Çinko Cürufu Katkısının Enerji Yapılarında Tampon Malzeme Bentonitin Hacimsel Deformasyon Davranışına Etkisinin İncelenmesi

An Investigation of the Volumetric Deformation Behavior of Buffer Material Bentonite in Energy Geo-structures with Zinc Slag Additives

Dila Çiğdem[1], Yeliz Yükselen Aksoy[2]

ÖZET

Nükleer atık depolama sistemleri gibi mühendislik uygulamalarında kullanılan bariyer malzemelerinin hacimsel deformasyon davranışları, sistemlerin uzun dönem performansı açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle, bentonit esaslı bariyer malzemelerinin deformasyon davranışlarının iyileştirilmesine yönelik alternatif katkı malzemelerinin araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Endüstriyel bir atık malzeme olan çinko cürufunun bu amaçla değerlendirilmesi, atıkların yeniden kullanımına ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlama potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmada, bentonit numunelerine %10 ve %20 oranlarında çinko cürufu eklenerek hazırlanan karışımların hacimsel deformasyon davranışları oda sıcaklığında incelenmiştir. Konsolidasyon deneyleri kapsamında, çinko cürufu katkısının bentonitin yükleme altındaki deformasyon davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Katkılı numunelerden elde edilen sonuçlar, katkısız bentonitin sonuçlarıyla karşılaştırılarak farklı katkı oranlarının etkileri araştırılmıştır. Ayrıca çinko cürufu katkısının bentonit tampon malzemesinin enerji geo-yapılarında önemli bir parametre olan termal iletkenliğine etkisi de belirlenmiştir. Deney sonuçları, oda sıcaklığında çinko cürufu katkısının bentonitin hacimsel deformasyonunu azalttığını göstermiştir. Çinko cürufu katkısı termal iletkenliği artırmıştır. Elde edilen bulgular, çinko cürufunun bentonit esaslı bariyer malzemelerinin deformasyon davranışını iyileştirmek amacıyla alternatif bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Hacimsel deformasyon, Bentonit, Enerji geo-yapıları, Çinko cürufu, Termal iletkenlik*

ABSTRACT

The volumetric deformation behavior of barrier materials used in engineering applications, such as nuclear waste disposal systems, is important for the long-term performance of these systems. Therefore, alternative additives need to be investigated to improve the deformation behavior of bentonite-based barrier materials. The use of zinc slag, an industrial waste material, for this purpose has the potential to contribute to waste reuse and the conservation of natural resources. In this study, the volumetric deformation behavior of bentonite mixtures containing 10% and 20% zinc slag was investigated at room temperature. Consolidation tests were conducted to evaluate the influence of zinc slag addition on the deformation behavior of bentonite under loading. Furthermore, the effect of zinc slag addition on the thermal conductivity of bentonite buffer material a key parameter in energy geostructures was determined. The results obtained from the mixtures were compared with those of unamended bentonite to investigate the effects of different additive contents. The experimental results showed that zinc slag addition reduced the volumetric deformation of bentonite at room temperature. The zinc slag additive increased the thermal conductivity. These findings suggest that zinc slag could be considered an alternative additive for improving the deformation behavior of bentonite-based barrier materials.

Keywords: *Volumetric deformation, Bentonite, Energy geostructures, Zinc slag, Thermal conductivity*

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, dilacigdem2003@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, yeliz.yukselen@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde nüfus artışına paralel olarak enerjiye duyulan ihtiyaç da hızla yükselmekte, bu durum farklı tür ve işlevlere sahip enerji yapılarının sayısının artmasına neden olmaktadır. Enerji yapılarının güvenli ve uzun ömürlü biçimde kullanılabilmesi, bu yapılarda kullanılan zemin malzemelerinin mühendislik özelliklerinin ayrıntılı olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Özellikle bariyer ve tampon malzemelerinin işletme süresince işlevlerini koruması, sistemlerin tasarımında dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. Bu nedenle, zeminlerin fiziksel, hidrolik ve mekanik özelliklerinin farklı koşullar altındaki değişimini inceleyen çalışmalar önem taşımaktadır (Abuel-Naga vd., 2006).

