Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

# ZEMİNİN ETKİN TERMAL İLETKENLİĞİNİN DOYGUNLUK DERECESİNE BAĞLI DEĞİŞİMİ VE ENERJİ KAZIKLARI İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ

## VARIATION OF EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF SOILS WITH DEGREE OF SATURATION AND ITS IMPLICATIONS FOR ENERGY PILE PERFORMANCE

**Nazlı ÖZEN ÇAVUŞLAR[1], Cem AKGÜNER[2], Ömer Can PAMUK[3]**

## ÖZET

Bu çalışmada kaolin, silt ve kum numunelerinin etkin termal iletkenliğinin suya doygunluk derecesine bağlı değişimi laboratuvar deneyleriyle incelenmiş ve sonuçlar enerji kazıkları açısından değerlendirilmiştir. Zemin numuneleri Proktor sıkıştırma deneylerinden elde edilen su muhtevası-kuru yoğunluk ilişkileri esas alınarak hazırlanmış ve özel olarak imal edilen silindirik numune haznesinde üç tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Lineer ısı iletim düzeneğinde deneylerin ilk 20 dakikasında yaklaşık 10,00-11,00 V ve 0,89-1,00 A uygulanmış ve buna karşılık gelen elektriksel güç 8,9–11,0 W olarak belirlenmiştir. Daha sonra gerilim ve akım yaklaşık 1,00-1,50 V ve 0,08-0,14 A aralığına, elektriksel güç ise 0,08-0,21 W seviyesine düşürülerek kararlı duruma ulaşılması beklenmiştir. Etkin termal iletkenlik ($k$) kararlı durumdaki güç ve sıcaklık farkı kullanılarak Fourier ısı iletim bağıntısından hesaplanmıştır. Sonuçlar, her üç zeminde de suya doygunluk derecesi arttıkça etkin termal iletkenliğin arttığını göstermiştir. Bu nedenle, mevsimsel değişimler de dikkate alındığında, zemin termal iletkenliğinin tüm su muhtevası veya suya doygunluk derecesi ($S_r$) koşulları için tek ve sabit bir değerle temsil edilmesi gerçek arazi koşullarını yeterince yansıtmayabileceği düşünülmektedir.
*Anahtar Kelimeler: Zemin termal iletkenliği; Doygunluk derecesi; Kararlı durum yöntemi; Enerji kazıkları; Termal zemin özellikleri*

## ABSTRACT

This study investigates the variation in the effective thermal conductivity of kaolin, silt, and sand specimens with degree of saturation through laboratory experiments and evaluates the results in terms of energy pile applications. The soil specimens were prepared based on the water content–dry density relationships obtained from Proctor compaction tests and compacted in three layers within a specially manufactured cylindrical specimen holder. In the linear heat conduction setup, approximately 10.00-11.00 V and 0.89-1.00 A were applied during the first 20 minutes of the tests, corresponding to an electrical power input of 8.9-11.0 W. The voltage and current were then reduced to approximately 1.00-1.50 V and 0.08-0.14 A, respectively, corresponding to a power level of 0.08-0.21 W, and the system was allowed to reach steady-state conditions. The effective thermal conductivity ($k$) was determined from the steady-state power input and temperature difference using Fourier's heat conduction equation. The results showed that effective thermal conductivity increased with increasing degree of saturation for all three soil types. Therefore, considering seasonal variations, representing soil thermal conductivity by a single constant value over the entire range of water content or degree of saturation ($S_r$) may not adequately reflect actual field conditions.

*Keywords: Soil thermal conductivity; Degree of saturation; Steady-state method; Energy piles; Thermal properties of soils*

1 İnşaat Mühendisi, TED Üniversitesi, nazli.ozen@tedu.edu.tr (Sorumlu yazar)
2 Doç. Dr., TED Üniversitesi, cem.akguner@tedu.edu.tr
3 Araştırma Görevlisi, TED Üniversitesi, omer.pamuk@tedu.edu.tr

# 1. GİRİŞ

Yapılarda enerji tüketiminin ve karbon salımının azaltılmasına yönelik gelişmeler, sığ jeotermal enerjinin geoteknik yapılarla birlikte kullanımını yaygınlaştırmıştır. Enerji kazıkları, yapısal yükleri zemine aktarırken kazık içerisine yerleştirilen kapalı devre borular aracılığıyla zeminle ısı alışverişi yapabilen temel elemanlarıdır. Brandl (2006) termo-aktif temel sistemlerinin çalışma prensiplerini kapsamlı biçimde ele almış, Laloui vd. (2006) ise bir ısı değiştirici kazığın termo-mekanik davranışını saha ölçümleri ve sayısal analizlerle incelemiştir. Bu çalışmalar, enerji kazığı performansında çevre zeminin termal özelliklerinin temel bir rol oynadığını göstermektedir.

Enerji kazıklarının ısı değişim kapasitesini etkileyen başlıca zemin parametrelerinden biri termal iletkenliktir (k, $k_t$). Yüksek termal iletkenlik, kazık ile çevre zemin arasındaki ısının daha etkin yayılmasını sağlarken düşük iletkenlik kazık çevresinde daha büyük sıcaklık gradyenleri oluşturabilir. Bu durum özellikle kısmen doygun, yüzeye yakın zeminlerde önemlidir. Akrouch vd. (2016), doygunluk koşullarındaki değişimin enerji kazıklarının ısı değişim hızını ve termal verimini belirgin biçimde etkileyebildiğini belirlemiştir.

Zeminlerin çok fazlı malzemeler olması nedeniyle laboratuvarda ölçülen termal iletkenlik, mineral daneler ile su ve hava fazlarının birlikte oluşturduğu ısı iletim davranışını temsil etmekte ve etkin termal iletkenlik olarak tanımlanmaktadır. Lu vd. (2007) de su muhtevası yanında kuru yoğunluk ve kum/kuvars içeriğinin termal iletkenlik tahmininde önemli olduğunu ortaya koymuştur.

Su muhtevası arttığında boşluklardaki iletkenliği nispeten düşük havanın yerini suyun alması ve daneler arasında daha sürekli ısı iletim yollarının oluşması nedeniyle termal iletkenlik genel olarak yükselmektedir. Bununla birlikte ölçülen değer kuru yoğunluk, porozite, mineralojik yapı ve dane temas koşullarından bağlı olarak değişebilmektedir. Barry-Macaulay vd. (2013), farklı zeminlerde termal iletkenliğin su muhtevası, yoğunluk, mineraloji ve dane boyutuyla değiştiğini; Yu vd. (2016) ise kum-kaolin karışımlarında su muhtevası ve kuru yoğunluk arttıkça termal iletkenliğin yükseldiğini göstermiştir.

