

BENTONİT VE BENTONİT-KUM KARIŞIMLARINDA KARBON FİBER KATKISININ BÜZÜLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

EFFECT OF CARBON FIBER ADDITIVE ON THE SHRINKAGE BEHAVIOR OF BENTONITE AND BENTONITE-SAND MIXTURES

Emir OKUCU¹, Yeliz YÜKSELEN-AKSOY², Okan ÖNAL²

ÖZET

Bentonit, su ile etkileşime girdiğinde yüksek şişme kapasitesine sahiptir. Ancak, su içeriği azaldığında veya belirli çevresel koşullarda bentonit büzülme davranışı gösterir. Nükleer atık depolama sahalarında, radyoaktif atıklardan kaynaklanan ve enerji kazıklarının etrafında oluşan yüksek sıcaklıkların, bentonit ve bentonit-kum karışımlarının sıcaklığını artırdığı bilinmektedir. Bu durum, malzemenin su içeriğini azaltarak büzülmesine neden olmaktadır. Oluşan büzülme nükleer atık depolama sahalarında sızdırma problemlerine, enerji kazıklarında taşıma kapasitesi kaybına yol açabilir. Bu büzülmenin önüne geçmek için karbon fiber katkısı kullanılabilir. Karbon fiber, iletken değildir ve asitler gibi şındırıcı malzemelere karşı çok yüksek dirençlidir. En önemli özelliği ise yüksek termal iletkenlik değeri ve yüksek çekme dayanımına sahip olmasıdır. Bu üstün özellikleri nedeniyle hem nükleer atık sahalarında hem de ısı kazıkları etrafında kullanılabilirler. Bu çalışma kapsamında bentonit ve bentonit-kum karışımları ve b karışımların %1 ve %1.5 oranlarında karbon fiber katkıları örnekleri hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda karbon fiber katkısının her iki karışımın katkısız haline kıyasla büzülme davranışını olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Bentonit, Bentonit-kum, Karbon Fiber, Büzülme

ABSTRACT

Bentonite has the capacity to swell when interacting with water. However, when the water content decreases or under certain environmental conditions, bentonite can exhibit shrinkage behaviour. For example, in nuclear waste repository sites, the heat from radioactive waste and the heat generated around energy piles are known to increase the temperature of bentonite and bentonite-sand mixtures. This incident causes shrinkage to

¹ Yüksek lisans öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, okucu.emir@ogr.deu.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Profesör, Dokuz Eylül Üniversitesi, yeliz.yukselen@deu.edu.tr

² Profesör, Dokuz Eylül Üniversitesi, okan.onal@deu.edu.tr

reducing the water content of the material. As a result of shrinkage, it may cause leakage problems in nuclear waste repository sites and loss of bearing capacity in energy piles. In order to prevent this shrinkage problem, the use of carbon fiber additive was considered. Carbon fiber is a fibrous filament. It is not water soluble and has a remarkably high resistance to corrosive materials such as acids. Its most important properties are its high thermal conductivity and high tensile strength. For that reason, carbon fibers can be used around nuclear waste repositories and heat piles. In the present study, bentonite, bentonite-sand mixtures and 1% and 1.5% carbon fiber added samples of these mixtures were prepared. As a result of the study, it was observed that carbon fiber additive positively affected the shrinkage behaviour of both mixtures compared to the additive-free state.

