KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(2), 2026
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 29(2), 2026
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 06.01.2026
Kabul Tarihi :17.04.2026

Received Date : 06.01.2026
Accepted Date : 17.04.2026

SICAKLIĞIN BARTIN KİLLERİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF BARTIN CLAYS

Ali Serdar KUZGUNKAYA[1] (ORCID: 0009-0009-0474-0966)
Yasin Doğukan SÜREK[1] (ORCID: 0009-0000-8816-1834)
Ömer AKMAN[1] (ORCID: 0009-0002-1139-9443)
Yüksel Samberk KIRIKCI[1] (ORCID: 0009-0003-5321-3341)
Ermedin TOTİÇ[1*] (ORCID: 0000-0002-4073-0265)

[1] Bartın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ermedin TOTİÇ, ermedintotic@bartin.edu.tr

ÖZET

Geoteknik mühendisliğinde zemin özellikleri, yapıların performansı açısından kritik öneme sahiptir. Yapıların projelendirilmesi mevcut zemin koşullarına göre yapılmaktadır. Ancak daha sonra zeminde meydana gelebilecek sıcaklık değişimleri, özellikle kil gibi su tutma kapasitesi yüksek zeminlerde, yapıların performansını olumsuz etkileyebilir. Bu çalışmada, yüksek sıcaklığın Bartın killi zemininin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bartın'dan alınan kil numunesi 20–700 °C aralığında farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış ve her bir sıcaklık seviyesi için elek ve hidrometre analizleri, kıvam limitleri, piknometre ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. TG–DTG, XRD ve SEM analizleri ile mikroyapısal değişimler incelenmiş ve geoteknik özelliklerdeki sıcaklığa bağlı farklılıklar bu dönüşümlerle ilişkilendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sıcaklık artışının zeminin geoteknik ve mineralojik özellikleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermekte olup, bu bulgular zemin mühendisliği uygulamalarında sıcaklık etkisinin dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kil zemin, sıcaklık etkisi, geoteknik özellikler, serbest basınç dayanımı, kıvam limitleri

ABSTRACT

In geotechnical engineering, soil properties play a critical role in the performance of engineering structures. The design of structures is generally carried out based on existing ground conditions. However, temperature changes occurring in clay soils with high water retention capacity may adversely affect structural performance. In this study, the effects of elevated temperature on the geotechnical properties of Bartın clay were experimentally investigated. Clay samples obtained from the Bartın region were subjected to temperatures ranging from 20 to 700 °C, and sieve and hydrometer analyses, consistency limit tests, pycnometer tests, and unconfined compression tests were conducted at each temperature level. Microstructural changes were examined using TG–DTG, XRD, and SEM analyses, and temperature-induced variations in geotechnical properties were correlated with these transformations. The results indicate that increasing temperature leads to significant changes in the geotechnical and mineralogical characteristics of the soil, highlighting the importance of considering temperature effects in geotechnical engineering applications.

Keywords: Clay soil, temperature effect, geotechnical properties, unconfined compressive strength, Atterberg limits

GİRİŞ

Mühendislik yapılarının üzerinde veya içinde imal edildiği ortam temel zemini olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin taşıma gücü mevcut zemin koşullarına ve üzerine gelen yapı yüklerine göre hesaplanmaktadır. Ancak çelikhane, dökümhane, tuğla, çimento ve kireç fabrikaları, termik santraller gibi yüksek sıcaklıkta çalışan endüstriyel tesislerin

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

yanı sıra, yangına maruz kalan yapıların temel zeminlerinde bu durum farklılık gösterebilir. Benzer şekilde, orman yangınlarından kaynaklanan sıcaklıklar da zemine 200 ila 850 °C arasında değişen bir ısı etkisi uygulayarak, yumuşak zeminlerin davranışını değiştirebilmektedir (DeBano, 2000). Yüzeysel yangınlarda sıcaklık etkisi, zeminin düşük ısı iletkenliği nedeniyle genellikle ilk 20–30 cm'lik üst tabaka ile sınırlı kalmaktadır. (Certini, 2005; DeBano, 2000). Buna karşın, endüstriyel tesisler gibi sürekli ısı kaynaklarının bulunduğu ortamlarda, ısıl yayılımın zamana bağlı etkisiyle sıcaklık değişimlerinin 1–2 metre derinliğe kadar nüfuz etmesi mümkündür (Mitchell vd., 2025; Hillel, 1998).

Sıcaklığın zeminlerin davranışı üzerindeki etkileri birçok araştırmada deneysel olarak incelenmiştir. Düşük sıcaklıklara (0–100 °C) maruz bırakılan zeminlerde kayma direnci parametrelerindeki değişimi inceleyen çalışmalar farklı sonuçlar bildirmiştir. Bazı araştırmacılar, sıcaklık artışının zeminlerin kayma dayanımını artırdığını belirtmişken (Maghsoodi vd., 2020; Abuel-Naga vd., 2007; Hueckel ve Borsetto, 1990) bazıları ise bu parametre değerlerinin azaldığını veya sıcaklıktan belirgin şekilde etkilenmediğini ifade etmiştir (Yavari vd., 2016; Cekerevac ve Laloui, 2004; Graham 2001; Burghignoli vd., 2000; Lingnau vd., 1996; Hueckel ve Borsetto, 1990).

Buna karşın, yüksek sıcaklıklara maruz kalan zeminlerin davranışı konusunda literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Wohlbier ve Henning (1969) kaolinit killerinde 400 °C'ye kadar değişim gözlenmezken, 500 °C'de plastik özelliklerin kaybolduğunu ve mukavemetin arttığını rapor etmiştir. Wang vd., (1990) ise kaolinit ve bentonit killerinde 400–500 °C aralığında mukavemet artışı ve plastisite azalması gözlemiş; bentonit 600 °C'de plastik olmayan bir yapıya dönüşerek orta düzeyde dayanım kazandığını belirmiştir. Tan vd., (2004), yüksek plastisiteli killerin likit limit, plastik limit, optimum su içeriği ve özgül ağırlık değerlerindeki değişimleri incelemiş ve 100–400 °C aralığında belirgin azalmalar, daha yüksek sıcaklıklarda ise sınırlı değişimler gözlemlemiştir.

