

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ KAZIKLARI VE SAYISAL MODELLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Utku Furkan ÇAKIR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

TEMMUZ 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ KAZIKLARI VE SAYISAL MODELLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Utku Furkan ÇAKIR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sedat SERT

TEMMUZ 2025

Utku Furkan ÇAKIR tarafından hazırlanan “ENERJİ KAZIKLARI VE SAYISAL MODELLEMESİ” adlı tez çalışması 07.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı **Geoteknik** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Sedat SERT (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Kurban ÖNTÜRK Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ENERJİ KAZIKLARI VE SAYISAL MODELLEMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(07/07/2025).

Utku Furkan ÇAKIR







TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince geoteknik mühendisliği alanında kazandığım bilgi ve deneyimlerde büyük katkısı bulunan, tez çalışmam boyunca da değerli görüş ve yönlendirmeleriyle her zaman yanımda olan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Sedat SERT'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Sayısal modelleme sürecindeki katkılarından ötürü Arş. Gör. Eylem ARSLAN'a da içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, yüksek lisans öğrenimim sırasında geoteknik alanındaki temel bilgilerimi oluşturmamda önemli rol oynayan ve derslerinde kazandırdıklarıyla mesleki altyapımı güçlendiren Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK ve Prof. Dr. Ertan BOL'a da teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Son olarak, eğitim hayatım boyunca bana daima maddi ve manevi destek sağlayan, her koşulda yanımda olan sevgili aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Utku Furkan ÇAKIR



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Geotermal Enerji Kazıkları	2
1.2. Tezin Amacı	3
1.3. Literatür Araştırması	3
1.4. Hipotez	11
2. GEOTERMAL ENERJİ KAZIKLARI VE UYGULAMA ALANLARI	13
2.1. Geotermal Enerji Kazıklarının Çalışma Prensipleri	13
2.1.1. Isı transfer süreci	13
2.1.1.1. Isı değişim boruları	13
2.1.1.2. Zeminin termal özellikleri	16
2.1.1.3. Enerji döngüsü	17
2.1.1.4. Sezonluk kullanımı	19
2.1.1.5. Tasarıma dayalı faktörler	19
2.1.2. Isı pompası entegrasyonu	21
2.1.3. Döngüsel enerjinin kullanılması	22
2.1.4. Sistemin verimliliği ve uzun vadedeki performansı	22
2.2. Geotermal Enerji Kazıklarının Uygulama Alanları ve Örnek Projeler	23
3. ENERJİ KAZIKLARININ SAYISAL MODELLEMESİ	25
3.1. Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)	25
3.2. Sonlu Hacim Yöntemi (FVM)	26
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)	27
4. HASSASLIK VE PARAMETRE DEĞİŞİMİ ANALİZİ	29
4.1. Hassaslık Analizi	29
4.2. Parametre Değişimi Analizi	33
4.3. Plaxis Programında Hassaslık ve Parametre Değişimi Analizi	34
5. MALZEME VE YÖNTEM	37
5.1. Vaka Analizi	37
5.2. Sayısal Modelleme	39
5.2.1. Zemin ve enerji kazığının modellenmesi	39
5.2.2. Geometri ve sonlu eleman ağı	41
5.2.3. Modele ait kademeli inşaat aşamaları	43
5.2.4. Hassaslık ve parametre değişimi analizi	45

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	47
6.1. Sayısal Modelin Doğrulanması ve Temel Bulgular	47
6.2. Hassaslık ve Parametre Değişimi Analizi Sonuçları	55
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	69



KISALTMALAR

2D	: İki boyutlu
3D	: Üç boyutlu
BC	: Sınır koşulu
COP	: Enerji performans katsayısı
COV	: Parametre değişim katsayısı
EPFL	: İsviçre Lozan Federal Teknoloji Enstitüsü
FDM	: Sonlu farklar yöntemi
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi
FVM	: Sonlu hacim yöntemi
GEP	: Geotermal enerji kazıkları
GSHP	: Yer kaynaklı ısı pompası
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
K	: Kelvin
PE	: Polietilen
PEX	: Çapraz bağlı polietilen



SİMGELER

ρ_s	: Katı yoğunluğu [kg/m ³]
c'_{ref}	: Kohezyon [kN/m ²]
c_s	: Isı kapasitesi [J/kg/K]
E'_{ref}	: Elastisite modülü [kN/m ²]
e_{init}	: Başlangıç boşluk oranı
$K_{0,x}$	: Yanal toprak basıncı katsayısı
k_x	: Yanal geçirimlilik katsayısı [m/s]
R_{inter}	: Arayüzey dayanım azaltma katsayısı
α_{sv}	: Termal genleşme katsayısı [1/K]
γ_{sat}	: Doygun birim hacim ağırlık [kN/m ³]
γ_{unsat}	: Doygun olmayan birim hacim ağırlık [kN/m ³]
ϵ_v	: Düşey birim şekil değiştirme
η_{SR}	: Hassaslık oranı
η_{SS}	: Hassaslık sayısı
λ_s	: Termal iletkenlik [W/m/K]
ν	: Poisson's Oranı
ϕ'	: Kayma direnci açısı [°]
ψ	: Kabarma açısı [°]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Geotermal enerji kazıklarına ilişkin sahada gerçekleştirilmiş çalışmalar. .	5
Tablo 1.2. Geotermal enerji kazıklarına ilişkin laboratuvar çalışmaları.	8
Tablo 1.3. Geotermal enerji kazıklarına ilişkin sayısal modelleme çalışmaları.	9
Tablo 2.1. Zeminlerin termal özellikleri (Yoon ve ark., 2022; Cableizer, 2025; Engineering Toolbox, 2025).	17
Tablo 4.1. Farklı zemin özellikleri ve arazi deneyleri için değişim katsayısı değerleri.	30
Tablo 5.1. Enerji kazığının sayısal modellemesinde kullanılan zemin özellikleri. ...	40
Tablo 6.1. Hassaslık analizi sonuçları (kazık başı deplasman kriteri).	57



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Enerji kazığı konfigürasyonları (Fadejev (2017)'den uyarlanmıştır).	14
Şekil 2.2. Enerji kazığı döngü sistemi (Sani ve ark. (2019)'tan uyarlanmıştır).	22
Şekil 4.1. Hassaslık matrisinin oluşturulması.	32
Şekil 4.2. İncelenen değişkenlere ait bağıl hassaslık değerlerinin dağılımı.	33
Şekil 5.1. Örnek vaka çalışmasına ait zemin profili.	38
Şekil 5.2. Örnek vaka çalışmasında kazığa uygulanan sıcaklık döngüsü.	41
Şekil 5.3. Sayısal modellemeye ait; a) geometri, b) sonlu eleman ağı.	43
Şekil 6.1. Kazık başında oluşan düşey deplasmanların zamana bağlı değişimi.	48
Şekil 6.2. Zemin katmanları boyunca farklı derinlik ve döngülerde oluşan birim şekil değiştirmeler.	50
Şekil 6.3. Kazık boyunca oluşan sıcaklık dağılımı; a) ısıtma döngüsünün ilk aşaması (aşama 2), b) ısıtma döngüsünün devamı (aşama 3), c) soğutma aşamasının ilk kısmı (aşama 4), d) soğutma aşamasının son kısmı (aşama 5).	51
Şekil 6.4. Deforme olmuş sonlu eleman ağı; a) ısıtma döngüsünün ilk aşaması (aşama 2), b) ısıtma döngüsünün devamı (aşama 3), c) soğutma aşamasının ilk kısmı (aşama 4), d) soğutma aşamasının son kısmı (aşama 5).	52
Şekil 6.5. Düşey deplasmanların dağılımı; a) ısıtma döngüsünün ilk aşaması (aşama 2), b) ısıtma döngüsünün devamı (aşama 3), c) soğutma aşamasının ilk kısmı (aşama 4), d) soğutma aşamasının son kısmı (aşama 5).	53
Şekil 6.6. Yatay deplasmanların dağılımı; a) ısıtma döngüsünün ilk aşaması (aşama 2), b) ısıtma döngüsünün devamı (aşama 3), c) soğutma aşamasının ilk kısmı (aşama 4), d) soğutma aşamasının son kısmı (aşama 5).	54
Şekil 6.7. Parametre değişimi analizleri sonucu elde edilen kazık başı düşey deplasmanların zamana bağlı değişimi.	59



ENERJİ KAZIKLARI VE SAYISAL MODELLEMESİ

ÖZET

Geotermal enerji kazıkları, yapıların zaten ihtiyaç duyduğu temel kazıklarının içine yerleştirilen ısı değiştirici boru devreleri aracılığıyla yeraltı ile ısı etkileşim kuran ve böylece binanın ısıtma-soğutma gereksinimini karşılayan, aynı zamanda taşıyıcı işlevini eksiltmeden sürdüren bütünleşik sistemlerdir. Temel elemanları ile ısıtma-soğutma altyapısının aynı gövdede buluşturulması, ilave alan gereksinimini en aza indirirken yeraltının yıl boyunca nispeten kararlı sıcaklık rejiminden yararlanmayı mümkün kılmaktadır. Bu sayede geleneksel mekanik sistemlere olan bağımlılık azalır, enerji daha verimli kullanılır, işletme sürekliliği ve konfor koşulları daha dengeli bir biçimde sağlanır. Sistemin temel mantığı, kapalı devre borularda dolaştırılan ısı taşıyıcı akışkanın zeminden ısı çekmesi veya fazlalık ısıyı zemine aktarması üzerine kurulur; böylece yapının taşıyıcı güvenliği ile ısıl performansı aynı strüktürel çözüm içinde uyumlu şekilde yönetilir. Kurgu olarak basit görünen bu yaklaşım, malzeme seçiminden boru düzenine, akış hızından zemin türüne kadar pek çok etmenin birlikte optimize edilmesini gerektirir ve doğru tasarlandığında hem ilk yatırım hem de yaşam döngüsü maliyetleri açısından rasyonel bir denge sunar.

