Bakır Cürufu Katkılı Kum-Bentonit Karışımlarının Termal İletkenlik ve Hacimsel Deformasyon Davranışlarının İncelenmesi

An Investigation of Thermal Conductivity and Volumetric Deformation Behavior of Sand-Bentonite Mixtures with Copper Slag Additives

Ceren ERCAN[1], Şükran Gizem ALPAYDIN[2], Yeliz YÜKSELEN AKSOY[3]

ÖZET

Enerji geo-yapılarının çevresinde ortaya çıkan yüksek sıcaklık koşulları zeminlerin mühendislik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, söz konusu alanlarda yüksek sıcaklığa karşı koruyucu bariyer işlevi görebilecek yeni özel tampon malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek termal iletkenliğe sahip bakır cürufunun, kum-bentonit karışımlarının hem yüksek sıcaklıklar karşısında dayanım hem de termal iletkenlik iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışmada, kum-bentonit zeminlerine %10 ve %20 oranlarında bakır cürufu eklenmiş ve özel olarak tasarlanan bir hücrede konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler önce oda sıcaklığında, ardından 150 °C sıcaklık altında uygulanmıştır. Aynı katkı oranı altında, farklı doygunluk derecelerinde (%60 ve %90) hazırlanan karışımlarda termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Konsolidasyon deneyleri sonucunda, bakır cürufu miktarının artmasıyla toplam düşey deformasyonun da arttığı belirlenmiştir. Termal iletkenlik ölçümlerinde ise bakır cürufu katkısının düşük doygunlukta iletkenlik değerini azalttığı, yüksek doygunlukta ise artırdığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Bakır Cürufu, Kum-Bentonit, Termal iletkenlik, Sıkışabilirlik davranışı*

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, cerenercan5@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Dr.Öğr.Üyesi, İstanbul Arel Üniversitesi, sukrangizemalpaydin@arel.edu.tr
[3] Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, yeliz.yukselen@deu.edu.tr

ABSTRACT

The high-temperature conditions around energy facilities can adversely affect the engineering properties of soils. Therefore, there is a need for new materials or special buffer materials that can provide thermal protection in these areas. Copper slag, which has relatively high thermal conductivity, has the potential to improve both the strength and thermal behavior of sand–bentonite mixtures. In this study, copper slag was added to sand–bentonite mixtures at contents of 10% and 20%, and consolidation tests were performed using a specially designed consolidation cell. The tests were first conducted at room temperature and then at 150 °C. Thermal conductivity measurements were also performed on mixtures prepared at different degrees of saturation (60% and 90%) for the same additive contents. The consolidation tests revealed that increasing the copper slag content increased the total vertical deformation. The thermal conductivity measurements showed that the addition of copper slag reduced thermal conductivity at 60% saturation but increased it at 90% saturation.

Keywords: *Copper Slag, Sand-Bentonite, Thermal Conductivity, Consolidation Behavior*

1. GİRİŞ

Enerji geotekniği uygulamalarında son yıllarda meydana gelen gelişmeler, zeminlerin yalnızca mekanik davranışlarının değil aynı zamanda termal etkiler karşısında özelliklerinin de mühendislik tasarımında önemli bir parametre haline gelmesine neden olmuştur. Özellikle yüksek seviyeli radyoaktif atık depolama tesisleri, enerji kazıkları, jeotermal sistemler, yer altı güç kabloları ve ısı depolama sistemleri gibi yapılarda zeminler uzun süre yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır (Gens, 2010; Laloui ve Di Donna, 2013). Bu sıcaklık artışları zeminlerin sıkışabilirlik, taşıma gücü, hidrolik iletkenlik, hacim değişimi ve termal iletkenlik gibi mühendislik özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Abuel-Naga ve ark., 2007; Tang ve Cui, 2009).