Keywords: Bentonite, Bentonite-sand, Carbon Fiber, Shrinkage

1. GİRİŞ

Son yıllarda bentonit ve bentonit-kum karışımları üstün özellikleri nedeniyle nükleer atıkların depolanmasında sızdırmazlık bariyeri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu özellikler düşük hidrolik iletkenlik ve yüksek şişme basıncıdır. Düşük hidrolik iletkenlik sayesinde nükleer atıklardan yayılan nükleotidlerin taşınarak yer altı suyuna karışması engellenecektir. Yüksek şişme basıncı sayesinde ise bakır nükleer atık kutusu etrafında oluşabilecek tüm boşluklar kapanarak sızdırmaz bir bariyer sağlanmış olacaktır. Nükleer atık kutusunu çevreleyen tampon malzeme radyonüklidlerin sürekli bozulması sebebiyle sıcaklık değişimine maruz kalmaktadır. Bu sıcaklıklar nükleer atık ilk yerleştirildiğinde 150 °C -200 °C aralığındadır (Villar vd., 2016). Sonraki 10 yılda ise sıcaklığın yaklaşık 85 °C'ye düştüğü gözlemlenmiştir (Hedin vd, 2019). Termal geçmiş, sıkıştırılmış bentonitin fiziko-kimyasal ve hidro-mekanik özelliklerinde değişiklik meydana getirerek sızdırmazlık performansını etkiler. Bu yüzden tampon malzeme üzerindeki ısının daha hızlı bertaraf edilmesi için termal iletkenliği arttıracak katkılar tercih edilebilir. Bentonit-kum karışımlarının kullanılma nedenlerinden biri de kumun termal iletkenliği arttırmasıdır. Yüksek sıcaklığın sebep olduğu değişikliklerden birisi de büzülme davranışdır. Nükleer atıkların etrafındaki tampon malzemeler ısınır ve ısınma sonucu tampon malzemenin atık kutusuna temas eden bölgesinde kuruma ve dolayısıyla büzülme meydana gelir. Tampon malzeme büzülürken çatlaklar oluşur ve sızdırmazlık bozulur. Radyonüklidlerin yer altı suyuna karışma ihtimali ortaya çıkar.

Bentonit ve bentonit-kum karışımlarının bir diğer kullanım alanı ise enerji kazıklarının etrafında termal iletkenliği arttırmak için kullanılmalarıdır. Enerji kazıkları taşıyıcı kazıklarının içinden geçirilen boru sistemi sayesinde yer altında yıl boyu sabit bulunan ısıyı genellikle su vasıtasıyla yer altından alır ve ısı pompası sisteminde mevsime göre ısıtma veya soğutma sağlar. Zemin içerisindeki sıcaklık dünyanın birçok bölgesinde 6-10 m derinlikten sonra 10~24 °C olarak sabitlenmektedir. Yer sıcaklığının sığ derinliklerde sabit olması sayesinde, genel anlamda bilinen jeotermal enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaksızın, dünyanın her yerinde ve her mevsimde, zemin tabakalarından yenilenebilir bir ısıtma ve soğutma kaynağı olarak faydalanmak mümkün olmaktadır. Enerji kazıkları yaz aylarında bina içindeki fazla sıcaklığı yer altına taşıırken, kışın ise yer altındaki sıcaklığı binalara taşır. Bu taşınma sayesinde ısınma ve soğumada enerji verimliliği arttırılmaktadır. Geleneksel ısınma ve soğuma yöntemlerine göre daha az enerji tüketimi sağlanır ve fosil yakıtların tüketimi azaltılır. Enerji kazıkları ve ısı pompaları sayesinde sağlanan bu verimlilik artışının daha da iyileştirilmesi adına enerji kazıklarının etrafına dolgu malzemesi yerleştirilmesi fikri

ortaya çıkmıştır. Önceki çalışmalar kazık etrafındaki dolgu malzemelerinin ısı kazıklarının termal performansı üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Gu ve O'neal, 1998; Chebaba ve Moore, 2010). Bu nedenle, termal olarak geliştirilmiş dolgu malzemeleri, son yıllarda araştırmacılar ve tasarımcılar tarafından büyük ilgi görmeye başlamıştır. Bununla birlikte, dolgu malzemelerinin seçimi, termal, mekanik ve ekonomik hususların karmaşık bir fonksiyonudur (Omer, 2012). Örnek olarak ısı alışverişinin hızlı olması dolayısıyla dolgu malzemesinin termal iletkenliğinin yüksek olması istenebilir. Isı alışverişinin hızlı olması termal döngülere yol açabilir. Döngüsel ısıtma ve soğutmanın enerji kazığını çevreleyen zemini kademeli olarak kurutacağını göstermektedir (Behbehani ve McCartney, 2020). Sıcaklığın doymuş kil-beton arayüzü üzerindeki etkisi 50°C'lik yüksek bir sıcaklıkta incelendiğinde kesme sırasında hacimsel büzülme gözlenmiştir (Di Donna, 2014). Gözlemlenen hacimsel büzülme davranışı zemin-kazık ara yüzündeki sürtünmeyi azaltarak kazıklarda taşıma kapasitesi kaybına veya farklı oturmalara yol açabileceği bilinmektedir (Kong vd. 2023).