Küresel ölçekte artan enerji talebi, kentleşmenin yoğunlaşması ve yapı stokunun verimlilik odaklı dönüşümü, temelde enerji üreten çözümlere olan ilgiyi düzenli biçimde artırmaktadır. Bu bağlamda geotermal enerji kazıkları, düşük çevresel etki hedefleriyle uyumlu, yerel ve güvenilir bir ısı kaynak sunmaları, mimari-yapısal sistemle doğal yoldan bütünleşmeleri ve farklı iklim bölgelerine uyarlanabilir olmaları nedeniyle sürdürülebilir temel teknolojileri arasında belirgin bir seçenek hâline gelmiştir. Yeni yapılarda tasarımdan itibaren entegre edilebilmeleri, yerinde inşa süreçleriyle eşzamanlı yürütülebilmeleri ve uzun hizmet ömürleri boyunca öngörülebilir bir enerji performansı sağlamaları, bu sistemleri hem teknik hem de ekonomik bakımdan cazip kılar. Ayrıca, proje ölçeğinde yapılacak doğru zemin etütleri, dikkatli termal tasarım ve düzenli izleme-işletme uygulamaları ile geotermal enerji kazıkları, yapının tüm kullanım süresi boyunca kararlı bir ısı altyapı sağlayarak sürdürülebilirlik hedeflerine somut katkı verir ve zemin-yapı-enerji etkileşiminin çok disiplinli olanaklarını etkin biçimde kullanır.

Bu çalışmanın temel amacı, enerji kazıklarının gerçek saha koşullarında maruz kaldığı termal çevrimler altındaki davranışını yüksek doğrulukta yeniden üretmek ve tasarım parametrelerinin göreceli etkisini nicelleştirmektir. Bu kapsamda, Lozan Federal Teknoloji Enstitüsü (EPFL) kampüsünde inşa edilmiş tam ölçekli betonarme enerji kazığı Plaxis 2D yazılımında eksenel simetrik sonlu eleman modeliyle temsil edilmiştir. Kazık-zemin geometrisi, kaya-alüvyon-moren tabakalarının stratigrafisi, ısıtma-soğutma döngülerinin süresi ve genliği, kazığa gömülü çift-U boru sistemi ve sınır koşulları sahadan elde edilen verilerle birebir uyumlu olacak biçimde tanımlanmıştır. İnşaat, iksa ve yükleme adımlarının kademeli olarak modellenmesi sayesinde kazığın inşa sürecinden servis aşamasına kadar tüm termomekanik yolculuğu ayrıntılı biçimde yakalanmıştır.

Model kalibrasyonu, kazığa yerleştirilen çok noktalı ekstansometreler, gömülü sıcaklık sensörleri ve başlık seviyesindeki deplasman ölçerlerden toplanan veriler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar hem literatürde raporlanan benzer çalışmalarla hem de EPFL sahasında daha önce yürütülmüş yerinde testlerin çıktılarıyla karşılaştırıldığında yüksek ölçüde tutarlılık sergilemiştir. 21 K’lık kontrollü ısıtma evresi, kazık başında yaklaşık 4 mm kabarmaya neden olmuş, bunu izleyen soğutma evresinde deformasyonun büyük kısmı geri dönmüş; ancak üst alüvyon tabakalarında küçük fakat kalıcı bir oturma bileşeni kalmıştır. Düşey şekil değiştirmelerin büyük bölümünün yumuşak alüvyon katmanlarında yoğunlaştığı, rijit moren tabakalarının ise bu deformasyonları kısıtladığı gözlenmiştir. Yatay deplasmanlar ikincil düzeyde kalmakla birlikte, kazığın yanal stabilitesine dair erken uyarı niteliğinde veriler sunmuştur.

Hassaslık analizinde, kazık betonu ile altı zemin tabakasına ait elastisite modülü, Poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı, kabarma açısı ve yatay geçirgenlik katsayısı tek tek, diğer tüm girdiler sabit tutularak gerçekçi minimum-maksimum sınırlar içinde değiştirilmiştir. Boyutsuz duyarlılık skorları, her iki ısı evrede de kazık başı deplasmanını belirleyen temel değişkenin kazığın elastisite modülü olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, üstteki alüvyon tabakalarının elastisite modülü ile sürtünme açısı ve orta derinlikteki moren tabakasının Poisson oranı ikincil ama kayda değer etkiler sergilemiştir. Kohezyon ile geçirgenlik katsayısı ise incelenen $\pm$ %20 aralıklarında sınırlı bir etki ortaya koymuştur. Tamamlayıcı parametre değişim senaryolarında oluşturulan “en düşük” ve “en yüksek” deplasman durumları, en olumsuz kombinasyonun dahi kazık başı kabarmayı 0,3 mm’den fazla değiştirmediğini ortaya koyarak; orta büyüklükteki termal yüklemeler altında rijit zemin profilinin servis deplasmanlarını parametre belirsizliklerine karşı büyük oranda duyarsız bıraktığını doğrulamıştır.

Elde edilen bulgular, enerji kazıklarının hem yapısal hem de ısıl performansını iyileştirmek için kazık rijitliğinin, boru konfigürasyonunun ve zemin tabakalarının kesme parametrelerinin birlikte optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, üst alüvyon katmanlarında tespit edilen kalıcı deformasyon bileşeni, tekrarlayan termal çevrimlerin ilerleyen yıllarda birikerek servis performansını etkileyebileceğini işaret etmektedir; bu nedenle, proje bazlı maksimum/minimum ΔT senaryolarının tasarım aşamasında mutlaka analiz edilmesi önerilmektedir. Çalışma, sahadan doğrulanmış ayrıntılı model yaklaşımı ve kapsamlı hassaslık değerlendirmesiyle model doğrulama metodolojisine katkı sağlamakta ve enerji kazıkları için kritik tasarım parametrelerinin önceliklendirilmesine rehberlik etmektedir. Gelecekte daha yüksek sıcaklık genlikleri, boru-beton-zemin etkileşimlerinin ayrıntılı termohidrolik modellemesi ve kazık grubu davranışına odaklanacak araştırmaların, yerinde performans tahminlerini daha da geliştirmesi beklenmektedir. Bu çerçevede, uluslararası tasarım standartlarının enerji kazıkları özelinde güncellenmesi ve performans temelli kabul kriterlerinin netleştirilmesi önemli bir araştırma ihtiyacı olarak ortaya çıkmaktadır. Uzun vadeli saha izleme verilerinin çok merkezli veri tabanlarında birleştirilmesi, model kalibrasyonunu güçlendirecektir. Böylelikle enerji kazıkları, karbon ayak izi açısından sorun teşkil etmeyen (sıfır karbon) kentler hedefi doğrultusunda hem sürdürülebilir enerji altyapısının hem de dayanıklı zemin-yapı sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşeni olmaya adaydır.

ENERGY PILES AND NUMERICAL MODELING

SUMMARY

Geothermal energy piles are hybrid foundation elements in which conventional reinforced-concrete piles incorporate looping heat-exchange pipes that carry a circulating fluid. By shifting heat to or from the soils these foundations serve simultaneously as structural supports and ground-source heat exchangers, enabling buildings to satisfy heating and cooling demands with minimal reliance on fossil fuels. The resulting decrease in operational energy consumption and greenhouse-gas emissions positions energy piles among the most promising low-carbon solutions for sustainable urban development, and their dual function has consequently attracted growing research attention. In essence, geothermal energy piles turn an unavoidable structural component into an active energy device, aligning foundation design with the goals of low-carbon construction. Their seamless integration, modest additional cost, and potential for year-round renewable heating and cooling place them among the most promising technologies for sustainable buildings, inspiring continued innovation at the crossroads of geotechnics, energy engineering, and environmental architecture.

Interest in energy piles is rising fast because they interest many fields at once. Geotechnical engineers look at how repeated heating and cooling change the grip between pile and soil and how much the pile settles over time. Heat-transfer specialists test different pipe layouts, grouts, and control settings to store or release heat without harming the structure. Urban designers see whether these piles can plug into local heating-and-cooling networks where normal geothermal wells will not fit. Today, teams mix data from field tests, lab experiments, and computer models to understand how heat, water, and soil stresses interact and to draft clear rules that keep the piles both strong and energy-efficient.

The study presented in this thesis numerically reproduces a full-scale field experiment conducted at the Lausanne Federal Institute of Technology. An axisymmetric finite-element model was constructed in PLAXIS to replicate, in every essential detail, the geometry of the cast-in-place pile, the stratified soil profile, the staged construction procedure, and the imposed thermal cycles that raised the pile-fluid temperature by approximately twenty-one kelvins before allowing it to return toward equilibrium. All thermal and mechanical parameters were assigned from site measurements or laboratory characterisation in order to minimise epistemic uncertainty and permit rigorous comparison with previous numerical investigations and with the high-resolution extensometer, strain-gauge and thermistor records obtained during the field test.

Computation shows that the imposed heating produced an upward displacement of roughly four millimetres at the pile head, reflecting thermal expansion of both concrete and the surrounding ground. Cooling reversed most of this uplift, yet a small residual settlement remained, indicating that cyclic thermal loading can induce irreversible strains that may accumulate over the service life of a ground energy system. The simulated time-displacement curve and the depth dependent axial strain profile match

very closely the results reported by reported works for the same site, and they fall within the scatter of the numerical predictions published by other colleagues as well as the measured extensometer data. This agreement confirms that the adopted material models and boundary conditions capture the essential thermo-hydro-mechanical processes governing pile behaviour.