Bu çalışmada kaolin, silt ve kumun farklı sıkışma ve doygunluk koşullarındaki etkin termal iletkenlikleri zeminlere uyarlanmış bir lineer ısı iletim deney düzeneği kullanılarak belirlenmiş ve k-$S_r$ ilişkileri enerji kazıkları açısından değerlendirilmiştir. Numuneler her zemin için elde edilen Proktor sıkıştırma eğrileri esas alınarak hazırlanmıştır. Lineer ısı iletim düzeneğine uyarlanan özel numune haznesi ve sıkıştırma aparatları kullanılmış, kararlı durum verilerinden elde edilen k değerleri tekrarlı deneylerle karşılaştırılmıştır.

# 2. ZEMİNLERDE TERMAL İLETKENLİK VE ENERJİ KAZIKLARI

## 2.1. Etkin termal iletkenliğin fiziksel temeli

Tek boyutlu iletimde ısı ile sıcaklık gradyeni arasındaki ilişki Fourier yasasıyla tanımlanmaktadır. Homojen bir malzemede k doğrudan malzeme özelliği olarak yorumlanabilirken, zeminde katı, su ve hava fazlarının birlikte etkisini içermektedir. Düşük doygunlukta iletim büyük ölçüde dane temasları üzerinden gerçekleşirken, doygunluk arttıkça gözenek suyu temas bölgelerinde termal köprüler oluşturarak iletim yollarını güçlendirmektedir. Dolayısıyla, k-$S_r$ ilişkisi zemin pürüzlülüğü, porozite ve dane temas koşullarına bağlıdır. Bu bakımdan, zeminlerin termal iletkenliklerinin değerlendirilmesinde $S_r$ değerinin yanısıra, sıkışma şartları ve dane özellikleriyle birlikte ele alınmalıdır.

## 2.2. Zemin türü, yoğunluk ve doygunluk etkisi

İnce ve iri daneli zeminlerin gözenek yapıları ve dane temas mekanizmaları farklıdır. Kumlarda kuvars gibi yüksek iletkenliğe sahip mineraller ve sıkışmayla artan temas noktaları, özellikle nemli koşullarda daha yüksek k değerlerine katkı sağlayabilir. İnce daneli zeminlerde ise özgül yüzey alanı, kil mineralleri ve karmaşık gözenek yapısı ısı iletimini farklılaştırır. Yu vd. (2016), kum-kaolin karışımlarında su muhtevası ve kuru yoğunluğun artmasının k'yı artırdığını, kil içeriğinin ise termal davranışı değiştirdiğini belirlemiştir.

Roshankhah vd. (2021), kum-silt karışımlarında etkin gerilme, kuru yoğunluk, mineralojik yapı ve gözenek akışkanının termal iletkenliği birlikte etkilediğini göstermiş; suya doygun numunelerin iletkenliğinin aynı koşullardaki hava-kuru numunelerden çok daha yüksek olabildiğini belirtmiştir. Cui ve Zhou (2022) ise kaolin, sıkıştırılmış silt ve Toyoura kumu üzerinde gerilme ile boşluk oranının birlikte etkisini incelemiş ve yüklemeyle artan dane temaslarının k'yı yükselttiğini ortaya koymuştur.

## 2.3. Ölçüm yöntemleri ve kararlı durum yaklaşımı

Zemin termal iletkenliği geçişli (transient) ısıl kaynağı/termal iğne yöntemleri, thermo-TDR sistemleri ve kararlı durum düzenekleriyle ölçülebilmektedir. Geçişli yöntemler daha hızlı sonuç elde edilmesi bakımından bir avantaj sağlamaktadır. Kararlı duruma dayalı yöntemlerde zamanla değişmeyen bir sıcaklık dağılımı oluşturularak k enerji dengesi ve sıcaklık gradyeninden hesaplandığı için gerekli süre daha uzun olmaktadır. Ölçüm süresi, temas koşulları ve yöntem varsayımları farklı olduğundan, literatürdeki mutlak k değerleri karşılaştırılırken deney yönteminin de dikkate alınması gerekmektedir.

Barry-Macaulay vd. (2013), zeminlerde termal iğne probu, kaya numunelerinde ise kararlı durum divided-bar düzeneği kullanmış ve ölçülen değerlerin nem, yoğunluk ve mineralojiden etkilendiğini göstermiştir. Alrtimi vd. (2016), ince daneli bir kum üzerinde kararlı durum divided-bar deneyleri yaparak doygunluk derecesinin termal iletkenlik üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymuştur. Kararlı duruma ulaşılıncaya kadar geçen geçici rejimde, termal iletkenliğe ek olarak zeminin özgül ısısı da sıcaklığın zamana bağlı gelişimini ve stabilizasyon süresini etkileyebilmektedir. Bu çalışmada etkin termal iletkenlik hesabı yalnızca kararlı durum ölçümlerine dayandırılmış, lineer ısı iletim düzeneği özel zemin haznesi ve gömülü termokupllarla uyarlanmıştır.

## 2.4. Enerji kazıkları açısından doygunluk değişiminin önemi

Enerji kazığı analizlerinde çevre zemin çoğu zaman sabit bir termal iletkenlikle temsil edilse de yüzeye yakın tabakalarda yağış, kuruma-ıslanma döngüleri ve yeraltı su seviyesindeki değişimler zeminin su muhtevasını değiştirebilmektedir. Bu nedenle özellikle doygun olmayan zeminlerde sahada oluşabilecek suya doygunluk derecesi aralığının dikkate alınarak termal özelliklerin değerlendirilmesi tasarım açısından önem kazanmaktadır.