Enerji yapılarında bariyer veya tampon malzemesi olarak kullanılan bentonitin şişme, sıkışabilirlik, su tutma ve geçirgenlik özellikleri, malzemenin tasarlanan işlevini yerine getirebilmesi açısından belirleyicidir (Villar ve Lloret, 2004; Kim vd., 2023). Bu özelliklerin birlikte değerlendirilmesi, bariyer sistemlerinin performansının anlaşılması açısından önemlidir. İnsan sağlığı, çevre güvenliği ve enerji yapılarının uzun dönem performansı göz önünde bulundurulduğunda, mühendislik özelliklerini uzun süre koruyabilen bentonit esaslı zemin malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, farklı katkı malzemelerinin bentonitin mühendislik davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması, uygun karışımların belirlenmesine katkı sağlayabilir.

Bentonit, suyla temas ettiğinde yüksek miktarda şişme ve su tutma kapasitesi gösteren ince daneli bir kil türüdür. Yüksek şişme basıncı ve düşük hidrolik iletkenliği nedeniyle özellikle nükleer atık depolama sistemlerinde bariyer ve tampon malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yükleme altında meydana gelen hacimsel deformasyonların belirlenmesi, bentonit esaslı malzemelerin sıkışabilirlik davranışlarının değerlendirilmesi açısından gereklidir. Katkı malzemelerinin bu davranış üzerindeki etkilerinin incelenmesi ise malzeme seçimi ve karışım tasarımı için deneysel bir temel oluşturmaktadır. Endüstriyel faaliyetler sonucunda elde edilen ve atık olarak nitelendirilen cürufların zemin iyileştirme ve katkı malzemesi olarak değerlendirilmesi gerek zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi gerekse atık malzemelerin yeniden kullanılması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada incelenen çinko cürufu, bentonit esaslı karışımlarda kullanılabilecek alternatif bir endüstriyel atık malzeme olarak ele alınmıştır. Ancak bu malzemenin katkı olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için farklı katkı oranlarının bentonitin hacimsel deformasyon davranışı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, çinko cürufu katkısının enerji geo-yapılarında tampon malzeme olarak kullanılan bentonitin hacimsel deformasyon davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, katkısız bentonit ile ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında çinko cürufu içeren bentonit karışımları hazırlanmıştır. Numunelerin konsolidasyon davranışları, oda sıcaklığında gerçekleştirilen ödeometre deneyleri ile incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak katkısız ve katkılı numunelerin yükleme altındaki hacimsel deformasyonları karşılaştırılmıştır. Böylece, çinko cürufu katkısının ve katkı oranının bentonitin sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE METOD

Çalışmada kullanılan bentonit ve çinko cürufu katkısının fiziko-kimyasal özellikleri aşağıda bulunan Tablo 1'de gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan bentonit numuneleri, hedeflenen kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanması amacıyla öncelikle 105 °C'lik etüvde 24 saat bekletilerek kuru hale getirilmiştir. Numuneler ağırlıkça yüzde olarak %10 çinko cürufu-%90 bentonit ve %20 çinko cürufu-%80 bentonit olacak şekilde hazırlanmıştır. Çinko cürufu numunesinin doğal su içeriği dikkate alınarak konsolidasyon deneyleri maksimum kuru birim hacim ağırlığın ve optimum su içeriğinin %80'inde olacak şekilde saf su ile hazırlanmıştır.

Tablo 1. Malzemelerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri

	Bentonit	**Çinko Cürufu**
Özgül ağırlık	2.63	4.40
Likit limit (%)	151	54
Plastik limit (%)	50.1	-
pH	7.98	6.30

2.1. Kompaksiyon Deneyleri

Standart Proctor deneyleri ASTM D 698-12 standardına uygun olarak yürütülmüştür. Deneylerde derin bir kapta kuru halde bulunan bentonite su püskürtme yoluyla karıştırılmıştır. Standarda uygun olarak 16 ila 24 saat arasında beklemesi gereken numuneler, bentonit davranışı göz önünde bulundurularak homojenliğin sağlanması için 24 saat kapalı bir şekilde bekletilmiştir. Her deney sonrasında alınan örneklerin su içeriği belirlenmiştir. Aynı yöntem çinko cürufu katkısı varlığında tekrar edilmiştir.