Abu-Zreig vd., (2001), optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış zemin numunelerinde serbest basınç dayanımını incelemiş; sıcaklık arttıkça dayanımın kademeli olarak azaldığını ve 400 °C'de tamamen kaybolduğunu rapor etmiştir. Polat (2009), farklı zemin türlerine ait sıkıştırılmış numunelere 100–1050 °C aralığında ısıl işlem uygulayarak serbest basınç dayanımı ile kıvam limitlerindeki değişimleri araştırmıştır. Sonuçları, sıcaklık arttıkça killi zeminlerin serbest basınç dayanımının yükseldiğini, killi kumlarda ise azaldığını, ayrıca tüm zeminlerde kıvam limitlerinin 400 °C civarında sıfırlandığını göstermiştir. Yılmaz (2011) ise kaolinit ve bentonitin 100–600 °C aralığında ısıl işlem sonrası geoteknik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, kaolinitin 400 °C'de, bentonitin 500 °C'de plastik özelliklerini kaybettiği ve artan sıcaklıkla birlikte tane büyüklüğünde artışın ortaya çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca, 400 °C'ye kadar her iki kilin şişme davranışının azaldığı ve içsel sürtünme açısında belirgin değişimler tespit edilmiştir.

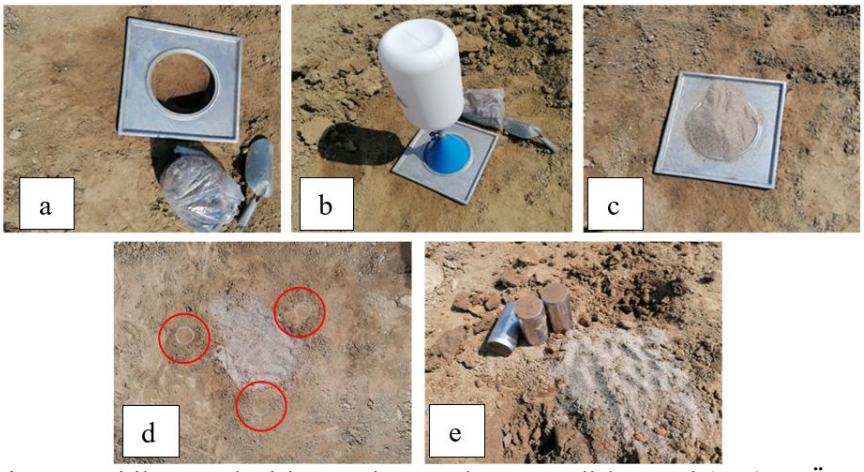
Tüm bu araştırmalara karşın, sıcaklığın zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisi konusunda literatürde ortak bir görüş birliği bulunmamaktadır. Farklı ve kimi zaman çelişkili sonuçların, zeminlerin mineralojik bileşimi ile yapısal özelliklerindeki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum, sıcaklığın zemin davranışına etkisinin daha kapsamlı biçimde araştırılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu zemini iyileştirmek amacıyla ısıl işlemi uygulamış; dayanım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan numuneler ise genellikle maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış ve ısıl işlem sonrasında su etkisi dikkate alınmadan kuru halde test edilmiştir. Ancak bu yaklaşım, doğal zemin koşullarını tam olarak yansıtmamaktadır. Killi zeminlerin nem kaybı sonucunda büzülerek sertleştiği ve bu etkinin artan sıcaklıkla daha belirgin hale geldiği bilinmektedir. Oysa arazi koşullarında sıcaklık etkisi kalıcı değildir ve sıcaklık normale döndüğünde zemin yeniden su alarak doğal su muhtevasına ulaşmakta, buna bağlı olarak kazandığı geçici dayanımı büyük ölçüde kaybetmektedir.

Bu çalışma, geçici yüksek sıcaklıklara maruz kalan Bartın killi zeminlerinin geoteknik özelliklerini deneysel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, sıcaklık artışının zeminin tane boyu dağılımı, kıvam limitleri ve serbest basınç dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, SEM, XRD ve TG-DTG analizleri ile zemin numunelerindeki mikroyapısal değişimler incelenmiş ve elde edilen bulgular geoteknik özelliklerdeki değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Uygulanan yöntemler, endüstriyel tesisler veya yangınlar sonucu oluşan geçici yüksek sıcaklıkların doğal zemin koşullarındaki davranışını açıklığa kavuşturarak, bu tür koşullarda zemin davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalarda kullanılan zemin numunesi, Bartın İli yerleşim alanı içerisinde, Bartın Çayı'nın batı kıyısında yer alan alüvyon sahadaki bir inşaat kazı çukurundan alınmıştır (Şekil 1). İlk aşamada, kazı çukuru tabanında kum konisi yöntemi uygulanarak zeminin doğal birim hacim ağırlığı belirlenmiştir (Şekil 2a–c). Kum konisi deneyi sırasında açılan çukurun çevresinden, iç çapı 38 mm ve boyu 76 mm olan keskin uçlu ince cidarlı metal numune alıcıları kullanılarak üç adet örselenmemiş numune alınmıştır (Şekil 2d–e). Ayrıca sahadan yaklaşık 30 kg kadar örselenmiş numune de alınmıştır. Tüm numuneler, su kaybının önlenmesi amacıyla naylon torbalarla sarılarak muhafaza edilmiş ve Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na götürülmüştür.

Şekil 1. Numunenin Alındığı Lokasyonun Harita Üzerindeki Görünümü



Şekil 2. Kum Konisi Yöntemi ile Doğal Birim Hacim Ağırlığının Belirlenmesi (a–c) ve Örselenmemiş Numune Alınması (d–e)

Örselenmemiş zemin numuneleri, hidrolik pres yardımıyla örselenmeye neden olmayacak şekilde numune alıcılardan çıkarılmış, hassas bir terazide tartılmış ve çap ile boyları ölçülerek doğal birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler, arazide belirlenen doğal birim hacim ağırlığı ile karşılaştırılarak doğrulanmış ve numuneler daha sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.

Çalışma kapsamında, örselenmiş numuneden temsili bir miktar alınmıştır. Bu numune üzerinde kıvam limitleri deneyleri yapılmış, doğal birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Geri kalan numune üç gün boyunca açık havada kurutulmuş ve topak kalmayacak şekilde el ile ufalanmıştır. Ufalanan numune, farklı sıcaklık etkilerini değerlendirebilmek üzere yaklaşık 2,5–3 kg'lık sekiz parçaya ayrılmıştır. Bu parçaların ikisi 24 saat boyunca 50 °C ve 105 °C'de etüvde kurutulmuş, diğer altı parça ise her biri farklı sıcaklıklarda (200, 300, 400, 500, 600 ve 700 °C) sıcaklık–zaman kontrollü yüksek ateş fırınında 6 saat bekletilmiştir. Isıl işlem süresi belirlenirken, yapı yangınlarına ilişkin standartlarda (NFPA 251; Eurocode 1, EN 1991-1-2) yaygın olarak kullanılan ve üst sınır dayanım süresi olarak kabul edilen 4 saat esas alınmıştır. Bununla birlikte, yangın sonrası taşıyıcı sistemin göçmesi durumunda enkaz içerisinde devam eden yanma ve korlaşma süreçleri nedeniyle zeminin yüksek sıcaklığa maruz kalmasının bir süre daha devam edebileceği göz önünde bulundurularak (Antonio Certini, 2005), ısıl etkinin