Akrouch vd. (2016), doygun olmayan zeminlerdeki doygunluk değişiminin enerji kazığı ısı değişim verimini etkileyebildiğini göstermiştir. Cui vd. (2023) de zeminin gerilme ve doygunluk durumuna bağlı termal iletkenlik değişimlerinin enerji kazığı analizlerinde dikkate alınmasının önemini vurgulamıştır. Bu etkileşim çift yönlü bağlaşık bir davranış göstermektedir; doygunluk derecesi zeminin ısıl iletkenliğini etkilerken, sıcaklık gradyenleri de zemin boşluklarındaki suyun yeniden dağılımına neden olarak yerel doygunluk derecesini değiştirebilmektedir. Isıl gradyen altında nemin daha sıcak bölgelerden daha soğuk bölgelere doğru yeniden dağılması, soğuk tarafta daha yüksek yerel su muhtevası ve doygunluk

derecesi oluşmasına katkı sağlayabilir. Bu bakımdan kontrollü laboratuvar deneylerinden elde edilen k-$S_r$ ilişkileri, tek bir sabit k değeri yerine sahadaki zemin durumuna bağlı parametrelere yönelik deneysel veriler sağlayabilmektedir.

# 3. MALZEME VE YÖNTEM

## 3.1. Deney programı ve numune durumları

Bu bildiri kapsamındaki deneylerde kaolin, silt ve kum zeminler kullanılmıştır. Isıl deneylerden önce zeminlerin geoteknik karakterizasyonu ve Proktor sıkıştırma deneyleri değerlendirilmiştir. Dane özgül ağırlığı değerleri, kullanılan ticari zemin ürünleri için literatürde raporlanan veriler esas alınarak kaolin, silt ve kum için sırasıyla $G_s$ = 2,60, $G_s$ = 2,65 ve $G_s$ = 2,65 olarak kabul edilmiştir. (Ekici, 2022). Kaolin ve silt için kıvam limitleri, kum için ise maksimum-minimum boşluk oranları belirlenmiş; temel karakterizasyon sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir. Her zemin için Proktor eğrisi üzerinde optimumdan kuru tarafta, optimum/optimuma yakın ve optimumdan ıslak tarafta olmak üzere üç durum seçilmiş ve her durumda bağımsız tekrarlı ısıl deneyler yapılmıştır. $S_r$ değerleri, ilgili başlangıç su muhtevası ve kuru yoğunluk kullanılarak hesaplanmış ve en yakın tam yüzdeye yuvarlanmıştır.

Tablo 1. Zeminlerin temel geoteknik karakterizasyon sonuçları

| **Zemin** | **USGS Sınıflandırma** | **$G_s$** | **LL (%)** | **PL (%)** | **PI (%)** | **$w_{opt}$ (%)** | **$\rho_{d,max}$ (g/cm³)** | **$e_{max}$ / $e_{min}$** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kaolin | ML | 2,60 | 46,7 | 30,2 | 16,5 | 24,5 | 1,29 | - |
| Silt | ML | 2,65 | 27,3 | 24,4 | 2,8 | 20,7 | 1,51 | - |
| Kum | SP | 2,65 | - | - | - | 9,2 | 1,56 | 0,79 / 0,52 |

Isıl iletkenlik deneylerinde kullanılan ve üç tabaka halinde sıkıştırılan zemin numunelerinin parametreleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Isıl iletkenlik deneylerinde kullanılan zemin durumları

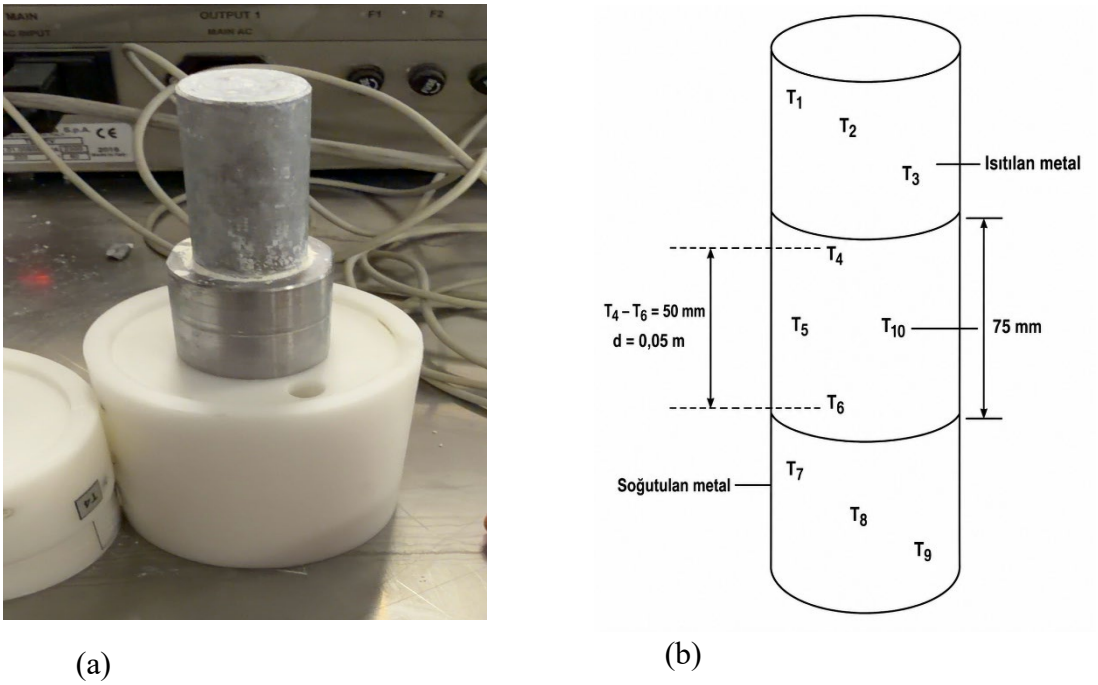
| **Zemin** | **w (%)** | **$\rho_d$ (g/cm³)** | **$S_r$ (%)** | **Proktor (%)** |
|---|---|---|---|---|
| Kaolin | 19,8 | 1,23 | 47 | 95,8 |
| | 24,5 | 1,29 | 63 | 100 |
| | 29,3 | 1,25 | 71 | 96,9 |
| Kum | 5,3 | 1,50 | 18 | 96,6 |
| | 9,2 | 1,56 | 35 | 100 |
| | 13,6 | 1,52 | 48 | 97,5 |
| Silt | 14,3 | 1,45 | 46 | 96,6 |
| | 20,7 | 1,51 | 73 | 100 |
| | 27,2 | 1,44 | 86 | 94,8 |

## 3.2. Numune hazırlama ve sıkıştırma

Isıl iletkenlik deneyleri için lineer ısı iletim düzeneğine uygun, 25 mm çapında ve 75 mm yüksekliğinde kestamit malzemeden özel silindirik bir numune haznesi imal edilmiştir. Her

deney öncesinde numunenin hazırlanması için gerekli kuru zemin miktarı, haznenin hacmi ve ilgili Proktor deneyinden elde edilen kuru yoğunluk değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra, hedeflenen su muhtevasına ulaşmak için numuneye ilave edilmesi gereken su miktarı belirlenmiş ve buna bağlı olarak toplam yaş numune belirlenmiştir. Hazırlanan malzeme, numune haznesine yerleştirilmeden önce üç eşit parçaya ayrılmıştır.