Yüksek sıcaklık altında zemin davranışının değişmesi, özellikle ince daneli zeminlerde daha belirgin hale gelmektedir. Sıcaklık artışı ile oluşan aşırı boşluk suyu basıncı, mineral yüzeyleri ile su arasındaki etkileşim ile kil minerallerinin mikro yapısı değişmekte; buna bağlı olarak zeminlerin deformasyon davranışı farklılaşmaktadır (Cekerevac ve Laloui, 2004). Bentonit gibi yüksek plastisiteli killerde sıcaklık artışı, adsorbe su tabakasının yeniden düzenlenmesine neden olmakta ve hacim değişimlerini etkileyebilmektedir (Delage ve Cui, 2008). Bu nedenle enerji yapılarında kullanılacak dolgu veya bariyer malzemelerinin yalnızca düşük geçirgenliğe sahip olması yeterli olmayıp aynı zamanda yüksek sıcaklık altında boyutsal kararlılıklarını koruyabilmeleri de büyük önem taşımaktadır.

Enerji geotekniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kum-bentonit karışımları, bentonitin düşük hidrolik iletkenliği ile kumun yüksek dayanımını bir araya getirmesi nedeniyle mühendislik açısından önemli bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmektedir (Komine ve Ogata, 1996). Ancak yüksek sıcaklık etkisi altında bu karışımların sıkışabilirlik davranışında değişimler meydana gelebilmekte ve zamanla oluşan oturmalar yapı

performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklık altında meydana gelen hacimsel deformasyon (konsolidasyon) davranışının belirlenmesi, enerji yapılarının uzun dönem performansının değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Konsolidasyon, doygun zeminlerde dış yük etkisiyle boşluk suyunun zamanla dışarı çıkması sonucu meydana gelen hacim azalması olarak tanımlanmaktadır (Terzaghi, 1943). Enerji yapılarında oluşan yüksek sıcaklıklar, klasik konsolidasyon davranışına ek olarak termal konsolidasyon mekanizmasını da ortaya çıkarmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla boşluk suyunun viskozitesi azalmakta, termal genleşme meydana gelmekte ve efektif gerilmeler değişmektedir (Campanella ve Mitchell, 1968). Bu durum, sıkışabilirlik katsayısı (C_c), konsolidasyon katsayısı (c_v) ve hacimsel deformasyon gibi parametreleri önemli ölçüde etkilemektedir (Abuel-Naga ve ark., 2007). Bu nedenle enerji geotekniğinde zemin davranışının değerlendirilmesinde sıcaklık etkisinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Termal iletkenlik, enerji yapılarında ısının zemin içerisinde yayılımını belirleyen temel mühendislik parametrelerinden biridir (Farouki, 1981). Zeminlerin termal iletkenliği; mineralojik yapı, dane boyutu dağılımı, porozite, kuru yoğunluk ve özellikle doygunluk derecesine bağlı olarak değişmektedir (Côté ve Konrad, 2005). Doygunluk derecesinin artmasıyla suyun hava boşluklarının yerini alması, ısı transfer yollarının sürekliliğini artırarak termal iletkenliği yükseltmektedir. Yüksek termal iletkenlik ihtiyacı nedeniyle enerji yapılarında istenen termal performansın sağlanabilmesi amacıyla zeminlerin farklı katkı malzemeleriyle iyileştirilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır.

Endüstriyel yan ürünlerin geoteknik mühendisliğinde değerlendirilmesi, hem çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması hem de zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Gorai ve Jana, 2003). Bu yan ürünlerden biri olan bakır cürufu; yüksek özgül ağırlığı, düşük su emme kapasitesi, yüksek mekanik dayanımı ve yüksek termal iletkenliği sayesinde çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır (Shi ve Qian, 2000). Bu nedenle bakır cürufunun yapı malzemelerinde yeniden değerlendirilmesi, hem atık yönetimi hem de sürdürülebilir mühendislik uygulamaları açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmada enerji yapılarında kullanılabilecek alternatif bir bariyer malzemesinin geliştirilmesi amacıyla kum-bentonit karışımlarına ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında bakır cürufu ilave edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde oda sıcaklığı ve 150 °C sıcaklık altında özel olarak tasarlanan yüksek sıcaklık konsolidasyon düzeneğinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiş, ayrıca %60 ve %90 doygunluk derecelerinde termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Böylece bakır cürufu katkısının hem yüksek sıcaklık altında meydana gelen deformasyon davranışına hem de ısı transfer özelliklerine etkisi birlikte değerlendirilmiş ve enerji geotekniği uygulamalarında kullanılabilecek sürdürülebilir bir dolgu malzemesi geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Bu çalışmada temel malzeme olarak kum, sodyum bentonit ve bakır cürufu kullanılmıştır. Deney numuneleri %65 kum ve %35 bentonitten oluşan referans karışım esas alınarak hazırlanmış, bu karışıma ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında bakır cürufu ilave edilmiştir.