Bu çalışma kapsamında bentonit ve bentonit-kum karışımlarının hacimsel büzülme oranları incelenmiştir. Bentonit ve bentonit-kum karışımlarının büzülme davranışına karbon fiber katkısının etkisi araştırılmıştır. Önceki çalışmalar kum katkısının bentonit tampon malzemesinin büzülmesini azaltabileceğini göstermiştir (Sridharan ve Prakash 2000; Tay vd. 2001; Wang vd. 2024). Bentonit-kum karışımlarında şişmeyi bentonit kısmı belirlerken, büzülme kum kısmı belirler. Bunun sebebi ise bentonit danelerinin su tutma kapasitesinin yüksek olması, kum danelerinin su tutma kapasitesinin ise oldukça düşük olmasıdır. Kum danelerinin su tutma kapasitesinin düşük olması sebebiyle su, daneler arasına giremez ve daneler birbirleriyle temas halindedir. Bentonit-kum karışımları sıkıştırılmış bentonitten daha düşük hacimsel büzülme şekil değiştirmesine sahip olacaktır.

Karbon fiber, inert bir gaz ortamında ısıtılarak elde edilen lifli bir filamenttir. Karbon fiber su içinde çözünmez, kokusuzdur ve asitler gibi aşındırıcı malzemelere karşı çok yüksek direnç gösterir. Karbon fiberin su tutma kapasitesi yoktur ve oda sıcaklığında su içeriği %0'dır. Bu sayede büzülme arttırıcı bir etki göstermesi beklenmez. Ayrıca, yüksek ısı direncine sahiptir ve termal iletkenliği oldukça yüksektir, bu da enerji altyapıları için önemli bir özelliktir. Hafif yapısının yanı sıra, karbon fiberin en önemli avantajlarından biri yüksek mukavemet ve yüksek termal iletkenliğidir. Tüm bu özellikleri sayesinde karbon fiberin büzülme davranışı üzerinde etkili olması beklenmektedir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Materyaller

Bu çalışmada kullanılan bentonit ticari bir Na-Aktive bentonittir. Bentonitin fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Kumun özgül ağırlığı 2.63’tür. Bu çalışmada kullanılan karbon fiberler 6 mm uzunluğunda kırılmıştır ve özgül ağırlığı 1.8 ‘dir.

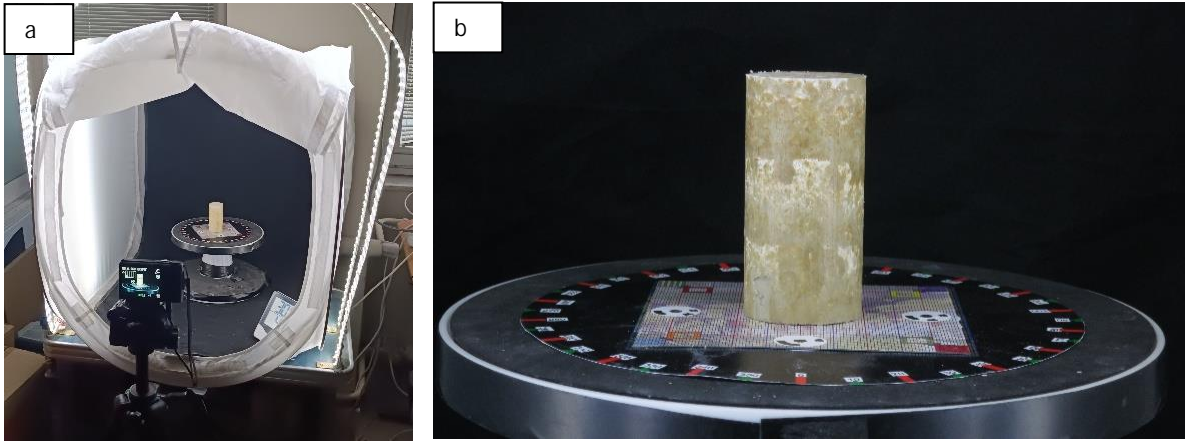
Tablo 1. Bentonitin fiziksel özellikleri