Analysis of deformation patterns reveals that vertical strains concentrate within the upper twelve metres, where soft alluvial layers possess low stiffness and therefore accommodate a large share of the thermal elongation. Axial strains in the stiffer B and C moraines are an order of magnitude smaller, demonstrating that differential rigidity directs deformation toward the most compliant strata. Radial displacements, by contrast, remain minor throughout the thermal cycle; even at maximum heating, outward movements are confined to narrow zones immediately adjacent to the pile-soil interface and decay rapidly with distance, confirming that the surrounding ground mass provides strong lateral confinement. Contours of temperature illustrate predominantly radial heat flow, with only slight distortion at lithological boundaries because the thermal conductivities of successive layers are broadly similar. After the cooling phase a residual temperature difference of roughly three kelvins persists near the pile toe, signifying that the deep moraine acts as a thermal reservoir.

To evaluate the influence of parameter uncertainty the thesis undertakes a systematic sensitivity analysis. Each key property of the concrete or of the six identified soil layers, namely Young's modulus, Poisson's ratio, effective cohesion, friction angle, dilation angle and horizontal permeability, is varied independently within realistic minimum and maximum bounds while other inputs remain fixed. The corresponding change in pile head displacement at the end of both the heating and cooling stages is converted into a nondimensional score that ranks parameters by importance. Results demonstrate that the elastic modulus of the concrete dominates the overall response in both thermal stages, underscoring the primary role of pile stiffness in controlling thermal elongation. Among the soils, the Young's modulus of layer A2 and of the B moraine, the Poisson ratio of the B moraine, and the friction angle of A2 exert the next greatest influence, whereas cohesion and permeability exert negligible effect within the examined ranges. Complementary parameter-variation simulations, obtained by combining extreme property sets to create "minimum-displacement" and "maximum-displacement" scenarios, show that even the most unfavourable combination alters the peak uplift by less than one third of a millimetre. This modest spread indicates that, under the moderate thermal amplitude applied in the field test and given the relatively stiff stratigraphy, service displacements remain insensitive to plausible variations in ground properties.

The combined numerical evidence carries several implications for design practice. First, because pile stiffness is the most influential factor, decisions regarding concrete grade, reinforcement ratio and the arrangement of heat-exchange pipes, which effectively reduce the composite cross-section, should be made with careful attention to their impact on axial rigidity as well as thermal performance. Second, site investigation efforts ought to prioritise accurate characterisation of elastic moduli in the layers that bracket the pile head, since these parameters govern the partitioning of deformation and therefore the magnitude of surface settlement or heave. Third, design calculations should incorporate realistic Poisson ratios for stiff, partially drained units, as they modulate the transfer of axial strain into lateral stress around the shaft. Finally, although parameter uncertainty proved benign in the present scenario, regions that experience larger seasonal ground-temperature swings or include highly compressible

surficial deposits may exhibit stronger sensitivity; future analyses should extend the present framework to such conditions to ensure that serviceability criteria remain satisfied.

In conclusion, the thesis confirms that well-calibrated finite-element models can replicate the coupled thermo-mechanical behaviour of energy piles observed in full-scale experiments with high fidelity. The validated model and the quantified parameter rankings provide a rational basis for optimising structural stiffness, pipe configuration and soil-interface properties in order to achieve reliable load-bearing capacity alongside efficient heat-exchange performance. These insights contribute to the development of performance-based design guidelines that will facilitate wider adoption of geothermal energy pile technology and thereby advance the construction industry's transition toward zero carbon foundations.





1. GİRİŞ

Son zamanlarda, özellikle Avrupa kıtasında, enerji kullanımında sürdürülebilirliği artırmak ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre eden yenilikçi sistemlere yönelinmiştir (Cunha ve Bourne-Webb, 2017). Bu bağlamda, küresel enerji hizmetleri talebinin 2050 yılına kadar on katına kadar artması beklenmektedir (Dinçer, 2000). Bu durum, ülkeleri CO₂ ve sera gazı emisyonlarını azaltmak yönünde politikalar geliştirmeye teşvik etmektedir.

İnşaat yapılarının iklimlendirilmesi için alternatif ve sürdürülebilir yöntemlerin kullanılması, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de birincil enerji tasarrufu sağlanması açısından çift avantaj sunmaktadır. Bu kapsamda, yeraltı kaynaklı ısı pompaları ve sığ geotermal enerji sistemleri gibi teknolojiler, enerji talebini karşılamada çevre dostu çözümler sunmuştur. İlk olarak, bina kazık temelleri Avusturya'da bir yeraltı ısı değiştiricisi ile desteklenmiş ve daha sonra bu tür kazıklar geotermal enerji kazıkları (*geothermal energy piles*, GEP) olarak tanımlanmıştır (Brandl, 2006). Günümüzde, enerji kazıklarının dünya genelindeki popüleritesi sürekli artmakta olup, Avusturya'da 100.000'den fazla enerji kazığı sistemi kurulmuştur (Brandl, 2013). Enerji kazıklarının, yapısal yük taşıma ve termal (ısı değiştirici) işlevlerini tek bir çözümde birleştirerek maliyet etkin bir çözüm sundukları bilinmektedir. Özellikle doğal yeraltı sıcaklığını kullanarak kış aylarında ısıtma ve yaz aylarında soğutma sağlayan sistemler, enerji verimliliğini artırırken fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmaktadır. Bu çabalar, yapıların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için hem termal hem de yapısal işlevler sunan geotermal enerji kazıkları gibi yöntemlerle desteklenmiş ve Avrupa'nın sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynamıştır.

Ayrıca, enerji kazıkları gibi entegre sistemlerin uygulanabilirliğini artırmak amacıyla son yıllarda çok disiplinli araştırmalar yoğunlaşmıştır. Geoteknik mühendisliği, enerji mühendisliği ve yapı mühendisliği alanlarının kesişiminde yürütülen bu çalışmalar, enerji kazıklarının ısıl performansını optimize etmeye ve zemin-enerji etkileşimlerini daha doğru modellemeye odaklanmaktadır.

1.1. Geotermal Enerji Kazıkları

Sığ geotermal enerji sistemlerinden biri olan geotermal enerji kazıkları hem yapısal yükleri taşıyan hem de yeraltındaki termal enerjiyi kullanarak ısıtma ve soğutma amaçlı enerji transferi sağlayan yenilikçi bir zemin yapı elemanıdır (Brandl, 2006). Geleneksel kazıklardan farklı olarak, enerji kazıkları yüzey altındaki sabit sıcaklık farklarından yararlanır ve bu enerjiyi ısı pompaları aracılığıyla binaların enerji ihtiyacını karşılamak için kullanır. Bu çevre dostu teknoloji, diyafram duvarları, tüneller, sığ temeller ve kazıklar gibi tüm zemin içine gömülü yapılara uygulanabilir (Adam ve Markiewicz, 2009). Sistemler, iyi tasarlanıp bakımı yapıldığında, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak, üstyapıların enerji talebi açısından tüm ihtiyaçlarını karşılayabilir. Bu kapsamda, sürdürülebilir enerji çözümleri sunarak fosil yakıt tüketimini azaltır ve karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlar (Sani ve ark., 2008).

Enerji kazıklarının temel işlevlerinden biri, yapıların yüklerini taşımanın yanı sıra, zeminin termal özelliklerinden faydalanan enerji üretimiyle çift yönlü bir rol oynamaktır. Kazıkların içine yerleştirilen borular sayesinde zeminle su veya diğer sıvılar arasında ısı alışverişi gerçekleştirilir. Böylece, yaz aylarında serinletme, kış aylarında ise ısıtma sağlanabilir.

Enerji kazıklarının önemi, giderek artan enerji talebine karşılık çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmasında yatmaktadır. Geleneksel enerji kaynaklarının sınırlı olması ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlar, yenilenebilir enerji teknolojilerine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu bağlamda enerji kazıkları, yapı projelerinde çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkar. Özellikle şehirleşmenin yoğun olduğu alanlarda, mevcut inşaat projeleriyle entegre edilebilmeleri, enerji kazıklarını hem ekonomik hem de teknik olarak cazip bir seçenek haline getirir.

Sonuç olarak, enerji kazıkları hem inşaat mühendisliği hem de enerji mühendisliği alanlarının kesişiminde yer alan önemli bir yenilik olarak değerlendirilmektedir. Bu kazıklar, yeraltı termal enerjisinin etkin kullanımını sağlayarak, enerji tasarrufu ve çevresel koruma açısından büyük bir potansiyele sahiptir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, geotermal enerji kazıklarının kullanımıyla sürdürülebilir enerji uygulamalarına katkıda bulunmak ve bu yenilikçi teknolojinin zeminlerde oluşturduğu etkileri incelemektir. Tez kapsamında, geotermal enerji kazıklarının gerçek bir arazi uygulaması seçilmiş ve bu uygulama sayısal olarak modellenmiştir. Modellemede, sonlu elemanlar yöntemi (*Finite element method*, FEM) temel alınmış ve bu yöntemin zemin ve kazık etkileşimlerini doğru bir şekilde analiz edebilmesi amacıyla Plaxis 2D yazılımı kullanılmıştır. Plaxis programı, zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliğinde karmaşık problemlerin çözümü için geniş ölçüde kullanılan güvenilir bir araçtır.

Bu çalışma ile enerji kazıklarının zeminde meydana getirdiği oturmalar ve gerilme dağılımları detaylı olarak tartışılmıştır. Tez, özellikle enerji kazıklarının zemin özelliklerine bağlı olarak performansını değerlendirmek, bu teknolojinin hem yapısal hem de çevresel faydalarını anlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar, enerji kazıklarının daha verimli ve güvenli bir şekilde tasarlanmasına katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma, sürdürülebilir enerji sistemlerinden biri olan geotermal enerji kazıklarının zeminlerdeki etkilerini anlamaya yönelik önemli bir adım niteliğindedir ve enerji kazıklarının daha geniş bir uygulama alanına yayılmasında yol gösterici olmayı hedeflemektedir.