Böylece referans numune (65S35B) ile bakır cürufu katkılı 65S35B-10BC ve 65S35B-20BC karışımları oluşturulmuştur.

Kullanılan malzemelerin temel fiziko-kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Kumun özgül ağırlığı 2.68, bentonitin 2.63 ve bakır cürufunun ise 3.62 olarak belirlenmiştir. Bakır cürufu ise plastik özellik göstermemekte (NP) olup düşük su emme kapasitesi ve yüksek özgül ağırlığı sayesinde zemin iskeletini güçlendirebilecek bir endüstriyel yan ürün niteliğindedir. Ayrıca yaklaşık 11.0 gibi pH değerine sahip olması nedeniyle alkali karakter göstermektedir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel parametreleri

Özellik	**Kum**	**Bentonit**	**Bakır Cürufu**	**ASTM Standart**
Özgül Ağırlık	2.68	2.63	3.62	ASTM D854-22
Likit Limit (%)	-	151	17.86	ASTM D4318-21
Plastik Limit (%)	-	50.1	NP	ASTM D4318-21
Plastisite İndeksi (%)	-	100.9	NP	ASTM D4318-22
pH	-	7.98	10.98	ASTM D4972

Deney numunelerinin hazırlanmasında ASTM D-698 (ASTM, 2021) standardına uygun olarak gerçekleştirilen Standard Proctor kompaksiyon deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ile optimum su içeriği değerleri esas alınmıştır. Bakır cürufu katkısının artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığı, optimum su içeriğinin ise azaldığı belirlenmiştir. Numunelere ait kompaksiyon parametreleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Numunelerin Standard Proctor kompaksiyon özellikleri

Numune	**Maks. Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m³)**	**Optimum Su İçeriği (%)**
65S35B	15.5	21.5
65S35B -10BC	16.4	21.1
65S35B -20BC	17.4	20.7

Çalışma kapsamında hazırlanan tüm numuneler üzerinde oda sıcaklığında ve 150 °C sıcaklık altında konsolidasyon deneyleri ile %60 ve %90 doygunluk derecelerinde termal iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney programı Tablo 3'te verilmiştir.