zamana bağlı gelişimini temsil edecek şekilde süre 6 saat olarak seçilmiştir. Isıl işleme tabi tutulan numuneler desikatörde soğutulduktan sonra, 105 °C ve üzerindeki sıcaklıklara maruz kalanlara elek ve hidrometre analizi, kıvam limitleri, piknometre ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Daha düşük sıcaklıklara maruz kalan numuneler üzerinde, ilgili standartlar gereği yalnızca kıvam limitleri ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Zemin numunesine ait fiziksel özellikler Tablo 1'de, kimyasal bileşim ise özel bir laboratuvarda gerçekleştirilen X-Ray Fluorescence (XRF) analizi ile belirlenmiş ve Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmada uygulanan deneysel program Tablo 3'te özetlenmiş, numune hazırlama süreci ve deneysel prosedür ise Şekil 3'te gösterilmiştir. Isıl işlem uygulanmamış numuneler için sıcaklık değeri, yaklaşık ortam sıcaklığı olan 20 °C olarak kabul edilmiştir. Elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limitleri ve piknometre deneyleri TS 1900-1 standardına, serbest basınç deneyi ise TS 1900-2 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklığın zeminin mekanik davranışı üzerindeki etkisinin örselenmemiş zemin üzerinden değerlendirilmesi teorik olarak daha uygun bir yaklaşım olsa da mevcut laboratuvar koşullarında ısıl işlem sırasında örselenmemiş numunelerin doğal su içeriklerini koruyacak bir donanım bulunmamaktadır. Bu nedenle, çalışmada serbest basınç deneyleri örselenmiş ve doğal birim hacim ağırlığında yeniden sıkıştırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Örselenmiş zemin için hazırlanan serbest basınç deney numunelerine, doğal su muhtevasına eşdeğer miktarda su ilave edilmiş ve doğal birim hacim ağırlığına ulaşacak şekilde üç tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Bu amaçla, önceden hesaplanan toplam numune kütlesinin üçte biri tartılarak, iç çapı 38 mm ve yüksekliği 76 mm olan özel tasarlanmış metal kalıba yerleştirilmiş ve hacminin üçte birini dolduracak şekilde hidrolik pres ile kontrollü bir biçimde sıkıştırılmıştır. Tabakalar arasında süreksizlik oluşmasını önlemek için birinci ve ikinci tabakaların sıkıştırılmasından sonra üst yüzeyleri spatula ile hafifçe çizilerek pürüzlendirilmiştir Serbest basınç deneyleri, 0,76 mm/dk. gerinim hızıyla, tam otomatik bilgisayar kontrollü GEOCOMP LoadTrac II cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deney her seriden üçer numune üzerinde uygulanmış ve sonuçlar ortalama değerler üzerinden değerlendirilmiştir.

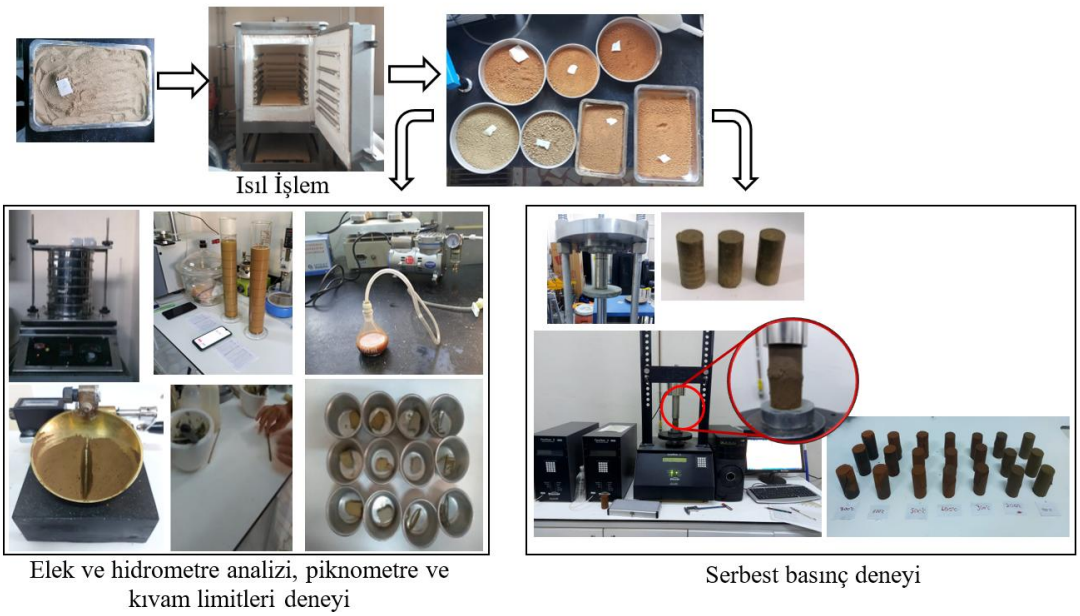
Bu çalışmada, sıcaklık değişimine bağlı olarak geoteknik özelliklerde meydana gelen değişimlerin mikroyapısal değişimlerle ilişkilendirilebilmesi amacıyla, numuneler üzerinde Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda ek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, kilin termal davranışını incelemek için 105 °C'de kurutulmuş numune üzerinde TG-DTG analizi uygulanmıştır. Mineralojik dönüşümlerin belirlenebilmesi amacıyla, 105 °C'de kurutulmuş numune ile 700 °C'de ısıl işleme tabi tutulmuş numune üzerinde kalitatif X-Ray Difraksiyon (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, 105 °C ve üzerindeki sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerde yüzey morfolojisi ve dokusal değişimleri incelemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Ayrıca, karbonatlı fazların varlığını ve sıcaklığa bağlı ayrışmasını nitel olarak değerlendirmek amacıyla, 105 °C ve 700 °C'de işlem görmüş numuneler üzerinde seyreltik HCl ile köpürme testi uygulanmıştır.