1.3. Literatür Araştırması

Enerji kazıkları, sürdürülebilir enerji çözümleri sunan yenilikçi teknolojilerden biri olarak son yıllarda hem akademik hem de endüstriyel alanda yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Bu teknolojiye ilişkin önemli noktalar çoğunlukla son yirmi yıl içinde çok sayıda çalışma ile irdelenerek bilgi birikimi sağlanmıştır. Bu çalışmalar, binaların sürdürülebilir iklimlendirilmesi için enerji kazıklarının uygulanmasına yönelik güncel uzmanlığı temsil etmektedir. Enerji kazıkları ile ilgili çalışmalar, yapılan uygulamaların yanı sıra, çoğunlukla sayısal modellemeler üzerinden yürütülmüş olup sıklıkla sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak yapılmıştır.

Sayısal modelleme teknikleri, enerji kazıklarının zeminle olan termal ve mekanik etkileşimlerini anlamada ve bu kazıkların performansını optimize etmede kritik bir rol oynamaktadır. Tez kapsamında araştırılması hedeflenen enerji kazıkları ve bu

kazıkların sayısal olarak modellenmesine ilişkin mevcut literatür incelenmiş ve bu bölümde bu alandaki önemli çalışmalar özetlenmiştir.

Laloui ve ark. (2006), enerji kazıklarının termal yükler altındaki davranışını inceleyen öncü çalışmalardan birinde, sonlu elemanlar analizini kullanarak termal ve mekanik etkilerin birleşik bir değerlendirmesini sunmuştur. Çalışma, enerji kazıklarının tasarımında termal genleşmenin önemine dikkat çekmiştir. Brandl (2006), enerji kazıklarının termal performansı ve yük taşıma kapasitesini analiz eden bir çalışmada, bu tür kazıkların, uygun şekilde tasarlandığında, hem yapısal hem de enerji verimliliği açısından avantajlar sağladığını göstermiştir. Çalışma, sayısal modelleme sonuçlarını saha ölçümleri ile karşılaştırarak, modelleme tekniklerinin doğruluğunu ortaya koymuştur. Knellwolf ve ark. (2011), enerji kazıklarının zeminle termal ve mekanik etkileşimini üç boyutlu modelleme ile analiz etmiştir. Çalışma, enerji kazıklarının tasarımında kullanılan parametrelerin, zemin tipine ve ısı değiştirici elemanların yerleşimine bağlı olarak optimize edilmesi gerektiğini göstermiştir. Polat ve ark. (2023) Texas'ta (Houston) yapılan gerçek bir enerji kazığı uygulamasının deneyini sayısal olarak modellemiş ve deney sırasında kaydedilen gerilme değişimi ile sıcaklık değişimi verilerini kullanarak sayısal modellemenin başarısını ortaya koymuştur.

Enerji kazıkları ile ilgili modelleme çalışmalarının bir diğer önemli odağı, zemin özelliklerindeki değişimlerin kazık davranışına etkisidir. Adam ve Markiewicz (2009), enerji kazıklarının zemin sıcaklıkları üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmada, termal yüklemenin zeminlerde oturma ve şişme gibi davranışlara yol açabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, enerji kazıklarının diyafram duvarları ve diğer yeraltı yapılarıyla da birlikte kullanılabileceği vurgulanmıştır. Tablo 1.1'de geotermal enerji kazıklarının sahada uygulandığı çalışmalara ilişkin bilgi ve sonuçlar verilmiştir. Tablo 1.2'de geotermal enerji kazıklarının laboratuvar ortamında test edildiği çalışmalara, Tablo 1.3'te ise bu kazıkların sayısal modelleme yöntemi ile modellendiği çalışmaların bir özetine yer verilmiştir. Çalışmaların özetlenmesinde ve listelenmesinde, Cunha ve ark. (2022) tarafından yayınlanan çalışmadan yararlanılmıştır. Böylece, enerji kazıklarının performansına ilişkin saha, laboratuvar ve sayısal modelleme bulguları bütüncül bir perspektifle değerlendirilerek literatürdeki mevcut bilgi boşlukları ortaya konulmuştur.

Tablo 1.1. Geotermal enerji kazıklarına ilişkin sahada gerçekleştirilmiş çalışmalar.

Referans	İncelenen Konular	Temel Sonuçlar
Laloui ve Moreni (1999)	Enerji kazıklarının ısıtma ve soğutma döngüleri altında mekanik ve termal davranışları saha testleriyle incelenmiştir.	Termal yüklerin, sürtünme mobilizasyonunu artırdığı ve kazıkta termal sıkıştırma gerilmesi oluşturduğu, yapının bütünlüğünün korunduğu belirtilmiştir.
Brandl (2000)	Enerji kazıkları ve diğer termo-aktif zemin yapılarının çevresel koruma ve uzun vadeli maliyet tasarrufu sağlama potansiyeli, ısı transferi, sıcaklık kaynaklı zemin özelliklerindeki değişiklikler ve temel davranışı üzerindeki etkiler incelenmiştir.	Çalışmada, enerji kazıkları ve diğer termo-aktif zemin yapılarının çevresel sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, düşük maliyet ve CO ₂ emisyonlarını azaltma gibi avantajlar sunarak yenilikçi ve uzun ömürlü bir alternatif oluşturduğu sonucuna varılmıştır.
Laloui ve ark. (2006)	Enerji kazıkları üzerine deneysel ve sayısal bir inceleme yapılmıştır. Deneysel kısımda, termal ve mekanik yükler altındaki kazık davranışı sahada (siltli killi zeminler) test edilmiş, sayısal modellemeye ise FEM ile kazık-zemin etkileşimi termo-hidro-mekanik olarak analiz edilmiştir.	Çalışmada, termo-hidro-mekanik sonlu eleman modelinin, enerji kazıklarının termal etkiler altındaki davranışını güvenilir bir şekilde simüle edebildiği ve deneysel sonuçlarla yüksek uyum gösterdiği tespit edilmiştir.
Amis ve ark. (2008)	Lambeth College (Londra) sahasında gerçekleştirilen bu çalışmada, enerji kazıklarının ısıtma ve soğutma döngüleri sırasında yük-altında davranışlarının ve zemine termal enerji yayılımının etkileri incelenmiştir.	Isıtma ve soğutma döngülerinin enerji kazıklarının yük-oturma davranışı üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı ve bu etkilerin sistem tasarımı sırasında dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir.
Bourne-Webb ve ark. (2009a)	Lambeth College (Londra) sahasında (siltli killi zeminler) bir enerji kazığı üzerinde, ısıtma/soğutma döngülerinin kazık kapasitesi üzerindeki etkileri yüklenme testleriyle incelenmiştir.	Çalışma, enerji kazıklarında termal döngülerin yük dağılımında geri dönüşümlü değişikliklere yol açtığını ve taşıma kapasitesini olumsuz etkilemediğini göstermiştir.
Amatya ve ark. (2012)	Çalışmada, enerji kazıklarının ısıtma ve soğutma döngüleri sırasında eksenel gerilme ve sürtünme direncindeki değişimler incelenmiştir. Çalışma sahasındaki hakim zeminler katı siltli killi zeminlerdir.	Enerji kazıklarının ısıtma ve soğutma döngüleri sırasında oluşan termal etkilerin, uygun tasarım ile yapıların taşıma kapasitesini olumsuz etkilemediği ve bu etkilerin tasarımda dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir.

Tablo 1.1. (Devamı) Geotermal enerji kazıklarına ilişkin çalışmalar.

Referans	İncelenen Konular	Temel Sonuçlar
McCartney ve Murphy (2012)	Denver, Colorado'da bir binada kurulan iki tam ölçekli enerji temelinin termomekanik davranışı ve bu temellerdeki ısı değişim kapasiteleri değerlendirilmiştir.	Enerji temellerinde termal eksenel gerilme ve deformasyonların kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu ve bu yapıların, düşük ek kurulum maliyetiyle yeni binalarda iyileştirilmiş ısı değişim kapasiteleri sağlamak için uygulanabileceğini göstermiştir.
Akrouch ve ark. (2014)	Yüksek plastisiteli kil zeminlerde enerji kazıklarının termomekanik yükler altında zamana bağlı davranışı ve bu yüklerin kazık deformasyonları ile sürtünme mobilizasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir.	Termal yüklerin, enerji kazıklarında uzun vadeli yer değiştirmelere neden olduğu ve kazıkların tasarımında bu etkilerin dikkate alınarak termal deformasyonları en aza indirecek simetrik kazık dağılımının sağlanması gerektiği, taşıma gücünün ise sınırlı etkisi olduğu belirlenmiştir.
Wang ve ark. (2015)	Çalışmada, termomekanik yüklerin bir geotermal enerji kazığının sürtünme kapasitesi üzerindeki etkileri, Monash Üniversitesi'nde gerçekleştirilen saha testiyle incelenmiştir.	Isıtma ve soğutma döngülerinin ardından kazığın sürtünme kapasitesinde kayıp gözlenmemiş ve kazığın termal genleşme ve büzülme davranışlarının elastik nitelikte olduğu belirlenmiştir.
Murphy ve McCartney (2015)	8 katlı bir bina altında yer alan iki tam ölçekli enerji temelinin ısıtma/soğutma döngüleri sırasında termomekanik davranışı ve bu döngülerin eksenel gerilme, deformasyon ve zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.	Enerji temellerinin termal eksenel gerilme ve yer değiştirme değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu, bu nedenle yapısal veya mimari hasara yol açmadığı, ancak karmaşık zemin tabakalarında daha ileri analizlerin gerekebileceği belirlenmiştir.
Szymkiewicz ve ark. (2015)	CFA (Continuous Flight Auger) kazıklarının taşıma kapasitesi üzerindeki sıcaklık ve ısıtma/soğutma döngülerinin etkisi kumlu zeminlerde deneysel olarak incelenmiştir.	Isıtma/soğutma döngülerinin kumlu zeminlerde kazık başı yer değiştirmeleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı ve döngülerin kazık çevresindeki zemini yoğunlaştırma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.
You ve ark. (2016)	Çimento-Uçucu Kül-Çakıl (CFG) enerji kazıklarının kumda, termal ve mekanik yükler altındaki yapısal davranışı incelenmiştir.	Isıtma/soğutma döngülerinin oturmalar ve eksenel gerilmelerde değişimlere yol açtığı, kazıkların güvenliğini olumsuz etkilemediği belirlenmiştir.