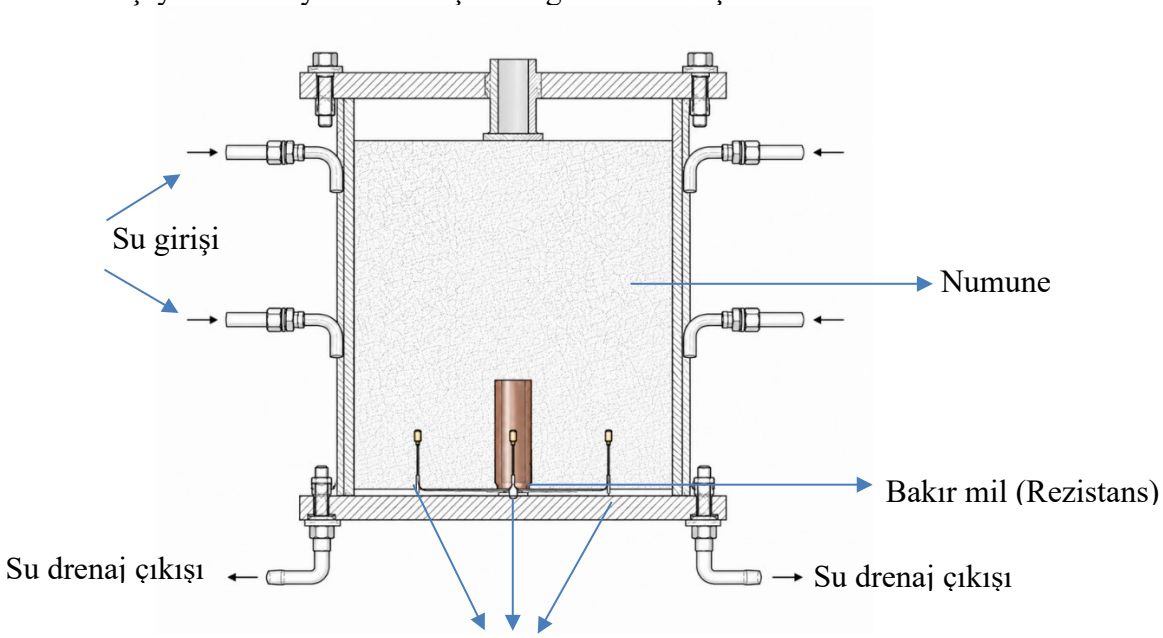
Tablo 3. Deney programı

Numune	**Konsolidasyon Deneyi**		**Termal İletkenlik**	
	25°C sıcaklık altında	**150 °C sıcaklık altında**	**%60 doygunluk derecesinde**	**%90 doygunluk derecesinde**
65S35B	✓	✓	✓	✓
65S35B -10BC	✓	✓	✓	✓
65S35B -20BC	✓	✓	✓	✓

2.2. Metot

2.2.1. Konsolidasyon Deneyleri

Konsolidasyon deneyleri, ASTM D2435/D2435M (ASTM, 2020) standardına uygun olarak, yüksek sıcaklık koşullarını oluşturmak amacıyla özel tasarlanmış bir deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmuştur. Model hücre dış çapı 12 cm, iç çapı ise 10 cm olacak şekilde üretilmiş olup, merkezine nükleer atık depolama tesislerinde kullanılan canister yapısını temsil eden bakır bir mil yerleştirilmiştir. Bakır mil içerisine yerleştirilen fişek rezistans ile sistem 150 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve sıcaklık dijital termostat yardımıyla sabit tutulmuştur. Sıcaklık dağılımını izlemek amacıyla, bakır mil içerisine ve zemin içerisinde bakır milden farklı uzaklıklara yerleştirilen iki adet K-tipi termokupl kullanılmıştır. Böylece biri bakır milde, ikisi zemin içerisinde olmak üzere toplam üç farklı noktadan sıcaklık ölçümü alınarak numune içerisindeki sıcaklık değişimi deney süresince takip edilmiştir.
Hazırlanan numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri önce oda sıcaklığı (25 °C), ardından 150 °C sıcaklık altında gerçekleştirilmiş ve elde edilen oturma verileri kullanılarak numunelerin düşey deformasyon davranışları değerlendirilmiştir.