Tablo 1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Zemin Örneğine Ait Fiziksel Özellikleri

Parametre	**Değer**
Kum (>0,75 mm) (%)	3,9
Silt (0,75-0,002 mm) (%)	61,1
Kil (<0,002 mm) (%)	35,0
LL (%)	48,9
PL (%)	25,5
PI (%)	23,4
γ_n (kN/m^3)	19,52
w (%)	29,21
γ_s (kN/m^3)	26,75
Zemin Grup Sembolü (USCS)	CL

Tablo 2. Zemin Numunesinin Oksit Kompozisyonu

Parametre	SO_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	Na_2O	SiO_2	SrO	BaO	Cr_2O_3	K_2O	MnO	P_2O_5	TiO_2
İçerik (%)	0,075	13,79	9,9	1,52	5,6	0,54	52,81	0,032	0,076	0,026	2,18	0,091	0,13	0,76



Şekil 3. Deneysel Yöntemin Şematik Gösterimi

Tablo 3. Deneysel Çalışmalar Programı

Deney	Sıcaklık (˚C)									Standard
	Oda Sıcaklığı (≈20°C)	50	105	200	300	400	500	600	700	
Elek Analizi	-	-	x	x	x	x	x	x	x	TS 1900-1
Hidrometre Analizi	-	-	x	x	x	x	x	x	x	TS 1900-1
Piknometre	-	-	x	x	x	x	x	x	x	TS 1900-1
Likit Limit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	TS 1900-1
Plastik Limit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	TS 1900-1
Serbest Basınç	x	x	x	x	x	x	x	x	x	TS 1900-2
SEM	-	-	x	x	x	x	x	x	x	-
TG-DTG	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-
XRD	-	-	x	-	-	-	-	-	x	-

BULGULAR VE TARTIŞMA

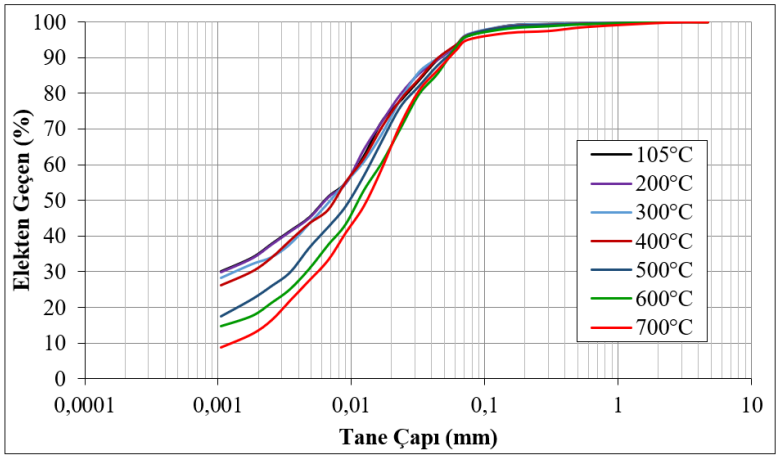
Çalışma kapsamında yapılan tane boyu dağılımına yönelik elek ve hidrometre analizleri ile kıvam limitleri ve piknometre deney sonuçları Tablo 4'te, tane boyu dağılım eğrileri ise Şekil 4'te sunulmuştur. Isıl işleme tabi tutulmayan ve 50 °C'de kurutulan numunelere ait tane boyu dağılımı ile tane birim hacim ağırlığı değerlerinin, TS 1900-1 standardı gereği 105 °C'de kurutulan numunelerden elde edilen sonuçlarla eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. Piknometre deney sonuçları, sıcaklık artışının zemin tane birim hacim ağırlığında belirgin bir değişime yol açmadığını göstermiştir.

Elek analizi ve kıvam limitleri deney sonuçları esas alınarak yapılan Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre, 20–500 °C aralığında ısıtılan numuneler düşük plastisiteli kil (CL), 600 ve 700 °C'de ısıtılan numuneler ise düşük plastisiteli silt (ML) grubunda yer almaktadır. Tablo 4 ve Şekil 4 incelendiğinde, 200 °C'den sonra artan sıcaklıkla birlikte kil boyutundaki tane oranının azaldığı, buna karşılık silt fraksiyonunun arttığı görülmektedir. Bu değişim; yüksek sıcaklıklarda meydana gelen su kayıplarının, kil minerallerinin ara katman yapılarını bozması, tabakalar arası mesafenin azalması ve tanelerin birbirine yapışarak silt boyutunda topaklar oluşturmasıyla açıklanabilir. Söz konusu topaklanmanın kıvam özelliklerine yansıdığı, Tablo 4 ve Şekil 5'te görüldüğü üzere likit limit ve plastisite indisi değerlerinden anlaşılmaktadır. Likit limit 105 °C'ye kadar hızlı bir şekilde azalmış, 105–600 °C aralığında ise belirgin bir değişim göstermemiştir. Buna karşılık, 700 °C'de zemin plastik özelliğini tamamen kaybetmiştir. Bu bulgular, Yılmaz (2011) tarafından kaolinit bazlı killerde rapor edilen plastiklik kaybı ve agregasyon eğilimleriyle paralellik göstermektedir. Kaolinit mineralinin 400–600 °C sıcaklık aralığında dehidroksilasyon süreci sonucunda kristal yapısını kaybederek amorf metakaolin fazına dönüştüğü bilinmektedir. Bu çalışmada 700 °C'de

gözlenen plastiklik kaybı ve zeminin ML sınıfına dönüşümü, literatürde tanımlanan bu mineralojik faz değişimi ve kil parçacıklarının yüksek sıcaklık etkisi altında geri dönüşümsüz agregasyonu ile açıklanabilir. Nitekim Bartın killerinde gözlenen bu yapısal dönüşüm, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde detaylandırılan mikroyapısal analiz bulguları (bkz. Şekil 9 ve 10) ile de desteklenmektedir.

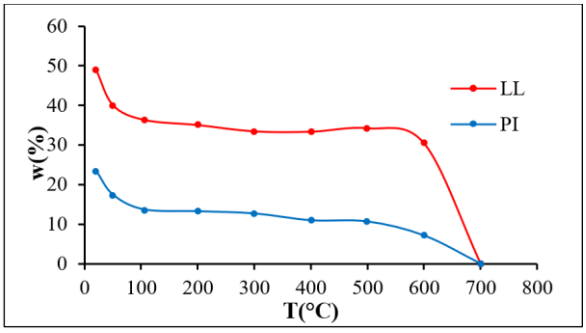
Tablo 4. Tane Boyu Analizi, Kıvam Limitleri ile Piknometre Deney Sonuçları