Tablo 1.1. (Devamı) Geotermal enerji kazıklarına ilişkin çalışmalar.

Referans	İncelenen Konular	Temel Sonuçlar
Santiago ve ark. (2016)	İspanya’da gerçekleştirilen bu çalışmada, ön dökümlü termo-aktif kazıkların mekanik ve termal yükler altındaki termomekanik davranışı incelenmiştir.	Sıcaklık artışıyla kazık gerilmelerinde artış, yan yüzey sürtünmesinin mobilizasyonu ve deformasyonlar gözlemlendiğini, bu etkilerin zeminin türüne bağlı olarak değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur.
Faizal ve ark. (2016)	Tam ölçekli bir geotermal enerji kazığının aralıklı ve sürekli çalışma modlarının termal davranışı üzerindeki etkileri, zemin ve kazık sıcaklıkları, eksenel gerilmeler ve zorlanmalar açısından deneysel olarak incelenmiştir.	Aralıklı çalışma modlarında daha yüksek enerji ekstraksiyonu ve daha düşük termal yüklenme görülmüş, ancak termal gerilmeler ve zorlanmalar sonunda benzer değerlere geri dönerek çevredeki zeminin termal gerilmeleri sınırlamadığı belirlenmiştir. Daha kapsamlı saha testleri önerilmektedir.
Zarrella ve ark. (2017)	U-tüp enerji kazıkları için termal tepki testi (TRT) yönteminin tasarım üzerindeki etkisi ve zemin termal iletkenliği tahminlerinin doğru yapılmasının önemi incelenmiştir.	Zemin termal iletkenliğinin yanlış tahmin edilmesinin, kazık uzunluğu hesaplamalarını ve ısı pompası sisteminin uzun vadeli performansını olumsuz etkileyebileceği ortaya konmuş, bu nedenle, detaylı sayısal modelleme ve doğru veri analizinin verimli tasarımlar ve maliyet optimizasyonu için gerekli olduğu tespit edilmiştir.
Bourne-Webb ve Freitas (2020)	Termo-aktif kazıkların ve kazık gruplarının monotonik ve çevrimsel termal yükler altındaki davranışını inceleyen saha testlerini, laboratuvar deneylerini ve sayısal analizleri derleyerek kazık-zemin etkileşimlerini ve iç gerilme değişimlerini değerlendirmiştir.	Isıtma ve soğutma döngülerinin kazık gruplarında daha büyük hareketlere ve daha düşük gerilme değişimlerine yol açtığı, kazık-zemin etkileşimlerinin detaylı analizlere ihtiyaç duyduğu ve çevrimsel termal yüklerin kazık performansını zamanla stabilize edebileceği belirtilmiştir.
Casagrande ve ark. (2021)	Tropikal bölgelere özgü tabakalı tortul zeminlerde bir enerji mikro kazığının ısıtma ve soğutma döngüleri altındaki termomekanik davranışı, termal tepki testleri kullanılarak incelenmiştir.	Organik kil tabakasının enerji kazığındaki termal gerilmeleri ve deformasyonları büyük ölçüde etkilediği, termal-plastik davranışın oluştuğu ve kazık-zemin etkileşiminin inşaat yöntemlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 1.2. Geotermal enerji kazıklarına ilişkin laboratuvar çalışmaları.

Referans	İncelenen Konular	Temel Sonuçlar
Kalantidou ve ark. (2012)	Sabit eksenel yükler altındaki enerji kazıklarının termal döngüler sırasında mekanik davranışı, fiziksel bir model kullanılarak incelenmiştir.	Yük, kazığın nihai taşıma kapasitesinin %40'ından az olduğunda kazık davranışının termo-elastik olduğu, ancak yük aşıldığında kalıcı oturmaların meydana geldiği belirlenmiştir. Termal yükler altında kazık stabilitesinin sağlandığı gösterilmiştir.
Yavari ve ark. (2014)	Çalışmada, kuru kum içerisinde yerleştirilen bir enerji kazığının termal döngüler sırasında eksenel yükler altındaki mekanik davranışı, fiziksel modelleme ile incelenmiştir.	Düşük eksenel yüklerde kazığın termo-elastik davrandığı, ancak daha yüksek yüklerde oturmalar ve kazık tabanına aktarılan eksenel kuvvetin arttığı belirlenmiştir. Zemin-kazık arayüzündeki sürtünmenin termal döngülerle değiştiği gözlemlenmiştir.
Ng ve ark. (2014)	Çalışmada, merkezkaç modelleme kullanılarak ısıtma/soğutma döngülerine maruz kalan enerji kazıklarının killi zeminlerdeki yer değiştirme etkileri incelenmiştir. Hem az konsolide olmuş hem de çok konsolide olmuş kaolin kilinde enerji kazıklarının uzun vadeli yer değiştirme davranışları analiz edilmiştir.	Az konsolide olmuş killi zeminde, her bir ısıtma/soğutma döngüsü ile yer değiştirmede azalarak devam eden bir etki gözlemlenmiştir. Çok konsolide olmuş killi zeminde ise oturma daha düşük seviyede kalmıştır. Bu farklılık, killi zemindeki aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak gelişen termal genleşme ve plastisitedeki değişikliklere bağlanmıştır.
Nguyen ve ark. (2017)	Çalışmada, kuru kumda yerleştirilmiş küçük ölçekli bir enerji kazığının uzun vadeli termomekanik davranışı, farklı sabit eksenel yükler ve 30 termal döngü altında incelenmiştir.	Sabit yük altındaki termal döngüler, kazık başında kalıcı oturmalarla yol açmış, bu oturmalar ilk termal döngüde maksimum olmuş ve döngü sayısı arttıkça azalarak asimptotik bir eğri ile tahmin edilebilmiştir.
Fei ve Dai (2018)	Çalışmada enerji kazıklarının termal çevrimler altındaki mekanik davranışı, laboratuvar ölçekli fiziksel modelleme ve sayısal analiz ile incelenmiştir. Kazık başının serbest ve kısıtlı olduğu durumlar farklı zemin ve kazık koşulları altında değerlendirilmiştir.	Termal çevrimler kazık başında kalıcı yer değiştirmelere neden olurken, kazık başındaki eksenel kuvvetin çevrim sayısı ile hafifçe arttığı gözlemlenmiştir. Sayısal analiz, termal çevrim davranışını doğru şekilde modellemek için uygun bir zemin modeli gerektiğini göstermiştir.

Tablo 1.3. Geotermal enerji kazıklarına ilişkin sayısal modelleme çalışmaları.

Referans	İncelenen Konular	Temel Sonuçlar
Choi ve ark. (2011)	Çalışmada, doygun olmayan zemin koşullarının düşey zemin ısı değiştiricilerinin (GCHP) aralıklı işletim modundaki performansı üzerindeki etkisi, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen üç boyutlu bir geçici iletken ısı transfer modeli kullanılarak incelenmiştir.	Doygun olmayan zemin koşulları, doygun koşullara göre %40'a kadar daha düşük ısı değişim oranları gösterirken, aralıklı işletim modunun sürekli işleme göre daha iyi performans sergilediği bulunmuştur.
Arson ve ark. (2013)	Bu çalışma, temel kazıklarında ısı transferini ve bu süreçlerin enerji dengesine etkilerini incelemiştir. Analitik, yapısal ve sayısal modeller kullanılarak ısı değiştirici kazık ile çevresindeki zemin arasındaki termomekanik davranış analiz edilmiştir.	Kazık ve zemin arasındaki bağın kaybolması durumunda, enerji sisteminin verimliliğinin azaldığı ve enerji dengesinin bozulduğu görülmüştür. Aderans kaybı, kazığın mekanik performansını olumsuz etkileyerek sürtünme direncinin kaybına yol açmıştır.
Loveridge ve Powrie (2013)	Zemin enerji sistemlerinde kullanılan tekli kazıklar için sıcaklık tepki fonksiyonları (G-fonksiyonları) incelenmiştir.	G-fonksiyonları, kazık geometrileri ve boru düzeneklerine bağlı olarak tasarım için alt ve üst sınır çözümleri sağlamış; mevcut yöntemlerin, kazıkların yüksek ısı depolama potansiyelini yeterince yansıtmadığını ortaya koymuştur.
Jeong ve ark. (2014)	Grup kazık içinde eksenel olarak yüklenen enerji kazıklarının termomekanik davranışını incelemek amacıyla, 3D sonlu eleman analizlerini içermektedir. Kazıklar arasındaki mesafe, düzenleme, zemin türü ve kazık uç taşıma durumu gibi faktörlerin mekanik davranış üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.	COMSOL yazılımı kullanılarak yapılan sayısal analizler, literatürdeki sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. Termal yükleme sırasında kazıklarda eksenel gerilme ve oturma gözlenmiştir. Ancak, geleneksel termal yüklemenin, kazık gruplarının mekanik davranışında belirgin bir değişikliğe yol açmadığı belirtilmiştir.
Gashti ve ark. (2015)	Enerji kazıklarının yer altı suyu akış koşulları altındaki performansını analiz etmektedir. Çalışma, kazık yapılarının hem enerji üretimi hem de yük transferi için kullanılabilirliğini değerlendirmek üzere, orta derecede yer altı suyu akışı altında kazıkların termomekanik davranışını incelemiştir.	Yer altı suyu akışının, enerji kazıklarının performansını %20 artırdığı, özellikle yaz modunda kazık çevresinde mobilize olan sürtünme gerilimini artırdığı belirlenmiştir. Yer altı suyu akışının, kazık performansını tasarım açısından önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Tablo 1.3. (Devamı) Geotermal enerji kazıklarına ilişkin sayısal modelleme çalışmaları.