Numune haznesinin dar ve uzun bir geometriye sahip olması nedeniyle, numunenin hazne boyunca kontrollü ve benzer koşullarda sıkıştırılması amacıyla farklı uzunluklara sahip özel sıkıştırma aparatları kullanılmıştır. İlk tabakada uzun metal sıkıştırma pistonu, ikinci tabakada daha kısa metal piston ve son tabakada plastik sıkıştırma aparatı kullanılmıştır. Bu çalışmada farklı kompaksiyon enerjisi uygulama "undercompaction" yöntemi uygulanmamış, farklı uzunluktaki sıkıştırma aparatları yalnızca dar ve uzun numune haznesinde her bir tabakanın hedef seviyeye kadar sıkıştırılabilmesi amacıyla tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan özel tasarım numune haznesi, sıkıştırma aparatları ve termokupl yerleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



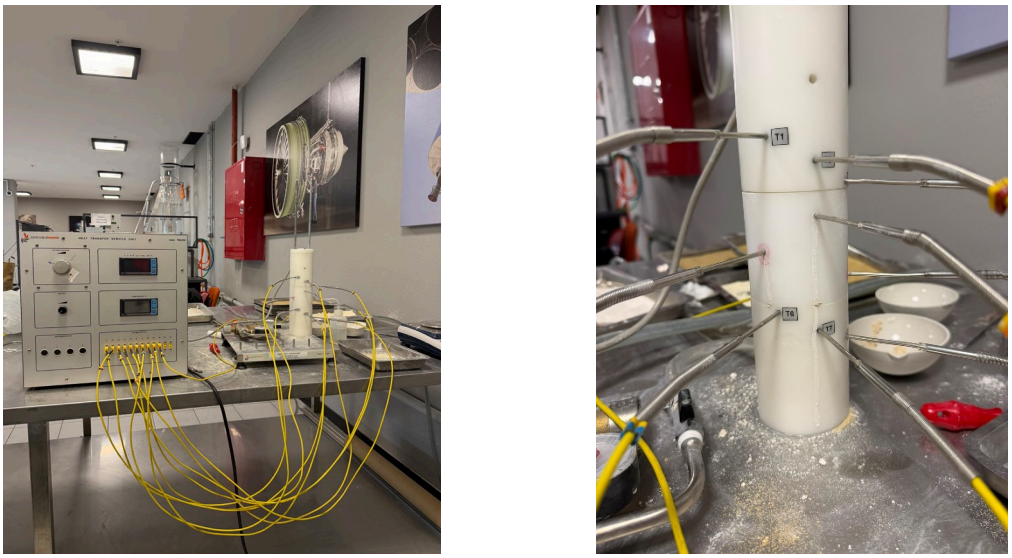

(a) (b)

Şekil 1. (a) Özel sıkıştırma aparatı ve kestamit numune haznesi; (b) hazne üzerindeki termokupl bağlantıları ve k hesabında kullanılan T4-T6 ölçüm noktaları (L=50 mm).

### 3.3. Isıl iletkenlik deney düzeneği

Isıl iletkenlik deneylerinde Elettronica Veneta ısı transfer servis ünitesi ve lineer ısı iletim modülü kullanılmıştır. Standart katı numune elemanı yerine kestamit zemin numune haznesi düzeneğe uyarlanmıştır. Düzeneğin üst ucunda numuneyi ısıtması için ısıtıcı, alt tarafında ise su dolaşımlı soğutma bölümü yer almaktadır. Hazne boyunca T1-T10 termokuplları ile sıcaklık dağılımı izlenmiş; k hesabında aralarındaki düşey mesafe 50 mm olan T4 ve T6 ölçümleri kullanılmıştır. Gerilim, akım ve termokupl sıcaklıkları deney boyunca kaydedilmiş; metal temas yüzeylerinde temas direncini azaltmak için termal temas macunu uygulanmıştır. Düzenek ve ölçüm kesiti Şekil 2'de gösterilmektedir.

Deneylerin ilk yaklaşık 20 dakikasında, numune boyunca ölçülebilir bir sıcaklık gradyenini daha kısa sürede oluşturmak amacıyla yaklaşık 10-11 V ve 0,89-1,00 A uygulanmış; buna karşılık gelen elektriksel güç yaklaşık 8,9-11,0 W olarak belirlenmiştir. Ardından gerilim ve akım azaltılmış; düşük güç aşamasında bu değerler deneye bağlı olarak yaklaşık 1,0-1,5 V ve 0,08-0,14 A aralığında kalmış ve buna karşılık gelen elektriksel güç yaklaşık 0,08-0,21 W olmuştur. Deneyler boyunca sıcaklık değerleri 2 dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Kararlı durum değerlendirmesinde T4, T5 ve T6 termokupllarının her birinin ardışık ölçümler arasındaki sıcaklık değişimi ayrı ayrı takip edilmiştir. Her bir termokupl için 2 dakikalık ölçüm aralığında sıcaklık değişiminin yaklaşık 0,2°C veya daha düşük olması ve bu davranışın ardışık olarak yaklaşık 6-8 dakika boyunca devam etmesi, sistemin kararlı duruma ulaştığının göstergesi olarak kabul edilmiştir. Etkin termal iletkenlik hesabında yalnızca bu koşulu sağlayan düşük güç aşamasındaki son kararlı durum ölçümleri kullanılmıştır. Sabitlenme dakikası kaydedilen deneylerde kararlı duruma ulaşma süresi kaolinde 48-58 dk, kumda 42-62 dk ve siltte 50-62 dk aralığında olmuştur.




