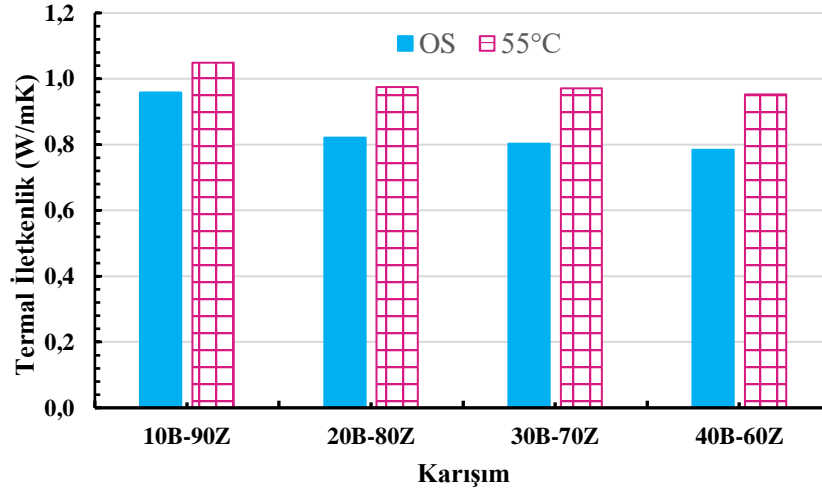
Bentonitin termal iletkenliği sıcaklık, su içeriği ve kuru yoğunluktan önemli ölçüde etkilenmektedir (DeVries, 1963; Nikolaev vd., 2013). Sıcaklığın, boşluk yapısına olan etkisi ve boşluk yapısının boyut dağılımına olan etkisi sonucunda termal iletkenlik yani ısı transferi etkilenmektedir (Ye vd., 2010; Xu vd., 2022). Daha önce yüksek sıcaklık varlığında bentonitle yapılan çalışmalar termal iletkenliğin arttığı ancak 100-150°C gibi çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığında artışta önemli ölçüde azalış olduğu gözlenmiştir (Yoon vd., 2022, Ye vd., 2010, Xu vd., 2021). Tablo 2’de karışımların farklı sıcaklıklar altında termal iletkenlik değerleri verilmiştir. Deney sonuçları oda sıcaklığı altında bentonit miktarı arttıkça termal iletkenliğin azaldığını göstermiştir. Oda sıcaklığından yüksek sıcaklığa geçildiğinde ise literatüre paralellik gösteren sonuçlar elde edilmiş ve termal iletkenliğin karışım bazında arttığı görülmüştür. Daha önce bentonit kullanılarak, üç farklı sıcaklık altında gerçekleştirilen bir çalışmada, bentonitin termal iletkenlik değerinin 25 °C, 60 °C ve 80 °C altında sırasıyla 0.658 W/mK, 0.808 W/mK ve 1.077 W/mK olarak arttığı gözlenmiştir. Aynı çalışmada, ferrokrom, çelik çürüğü gibi katkıları varlığında da bentonitin artan sıcaklıkla birlikte termal iletkenlik katsayısının (λ) artış gösterdiği belirlenmiştir (Aşçı, 2023).

Bentonit içerikli tampon malzemelerin yüksek sıcaklık varlığında termal, hidrolik ve mekanik özelliklerinin nasıl etkilendiğini değerlendirilmelidir. Bu amaçla, Kore ve diğer ülkelerde çok sayıda çalışma yürütülmüştür; ancak çoğu,

100 °C veya daha düşük sıcaklıklarda incelemiştir. Araştırmacılar, sabit doygunluk koşullarıyla hazırlanan sistemlerde termal iletkenliğin sıcaklıkla arttığını ortaya koymuşlardır (Yoon vd., 2022). Bentonitin, termal iletkenliğinin katı, su ve hava fazlarındaki maddelerin termal iletkenliklerinin bir kombinasyonu olduğu varsayılmaktadır. Bentonit, sıkıştırılmış hale geçtiğinde daneler arası temas artacağından oda sıcaklığı altında termal iletkenlik artmaktadır. (Şekil 6).