Referans	İncelenen Konular	Temel Sonuçlar
Rotta Loria ve ark. (2015)	Çalışmada, doymun kumda enerji kazıklarının termo-mekanik davranışını anlamak için santrifüj verileri ve sonlu eleman analizleri kullanılmıştır.	Enerji kazıkları için ince bir sonlu elemanlar tabakasının, kazık-zemin etkileşimini modellemede uygun bir çözüm olduğu, termal ve mekanik yükler altında enerji kazıklarının davranışını anlamak için plastisitenin önemli bir bileşen olarak öne çıktığı belirlenmiştir.
Olgun ve ark. (2015)	Çalışmada, enerji kazıklarının uzun dönem performansı incelenmiştir. Özellikle, kazık gruplarının ve bireysel kazıkların farklı enerji talepleri altında nasıl tepki verdiği modellenmiştir. Farklı yerel iklim koşulları dikkate alınarak uzun vadeli enerji sürdürülebilirliği ve geoteknik etkiler analiz edilmiştir.	Isı değişim operasyonlarının mevsimsel enerji talebiyle ilişkili olduğu ve dengelenmediğinde performansı olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Kazıkların genelde elastik uzama gösterdiği ve uzun vadeli geoteknik performansların genelde etkilenmediği belirlenmiştir.
Aydın ve Şişman (2015)	Çoklu U-tüplü sondaj kuyularının termal performansı ve maliyet etkinliği üzerine yapılan deneysel ve hesaplamalı bir araştırmayı ele almaktadır.	2U ve 3U-tüp konfigürasyonlarının performans açısından önemli iyileşmeler sağladığı, ancak 4U ve 5U-tüp kullanımıyla elde edilen performans artışının ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. 2U-tüp optimum çözüm olarak belirlenmiştir.
Ng ve ark. (2016)	Yarı yüzen enerji kazıklarının kum zeminlerdeki tekrarlı ısıtma ve soğutma döngülerine karşı yatay gerilme tepkisini incelemektedir. Odak noktası, kazık/zemin arayüzünde meydana gelen yatay gerilme azalması ve bunun kazık performansına etkisidir.	Isıl döngü sırasında kazık/zemin arayüzünde büzülme ve yatay gerilme azalması olduğu, bunun kazık shaft direncinde düşüşe ve ilave oturmalara neden olduğu belirlenmiştir. Yatay gerilmenin kazık çapına ve döngü genliğine bağlı olduğu belirlenmiştir.
Olgun ve ark. (2017)	Çalışma, mevsimsel enerji talebindeki dengesizliklerin enerji kazıkları borularının uzun vadeli performansına etkisini ve farklı iklim koşullarında gerekli boru uzunluklarını incelemektedir.	Dengesiz enerji taleplerinin, ısı değişim verimliliğini düşürdüğü ve farklı iklim koşullarına göre boru uzunluklarının önemli ölçüde değiştiği belirlenmiştir. Uzun vadeli performans için dengeli termal yüklerin korunmasının kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir.

Tablo 1.3. (Devamı) Geotermal enerji kazıklarına ilişkin sayısal modelleme çalışmaları.

Referans	İncelenen Konular	Temel Sonuçlar
Gawecka ve ark. (2017)	Çalışmada, Londra Kili'nde bulunan termo-aktif kazıkların termal, hidro-mekanik davranışı FEM kullanılarak analiz edilmiştir.	Soğutmada çekme, ısıtmada basınç gerilmelerinin oluştuğu belirlenmiştir. Termal yük etkilerinin zamanla azaldığı, modelleme yönteminin ise tasarım sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.
Zhang ve Chen (2017)	Enerji kazıklarının yer altı kaynaklı ısı pompa sistemlerindeki ısı transfer performansını incelemiş ve hem tekli hem de 3x3 kazık grupları için fiziksel modeller oluşturulmuştur. Isı transfer süreçleri sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilmiştir.	Soğutma modunda, ısı transfer oranı bir ay içinde $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ seviyesinde sabitlenmiştir. 3x3 kazık grubu için, toprak sıcaklığı bir yıllık döngü sonunda $0,03^\circ\text{C}$ azalmıştır. Isı çekilmesi ve geri enjeksiyonun dengeli yapılmasıyla toprak sıcaklık dengesi korunmuştur. İlkbahar ve sonbahardaki ara dönemlerde, sıcaklık geri kazanımı teşvik edilmiştir.
Wang ve ark. (2019)	Enerji kazıklarının döngüsel sıcaklık yüklerine karşı davranışını incelemek için sonlu eleman modellemesi yapılmış ve sıralı termal eşleme yöntemi kullanılarak sıcaklık kaynaklı yer değiştirmeler ve eksenel kuvvetler analiz edilmiştir.	Döngüsel ısıtma ve soğutma süreçlerinin kazık boyunca ek eksenel kuvvetler ve yer değiştirmelere neden olduğu belirlenmiştir. Kazık başına uygulanan yüklerin, uç zeminde plastik deformasyonun başladığı yük değerini aşmaması gerektiği belirtilmiştir.

1.4. Hipotez

Geotermal enerji kazıkları, sürdürülebilir enerji sistemlerinde hem yapısal hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sağlayan bir sistem olup, zeminlerde oluşturduğu oturma, gerilme dağılımı ve diğer geoteknik etkiler zemin özelliklerine ve kazık tasarımına bağlı olarak optimize edilmelidir. Bu çalışmada; enerji kazıklarına ait gerçek bir vaka analizinin sayısal olarak modellemesi üzerinde durulmuştur. Çalışmada, geotermal enerji kazığının zeminle etkileşimini çok boyutlu olarak incelemek öngörülmüştür. Böylece, termal genleşmenin yarattığı gerilme ve deplasmanlar, tabakalar arası rijitlik farklarının şekil değiştirme profilini nasıl yönlendirdiği ve parametre belirsizliğinin servis deplasmanlarına etkisinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Çalışma, geotermal enerji kazıklarının performansının, uygun modelleme ve analiz yöntemleriyle değerlendirilmesi, bu kazıkların güvenli,

verimli ve yaygın bir şekilde kullanımını teşvik edecek veriler sunarak, enerji sistemlerinde zemin-kazık etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.



2. GEOTERMAL ENERJİ KAZIKLARI VE UYGULAMA ALANLARI

2.1. Geotermal Enerji Kazıklarının Çalışma Prensibi

Geotermal enerji kazıkları (GEP), yapı yüklerini taşıırken aynı zamanda enerji transferi sağlayan çok işlevli yapı elemanlarıdır. Bu sistemler, zeminlerin doğal sıcaklık değerlerinden yararlanarak binaların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmıştır. Çalışma prensibi; ısı transfer süreci, ısı pompası entegrasyonu, döngüsel enerjinin kullanılması, sistemin verimliliği ve uzun vadedeki performans alt başlıkları ile özetlenmektedir.

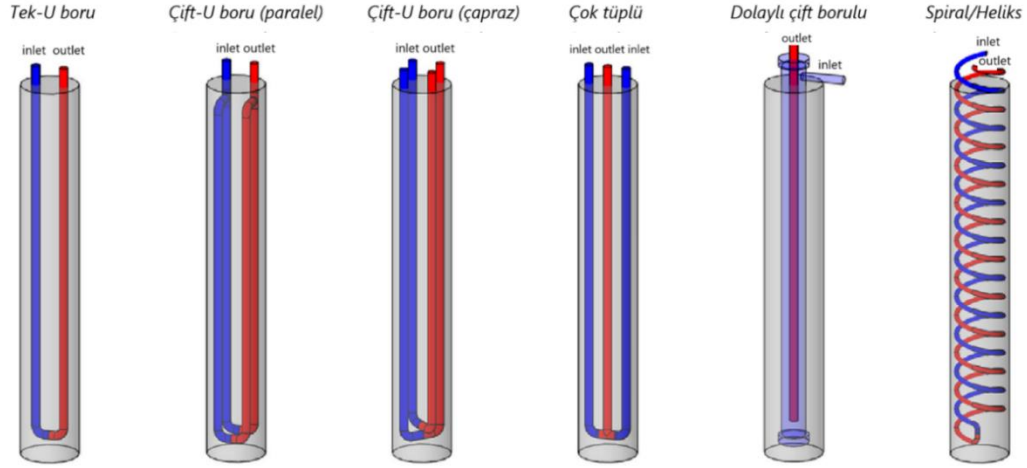
2.1.1. Isı transfer süreci

Geotermal enerji kazıkları, içine yerleştirilen ısı değişim boruları aracılığıyla zeminin sıcaklığıyla enerji alışverişi yapar. Borular, genellikle su veya antifriz karışımı gibi ısı taşıyıcı sıvılarla doludur. Bu sıvılar, kazık boyunca dolaşırken, zeminden ısı çeker veya ısıyı zemine bırakır.

2.1.1.1. Isı değişim boruları

Isı değişim boruları genellikle yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerden yapılır (örneğin, polietilen veya bakır). Bu malzemeler polietilen (PE), çapraz bağlı polietilen (PEX) veya yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) gibi yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerdir ve enerji kayıplarını azaltarak topraktan ısı transferini optimize etmektedir.

Enerji kazıklarında kullanılan boru düzenekleri genelde tek-U, tek-W, W şekilli tüm-yuvarlak, çift-U, koaksiyel (eş merkezli), heliks veya spiral yapıda olabilmektedir. Her bir konfigürasyonun avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Şekil 2.1’de kazık içi farklı boru konfigürasyonlarının geometrik şekillerine yer verilmiştir.



Şekil 2.1. Enerji kazığı konfigürasyonları (Fadejev (2017)'den uyarlanmıştır).