(a) (b)

Şekil 2. (a) Zemin numuneleri için uyarlanan lineer ısı iletim deney düzeneği; (b) termokupl düzeneği

### 3.4. Etkin termal iletkenlik hesabı

Kararlı durumda sisteme verilen elektriksel güç, ölçülen gerilim ve akımın çarpımı ile belirlenmiştir. Isı kaynağına aktarılan elektriksel güç Q aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır:

$$Q = V\,I \tag{1}$$

Burada V gerilim (V), I akım (A) ve Q elektriksel ısı gücüdür (W). Etkin termal iletkenlik hesabında T4-T6 termokupları arasındaki sıcaklık farkı kullanılmıştır. Bu iki ölçüm noktası arasındaki mesafe L=0,05 m, numune çapı D=0,025 m ve kesit alanı $A=4{,}9087\times10^{-4}$ m²'dir. Tek boyutlu kararlı ısı iletimi kabulü altında etkin termal iletkenlik aşağıdaki Fourier bağıntısından elde edilmiştir:

$$k = (Q\,L) / (A\,\Delta T) \tag{2}$$

Burada $\Delta T = T4 - T6$, kararlı durum sıcaklık farkını ifade etmektedir. Deneyler boyunca sıcaklık değerleri 2 dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Kararlı durum değerlendirmesinde T4, T5 ve T6 termokupllarının her birinin ardışık iki ölçüm arasındaki sıcaklık değişimi ayrı ayrı izlenmiştir. Sistemin kararlı duruma ulaşmasının ardından ölçülen V, I ve $\Delta T$ değerleri etkin termal iletkenlik hesabında kullanılmıştır. $Q = VI$ bağıntısı ile belirlenen elektriksel gücün numune boyunca iletilen baskın ısı akısını temsil ettiği kabul edilmiştir. Ara yüzey etkisinin ana eğilimleri değiştirip değiştirmediği ayrıca bantlı ve bantsız (Bölüm 3.5) kontrol deneyleriyle incelenmiş; elde edilen farkın yaklaşık %5-6 düzeyinde kalması nedeniyle bu çalışma kapsamında ayrıca bir ara yüzey düzeltmesi uygulanmamıştır.

### 3.5. İzolasyon Bandı Kullanımının Ölçümlere Etkisinin Değerlendirilmesi

Kestamit numune haznesinin orta birleşim bölgesinde, numune-hazne ara yüzeyini çevreleyen ince kauçuk izolasyon bandının ölçüme ilave bir termal direnç getirip getirmediği kontrol deneyleriyle incelenmiştir. Ön kontrol ölçümünde kestamit numune haznesi malzemesi için termal iletkenlik değeri yaklaşık 0,66 W/mK mertebesinde elde edildiğinden, benzer büyüklük mertebesinde termal iletkenlik gösteren kaolin karşılaştırma malzemesi olarak tercih edilmiştir. Su muhtevası (w) ≈ %20 ve kuru yoğunluğu ($\rho_d$) ≈ 1,20 g/cm³ olan numunelerde, ana deney protokolüne karşılık gelen kontrol çiftinde bantlı ve bantsız ölçümlerde sırasıyla yaklaşık 0,88 ve 0,93 W/mK; ayrı düşük güçlü kontrol çiftinde ise yaklaşık 0,26 ve 0,28 W/mK değerleri elde edilmiştir. Endüstriyel kauçuk bileşiklerin termal iletkenliğinin, bileşimlerine bağlı olarak yaklaşık 0,15-0,40 W/mK aralığında değişebildiği bildirilmektedir (Kerschbaumer vd., 2019). Kullanılan izolasyon bandının üreticiye özgü termal iletkenlik değeri ayrıca belirlenmediğinden, söz konusu literatür aralığı herhangi bir düzeltme katsayısı olarak kullanılmamış ve değerlendirme doğrudan bantlı ve bantsız kontrol deneylerine dayandırılmıştır. Kontrol deneylerinde bantlı ve bantsız ölçümler arasında gözlenen farkın, ana deneylerde doygunluk derecesindeki değişime bağlı olarak etkin termal iletkenlikte gözlenen artışlara kıyasla daha düşük kalması nedeniyle, bu çalışma kapsamında bant etkisi için ayrıca bir termal direnç düzeltmesi uygulanmamıştır.

### 3.6. Deney sonu su muhtevası kontrolü

Deney sonrasında numunenin sıcak (ısıtıcıya yakın üst bölüm), orta ve soğuk (suyla soğutulan alt bölüm) kesimlerinden ayrı örnekler alınarak su muhtevası ölçülmüştür. Bu ölçümler, ısıl gradyen altında numune boyunca olası nem yeniden dağılımının değerlendirilmesi ve bunun sonuçların yorumuna etkisinin kontrol edilmesi amacıyla yapılmıştır. Son deney serilerinin çoğunda sıcak uçtaki su muhtevası soğuk uçtakinden bir miktar düşük bulunmuştur.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Deneylerin tekrarlanabilirliği

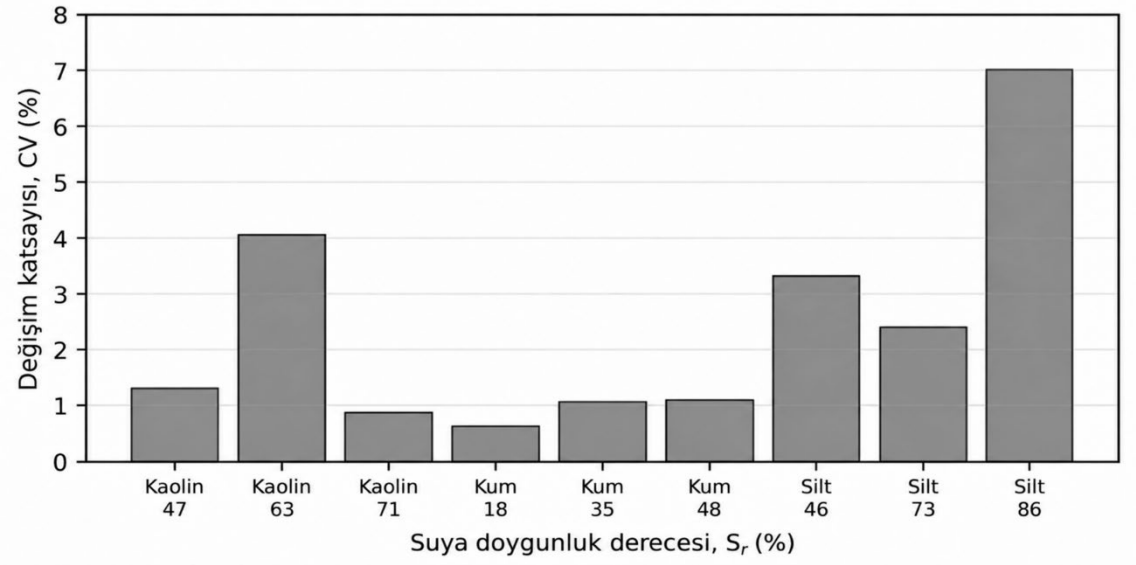
Her zemin ve su muhtevası durumu için gerçekleştirilen tekrarlı deneylerin sonucunda genel olarak birbirine yakın k değerleri elde edilmiştir. Tablo 3'te ortalama, standart sapma ve değişim katsayıları (CV) özetlenmiştir. Kaolin için CV %0,83-%4,04; kum için %0,59-%1,08; silt için ise %2,37-%7,02 aralığındadır. En yüksek fark siltin en yüksek doygunluk seviyesinde görülmüş, diğer deney gruplarında CV çoğunlukla %4'ün altında kalmıştır. Bu sonuçlar, numune hazırlama ve kararlı durum okuma prosedürünün genel olarak

tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. İstatistiksel değerlendirme, ana sonuç tablosunda yer alan k tekrarları kullanılarak yapılmıştır.

Tablolarda verilen suya doygunluk derecesi $S_r$ değerleri, deney öncesinde numune hazırlama aşamasında esas alınan başlangıç su muhtevası ve kuru yoğunluk değerlerinden hesaplanmıştır. Bu değerler deney sonu lokal su muhtevası ölçümlerini temsil etmemektedir.

Tablo 3. Tekrarlı deneylerin istatistiksel özeti

| Zemin | $S_r$ (%) | $k_{ort.}$ (W/mK) | Std. sapma | CV (%) |
|---|---|---|---|---|
| Kaolin | 47 | 0,933 | 0,012 | 1,24 |
| Kaolin | 63 | 1,133 | 0,046 | 4,04 |
| Kaolin | 71 | 1,387 | 0,012 | 0,83 |
| Kum | 18 | 0,973 | 0,006 | 0,59 |
| Kum | 35 | 1,891 | 0,020 | 1,06 |
| Kum | 48 | 2,137 | 0,023 | 1,08 |
| Silt | 46 | 1,020 | 0,034 | 3,30 |
| Silt | 73 | 1,464 | 0,035 | 2,37 |
| Silt | 86 | 1,555 | 0,109 | 7,02 |




Şekil 3. Tekrarlı deneylerde etkin termal iletkenliğin değişim katsayısı.

### 4.2. Kaolin numuneleri

Kaolin numunelerinde $S_r$=%47 düzeyinde ortalama k=0,933 W/mK elde edilirken, $S_r$=%63 düzeyinde ortalama 1,133 W/mK ve $S_r$ =%71 düzeyinde 1,387 W/mK bulunmuştur. En düşük ve en yüksek doygunluk durumları arasında etkin termal iletkenlik yaklaşık %48,6 artmıştır. $S_r$=%47 ve %71 gruplarında tekrarlı deneyler oldukça düşük farklılık göstermiştir. Optimum Proktor koşuluna karşılık gelen $S_r$=%63 grubunda farklılık bir miktar daha yüksek olmakla birlikte ortalama eğilim benzer değerlerde kalmıştır.

Kaolinde gözlenen doygunlukla bağlantılı etkin termal iletkenlik artışı, suyun gözeneklerdeki hava fazının yerini almasıyla daneler arasındaki termal bağlantıların güçlenmesi ile açıklanabilir. Yu vd. (2016), kaolin içeren kum-kil karışımlarında su

muhtevası artışının etkin termal iletkenliği artırdığını göstermiştir. Cui ve Zhou (2022) da kaolin, silt ve kumun termal iletkenliğinin zemin durumu ve temas mekanizmasına bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

### 4.3. Kum numuneleri

Kum numunelerinde suya doygunluk oranını en büyük etkiyi göstermiştir. Sonuçlarda $S_r$=%18 düzeyinde ortalama k=0,973 W/mK iken, $S_r$=%35 düzeyinde k=1,891 W/mK ve $S_r$=%48 düzeyinde k=2,137 W/mK elde edilmiştir. İncelenen aralıkta k değeri yaklaşık %119.6 artmıştır. Özellikle $S_r$=%18'dan %35'ya geçişteki keskin artış, düşük doygunluk bölgesinde gözenek suyunun dane temaslarını birbirine bağlayan termal köprüler oluşturmasının önemini göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında minerolojik bir değerlendirme yapılmamıştır. Kumun incelenen doygunluk düzeylerinde kaolin ve silte göre daha yüksek k değerleri vermesi, granüler dane temaslarının ve kumlarda bulunabilen yüksek termal iletkenlikli minerallerin olası etkileriyle uyumludur. Bununla birlikte saf kuvars mineralinin termal iletkenliği ile kum zeminin etkin termal iletkenliği birbirinden ayrılmalıdır. Zemin numunesindeki hava ve su fazları ile temas dirençleri nedeniyle etkin değer mineral danesinin iletkenliğinin oldukça altında kalmaktadır. Alrtimi vd. (2016), kararlı durum deneylerinde doygunluk derecesinin kum termal iletkenliği üzerinde belirgin etkisini göstermiştir. Roshankhah vd. (2021) de kum-silt sistemlerinde gözenek akışkanı ve dane temas koşullarının belirleyici olduğunu vurgulamıştır.