Na-Aktive Bentonit	
Özgül Ağırlık	2.60
Geçen Elek	-No 200
Doğal Su İçeriği (%)	8
Likit Limit (%)	270
Plastik Limit (%)	63

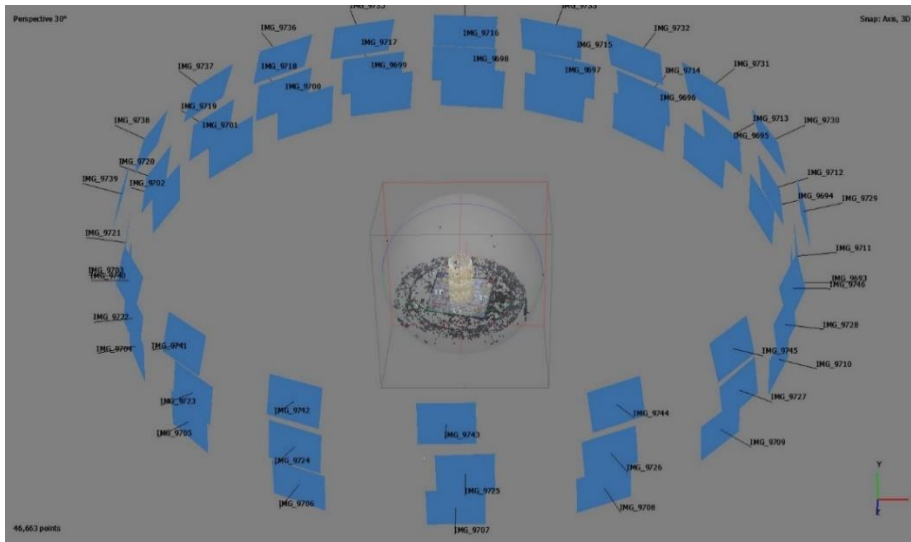
Zemin numuneleri hazırlanırken belirli bir kuru birim hacim ağırlıkta ve iki farklı doygunluk derecesinde (%50 ve %90) hazırlanmıştır. Yapılan denemeler sonucu Harvard mini kompaksiyon kalıbının ölçüsünün yeterli olduğu daha büyük kalıplarda çok fazla bentonit zaiyatı olduğuna karar verilmiştir. Harvard mini kompaksiyon kalıbının yarıçapı 3.8 cm ve yüksekliği 7.6 cm’dir. Bentonit numuneleri 9.6 kN/m³ kuru birim hacim ağırlıkta, bentonit-kum karışımları ise 16.0 kN/m³ kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanmıştır. Kuru birim hacim ağırlıklar daha önceki çalışmalardan elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleridir. Bentonit-kum numuneleri hazırlanırken kuru ağırlıkça %30 Bentonit ve 70% kum olarak hazırlanmıştır (30B70S). Hazırlanan karışımlar sıkıştırılmadan önce eklenen suyun homojen dağılması için 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra 3 tabaka halinde sıkıştırılan numuneler kriko yardımıyla kalıptan çıkarılıp ve fotoğraflanmaya hazır hale getirilmiştir.