Tek-U borular:

- Basit ve düşük maliyetli bir tasarımıdır.
- Ancak, sınırlı yüzey alanı nedeniyle ısı transfer kapasitesi daha düşüktür.

Tek-W borular:

- Daha geniş bir yüzey alanı oluşturarak ısı transfer kapasitesini artırır. U şekline göre daha verimli olabilir.

W şekilli tüm-yuvarlak (*W-Shaped All-Round*) boru:

- Borular kazığın tamamını saracak şekilde yerleştirilir. Bu, ısı transfer yüzeyini maksimize eder ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlar.
- Mehrizi ve ark. (2016)'ya göre, bu konfigürasyon ısı transfer oranında en yüksek verimi sağlamaktadır. Bezyan ve ark. (2015) çalışmasında, U-tüp ve W-tüp konfigürasyonlarını karşılaştırmış ve W-tüp için yaklaşık 54,3 W/m, U-tüp için ise 44,5 W/m ısı transfer oranı elde edilmiştir. W-tüp'ün performansının daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Çift-U borular:

- Daha geniş bir ısı transfer yüzey alanı sağlar.
- Yüksek enerji talepleri olan sistemlerde tercih edilir (Ghasemi-Fare ve Basu, 2013).

Koaksiyel (eş merkezli) borular:

- İç içe geçmiş iki borudan oluşur; biri sıvının gidişini, diğeri dönüşünü sağlar.
- Daha az basınç kaybı ve yüksek enerji transfer verimliliği sunar.

Heliks borular:

- Heliks borular, bir yay veya spiral şekline benzer şekilde borunun kazık içerisine sarılarak yerleştirildiği bir tasarımı ifade eder.
- Genellikle kazığın çapına göre bir veya birden fazla spiral şeklinde yerleştirilir.
- Bu tasarım, borunun toplam uzunluğunu artırarak ısı transfer yüzeyini maksimize etmeyi amaçlar.
- Park ve ark. (2015) büyük çaplı enerji kazıkları için heliks boruların ekonomik ve termal performans açısından avantajlı olduğunu belirtmiştir.
- Bu boruların uygulanması büyük çaplı kazıklara uygun olup, daha küçük çaplı kazıklarda zordur.
- Borunun yerleştirilmesi maliyetli ve zorlu olabilir.

Spiral borular:

- Spiral borular, genelde bir sarmal şekline benzer ve kazık içinde, kazığın ekseni boyunca boruların spiral şekilde yerleştirilmesiyle oluşturulur.
- Spiral boruların tasarımı, heliks borulara benzer olsa da boruların daha sıkı bir şekilde dolanmasıyla farklılaşır (Alqawasmeh ve ark., 2024).
- Spiral borular, uzun tüp uzunluğu sayesinde enerji kazığı içinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığı için Bezyan ve ark. (2015) ve Zhao ve ark. (2016) tarafından en yüksek ısı transfer oranına sahip olarak gösterilmiştir.
- Düz ve U-tüp borulara kıyasla tasarımı daha karmaşık ve yerleştirme maliyeti daha yüksektir.

Boruların kazık içindeki yerleşimi ve yoğunluğu, enerji kazıklarının verimliliğini etkilemektedir. Daha yoğun boru düzenekleri, enerji transfer oranını artırabilmekte ancak maliyetleri yükseltmektedir. Borular içinde dolaşan ısı taşıyıcı sıvı (genellikle su veya antifriz karışımı), zeminin sıcaklığıyla ısı enerji alışverişi yaptığından sıvının dolaşım hızı, enerji transfer oranını belirlemektedir. Çok düşük hızlar verimliliği azaltabilirken, çok yüksek hızlar basınç kaybına ve enerji kaybına yol açabilmektedir

(Sani ve ark., 2019). Bu nedenle, optimum sıvı dolaşım hızının belirlenmesi, sistemin hem enerji verimliliği hem de uzun vadeli performansı açısından kritik öneme sahiptir.

2.1.1.2. Zeminin termal özellikleri

Geotermal enerji kazıklarının verimliliği, büyük ölçüde zeminin termal özelliklerine bağlıdır. Zeminin termal iletkenliği, ısı kapasitesi, su içeriği ve geçirgenliği gibi özellikler, enerji kazıklarının performansını doğrudan etkileyen temel faktörlerdir.

Termal iletkenlik (*thermal conductivity*) ısıнын zemin içinde yayılma hızını belirleyen en önemli parametredir. Kum ve çakıl gibi geçirgen ve sıkı zeminlerde termal iletkenlik daha yüksek olduğundan bu tür zeminler, enerji kazıkları için daha verimli ısı transferi sağlar. Killi ve organik zeminler daha düşük termal iletkenlik göstermekte olup bu durum, ısıнын zeminde daha yavaş yayılmasına neden olmakta ve enerji kazıklarının verimliliğini azaltabilmektedir (Ekberli ve ark., 2021). Su içeriği ve zeminin birim hacim ağırlığındaki artış ise daha yüksek iletkenlik gösteren bir ortam yaratmaktadır. Dolayısıyla termal iletkenliği etkileyen, zemine ve zeminin koşullarına bağlı birçok faktör mevcuttur (Cunha ve Bourne-Webb, 2022).

Isı kapasitesi (*specific heat capacity*), zeminin birim kütlesinin sıcaklığını 1°C artırmak için gereken enerji miktarını ifade eder. Bu kapasite, kil ve organik maddeler açısından zengin zeminlerde yaygın olduğundan bu tür zeminler, daha fazla ısı depolayabilir (Yılmaz ve Alagöz, 2008). Kum ve çakıl gibi iri daneli zeminlerde ise ısı kapasitesi düşük olduğu için bu zeminler daha hızlı ısınır ve soğur. Isı kapasitesi, zeminlerin termal stabilitesini etkiler ve enerji kazıklarının uzun vadeli verimliliğinde önemli bir rol oynar.

Daha önce bahsi geçtiği üzere, zeminlerin su içeriği ve yeraltı suyu varlığı, termal iletkenliği ve enerji transferini büyük ölçüde etkilemektedir. Yüksek su içeriği ısı transferi için daha iyi bir ortam sağlamaktadır. Çünkü suyun termal iletkenliği havadan yaklaşık 25 kat daha yüksektir. Bu nedenle kuru bir zemin ortamında ısı iletimi düşük olup enerji kazıklarının verimliliği azalabilmektedir. Doymamış zeminlerde, termal iletkenlik doymuş koşullara kıyasla %40'a kadar azalmaktadır. Bu durum, su içeriğinin ısı transfer verimliliği üzerindeki kritik etkisini vurgulamaktadır (Cunha ve Bourne-Webb, 2022). Yeraltı suyu akışı ise akışkan bir ortamda, konvektif ısı transferi nedeniyle daha yüksek enerji transferi sağlayabilmektedir. Yeraltı suyunun hareketi, enerji kazıkları çevresindeki ısı transfer performansını artırabilmektedir. Örneğin,

Zhang ve ark. (2013), yeraltı suyu akışının ısı değişim performansını 5 kat artırabildiğini göstermiştir.

Zeminin sıcaklık profili, kazıkların performansını etkileyen bir diğer faktördür. Zemin sıcaklığı derinliğe bağlı olarakta değişkenlik gösterebilmektedir. Sıcaklık, yüzeyden derinlere doğru genellikle sabittir. 10-20 metre derinliklerde zemin sıcaklığı yıl boyunca sabit kalmaktadır. Bu, enerji kazıklarının hem ısıtma hem de soğutma için kullanılmasını sağlamaktadır. Daha sıkı zeminlerde ise sıcaklık, mevsimsel değişikliklerden daha fazla etkilenmekte ve sistem performansı dalgalanabilmektedir.

Zemin türlerindeki farklılık, zeminlerin farklı termal parametre değerlerine sahip olması nedeniyle enerji kazıklarının performansı üzerinde çok etkin olabilmektedir (Fadejev ve ark., 2017). Yüksek termal iletkenliği nedeniyle kumlu ve çakıllı zeminler enerji kazıkları için ideal olarak görülmektedir. Killi zeminler ise düşük termal iletkenlik ve yüksek ısı kapasitesine sahiptir. Bu zeminlerde ısı transferi daha yavaş gerçekleşmektedir. Organik zeminler hem düşük iletkenlik hem de düşük birim hacim ağırlıkları nedeniyle enerji kazıkları için genellikle tercih edilmemektedir.

Tablo 2.1. Zeminlerin termal özellikleri (Yoon ve ark., 2022; Cableizer, 2025; Engineering Toolbox, 2025).

Zemin türü	Termal iletkenlik (W/mK)	Özgül ısı kapasitesi (J/kgK)	Termal genleşme katsayısı ($\times 10^{-6}$ 1/K))
Kil (kuru-doygun)	0.35-1.56	880-1380	4-6
Kum (kuru-doygun)	0.43-2.42	≈ 830 (kuvars kum)	3-5
Doygun kil	1.04-1.56	1000-1480	4-6
Kuru kum	0.43-0.69	≈ 830	3-5
Organik zemin	0.17-0.54	≈ 1900	5-10

2.1.1.3. Enerji döngüsü

Geotermal enerji kazıkları (GEP), binaların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için zeminin doğal sıcaklığını kullanırken bir enerji döngüsü yaşanmaktadır. Bu döngü, yıl boyunca sürekli bir enerji alışverişi ile zeminin termal kapasitesini kullanmakta ve aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır.

Kazık içine yerleştirilen ısı değişim boruları, zeminin ısınısını emmekte veya binadan gelen fazla ısıyı toprağa aktarmaktadır. Bu süreç, kazıkların çevresindeki zeminin termal iletkenliği ve ısı kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. Kış aylarında zeminden alınan düşük sıcaklık, kazık borularındaki sıvı aracılığıyla ısı pompasına taşınmaktadır. Isı pompası, bu enerjiyi yoğunlaştırarak binanın ısıtılmasında kullanılmaktadır. Yaz aylarında ise binadaki fazla ısı, ısı değişim boruları aracılığıyla zemine aktarılmakta ve bina soğutulmaktadır.