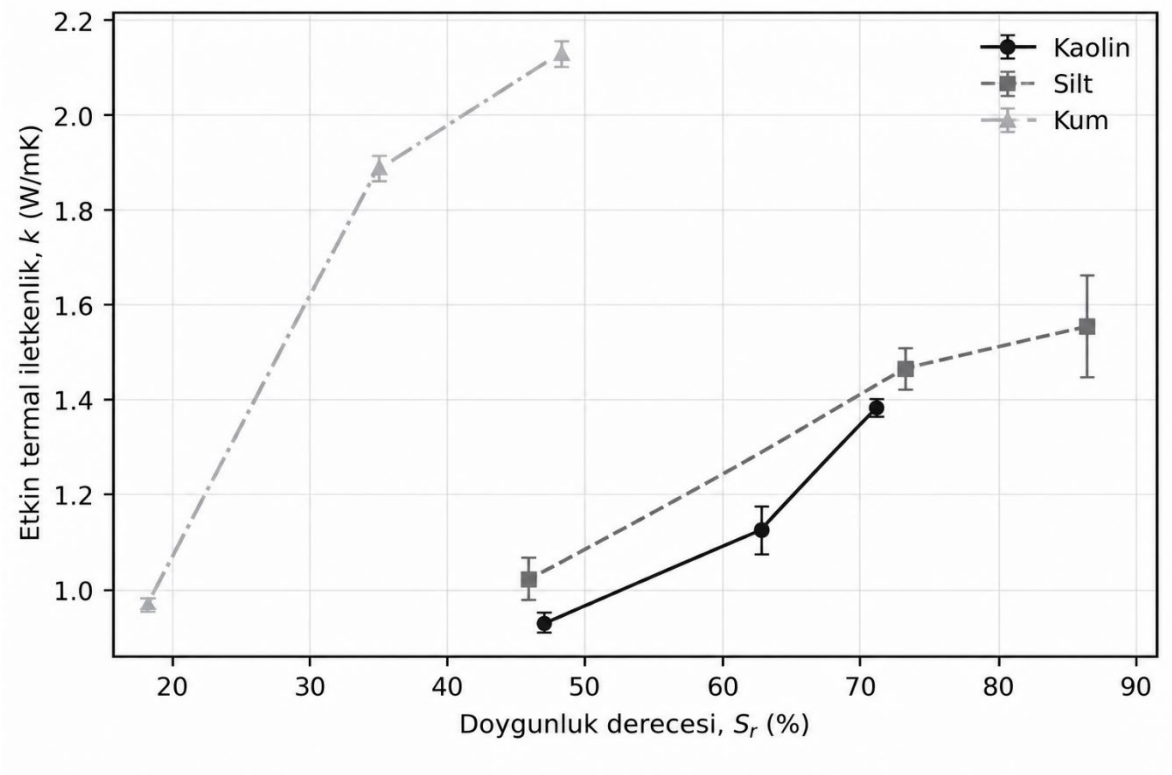
### 4.4. Silt numuneleri

Silt numunelerinde $S_r$=%46 için ortalama k=1,020 W/mK, Proktor optimumuna karşılık gelen $S_r$=%73 için k=1,464 W/mK ve daha ıslak koşuldaki $S_r$=%86 için k=1,555 W/mK elde edilmiştir. En düşük ve en yüksek doygunluk seviyeleri arasındaki artış yaklaşık %52,45'dır. $S_r$=%73'ten %86'e geçişte artışın sınırlı kalması, aynı anda kuru yoğunluğun 1,51 g/cm³'ten 1,44 g/cm³'e düşmesiyle ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla bu deney serisi, doygunluk artışının k'yı yükseltme eğilimi ile kuru yoğunluk azalmasının ters yönlü etkisinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini açık biçimde göstermektedir.

Siltin $S_r$=%86 grubunda diğer gruplara göre daha yüksek dağılım gözlenmiştir. Üç tekrar 1,681, 1,506 ve 1,479 W/mK değerlerini vermiştir. Bu değerlerin tamamı deney verisi olarak korunmuş ve ortalama hesaplamasına dahil edilmiştir. Yüksek doygunlukta numune hazırlama sırasında küçük yoğunluk farklılıkları, yerel su dağılımı veya termokupl temas koşulları farklılıkların daha belirginleşmesine neden olmuş olabilir. Bu nedenle suya doygunluk oranı yüksek silt için bildirilen ortalama değer, daha doğru bir değerlendirme yapılabilmesi için standart sapmayla birlikte verilmiştir.

### 4.5. Zeminlerin karşılaştırılması ve k-$S_r$ ilişkisi

Üç zemine ait ortalama k- $S_r$ sonuçları Şekil 4'te birlikte gösterilmiştir. Her üç zeminde de kendi deney aralığı içerisinde $S_r$ arttıkça etkin termal iletkenlik artmıştır; ancak artışın büyüklüğü zeminlere göre değişmiştir. Eğriler arasındaki farklılıklar kuru yoğunluk, dane yapısı ve mineralojinin ortak etkisini içermektedir.




Şekil 4. Kaolin, silt ve kum için ortalama etkin termal iletkenlik-doygunluk derecesi ilişkisi (hata çubukları ±1 standart sapma).

Kumda %18-%48 doygunluk aralığında k'nın iki kattan fazla artması, doygun olmayan granüler zeminlerde nem değişiminin enerji kazığı performansı açısından özellikle önemli olabileceğine işaret etmektedir. Kaolinde incelenen %47-%71 aralığında yaklaşık %52.45'lik artış, ince daneli zeminlerde de tek bir sabit k değerinin tüm suya doygunluk koşullarını temsil etmesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Siltte ise yüksek doygunlukta kuru yoğunluğun azalması, k artışını kısmen dengelemiş görünmektedir. Bu sonuç, k değerini yorumlarken $S_r$ yanında kuru yoğunluğun da göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir.

### 4.6. Enerji kazıkları için mühendislik değerlendirmesi

Enerji kazıklarının ısı değişim performansının değerlendirilmesinde, çevre zeminin termal iletkenliği önemli ve belirsizliğin en fazla olduğu tasarım parametrelerinden biridir. Bu çalışmada, aynı zeminin farklı doygunluk koşullarında ölçülen termal iletkenlik değerlerinde yaklaşık %52.5 ile %119.6 arasında değişen artışlar elde edilmiştir. Bu büyüklükteki değişimler, zeminin nem durumunun enerji kazığının çevre zeminle gerçekleştirdiği ısı alışverişini önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle yüzeye yakın ve doygun olmayan kum tabakalarında, kurak ve yağışlı dönemlere bağlı olarak su miktarındaki değişimler termal iletkenlikte belirgin farklılıklara neden olabilmektedir.

Akrouch vd. (2016), doygun olmayan zeminlerde enerji kazıklarının termal performansının doygunluk koşullarındaki değişimlerden önemli ölçüde etkilenebildiğini ortaya koymuştur. Cui vd. (2023) ise zeminin mevcut durumuna bağlı olarak değişen termal iletkenliğin enerji kazıklarının ısı transferi analizlerinde dikkate alınmasının önemine dikkat çekmiştir. Bu açıdan, enerji kazığı tasarımında çevre zemini tek bir sabit termal iletkenlik değeriyle temsil

etmek yerine, sahada oluşması beklenen doygunluk aralığını dikkate alan farklı k değerlerinin analizlerde kullanılması ile optimizasyon sağlanması daha gerçekçi sonuçların elde edilmesine katkı sağlayabilir.