Sıcaklık (°C)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL	PL	PI	γ_s (kN/m^3)	Zemin Grup Sembolü (USCS)
20	3,9	61,1	35,0	48,9	25,5	23,4	26,75	CL
50	3,9	61,1	35,0	40,7	22,6	18,1	26,75	CL
105	3,9	61,1	35,0	36,3	22,6	13,7	26,75	CL
200	4,0	61,1	34,9	34,9	21,8	13,1	26,88	CL
300	3,4	63,9	32,7	33,4	20,7	12,7	26,83	CL
400	3,6	65,0	31,4	33,3	22,4	10,9	26,93	CL
500	3,7	73,1	23,2	34,2	23,6	10,6	26,85	CL
600	3,9	78,1	18,0	30,4	23,3	7,1	26,78	ML
700	4,9	79,5	15,6	NP	NP	NP	26,77	ML

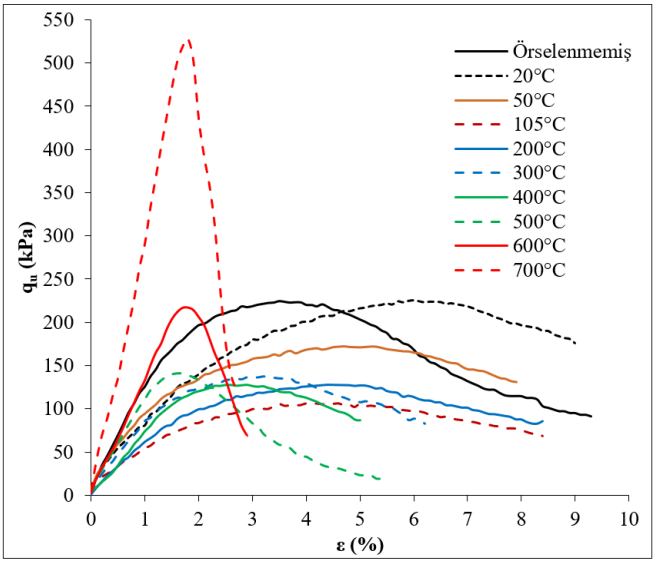


Şekil 4. Farklı Sıcaklıklara Maruz Kalmış Kil Numunesine Ait Tane Boyu Dağılım Eğrileri

Serbest basınç deneyi öncelikle örselenmemiş numune ile doğal birim hacim ağırlığı ve su içeriğinde yeniden sıkıştırılmış numune üzerinde uygulanmıştır. Çalışmanın devamında, farklı sıcaklıklarda ısıtılmış numuneler üzerinde de aynı deney gerçekleştirilmiş ve elde edilen gerilme–şekil değiştirme eğrileri Şekil 6'da sunulmuştur. Sonuçlar, örselenmemiş numune ile ısıl işlem görmemiş yeniden sıkıştırılmış numunenin serbest basınç dayanımlarının yaklaşık 225 kPa ile birbirine eşit olduğunu, ancak yeniden sıkıştırılmış numunenin daha sünek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, yeniden sıkıştırılmış numunelerde rijitliğin sıcaklık artışıyla birlikte belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir.

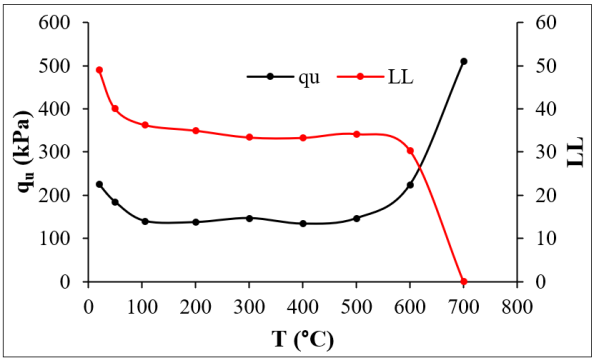


Şekil 5. Deneyde Kullanılan Numunelerinin LL ve PI Sıcaklığa Göre Değişimi



Şekil 6. Çalışmada Yapılan Serbest Basınç Deney Sonuçları

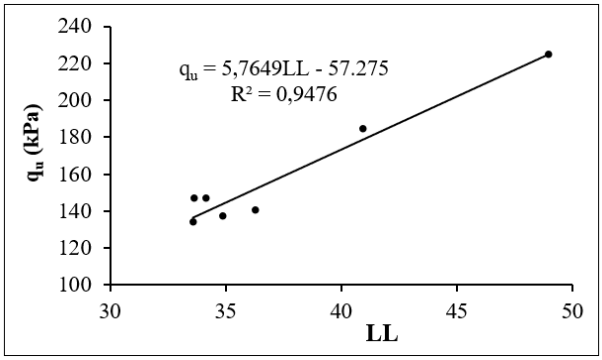
Sıcaklığın zemin davranışı üzerindeki etkisini daha iyi değerlendirebilmek amacıyla, farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelere ait serbest basınç deney sonuçları likit limit değerleri ile birlikte Şekil 7'de sunulmuştur. Isıl işlem görmemiş (20 °C) yeniden sıkıştırılmış numunenin serbest basınç dayanımı 225 kPa iken, bu değer 105 °C'de 140,14 kPa'a düşmüştür. Bu ani dayanım kaybı, ısıl işlemle birlikte kil minerallerini çevreleyen adsorbe suyun ve kısmen çift tabaka suyunun kalıcı olarak incelmesi sonucunda taneler arası kohezyonun zayıflaması ile açıklanabilir. Düşük sıcaklıklarda meydana gelen bu yapısal bozulma, kil parçacıkları arasındaki elektriksel çekim kuvvetlerini ve su tutma kapasitesini zayıflatarak taneler arası bağların gevşemesine yol açmaktadır. Bu değişim, zemin matrisinin daha düşük su içeriklerinde likit limit sınırına ulaşmasına ve eş zamanlı olarak serbest basınç dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Literatürde, killerin düşük sıcaklıklarda (100–200 °C) kurutulmasının parçacıkların yeniden düzenlenmesine ve dayanım kaybına yol açabileceği bildirilmiştir (Abuel-Naga vd., 2007). TG–DTG analizlerinde (bkz. Şekil 9) 105 °C'ye kadar gözlenen kütle kaybı, bu sıcaklıkta suyun uzaklaşmasının zemin matrisinde fiziksel değişimlere yol açtığını desteklemektedir.