2.2. Konsolidasyon Deneyleri

Konsolidasyon deneyleri ASTM D2435/D2435M-25 standardına uygun olarak yürütülmüştür. Numuneler kompaksiyon deneyleri ile önceden belirlenmiş olan kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerlerinin %80'inde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler bentonit kilinin şişme özelliği göz önünde bulundurularak deneye tabi tutulmadan önce 5 gün boyunca kelepçeli sistemde sabit hacimde su altında kalacak şekilde bekletilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında yükleme ve boşaltma aşamaları uygulanarak tamamlanmıştır.

2.3. Termal İletkenlik Deneyleri

Termal iletkenlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bentonit numunelerine kuru ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında çinko cürufu ilave edilmiştir. Bentonit–çinko cürufu karışımları, homojenlik sağlanıncaya kadar kap içerisinde karıştırılmış ve hava almayacak şekilde kapalı kaplarda 24 saat süreyle bekletilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında, ASTM D698 standardına göre gerçekleştirilen kompaksiyon deneylerinden elde edilen kuru birim hacim ağırlık–su içeriği değerleri esas alınmıştır. Her bir karışım için numuneler, %60 ve %90 doygunluk derecelerine karşılık gelen su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık değerlerinde hazırlanmış ve kalıp içerisinde sıkıştırılmıştır. Numuneler, doygunluk derecesi ve çinko cürufu katkı oranına göre B-60S, B-90S, B-10ÇC-60S, B-10ÇC-90S, B-20ÇC-60S ve B-20ÇC-90S şeklinde kodlandırılmıştır. Hazırlanan numunelerin termal iletkenlik, termal

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, dilacigdem2003@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, yeliz.yukselen@deu.edu.tr

difüzivite ve hacimsel ısı kapasitesi değerleri TEMPOS Thermal Analyzer cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