2.2. Metot

Fotogrametri, fotoğraflar aracılığıyla bir nesne veya çevrenin ölçümlerini ve verilerini toplama ve analiz etme tekniğidir. Başka bir deyişle, fotogrametri, bir nesnenin veya ortamın geometrik özelliklerinin, yani konum, şekil ve boyutlarının, fotoğraflar kullanılarak elde edilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem sayesinde, fotoğraflanmış nesne, ortam veya bölgenin üç boyutlu (3D) modelleri oluşturulabilir. Bu veriler, nesnenin veya çevrenin detaylı ve doğru bir şekilde rekonstrüksiyonunu mümkün kılar (Surmen, 2023). Bu çalışma kapsamında bir fotogrametri tekniği olan Structure from Motion (SfM) tekniği kullanılarak zemin numunelerinin hacmi bulunmuştur. SfM tekniği karmaşık metrik kamera sistemleri gerektirmediğinden, bu çalışmanın görüntüleme adımları için standart düşük maliyetli bir kamera olan Canon PowerShot S100 dijital kamerası kullanılmıştır. Zemin numuneleri döner bir platform üzerinde 18 farklı açıdan ve 3 farklı yükseklik seviyesinden fotoğraflanmıştır. Bir numune için toplam 54 adet görüntü alınmıştır. Görüntü alma işlemi, ışığı yayarak eşit aydınlatma sağlamak amacıyla beyaz renkli bir fotoğraf çadırında gerçekleştirilmiştir ve siyah arka plan sayesinde numuneler için homojen bir alan sağlanmıştır. Dönme tablasının merkezine, numunelerin yerleştirileceği ölçekli bir taban yerleştirilmiştir. Bu ölçek, dönme açılarını tanımlayan işaretler ve belirli mesafelerde dört referans noktası içerir. Söz konusu ölçek, daha önce Porter vd. (2016) tarafından arkeolojik eserleri modellemek için hazırlanmıştır. Görüntüleme düzeni ve bu düzenden alınan gerçek bir görüntü Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. a) Görüntü Alma Düzeneği, b) Alınan Görüntü