# 5. SONUÇLAR

Kaolin, silt ve kum zeminlerin doygunluk derecesine bağlı etkin termal iletkenliklerini belirlemek amacıyla, Proktor deneylerinden elde edilen sıkıştırma ilişkileri esas alınarak numuneler hazırlanmış ve kararlı durum lineer ısı iletim düzeneği kullanılarak tekrarlı laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Kaolin numunelerinde $S_r$ = %47-%71 aralığında doygunluk derecesinin artmasıyla ortalama etkin termal iletkenlik 0,93 W/mK'den 1,39 W/mK'ye yükselmiş ve yaklaşık %49 oranında artış göstermiştir. Kum numunelerinde ise $S_r$ = %18-%48 aralığında ortalama k değeri 0,973 W/mK'den 2,137 W/mK'ye yükselmiş ve yaklaşık %119.6 oranında artmıştır. Bu sonuç, incelenen zeminler içerisinde kumun doygunluk değişimine karşı termal iletkenlik bakımından en yüksek duyarlılığı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Silt numunelerinde $S_r$ = %46-%86 aralığında ortalama termal iletkenlik 1,020 W/mK'den 1,555 W/mK'ye yükselmiştir. Ancak siltin yüksek doygunluk bölgesinde kuru yoğunluğun azalması, doygunluk artışının termal iletkenlik üzerindeki etkisini kısmen sınırlandırmıştır.

Tekrarlı deneylerin büyük bölümünde düşük değişim katsayıları elde edilmiştir. Kum deneylerinde değişim katsayısı (CV) yaklaşık %1 seviyesinde kalırken, kaolin ve silt deneylerinin çoğunda %4'ün altında değerler elde edilmiştir. Bu düşük farklar, kullanılan numune haznesi, üç tabakalı sıkıştırma yöntemi ve kararlı durum ölçüm yaklaşımının deneylerin tekrarlanabilirliği açısından yeterli olduğunu göstermektedir. En yüksek farklılık $S_r$ = %86 koşulundaki silt deneylerinde görülmüş ve bu grup değerlendirilirken ortalama değerle birlikte standart sapma da dikkate alınmıştır. Ayrıca kaolin üzerinde gerçekleştirilen kauçuk bantlı-bantsız kontrol deneylerinde sonuçların aynı mertebede kalması, numune orta kesitindeki ince kauçuk bandın mevcut geometri ve deney koşullarında ana ölçüm eğilimleri üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermiştir.

Genel olarak deney sonuçları, zeminlerin etkin termal iletkenliğinin doygunluk derecesine bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiğini göstermiştir. Bu değişimin büyüklüğü zemin türüne göre farklılık göstermekte ve yoğunluk gibi diğer fiziksel özelliklerden de etkilenmektedir. Özellikle doygun olmayan zeminlerin bulunduğu enerji kazığı uygulamalarında, çevre zemini tek bir sabit termal iletkenlik değeriyle temsil etmek her saha koşulu için yeterli değildir. Bu nedenle enerji kazıklarının termal performans analizlerinde zemin türü, doygunluk derecesi ve yoğunluk değişimlerinin birlikte değerlendirilmesi daha gerçekçi sonuçlar sağlayacaktır.

# KAYNAKLAR

Akrouch, G.A., Sánchez, M. ve Briaud, J.-L. (2016), "An experimental, analytical and numerical study on the thermal efficiency of energy piles in unsaturated soils", Computers and Geotechnics, Vol. 71, 207-220.

Alrtimi, A., Rouainia, M. ve Haigh, S. (2016), "Thermal conductivity of a sandy soil", Applied Thermal Engineering, Vol. 106, 551-560.

Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Singh, R.M., Wang, B. ve Ranjith, P.G. (2013), "Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region", Engineering Geology, Vol. 164, 131-138.

Brandl, H. (2006), "Energy foundations and other thermo-active ground structures", Géotechnique, Vol. 56, No. 2, 81-122.

Cui, S.Q. ve Zhou, C. (2022), "Coupled effects of stress state and void ratio on thermal conductivity of saturated soils", Géotechnique Letters, Vol. 12, No. 2, 148-153.

Cui, S.Q., Zhou, C., Liu, J.Q. ve Akinniyi, D.B. (2023), "Stress effects on thermal conductivity of soils and heat transfer efficiency of energy piles in the saturated and unsaturated soils", Computers and Geotechnics, Vol. 160, 105549.

Ekici, A. (2022), "Geotechnical properties of coarse-fine mixtures and their interaction with geogrids through large direct shear testing", Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.

Laloui, L., Nuth, M. ve Vulliet, L. (2006), "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 30, No. 8, 763-781.

Lu, S., Ren, T., Gong, Y. ve Horton, R. (2007), "An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature", Soil Science Society of America Journal, Vol. 71, No. 1, 8-14.

Roshankhah, S., Garcia, A.V. ve Santamarina, J.C. (2021), "Thermal conductivity of sand-silt mixtures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 147, No. 2, 06020031.

Yu, X., Zhang, N., Pradhan, A. ve Puppala, A.J. (2016), "Thermal conductivity of sand-kaolin clay mixtures", Environmental Geotechnics, Vol. 3, No. 4, 190-202.

Kerschbaumer, R.C., Stieger, S., Gschwandl, M., Hutterer, T., Fasching, M., Lechner, B., Meinhart, L., Hildenbrandt, J., Schrittesser, B., Fuchs, P.F., Berger-Weber, G. ve Friesenbichler, W. (2019), "Comparison of steady-state and transient thermal conductivity testing methods using different industrial rubber compounds", Polymer Testing, Vol. 80, 106121.

## SEMBOL LİSTESİ

| | | | |
|---|---|---|---|
| **A** | **Numune kesit alanı (m²)** | **$S_r$** | **Suya doygunluk derecesi (%)** |
| **D** | **Numune çapı (m)** | **V** | **Gerilim (V)** |
| **I** | **Akım (A)** | **w** | **Su muhtevası (%)** |
| **k** | **Etkin termal iletkenlik (W/(m·K))** | **$\rho_d$** | **Kuru yoğunluk (g/cm³)** |
| **L** | **Termokupllar arası mesafe (m)** | **$\Delta T$** | **Sıcaklık farkı (°C)** |
| **Q** | **Isı gücü (W)** | **CV** | **Değişim katsayısı (%)** |
| **P** | **Elektriksel güç (W)** | | |