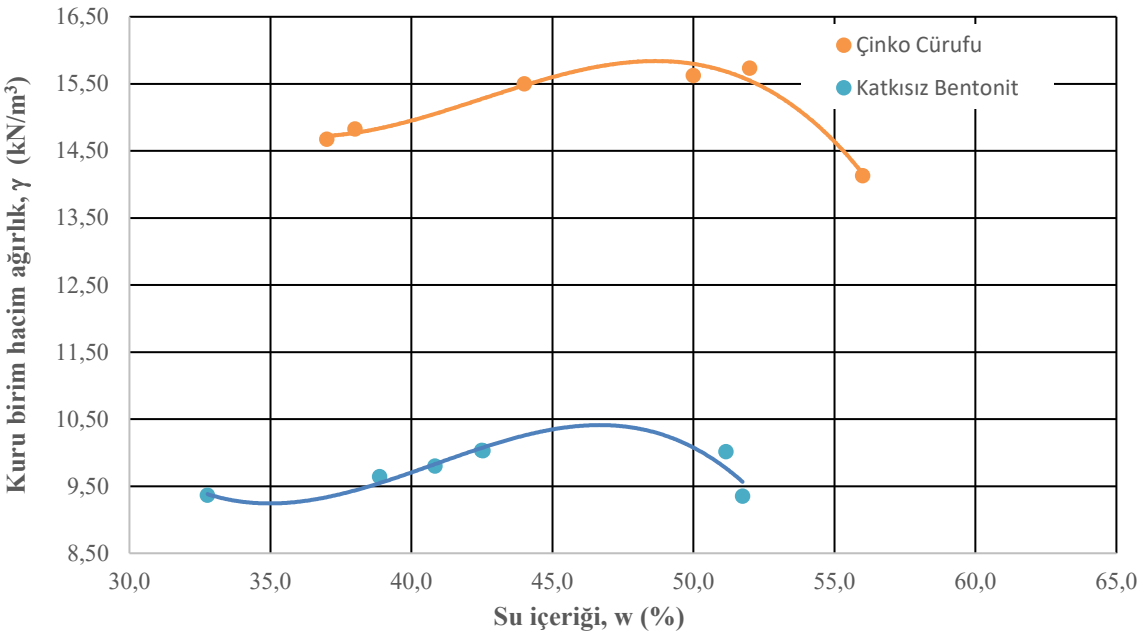
3. DENEYSEL SONUÇLAR

3.1. Kompaksiyon Deneyi Sonuçları

Çinko cürufu katkısının bentonit malzeme ile karıştırıldığında kompaksiyon parametreleri üzerine etkisi Standart Proctor deneyleri ile incelenmiştir. Şekil 2'de çinko cürufu varlığındaki kompaksiyon eğrisi katkısız bentonitin kompaksiyon eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Çinko cürufu varlığı maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde yaklaşık 5.7 kN/m^3 artış meydana gelirken optimum su içeriğinde ise %1'lik bir artış meydana gelmiştir.

Tablo 2. İncelenen Numunelerin Kompaksiyon Parametrelerinin Karşılaştırması

Numune	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	w_{opt}(%)
Katkısız Bentonit	10.20	48.0
80B-20ÇC	15.8	49.0



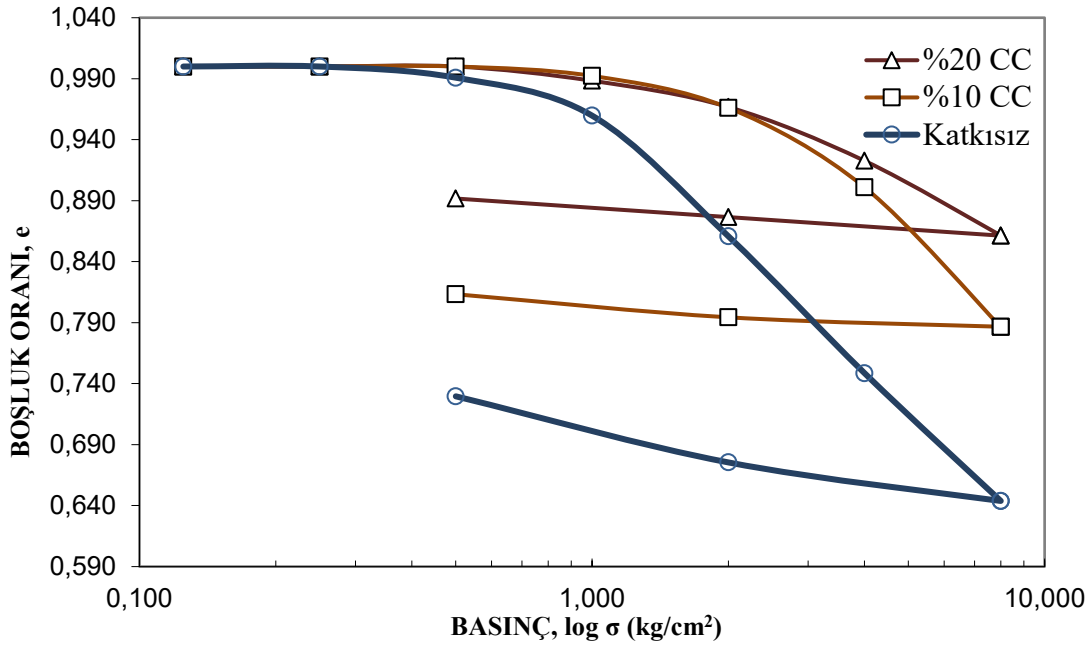
Şekil 1. Çinko Cürufu-Katkısız Bentonit Karışımı Numunelerinin Kompaksiyon Eğrisi

3.2. Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

Bentonit numunesinin sıkışma davranışı %10 ve %20 çinko cürufu varlığında belirlenmiştir. Şekil 3'te, oda sıcaklığında katkısız bentonit ile ağırlıkça %10 ve %20 çinko cürufu katkılı bentonit numunelerine ait boşluk oranı– gerilme (e–logσ) eğrileri birlikte gösterilmektedir. Katkısız bentonite ait eğri Toyğar ve Yükselen Aksoy (2026)'dan alınmıştır. Katkısız bentonit çinko cürufu katkılı bentonit numunesine göre daha fazla deformasyon göstermiştir.