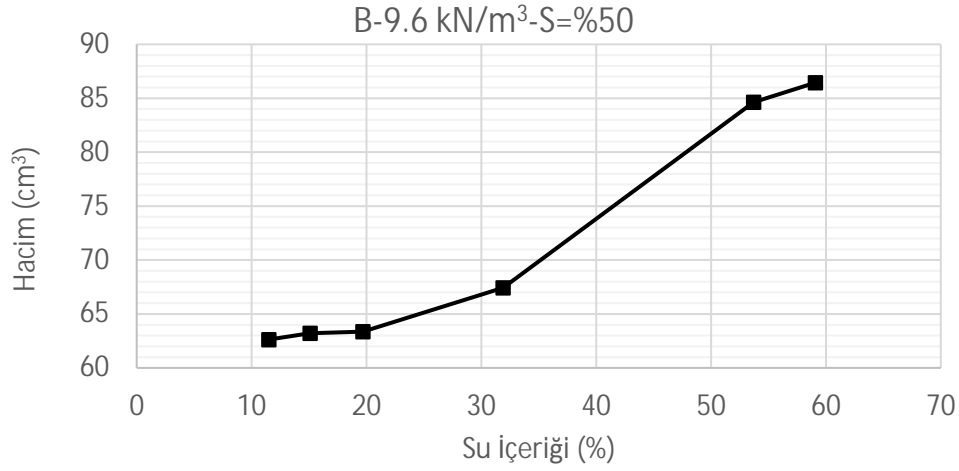


Şekil 2. Kamera Pozisyonları ve 3D Model

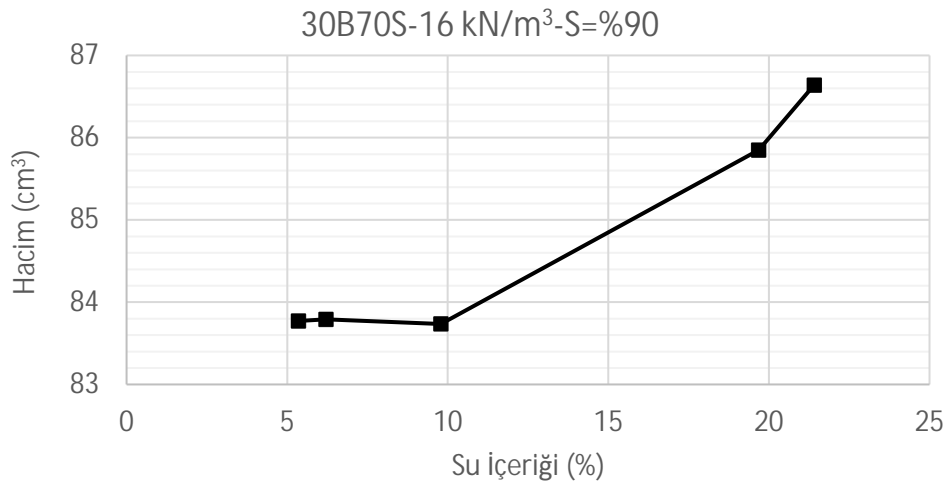
SfM, bir nesnenin çoklu açılarından alınan görüntülerini kullanarak üç boyutlu geometrisini oluşturmayı amaçlayan bir tekniktir. Bu fotogrametrik teknik, yakından çekilen fotoğrafları veya havadan çekilen fotoğrafları kullanabilir. Bu çalışmada, zemin numunelerinin 3D modelinin oluşturulması için Agisoft firmasının MetaShape adlı ticari yazılımı kullanılmıştır. Bir numune için 18 farklı açıdan ve 3 farklı seviyeden toplam 54 adet görüntü alınmıştır. Alınan görüntülerle 3D model oluşturulmuştur. Şekil 2'de kamera pozisyonları ve oluşturulan model verilmiştir. Oluşturulan 3D model düğüm noktalarından oluşmaktadır. Bu noktalar birleştirilerek bir katı modeli oluşturulmaktadır. Algoritmalar, bu fotoğraflardaki örtüşen desenleri tespit eder ve bu sayede fotoğraflanan nesnenin 3D rekonstrüksiyonunu oluşturur. Oluşturulan modelde en az üç noktanın bilinen koordinatları veya bileşimde bilinen boyutlara sahip bir nesne kullanılarak bir ölçekleme yapılmadıkça, gerçek ölçek ve koordinatları yansıtamaz. Bu sebeple numunenin altında bulunan tabana 4 adet yazılım tarafından otomatik algılanan gösterge basılmıştır. Bu göstergeler sayesinde 3D model ölçeklendirilebilir ve gerçek hacme ulaşılabilir. Numunelerin hacmi Agisoft MetaShape yazılımının içindeki yerleşik hacim fonksiyonu kullanılarak bulunmuştur. (Önal ve Gharehaghajlou, 2021).

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada bentonit ve bentonit-kum karışımlarında karbon fiber katkısının büzülme davranışına etkisi araştırılmıştır. Bunun için numuneler farklı doygunluk derecelerinde hazırlanmış, karbon fiber katkısının yanında su içeriğinin de büzülme davranışına etkisi de belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda hacimsel büzülme oranının başlangıç su içeriğine bağlı olduğu ve belirli bir su içeriğinden sonra hacimsel değişim gözlenmeyip numunenin katı hale geçtiği gözlemlenmiştir. Bentonit numunelerinde %20, Bentonit-kum numunelerinde ise %10 su içeriğinden düşük değerlerde hacimsel büzülme gerçekleşmemektedir. Bentonit-kum numuneleri bentonit numunelere göre daha az hacimsel büzülme göstermiştir. Bunun sebebi kum danelerinin birbirine temas ederek büzülmeyi durdurmasıdır. Bentonit ve bentonit-kum numunelerinin %90 doygunluk derecesinde hazırlanmış numunelerinin su içeriğine bağlı hacimsel büzülme grafikleri Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir.