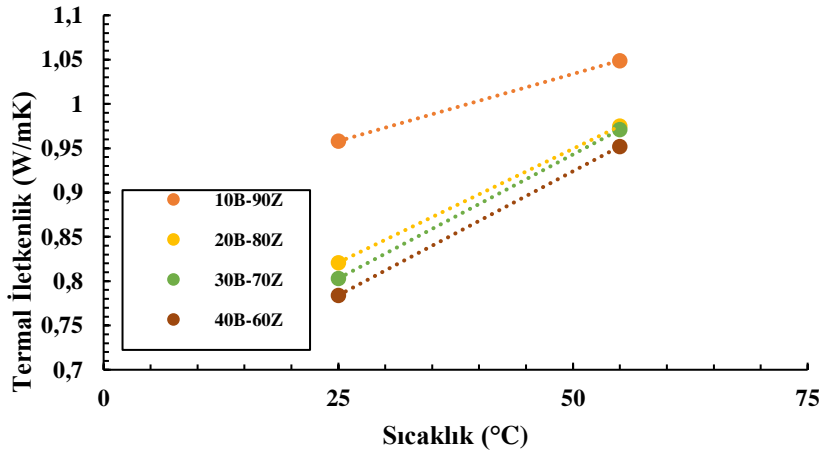
Tablo 2. Farklı Sıcaklıklar Altında Karışımlara ait “ λ ” Katsayıları

Karışım	Oda Sıcaklığı (22~25° C)		55° C
	Termal İletkenlik (λ , W/mK)		Termal İletkenlik (λ , W/mK)
10B-90Z	0.958		1.049
20B-80Z	0.821		0.975
30B-70Z	0.803		0.971
40B-60Z	0.784		0.952



Şekil 6. Karışımların Termal İletkenlik Değerlerinin Karşılaştırılması

Deney sonuçları, bentonit yüzdesi arttıkça termal iletkenliğin azaldığını göstermiştir (Şekil 7). Oda sıcaklığından yüksek sıcaklığa geçirdiğinde, bu trend devamlılık göstermiş ve bentonit miktarının artması ile birlikte termal iletkenliğin azaldığı görülmüştür.



Şekil 7. Sıcaklık-Termal İletkenlik İlişkisi

Bu çalışma kapsamında, zeolit-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Deney sonuçları, sıcaklık artışı ile birlikte karışımların termal iletkenliğinin arttığını göstermiştir. Termal iletkenlik ölçümlerinde temas yüzeyi ve su içeriği büyük önem taşımaktadır. Karışımların su içeriği düşüken, termal iletkenlik davranışını danelerin temas yüzeyleri kontrol etmektedir. Su miktarının artması ile birlikte kontrol su yüzdesine bağlı olarak değişmektedir (Tien vd., 2005). Belirli bir seviyeden sonra ise bu etki

ihmal edilebilir düzeye gelmektedir. Buna ek olarak, artan sıcaklıkla birlikte zeminlerin sıkışma miktarının içerisindeki suyun atılması ile birlikte artmasından dolayı (Laloui, 2001), yine daneler birbiri ile yakınlaşmakta ve termal iletkenlik artmaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda, deneye tabi tutulan karışımların, gerekli diğer mühendislik parametrelerini de sağlaması koşulu ile yüksek sıcaklığın ısı kaynağından uzaklaştırılması hedeflenen alanlarda kullanımının uygun olacağı görülmüştür.

Teşekkür:

Bu çalışma kapsamında yürütülen deneylerde, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarından yararlanılmıştır. Yazar, bu destek için minnettardır. Bu çalışmada E.G., fikir sahibi olup deneyleri gerçekleştirmiş, sonuçları yorumlamış ve makaleyi yazmıştır.