Şekil 7. Sıcaklığın Serbest Basınç Dayanımı ve Likit Limit Değerlerine Etkisi

105–500 °C aralığında serbest basınç dayanımında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Bu sıcaklık aralığında SEM görüntülerinde (bkz. Şekil 11) kil plakalarında kademeli bir bozulma gözlenmesine rağmen, mikroyapısal bütünlüğün büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Bu durum, geoteknik özelliklerde önemli bir değişimin meydana gelmemesinin temel nedeni olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, 20–500 °C aralığında likit limit ile serbest basınç dayanımı arasında güçlü bir korelasyon gözlenmiş olup (Şekil 8), zemin plastikliğinin bu sıcaklık aralığında mekanik davranış üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. 500 °C'nin üzerinde gerçekleştirilen ısıl işlemle birlikte serbest basınç dayanımında belirgin bir artış gözlenmiştir. 600 °C'de dayanım224,22 kPa'a yükselmiş, 700 °C'de ise 509,17 kPa'a ulaşmıştır. Buna karşılık, 700 °C'de plastik özelliklerini tamamen kaybeden numunenin yüksek serbest basınç dayanımı sergilemesi; numunedeki %15,6 oranındaki kil fraksiyonunun (bkz. Tablo 4) zemin matrisini bir arada tutmaya yetecek bağlayıcı etkiyi koruması, kil plakaları arasındaki su kaybına bağlı olarak bağ yapısının yeniden düzenlenmesiyle tane boyutunun artması ve gelişen ısıl kaynaklı pekleşme ile açıklanabilir. Bu mekanik davranış, mikroyapı düzeyinde gerçekleşen geri dönüşümsüz bir değişime işaret etmekte olup, SEM görüntülerinde

(bkz. Şekil 11) gözlenen taneler arası sinterleşme (kaynaşma) bulgularıyla uyumludur. Söz konusu fiziksel kenetlenme, XRD analizlerinde (bkz. Şekil 10) belirlenen kaolinitin dehidroksilasyonu (Grim, 1968) ve kalsitin termal ayrışma (dekarbonizasyon) süreci (Karunadasa vd., 2019; Rodriguez-Navarro vd., 2009) ile mineralojik düzeyde desteklenmektedir. Literatürde, killi zeminlerin yüksek sıcaklıklarda plastik özelliklerini kaybederek belirgin bir mukavemet artışı sergilediği (Polat, 2009; Wang vd., 1990; Wohlbier ve Henning, 1969) ve yüksek sıcaklıkların kil parçacıkları arasında sinterleşme benzeri bağ oluşumlarını teşvik ederek zemin iskeletini daha rijit bir yapıya dönüştürdüğü rapor edilmiştir. Bartın killerinde 700 °C'de gözlenen bu gelişim, literatür bulgularıyla uyumlu olup, doğal zemine kıyasla yaklaşık 2,3 katlık bir dayanım artışı ile sonuçlanmıştır.

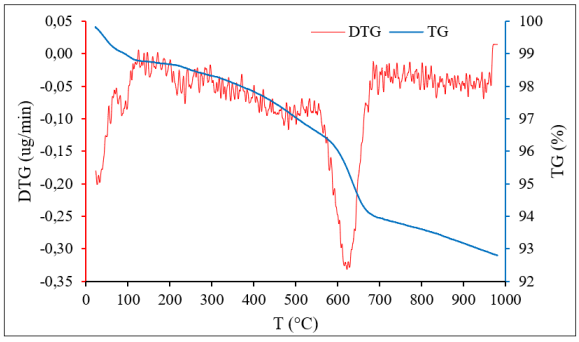


Şekil 8. 20–500 °C Aralığında Isıl İşlem Görmüş Numunelerde Likit Limit ile Serbest Basınç Dayanımı İlişkisi

Bartın killerinin sıcaklığa bağlı geoteknik özelliklerindeki değişimleri mikroyapısal dönüşümlerle ilişkilendirmek amacıyla, TG–DTG analizleri ile 105 ve 700 °C'de ısıl işlem görmüş numunelere ait XRD paternleri ve 105–700 °C aralığında ısıl işlem uygulanmış numunelerin SEM görüntülerine ait bulgular aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

TG–DTG eğrileri (Şekil 9), kil numunesinin 20–1000 °C aralığında çok kademeli bir kütle kaybı davranışı sergilediğini göstermektedir. İlk kütle kaybı 20–130 °C aralığında meydana gelmiş olup yaklaşık %1 düzeyindedir. Bu da serbest ve adsorbe suyun uzaklaşmasına karşılık gelmektedir (Grim, 1968). Bunu 130–590 °C aralığında gerçekleşen daha yavaş ve toplamda %2–2,5 düzeyindeki bir kütle kaybı izlemektedir. Bu kütle kaybı, illit ve kaolinit minerallerinin kademeli dehidroksilasyon süreciyle ilişkilidir (Liu vd., 2015). 590–680 °C aralığındaki ani kütle kaybı ise kaolinitin metakaolin benzeri amorf faza dönüşümünü **(**Brown ve Brindley, 1980) ve zemindeki karbonat fazının, özellikle kalsitin, termal ayrışma sürecine girmeye başladığını göstermektedir.

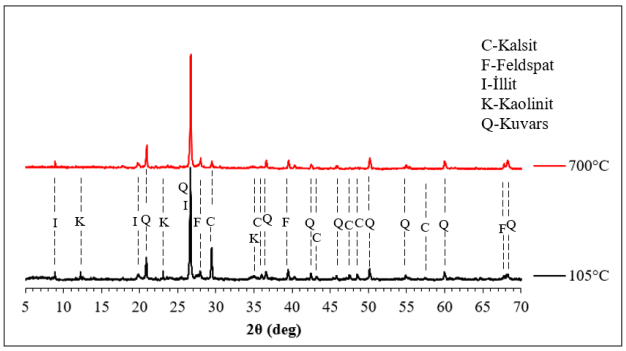
Kalsitin termal ayrışma sıcaklığı, mineralin saflığı, kristal boyutu, ısıtma hızı ve atmosfer koşullarına bağlı olarak yaklaşık 700–750 °C aralığında başlamaktadır (Karunadasa vd., 2019; Rodriguez-Navarro vd., 2009). Öte yandan Zhuang vd. (2025), bu sürecin yaklaşık 590 °C civarında başlayabileceğini bildirmiştir. Bu çalışma kapsamında 580–690 °C aralığında gözlenen kütle kaybı, kaolinitin metakaolinit fazına dönüşümü ile karbonatların (özellikle kalsit) termal ayrışmasının başlamasına karşılık gelmektedir. Öte yandan 700–1000 °C aralığında TG eğrisinde yalnızca yaklaşık %1'lik ek bir kütle kaybının görülmesi, dehidroksilasyonun büyük ölçüde tamamlandığını ve karbonatların önemli bir kısmının 600–700 °C aralığında ayrıştığını göstermektedir. TG eğrisindeki toplam kütle kaybının sınırlı düzeyde kalması ise kildeki kaolinit ve illit katkılarının nispeten düşük olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 9. Bartın Kil Numunesine Ait TG–DTG Eğrileri