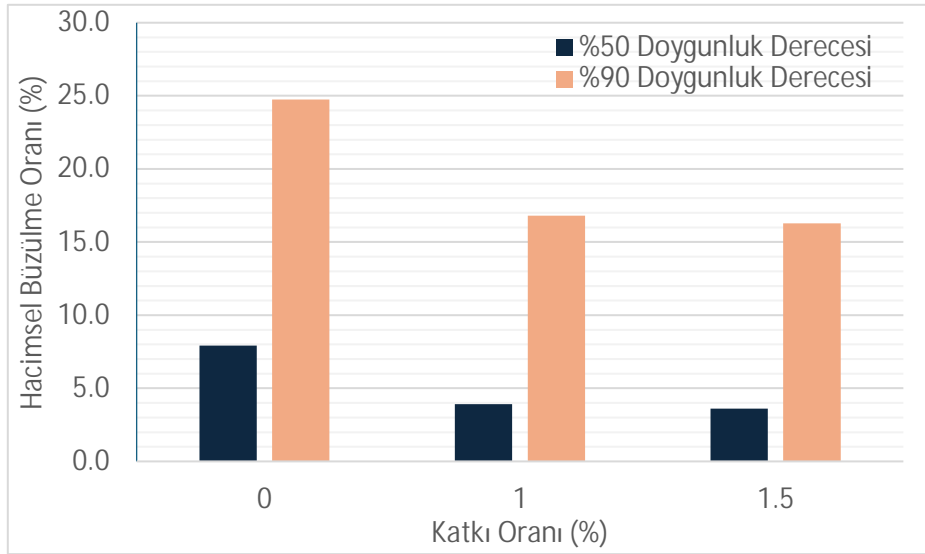


Şekil 3. Bentonit numunesinin su içeriğine bağlı hacimsel değişimi

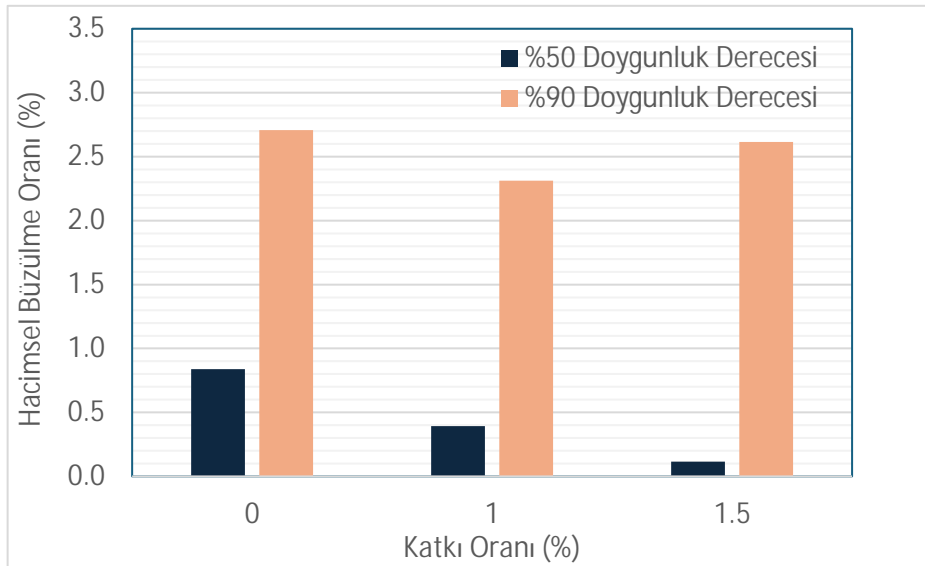


Şekil 4. Bentonit-kum numunesinin su içeriğine bağlı hacimsel değişimi

Karbon fiber katkısının hacimsel büzülme oranını azalttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5 ve 6). Bunun sebebinin karbon fiber filamentlerinin bentonit ve bentonit-kum karışımları ile kenetlenmesi olduğu düşünülmektedir. Bentonit numunelerinde %1 karbon fiber katkısı toplam hacimsel büzülme miktarını yaklaşık %50 oranında azaltırken, bu değer bentonit-kum numunelerinde %53 oranlarında gerçekleşmiştir ($S=\%50$ için). Doęunluk derecesi %50 değerinden %90 değerine yükseltildiğinde ise büzülme değerlerindeki azalış bentonit numuneleri için % 32, bentonit-kum karışımları için %15 değerlerine gerilemiştir. Büzülme sırasında oluşan rezidüel gerilmeler karbon fiber tarafından karşılanmaktadır. Ayrıca alışma kapsamında %1 karbon fiber katkısı ve %1.5 karbon fiber katkısının etkileri de araştırılmıştır. %1 ve %1.5 katkı arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür. Aralarında oluşan farkların %0.5'ten az olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Bentonit numunesinin farklı karbon fiber katkısı oranlarında hacimsel büzülme oranları



Şekil 6. Bentonit-kum numunesinin farklı karbon fiber katkısı oranlarında hacimsel büzülme oranları

4. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada %1 ve %1.5 karbon fiber katkısının farklı doygunluk derecelerinde hazırlanmış bentonit ve bentonit-kum numunelerinin büzülme davranışına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları özetlenirse;