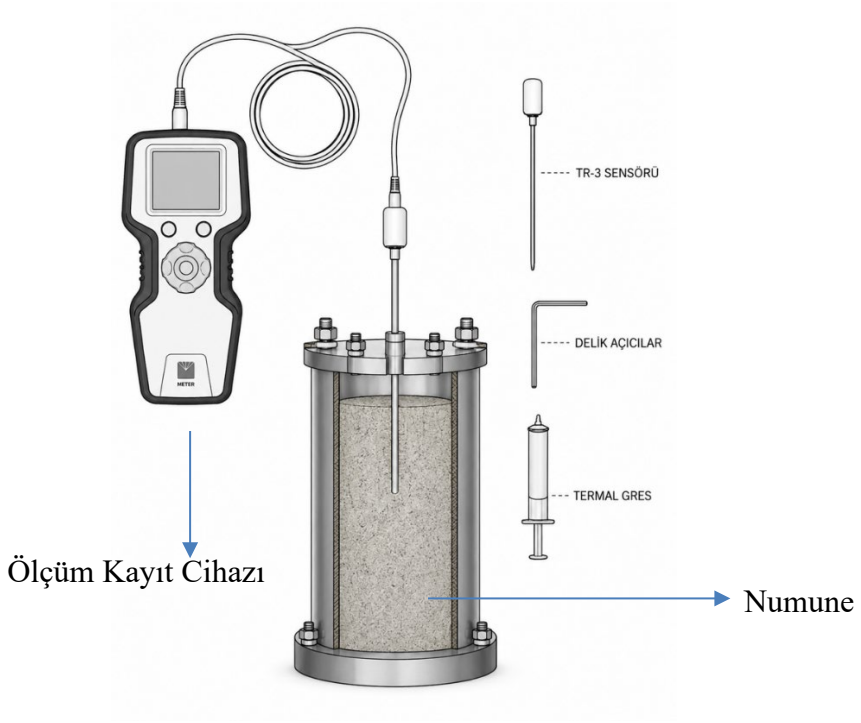


Şekil 1. Konsolidasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi

2.2.2. Termal İletkenlik Ölçümleri

Termal iletkenlik ölçümleri, TEMPOS Thermal Analyzer cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, ASTM D-698 (ASTM, 2021) standardına göre gerçekleştirilen Standard Proctor kompaksiyon deneylerinden elde edilen kompaksiyon eğrisi esas alınarak, maksimum kuru birim hacim ağırlığın %90'ına karşılık gelen kuru birim hacim ağırlık ve buna karşılık gelen su içeriğinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler %60 ve %90 doygunluk derecelerine ulaştırıldıktan sonra ölçüm kaplarına yerleştirilmiş ve yaklaşık 7 cm uzunluğundaki TR-3 prob kullanılarak termal iletkenlik ölçümleri

gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2'de sunulmuştur. Ölçümler sonucunda cihaz tarafından hesaplanan termal iletkenlik değerleri kaydedilmiş ve bakır cürufu katkısı ile doygunluk derecesinin termal iletkenlik üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.



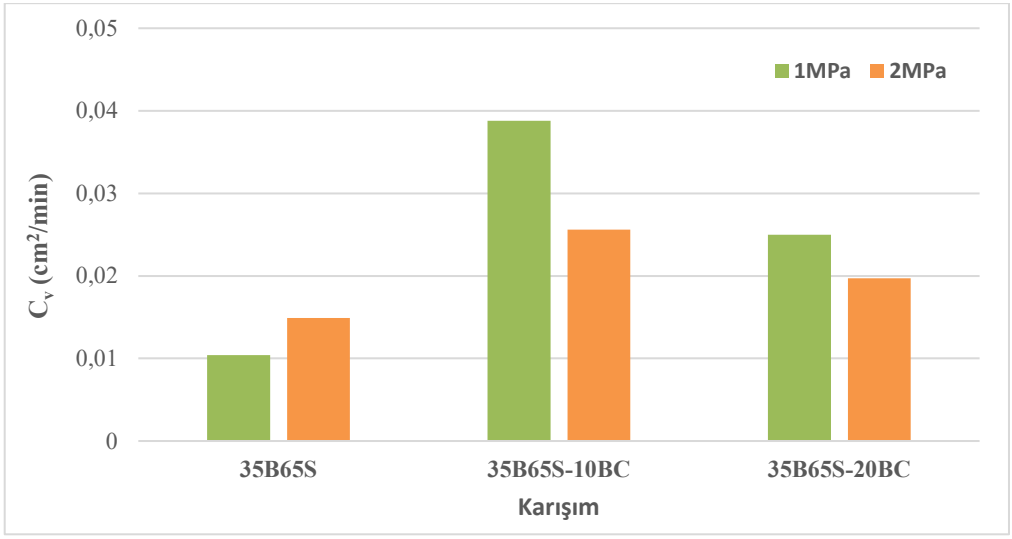
Şekil 2**.** Termal iletkenlik ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi