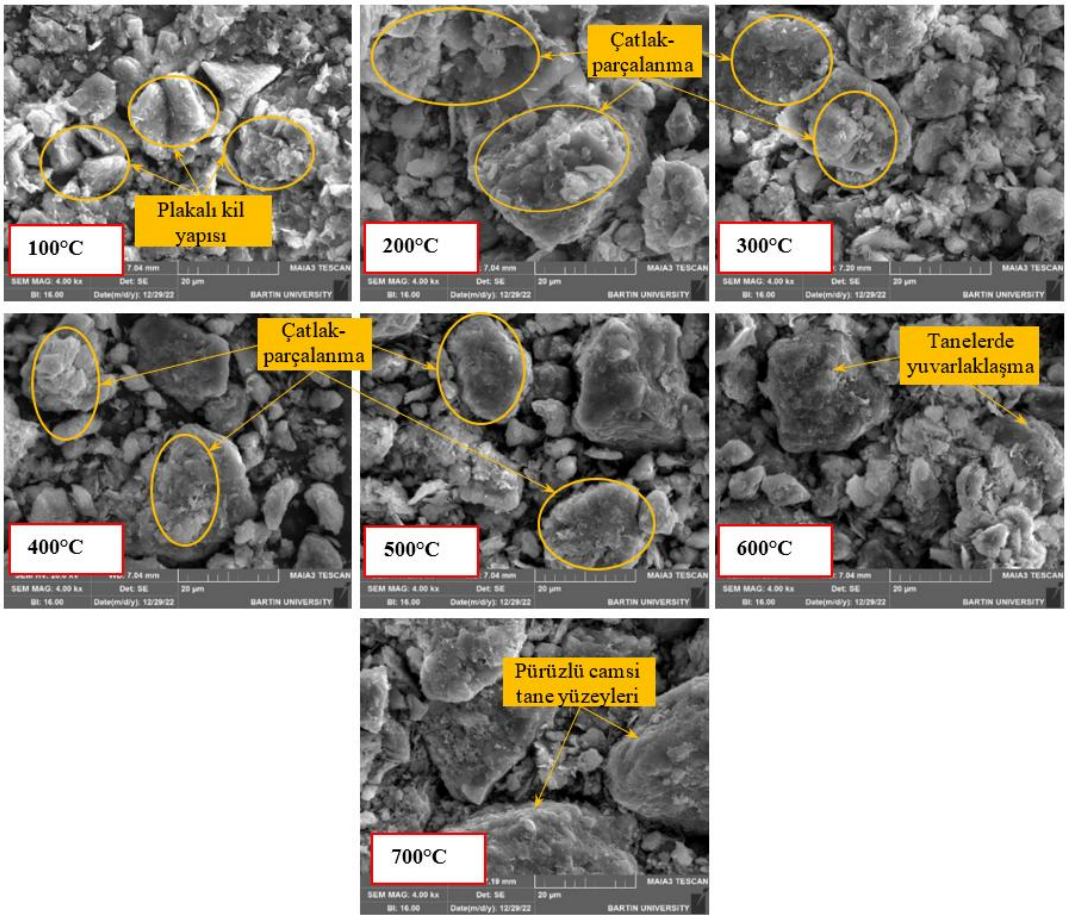
XRD paternleri (Şekil 10), TG–DTG analizlerinden elde edilen mineralojik dönüşümleri doğrulamaktadır.700 °C'de kaolinitin piklerinin (2θ≈12,3°, 21,1° ve 35,02°) tamamen kaybolması ve kalsit piklerinin belirgin biçimde

zayıflaması (2θ≈29,4°) veya ortadan kalkması (2θ≈23,02°, 36,04°, 43,25°, 47,31°, 48,65°, 57,56°), bu minerallerin ilgili sıcaklıklarda geçirdiği yapısal bozulmayı teyit etmektedir. Ayrıca HCl testi sırasında 105 °C numunesinde gözlenen yoğun köpürmeye karşın 700 °C numunesinde köpürmenin belirgin biçimde azalması, kalsitin büyük ölçüde ayrıştığını desteklemektedir.



Şekil 10. 105 °C ve 700 °C'de Isıl İşlem Görmüş Bartın Kil Numunelerine Ait XRD Paternleri

SEM görüntüleri (Şekil 11) incelendiğinde, tüm numunelerde topaklanmış tane yapısının genel olarak korunduğu, ancak sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzey morfolojisinde belirgin değişimlerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. 105 °C'de tabakalı kil yapısının büyük ölçüde korunduğu ve yalnızca yüzeylerde hafif büzülme izleri görülmüştür. 200–600 °C sıcaklık aralığında kil plakalarının düzeni giderek bozulmuş, plaka kenarlarında çatlama ve parçalanmalar gelişmiş ve yüzeyler düzensiz, kırıklı bir morfoloji kazanmıştır. Bu aralıkta, özellikle 500 °C'den itibaren plakaların kenarlarında belirgin yuvarlaklaşmalar oluşmuş ve keskin köşeler giderek kaybolmuştur. Eş zamanlı olarak, kil plakalarının kısmen kaynaşması sonucu oluşan topaklar daha kompakt bir yapı kazanmaya başlamıştır. 700 °C'de ise artan sıcaklığın etkisiyle topak yapıları belirgin biçimde pekleşmiş ve yüzeyler sinterleşmeye bağlı olarak camsı ve pürüzlü bir morfoloji kazanmıştır.



Şekil 11. Farklı Sıcaklıklarda Isıl İşleme Tabi Tutulan Bartın Kil Numunelere Ait x4000 SEM Görüntüleri

Deneysel bulgular bir arada değerlendirildiğinde, sıcaklık etkisinin üç temel sıcaklık aralığında farklı davranışlar sergilediği görülmektedir. Birinci aralıkta (20–105 °C), su kaybı ve sınırlı yapısal değişimlere bağlı olarak likit limit ile serbest basınç dayanımı değerlerinde belirgin düşüşler izlenmektedir. İkinci aralıkta (105–500 °C), kil plakalarında kademeli bir bozulma gözlenmesine karşın mikroyapısal bütünlük büyük ölçüde korunmakta ve bu nedenle geoteknik özelliklerde kayda değer bir değişim oluşmamaktadır. Üçüncü aralıkta (600–700 °C) ise taneler arası kaynaşma eğilimleri ve sinterleşmeye bağlı pekleşme belirginleşmekte, serbest basınç dayanımında dikkate değer bir artış gözlenmektedir. Bu sıcaklık aralığında kaolinit yapısının kaybolması ve karbonatların ayrışması ile birlikte tanelerin pekleşmesi ve pürüzlü, camsı yüzeylerin oluşması, zeminin su tutma kapasitesinin azalmasına ve plastik davranışın kaybolmasına yol açarken, aynı mikroyapısal değişimlerin serbest basınç dayanımındaki artışı desteklediği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, sıcaklığın Bartın killerinin mineralojik, mikroyapısal ve geoteknik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu; bu etkinin hem kütle kaybı davranışında hem kristal yapıda hem de mekanik parametrelerde açık biçimde izlenebildiği ortaya konulmuştur.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Bartın killi zemin numunelerinin 20–700 °C aralığındaki sıcaklık etkisi altında geoteknik davranışları incelenmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte kil minerallerindeki yapısal su kaybı ve ara katman bağlarının yeniden düzenlenmesi, tanelerin birbirine yapışarak daha büyük parçacıklar oluşturmasına ve kil fraksiyonu içeriğinin 20 °C'deki %35'ten 700 °C'de %16'ya gerilemesine yol açmıştır. Buna karşın, tane birim hacim ağırlığında sınırlı bir değişim gözlenmiştir.