Tablo 3. İncelenen Numunelerin Sıkışma İndisi ve Konsolidasyon Katsayısı Karşılaştırması

Numune	C_c	c_v
B	0,627	0,0048
B-%10ÇC	0,543	0,0133
B-%20ÇC	0,267	0,0144



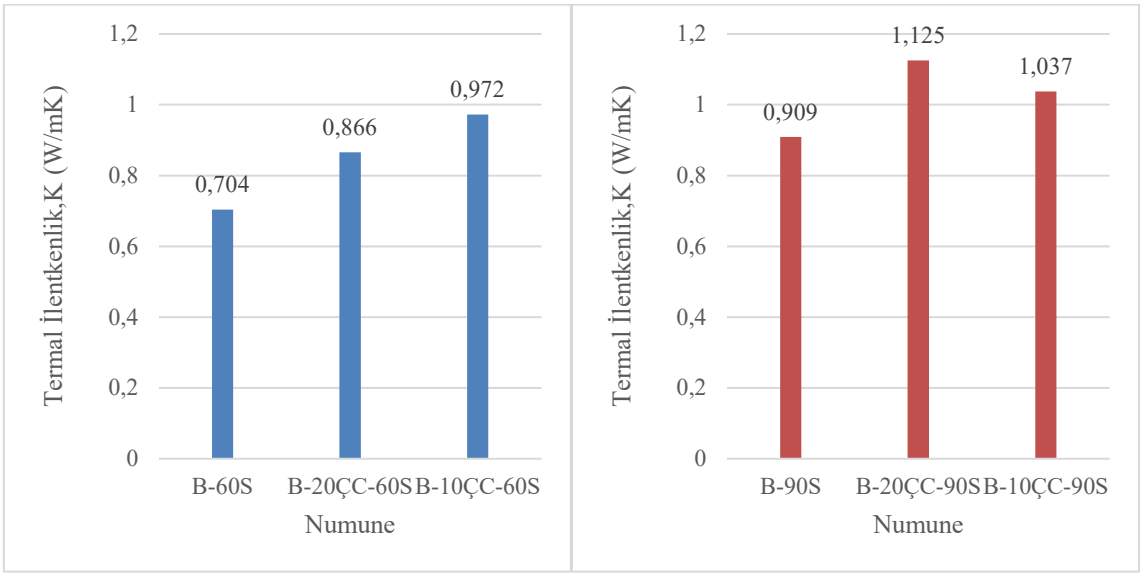
Şekil 2. Ortam sıcaklığında Katkısız, %20 Çinko Cürufu ve %10 Çinko Cürufu Katkılı bentonitin konsolidasyon eğrileri

Tablo 3 'te gösterildiği şekilde çinko cürufu katkı oranının artmasıyla C_c değeri 0.627'den katkı miktarı sırasıyla 0.543 ve 0.267'ye düşerek numunelerin sıkışabilirliğinin azaldığını göstermiştir. 2 kg/cm² gerilme kademesinde belirlenen c_v değeri ise 0.0048'den sırasıyla 0.0133 ve 0.0144'e yükselmiştir bu yükseliş ise incelenen numunelerde katkılı numunelerin daha hızlı konsolide olduğu belirtmektedir.