3. DENEY SONUÇLARI

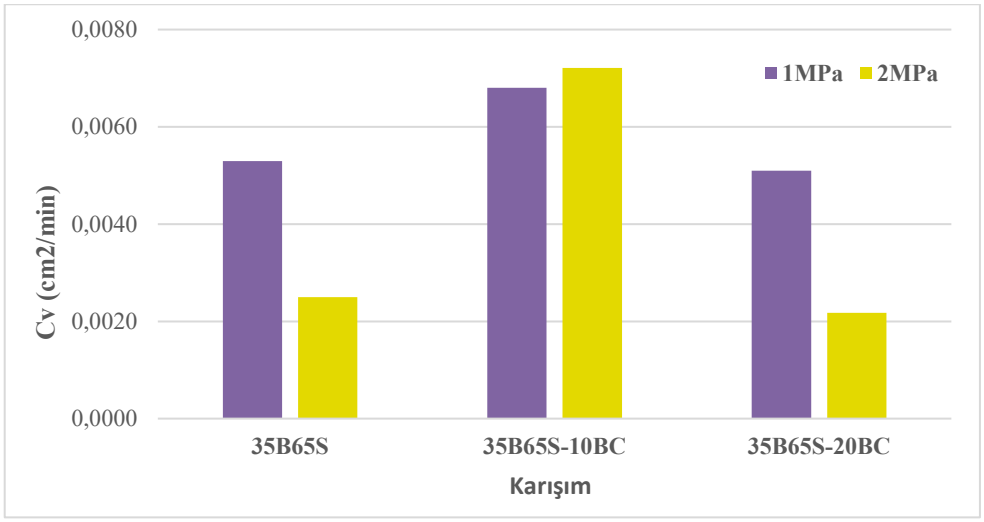
3.1. Konsolidasyon Deney Sonuçları

Bu çalışma kapsamında %35 bentonit–%65 kum karışımından oluşan katkısız numune ile %10 ve %20 bakır cürufu ilaveli karışımlar üzerinde oda sıcaklığı ve 150 °C sıcaklık koşullarında tek boyutlu konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 1 MPa ve 2 MPa düşey gerilmeler altında yürütülmüş ve elde edilen oturma-zaman verilerinden konsolidasyon katsayıları (c_v) hesaplanmıştır. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık koşullarında elde edilen c_v değerlerinin karşılaştırılması sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.

Oda sıcaklığında bakır cürufu ilavesinin konsolidasyon katsayısını artırdığı görülmektedir (Şekil 3). Katkısız 35B65S numunesinde c_v değerleri 1 MPa ve 2 MPa yük altında sırasıyla 0.0104 cm²/dk ve 0.0149 cm²/dk olarak belirlenmiştir. %10 bakır cürufu ilavesiyle c_v değerleri 0.0388 cm²/dk ve 0.0256 cm²/dk'ya yükselerek en yüksek değerlere ulaşmıştır. Katkı oranının %20'ye çıkarılmasıyla ise c_v değerleri 0.0250 cm²/dk ve 0.0197 cm²/dk'ya düşmüştür. Bu durum, düşük katkı oranlarında drenaj yollarının açılması, yüksek katkı oranlarında ise boşluk yapısının kısmen dolması nedeniyle drenajın sınırlandırılması ile açıklanabilir.



Şekil 3. Oda sıcaklığında 1 MPa ve 2 MPa yük seviyelerinde katkısız ve bakır cürufu ilaveli kum–bentonit karışımlarının konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri



Şekil 4. 150°C sıcaklıkta 1 MPa ve 2 MPa yük seviyelerinde katkısız ve bakır cürufu ilaveli kum–bentonit karışımlarının konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri

Yüksek sıcaklık (150 °C)'de gerçekleştirilen deneylerde tüm numunelerde c_v değerlerinin oda sıcaklığına göre genel olarak azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4). Katkısız numunede c_v değerleri 1 MPa ve 2 MPa yük altında sırasıyla 0.0053 cm²/dk ve 0.0025 cm²/dk olarak hesaplanmıştır. %10 bakır cürufu ilaveli numunede 0.0068 cm²/dk ve 0.0072 cm²/dk ile en yüksek c_v değerleri elde edilirken, %20 katkılı numunede bu değerler 0.0051 cm²/dk ve 0.0022 cm²/dk'ya düşmüştür. Bu sonuçlar, yüksek sıcaklık altında bentonitin mikro yapısında meydana gelen değişimlerin ve artan sıkışabilirliğin, konsolidasyon hızını azaltıcı yönde etkili olduğunu göstermektedir.