Düşük sıcaklıklarda (20–105 °C), su kaybı ve hafif yapısal bozulmalar likit limit ve serbest basınç dayanımında hızlı bir azalmaya neden olurken, orta sıcaklıklarda (105–500 °C) kil plakalarının kademeli bozulmasına rağmen mikroyapısal bütünlük büyük ölçüde korunmuş ve geoteknik özelliklerde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

Yüksek sıcaklıklarda (600–700 °C) kaolinitin dehidroksilasyonu ve kalsitin kısmi termal bozulması ile birlikte tanelerde meydana gelen pekleşme ve camsı–pürüzlü yüzeylerin oluşumu, serbest basınç dayanımının artmasına ve kilin plastik özelliklerini kaybetmesine yol açmıştır. Bu sıcaklıkta serbest basınç dayanımı, doğal zemine göre yaklaşık 2,5 kat artmıştır.

TG–DTG, XRD ve SEM bulguları, gözlemlenen bu davranış değişimlerini desteklemiş, sıcaklığa bağlı mineralojik ve mikroyapısal dönüşümleri ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, geçici yüksek sıcaklık koşullarının Bartın killi zeminlerinin geoteknik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına önemli bir katkı sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK-2209-A - Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Proje No: 1919B012302213) kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, mali desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

KAYNAKLAR

Abu-Zreig, M. M., Al-Akhras, N. M., & Attom, M. F. (2001). Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils. Applied Clay Science, 20(3), 129–135. https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00066-7

Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Bouazza, A., & Ramana, G. V. (2007). Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling. Canadian Geotechnical Journal, 44(8), 942–956. https://doi.org/10.1139/t07-031

Brown, G., & G.W. Brindley. (1980). X-ray diffraction procedures for claymineral identification. In Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification, edited by G.W. Brindley and G. Brown, 305-359. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.

Burghignoli, A., Desideri, A., & Miliziano, S. (2000). A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils. Canadian Geotechnical Journal, 37(4), 764–780. https://doi.org/10.1139/t00-010

Cekerevac, C., & Laloui, L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28(3), 209–228. https://doi.org/10.1002/nag.332

Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. Oecologia, 143(1), 1-10. https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8

DeBano, L. F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. Journal of Hydrology, 231, 195–206. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-3

EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European Committee for Standardization (CEN).

Graham, J., Tanaka, N., Crilly, T., & Alfaro, M. (2001). Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays. Canadian Geotechnical Journal, 38(3), 608–621. https://doi.org/10.1139/t00-125

Grim, R. E. (1968). Clay mineralogy. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York.

Hillel, D., 1998. Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations, 771 pp. Academic Press, San Diego, California.

Hueckel, T., & Borsetto, M. (1990). Thermoplasticity of saturated soils and shales: constitutive equations. Journal of geotechnical engineering, 116(12), 1765-1777. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:12(1765)

Karunadasa, K. S. P., Manoratne, C. H., Pitawala, H., & Rajapakse, R. M. G. (2019). Thermal decomposition of calcium carbonate (calcite polymorph) as examined by in-situ high-temperature X-ray powder diffraction. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 134, 21–28. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.05.023

Lingnau, B. E., Graham, J., Yarechewski, D., Tanaka, N., & Gray, M. N. (1996). Effects of temperature on strength and compressibility of sand-bentonite buffer. Engineering Geology, 41(1–4), 103–115. https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00028-3

Liu, X., Liu, X., & Hu, Y. (2015). Investigation of the thermal behaviour and decomposition kinetics of kaolinite. Clay Minerals, 50(2), 199–209. https://doi.org/10.1180/claymin.2015.050.2.04

Maghsoodi, S., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2020). Thermal effects on mechanical behaviour of soil–structure interface. Canadian Geotechnical Journal, 57(1), 32–47. https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0583

Mitchell, J. K., Soga, K., & O'Sullivan, C. (2025). Fundamentals of soil behavior. John Wiley & Sons.

NFPA 251. (2021). Standard methods of fire tests of building construction and materials. National Fire Protection Association.

Polat, O. (2009). Killi zeminlerin mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklık ile iyileştirilmesi (Tez No. 259397) [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Rodriguez-Navarro, C., Ruiz-Agudo, E., Luque, A., Rodriguez-Navarro, A. B., & Ortega-Huertas, M. (2009). Thermal decomposition of calcite: Mechanisms of formation and textural evolution of CaO nanocrystals. American Mineralogist, 94(4), 578–593. https://doi.org/10.2138/am.2009.3021

Tan, Ö., Yılmaz, L., & Zaimoğlu, A. S. (2004). Variation of some engineering properties of clays with heat treatment. Materials Letters, 58(7–8), 1176–1179. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.08.030

Wang, M. C., Benway, J. M., & Arayssi, A. M. (1990). The effect of heating on engineering properties of clays. In Physico-chemical aspects of soil and related materials. ASTM International.

Wohlbier, H., & Henning, D. (1969). Effect of preliminary heat treatment on the shear strength of kaolinite clay. Highway Research Board Special Report, 103.

Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J. M., & Hassen, G. (2016). Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil–structure interface. Canadian Geotechnical Journal, 53(7), 1186–1194. https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0355

Yılmaz, G. (2011). The effects of temperature on the characteristics of kaolinite and bentonite. Scientific Research and Essays, 6(9), 1928–1939. https://doi.org/10.5897/SRE10.727

Zhuang, D., Chen, Z., & Sun, B. (2025). Thermal Decomposition of Calcium Carbonate at Multiple Heating Rates in Different Atmospheres Using the Techniques of TG, DTG, and DSC. Crystals, 15(2). https://doi.org/10.3390/cryst15020108