3.3. Termal İletkenlik Deneyleri Sonuçları

Termal deney sonuçları incelendiğinde, doygunluk derecesinin artmasıyla tüm numunelerin termal iletkenlik değerlerinin arttığı görülmüştür. %60 doygunlukta çinko cürufu katkısı termal iletkenliği artırmış, ancak katkı oranının %10'dan %20'ye çıkarılmasıyla termal iletkenlikte azalma meydana gelmiştir. %90 doygunlukta ise katkı oranı arttıkça termal iletkenlik artmış ve en yüksek değer %20 çinko cürufu katkılı numunede elde edilmiştir. Hacimsel ısı kapasitesi, katkısız bentonitte doygunluk derecesinin artmasıyla artmıştır. %60 doygunlukta çinko cürufu katkısı hacimsel ısı kapasitesini azaltmış, %90 doygunlukta ise katkılı numunelerin hacimsel ısı kapasitesi artmıştır. Bu doygunluk derecesinde en yüksek hacimsel ısı kapasitesi %10 çinko cürufu katkılı numunede belirlenmiştir. Difüzivite değerleri ise doygunluk derecesinin artmasıyla tüm karışımlarda azalmıştır. %60 doygunluk derecesinde çinko cürufu katkısı difüziviteyi artırırken, %90 doygunluk derecesinde katkı ilavesi difüziviteyi azaltmıştır. Genel olarak çinko cürufu katkısının bentonitin termal özellikleri üzerindeki etkisinin katkı oranı ve doygunluk derecesine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, dilacigdem2003@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, yeliz.yukselen@deu.edu.tr



a) b)

Şekil 3. Çinko cürufu katkı oranı ve doygunluk derecesinin bentonitin termal iletkenliğine etkisi a) %60 doygunlukta hazırlanmış numuneler b) %90 doygunlukta hazırlanmış numuneler

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada tampon malzemenin yüksek termal iletkenliğe sahip olduğu bilinen bir atık olan çinko cürufu ile kullanıldığında hacimsel deformasyonunda ve sıkışabilirlik parametrelerindeki değişimler incelenmiştir.

Çinko cürufu eklendiğinde bentonit malzemenin maksimum kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su içeriğinde artış gözlemlenmiştir. Çinko cürufu katkısının, katkısız bentonite göre yükleme altında hacimsel deformasyonu ve sıkışabilirliği azalttığı ayrıca katkı oranı %10'dan %20'ye çıkarıldığında da bu etkinin devam ettiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, çinko cürufu katkısı ile konsolidasyon katsayısının (c_v) arttığı ve katkılı numunelerin daha hızlı konsolide olduğu da belirlenmiştir. Çinko cürufu katkılı numunelerin termal iletkenlik değerleri genel olarak katkısız bentonitten daha yüksek bulunmuş, ancak bu davranışın aksine %60 doygunlukta katkı oranının %10'dan %20'ye çıkarılmasıyla bu artışın azaldığı görülmüştür. Hacimsel ısı kapasitesi bakımından katkılı numuneler %60 doygunlukta katkısız bentonitin altında kalırken, %90 doygunlukta katkısız bentonitin üzerine çıkmış; termal difüzivite ise %60 doygunlukta katkıyla artarken %90 doygunlukta katkısız bentonite göre azalmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK-1001 124M454 numaralı proje tarafından desteklenmektedir. TÜBİTAK'a projeye verdiği destek için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Ramana, G.V., Grino, L., Rujivipat, P. ve Thet, Y. (2006), "Experimental Evaluation of Engineering Behavior of Soft Bangkok Clay Under Elevated Temperature", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(7), 902-910.

ASTM D698-12 (2021), "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.

ASTM D2435/D2435M-25 (2025), "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading", ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bag, R. ve Rabbani, A. (2017), "Effect of Temperature on Swelling Pressure and Compressibility Characteristics of Soil", *Applied Clay Science*, 136, 1-7.

Burghignoli, A., Desideri, A. ve Miliziano, S. (2000), "A Laboratory Study on the Thermomechanical Behaviour of Clayey Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 764-780.

Chen, Z.-G., Tang, C., Zhu, C., Shi, B. ve Liu, Y.-M. (2017), "Compression, Swelling and Rebound Behavior of GMZ Bentonite/Additive Mixture Under Coupled Hydro-Mechanical Condition", *Engineering Geology*, 221, 50-60.

Cho, W.J., Lee, J.O. ve Chun, K.S. (1999), "The Temperature Effects on Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite", *Applied Clay Science*, 14, 47-58.