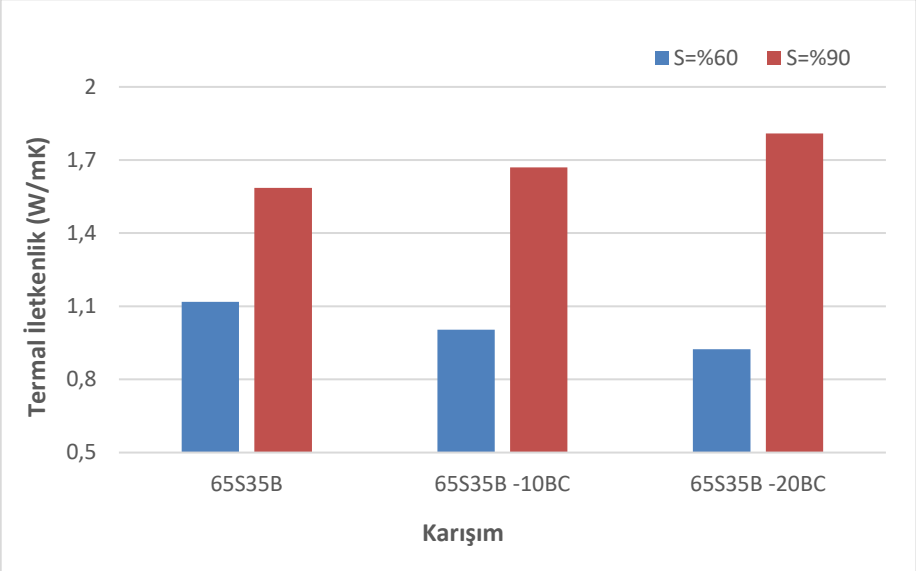
Genel olarak, %10 bakır cürufu ilavesi hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta en yüksek konsolidasyon katsayılarına sahiptir. Buna karşın, katkı oranının %20'ye çıkarılması c_v değerlerini azaltmış, 150°C sıcaklıkta ise tüm karışımlarda oda sıcaklığına kıyasla daha düşük c_v değerleri elde edilmiştir.

3.2. Termal İletkenlik Deney Sonuçları

Bu çalışma kapsamında katkısız (%35 bentonit–%65 kum) ve %10 ile %20 bakır cürufu ilaveli karışımların termal iletkenlik katsayıları %60 ve %90 doygunluk derecelerinde belirlenmiştir. Elde edilen termal iletkenlik katsayıları Tablo 4'te, bu değerlerin karşılaştırmalı gösterimi ise Şekil 5'te sunulmuştur.

Tablo 4. Farklı doygunluk derecelerinde katkısız ve bakır cürufu ilaveli kum–bentonit karışımlarının termal iletkenlik katsayıları

Thermal Conductivity (W/mK)		
Numune	Doygunluk Derecesi (%)	
	60	90
65S35B	1.118	1.586
65S35B -10BC	1.004	1.670
65S35B -20BC	0.924	1.809



Şekil 5. %60 ve %90 doygunluk derecelerinde katkısız ve bakır cürufu ilaveli kum–bentonit karışımlarının termal iletkenlik katsayıları

%60 doygunluk derecesinde katkısız numunenin termal iletkenliği 1.11 W/mK olarak ölçülmüştür. %10 ve %20 bakır cürufu ilavesiyle bu değerler sırasıyla 1.00 W/mK ve 0.91 W/mK'ya düşmüştür. Bu durum, düşük doygunlukta bakır cürufu ilavesinin karışımın ısı iletimini azalttığını göstermektedir.