KAYNAKLAR

- Akgün, H., Ada, M. & Koçkar, M.K. (2015). Performance assessment of a bentonite–sand mixture for nuclear waste isolation at the potential akkuyu nuclear waste disposal site, southern Turkey, *Environ. Earth Sci.* 73(10) 6101-6116.).
- Alpaydın, Ş. G. (2019). An investigation of effects of boron additives on the permeability and shear strength behavior of sand-bentonite mixtures under high temperatures. Master thesis, Dokuz Eylül University, Supervisor: Yukselen Aksoy, Y., 161 p., 2019.
- 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, 1–13.
- Aşçı, C. (2023). Developing thermally conductive and resistive soil mixtures for energy geo-structures. Master thesis, Dokuz Eylül University, Supervisor: Yukselen Aksoy, Y., 208 p., 2023.
- Baerlocher C., Meier W. H., Olson D. H., Atlas of Zeolite Framework Types, 6th Edition, Elsevier, 2007.
- Cho, W. J., Lee, J. O., & Kang, C. H. (1999). Influence of salinity on the hydraulic conductivity of compacted bentonite. *MRS Proceedings*, 713.
- Çirkin, İ., Yukselen Aksoy, Y. (2022). Pomza, Perlit ve Cam Elyaf Katkılarının Yüksek Sıcaklık Altında Kum-Kaolin Karışımlarının Kayma Dayanımı Davranışına Etkisi. *DEUFMD*, 24(71), 657-663.
- DeVries D.A. (1963). Thermal Properties of Soils. In W.R. van Wijk (ed.) *Physics of Plant Environment*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Dixon, D.A., Gray, M.N., & Thomas, A.W. (1985). A study of the compaction properties of potential clay–sand mixtures for use in nuclear fuel waste. *Engineering Geology*, 21: 247–255.
- Fleureau, J. M. (1979). Influence d'un champ thermique ou électrique sur les phénomènes d'interaction solide-liquide dans les milieux poreux, Doctoral thesis. Ecole Centrale de Paris.
- Gray, H. (1936). Progress Report on Research on the Consolidation of Fine-Grained Soils. *Proc. Internat. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Harvard University, Vol. 2, p. 138-141.
- Hanson, J.L., Yeşiller, N., & Oettle, N.K. (2010). Spatial and temporal Temperature distributions in municipal solid waste landfills. *Journal of Environmental Engineering*, 136(8), 804-814.
- Laloui, L. (2001). Thermo-mechanical behavior of soils. *Revue Française de Genie Civil.*, 5 (6), 809-843.
- Nikolaev, I.V.; Leong, W.H.; Rosen, M.A. (2013). Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range. *Int. J. Thermophys.* 34, 1110–1129.
- Paaswell, R. (1967). Temperature effects on clay soil consolidation. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93, 9-22.
- Pakbaz, M.C. and Khayat, N. (2004). The effect of sand on strength of mixtures of bentonite sand. *Engineering Geological Methods: Modelling of soil and rock behaviour. Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*, 104: 316 - 320.
- Pourhakkak, Poursan & Taghizadeh, Ali & Taghizadeh, Mohsen & Ghaedi, Mehrorang & Haghdoost, Sepahdar. (2021). Fundamentals of adsorption technology. 10.1016/B978-0-12-818805-7.00001-1.

- Robinet, J. C., Rahbaoui, A., Plas, F. & Lebon, P. (1996). A constitutive thermomechanical model for saturated clays. *Eng Geol.* [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00049-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00049-6)
- Sellin, P. & Leupin, O. X. (2013). The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management - A review. *Clays and Clay Minerals*, 61(6), 477–498.
- Shutterstock, 2024. <https://www.shutterstock.com/tr/search/soil-compaction/> Accessed 16.09.2024.
- Smith, M. J. et al. (1980). Engineered barrier development for a nuclear waste repository in basalt: an integration of current knowledge. In: RHO-BWI-ST-7, Rockwell Hanford Operations, WA.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1993). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*, McGraw-Hill, New York.
- Tien, Y. M., Chu, C. A., & Chuang, W. S. (2005). The prediction model of thermal conductivity of sand-bentonite based buffer material. *France Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, 657.
- Yoon, S., Kim, M.J., Park, S., Kim, G.Y. (2021). Thermal conductivity prediction model for compacted bentonites considering temperature variations, *Nucl. Eng. Technol.* 53, 3359–3366.
- Yoon, S., Lee, G., Park, T., Lee, C., Cho, D. (2022). Thermal conductivity evaluation for bentonite buffer materials under elevated temperature conditions, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 30, 101792, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101792>.
- Xu, Y.S., Zeng, Z.T., Lv, H.B. (2019). Temperature dependence of apparent thermal conductivity of compacted bentonites as buffer material for high-level radioactive waste repository. *Appl. Clay Sci.* 174, 10–14.
- Xu, Y., Zhou, X., Sun, D., Zeng, Z.T. (2022). Thermal properties of GMZ bentonite pellet mixtures subjected to different temperatures for high-level radioactive waste repository. *Acta Geotech.*, 17, 981–992.
- Ye, W.M., Chen, Y.G., Chen, B., Wang, Q., Wang, J. (2010). Advances on the knowledge of the buffer/backfill properties of heavily-compacted GMZ bentonite. *Eng. Geol.* 2010, 116, 12–20.
- Youssef, M.S., Sabry, A. & El Ramli A.H. (1961). Temperature changes and their effects on some physical properties of soils. *Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 2* : 419-421, Paris.
- Zendelska A., Golomeova M., Blažev K., Boev B., Krstev B., Golomeov B., A, Krstev. (2015). Kinetic studies of manganese removal from aqueous solution by adsorption on natural 46 Microporous and Mesoporous Materials zeolite. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 34(1), 1857–5625.