He, L., Sedighi, M., Hadi Mosleh, M., Jivkov, A. ve Liu, J. (2025), "Elevated Temperature Effects on Swelling Pressure of Compacted Bentonite", *Deep Underground Science and Engineering*, 4, 699-708.

He, Y., Lu, P., Ye, W., Chen, Y.-G. ve Zhang, K.-N. (2022), "Coupled Chemo-Hydro-Mechanical Effects on Volume Change Behaviour of Compacted Bentonite Used as Buffer/Backfill Material in High-Level Radioactive Waste Repository", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 59, 1207-1231.

Jarad, N., Cuisinier, O. ve Masrouri, F. (2017), "Effect of Temperature and Strain Rate on the Consolidation Behaviour of Compacted Clayey Soils", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.

Kautsky, U., Lindborg, T. ve Valentin, J. (2015), "A Biosphere Assessment of High-Level Radioactive Waste Disposal in Sweden", *Radiation Protection Dosimetry*, 164(1-2), 103-107.

Kim, M., Lee, S., Lim, H., Kim, J. ve Yoon, S. (2023), "Effects of Initial Compaction Condition and Temperature on Swelling Characteristics of Compacted Bentonite", *Progress in Nuclear Energy*, 164, 104871.

Laloui, L. ve Rotta Loria, A.F. (2019), *Analysis and Design of Energy Geostructures: Theoretical Essentials and Practical Applications*, Academic Press.

Łukawska, A., Ryżyński, G. ve Żeruń, M. (2020), "Serial Laboratory Effective Thermal Conductivity Measurements of Cohesive and Non-cohesive Soils for the Purpose of Shallow Geothermal Potential Mapping and Databases—Methodology and Testing Procedure Recommendations", *Energies*, 13(4), 914.

Moukalled, F. ve Saleh, Y. (2006), "Heat and Mass Transfer in Moist Soil, Part I: Formulation and Testing", *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 49(5), 467-486.

Ng, C.W.W., Akinniyi, D.B. ve Zhou, C. (2021), "Volume Change Behaviour of a Saturated Lateritic Clay Under Thermal Cycles", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 653-661.

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, dilacigdem2003@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, yeliz.yukselen@deu.edu.tr

Nikoosokhan, S., Nowamooz, H. ve Chazallon, C. (2016), "Effect of Dry Density, Soil Texture and Time-Spatial Variable Water Content on the Soil Thermal Conductivity", *Geomechanics and Geoengineering*, 11(2), 149-158.

Toyğar, F. ve Yükselen Aksoy, Y. (2026), "Investigation of Fine Content Effect on the Volume Deformation of Sand-Bentonite Mixtures under Different Thermal Conditions", *7th International Conference on Environmental Geotechnology, Recycled Waste Materials and Sustainable Engineering (EGRWSE 2026)*, Hindistan.

Villar, M.V. ve Lloret, A. (2004), "Influence of Temperature on the Hydro-Mechanical Behaviour of a Compacted Bentonite", *Applied Clay Science*, 26, 337-350.

Villar, M.V., Gómez-Espina, R. ve Lloret, A. (2010), "Experimental Investigation into Temperature Effect on Hydro-Mechanical Behaviours of Bentonite", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(1), 71-78.

Xiao, Y., Sun, Z., Wang, N., Guo, H., Wu, H. ve Meng, M. (2024), "Thermo-Mechanical Behavior of Sand-Clay Mixtures. Part I: Experimental Study", *Acta Geotechnica*, 19, 3377-3387.

Xu, Y., Sun, D., Zeng, Z. ve Lv, H. (2019), "Temperature Dependence of Apparent Thermal Conductivity of Compacted Bentonites as Buffer Material for High-Level Radioactive Waste Repository", *Applied Clay Science*, 174, 10-14.

Yoon, S., Kim, M.-J., Park, S. ve Kim, G.-Y. (2021), "Thermal Conductivity Prediction Model for Compacted Bentonites Considering Temperature Variations", *Nuclear Engineering and Technology*, 53, 3359-3366.