%90 doygunluk derecesinde ise tüm numunelerde termal iletkenlik değerleri artmıştır. Katkısız numunede 1.58 W/mK olarak belirlenen termal iletkenlik, %10 bakır cürufu ilavesiyle 1.66 W/mK'ya, %20 bakır cürufu ilavesiyle ise 1.79 W/mK'ya yükselmiştir. Doygunluk derecesinin artmasıyla boşluklardaki havanın yerini suyun alması ve suyun havaya göre daha yüksek ısı iletimine sahip olması nedeniyle termal iletkenlik değerlerinin arttığı düşünülmektedir. Ayrıca yüksek doygunluk koşullarında bakır cürufunun yüksek ısıl iletkenlik özelliğinin daha etkin hale gelmesiyle katkı oranındaki artışın termal iletkenliği olumlu yönde etkilediği görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında kum–bentonit karışımlarına farklı oranlarda bakır cürufu ilave edilerek oda sıcaklığı ve 150 °C sıcaklık altında konsolidasyon deneyleri ile farklı doygunluk derecelerinde termal iletkenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Bakır cürufu ilavesi, oda sıcaklığında kum–bentonit karışımlarının konsolidasyon katsayısını değiştirmiş; %10 katkı oranında artış, %20 katkı oranında ise azalış meydana gelmiştir.
- 150 °C sıcaklık altında tüm karışımlarda konsolidasyon katsayısı oda sıcaklığına göre azalmış, yüksek sıcaklığın konsolidasyon hızını düşürdüğü belirlenmiştir.
- Bakır cürufu oranının artmasıyla numunelerin düşey deformasyonları artmış, buna bağlı olarak sıkışabilirlik davranışı değişmiştir.
- Doygunluk derecesinin artmasıyla tüm karışımlarda termal iletkenlik değerleri artmış ve en yüksek değerler %90 doygunluk derecesinde elde edilmiştir.
- Bakır cürufu ilavesi, %60 doygunluk derecesinde termal iletkenliği azaltırken, %90 doygunluk derecesinde artırmıştır.
- Elde edilen sonuçlar, bakır cürufunun kum–bentonit karışımlarının hem konsolidasyon hem de termal davranışını etkilediğini göstermiştir. Genel değerlendirme sonucunda, %10 bakır cürufu katkısının kullanımının daha uygun olacağı belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje no: 124M454). Yazarlar bu destek için minnettardır.

KAYNAKLAR

Gens, A. (2010), "Soil–Environment Interactions in Geotechnical Engineering", *Géotechnique*, Vol 60(1), 3-74.

Laloui, L. ve Di Donna, A. (2013), *Energy Geostructures*, John Wiley & Sons, London.

Tang, A.M. ve Cui, Y.J. (2009), "Thermo-Mechanical Behaviour of Compacted Expansive Clays", *Geotechnical Testing Journal*, Vol 32(2), 75-83.

Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Lim, B.F. ve Ramana, G.V. (2007), "Thermal Consolidation Characterist of Soft Bangkok Clay", *Geomechanics and Geoengineering*, Vol 2(3), 211-220.

Cekerevac, C. ve Laloui, L. (2004), "Experimental Study of Thermal Effects on the Mechanical Behaviour of a Clay", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol 28(3), 209-228.

Delage, P. ve Cui, Y.J. (2008), "Clays in Radioactive Waste Disposal", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol 1(3), 187-196.

Komine, H. ve Ogata, N. (1996), "Prediction for Swelling Characteristics of Compacted Bentonite", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 33(1), 11-22.

Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, New York.

Campanella, R.G. ve Mitchell, J.K. (1968), "Influence of Temperature Variations on Soil Behavior", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, Vol 94(SM3), 709-734.

Farouki, O.T. (1981), *Thermal Properties of Soils*, CRREL Monograph 81-1, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover.

Côté, J. ve Konrad, J.M. (2005), "A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 42(2), 443-458.

Gorai, B. ve Jana, R.K. (2003), "Characteristics and Utilisation of Copper Slag—A Review", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol 39(4), 299-313.

Shi, C. ve Qian, J. (2000), "High Performance Cementing Materials from Industrial Slags—A Review", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol 29(3), 195-207.

ASTM (2020), ASTM D2435/D2435M-20, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading**,** ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM (2021), ASTM D698-21, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort**,** ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.