- Su içeriği büzülme davranışında ana belirleyici etmendir. Numunenin mevcut su içeriği azaldıkça hacimsel büzülme artar fakat su içeriğinin belirli bir noktadan sonra azalması numune hacminde belirgin bir değişiklik meydana getirmez.
- Karbon fiber katkısı büzülmeyi gözle görünür biçimde azaltmıştır.
- %1 ve %1.5 karbon fiber katkıları arasında anlamlı bir fark oluşmamıştır. Saha uygulamalarında %1 karbon fiber katkısı kullanılabilir.
- Bentonit-kum numunelerinde bentonit numunelere göre daha az hacimsel büzülme gerçekleşmiştir.
- Karbon fiber malzemesi yüksek termal iletkenliği, tek eksenli basınç dayanımını arttırması, şişme basıncını ve hacimsel büzülmeyi azaltması gibi özelliklerinden dolayı nükleer atık depolama sahalarında ve enerji yapılarında kullanım için tercih edilebilir. Farklı tampon (buffer) malzemeleri için karbon fiber etkisinin belirlenmesi gerekir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje no: 223M415). Yazarlar bu destek için minnettardır.

KAYNAKLAR

- Behbehani, F., McCartney, J.S. (2020), "Simulation of The Thermo-Hydraulic Response of Energy Piles in Unsaturated Soils", E3S Web of Conferences 205, 05002.
- Cehaba, G., Moore, D. (2010), "Parametric Study Examining the Short and Long-Term Response of High-Density Polyethylene (HDPE)", Pipes When Installed By Horizontal Directional Drilling", Tunnelling and Underground Space Technology 25, 782-794.
- Di Donna, A. (2014), "Thermo-Mechanical Aspects of Energy Piles", Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland.
- Gu, Y., O'Neal, D. (1998), "Development of An Equivalent Diameter Expression For Vertical U-Tubes Used In Ground-Coupled Heat Pumps", ASHRAE Transactions, January 1998.
- Hedin, A., Johansson, A. J., Lilja, C., Kalinowski, B. (2019), "Supplementary Information on Canister Integrity Issues", Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Sweden, SKB TR-19-15.
- Kong, G., Chang, H., Wu, D., Peng, H., Shen, Y., Abuel-Naga, H. (2023), "Effects of Pile Configuration on The Group Behaviour of Semi-Floating Energy Piles", Journal of Building Engineering 77, 107487.
- Omer, A.M. (2012), "Cooling and Heating with Ground Source Energy", International Journal of Energy Optimisation and Engineering, Malaysia 1, 41-58.

- Onal, O., Gharehaghajlou, A. (2021), "Non-Destructive Volumetric Quantification of Irregular Shaped Soil Samples Using Close-Range Photogrammetry", Innov. Infrastruct. Solut. 6, 94 (2021).
- Porter S.T., Roussel M., Soressi M. (2016), "A Simple Photogrammetry Rig for The Reliable Creation Of 3D Artifact Models In The Field: Lithic Examples From The Early Upper Paleolithic Sequence Of Les Cottés (France)", Adv Archaeol Pract 4(1):71–86.
- Sridharan A., Prakash K. (2000), "Shrinkage Limit of Soil Mixtures", Geotech Test J 23(1):3–8.
- Surmen, H. K. (2023), "Fotogrametri ile Üç Boyutlu Tarama- 3B Fotogrametri", Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar-I, Serüven Yayınevi, 173-196.
- Tay Y.Y., Stewart D.I., Cousens T.W. (2001), "Shrinkage and Desiccation Cracking in Bentonite-Sand Landfill Liners", Eng Geol 60:263–274.
- Villar, M.V., Martín, P.L., Romero, F.J., Iglesias, R.J., Gutiérrez-Rodrigo, V. (2016), "Saturation of Barrier Materials Under Thermal Gradient", Geomechanics for Energy and the Environment 8, 38–51.
- Wang, DW., Zhu, C., Tang, CS. et al. (2024), "Experimental Study on Shrinkage Characteristics of Compacted Bentonite–Sand Mixtures", Bull Eng Geol Environ 83, 43.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
B	Bentonit
30B70S	Bentonit Kum Karışımı
S50	%50 Doygunluk Derecesi
S90	%90 Doygunluk Derecesi
OS	Oda Sıcaklığı