Isı pompası, enerji döngüsünün merkezinde yer almaktadır. Bu cihaz, birincil döngüde (zeminle temas eden sistem) toplanan enerjiyi yoğunlaştırmakta veya azaltarak ikincil döngüde (bina içi sistem) kullanılabilir hale getirmektedir. Çalışma prensibi incelendiğinde, ısı pompası zeminin ısınısını düşük sıcaklıkta almakta ve daha yüksek bir sıcaklıkta bina sistemine transfer etmektedir. Yazın ise bu süreç tersine işlemektedir. Her ısı pompası bir enerji performans katsayısı (COP) değerine sahip olmaktadır. Bir ısı pompasının performansı, genellikle 4'ün üzerinde bir katsayıya sahip olmaktadır, yani kullanılan her birim enerji için dört kat daha fazla ısı veya soğutma sağlanmaktadır.

Zeminden alınan veya zemine bırakılan enerji, borularda dolaşan sıvı aracılığıyla sürekli bir döngü halinde taşınmaktadır. Borulardaki sıvının akış hızı, ısı transfer hızını etkilemektedir. Daha hızlı bir akış, daha etkili bir enerji taşınımı sağlamaktadır. Sıvı, enerjiyi zeminden veya binadan alarak sistem içinde sürekli bir döngüde hareket etmektedir. Enerji döngüsünün başarısı, toprağın termal kapasitesinin korunmasına bağlıdır.

Mevsimsel enerji dengesi, kışın zeminden alınan enerjinin, yazın zemine geri verilmesi ile sağlanmaktadır. Enerji alışverişi dengelenmezse, zemin sıcaklığı zamanla değişebilmekte ve sistem performansı düşebilmektedir. Örneğin kışın aşırı enerji çekimi, zeminin aşırı soğumasına neden olabileceken, yazın fazla ısı transferi, zeminin aşırı ısınmasına yol açabilmektedir. Bazı sistemlerde enerji döngüsü, mevsimsel enerji depolama teknikleriyle desteklenmektedir. İlkbahar ve sonbahar gibi ara mevsimlerde zemin yeniden ısı dengeye getirilmekte, bu durum, kış ve yaz modlarında zeminin performansını arttırmaktadır. Yeraltı suyu bulunan bölgelerde ise konvektif ısı transferi sayesinde enerji döngüsü daha verimli hale gelebilmektedir.

Enerji döngüsü, geotermal enerji kazıklarının verimliliğini artırmak ve uzun vadeli termal dengeyi sağlamak için kritik bir süreçtir. Uygun tasarım ve yönetimle, bu döngü sürdürülebilir enerji çözümlerinde yüksek performans sağlamaktadır. Mevsimsel enerji dengelemesi ve doğru ısı pompası seçimi, sistemin etkinliğini ve ömrünü arttırmaktadır.

2.1.1.4. Sezonsal kullanımı

Geotermal enerji kazıklarının (GEP) performansı, yıl boyunca değişen ısıtma ve soğutma taleplerine göre optimize edilmektedir. Kış aylarında zeminden alınan düşük sıcaklık, ısı pompası aracılığıyla yükseltilerek binanın ısıtılmasında kullanılırken, yaz aylarında bina içerisindeki fazla ısı zeminle paylaşılmaktadır. Bu çift yönlü enerji alışverişi, zeminin termal kapasitesini etkili bir şekilde kullanmaktadır. Ancak, kış ve yaz arasındaki dengesizlikler, zeminin sıcaklığında uzun vadeli değişimlere yol açabilmektedir. Fadejev ve ark. (2017), mevsimsel enerji taleplerinin dengelenmesinin enerji kazıklarının uzun vadeli verimliliği üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Bu dengenin sağlanamaması durumunda, zeminin sıcaklığı kışın aşırı soğuyabilir veya yazın aşırı ısınabilir ve sistem verimliliği azalabilir. Cunha ve Bourne-Webb (2022) tarafından yapılan araştırmalar ise, ara mevsimlerde (ilkbahar ve sonbahar) enerji alışverişinin dengelenmesinin zemin sıcaklıklarının doğal kararlılığını koruyarak sistemin sürdürülebilirliğine katkı sağladığını vurgulamaktadır. Bu nedenle, enerji kazıklarının tasarımında, mevsimsel enerji taleplerini karşılamaya yönelik dengeleme stratejileri, performansı artırmak için hayati öneme sahiptir.

2.1.1.5. Tasarıma dayalı faktörler

Geotermal enerji kazıklarının (GEP) ısı transfer sürecindeki verimliliği, kazık tasarımı sırasında dikkate alınan bir dizi faktöre bağlı olmaktadır. Bu faktörler, enerji transfer kapasitesini optimize etmek ve zeminin termal kararlılığını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Bunlardan ilki kazıkların uzunluğu ve çapıdır. Bu faktörler, sistemin enerji transfer kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Daha uzun kazıklar, daha geniş bir yüzey alanı sağlayarak zeminin daha derin katmanlarından ısı alımını mümkün kılmaktadır. Bourne-Webb ve ark. (2009b), derin kazıkların, yüzeye daha yakın kazıklara göre daha stabil bir termal profil sunduğunu ve mevsimsel enerji değişimlerinden daha az etkilendiğini belirtmiştir.

İkincil etmen ısı değişim boruları ve konfigürasyonudur. Isı değişim borularının yerleşimi ve türü, sistemin termal performansını önemli ölçüde belirlemektedir. Çift-U ve tek-U boru konfigürasyonları arasında verimlilik farkları bulunmaktadır. Ghasemi-Fare ve Basu (2013) çift-U boruların ısı transfer yüzey alanını artırarak enerji verimliliğini artırabildiğini göstermiştir. Bu boruların aynı kazık uzunluğu ve sıvı akış hızında daha yüksek ısı transfer oranı sağladığını ve özellikle büyük binalar gibi yüksek enerji talebi olan yapılarda daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Tek-U boruların ise maliyet açısından avantajlı olduğunu ancak sınırlı bir enerji transfer kapasitesine sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Bu tür boruların küçük ölçekli sistemlerde veya düşük enerji taleplerinde kullanılabileceğini ayrıca önermişlerdir. Boruların malzemesi de önemli olmakta ve yüksek iletkenliğe sahip malzemeler, ısı transfer oranını arttırmaktadır (Sani ve ark., 2019).

Kazık ve zemin arasındaki temas alanı ise bir diğer tasarıma dayalı faktördür. Bu temas alanı enerji transfer verimliliğinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bourne-Webb ve ark. (2009b), temas yüzeyinin arttırılmasının, enerji kazıkları için daha yüksek ısı transferi sağladığını ve bu nedenle yüzey alanının optimize edilmesi gerektiğini öne sürmüştür.

Tasarıma dayalı bir diğer faktör akış hızı ve taşıyıcı sıvının türüdür. Isı değişim borularındaki akış hızının artması, enerji taşınımını iyileştirmektedir. Ancak, çok yüksek akış hızları enerji kayıplarına ve sistemin verimliliğinde azalmaya yol açabilmektedir. Optimum akış hızının, sıvının zemin sıcaklığı ile uyumlu şekilde ısı alışverişi yapabileceği bir seviyede tutulması gerekmektedir.

Zemin türü, enerji kazıklarının performansında tasarıma dayalı önemli bir parametredir. Sani ve ark. (2019), kumlu zeminlerin killi zeminlere göre daha yüksek termal iletkenlik sunduğunu ve bu nedenle enerji kazıkları için daha uygun olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, zeminin su içeriği ve yeraltı suyu varlığı, enerji transfer verimliliğini artıran faktörler arasındadır.

Tasarımsal son faktör ise termal yüklerin dengelenmesidir. Kazıkların mevsimsel enerji taleplerine yanıt verebilmesi için, tasarım sırasında termal yüklerin dengelenmesi gereklidir. Sani ve ark. (2019), enerji kazıklarının kışın enerji çekimi ve yazın enerji geri enjeksiyonu yoluyla termal dengeyi koruyarak uzun vadeli performansı sürdürebileceğini vurgulamıştır.

2.1.2. Isı pompası entegrasyonu

Geotermal enerji kazıklarının verimli çalışabilmesi için, zemin ile enerji alışverişini düzenleyen bir ısı pompası sisteminin entegre edilmesi gerekmektedir. Isı pompası, kazıklarda dolaşan sıvı akışkanın taşıdığı enerjinin optimize edilmesini sağlayarak, binaların ısıtma veya soğutma ihtiyaçlarına yönelik enerji transferini düzenlemektedir.

Birincil ve İkincil Döngü: Birincil döngü, geotermal enerji kazıklarına entegre edilen ısı değişim borularında, akışkanın zeminle enerji alışverişi gerçekleştirdiği süreçtir. Bu döngüde, zemin sıcaklığından faydalanılarak enerji transferi sağlanmaktadır. İkincil döngü, birincil döngüde toplanan enerjinin, binanın ısıtma veya soğutma sistemine taşındığı süreçtir. Isı pompası aracılığıyla enerji, düşük sıcaklık seviyesinden daha yüksek bir sıcaklık seviyesine yükseltilmekte ve binaya iletilmektedir.

Isı Pompasının Rolü: Isı pompasında, enerjinin sıkıştırma ve genleşme prensipleriyle taşınması sağlanmaktadır. Zemin sıcaklığından elde edilen düşük sıcaklıklı enerjinin, ısı pompası tarafından sıkıştırılarak sıcaklık seviyesinin artırılması sağlanmaktadır. Bu, ısıtma sırasında binanın enerji gereksiniminin daha verimli şekilde karşılanmasına olanak tanımaktadır. Soğutma dönemlerinde ise fazla ısının zemine geri aktarılması gerçekleştirilmektedir.

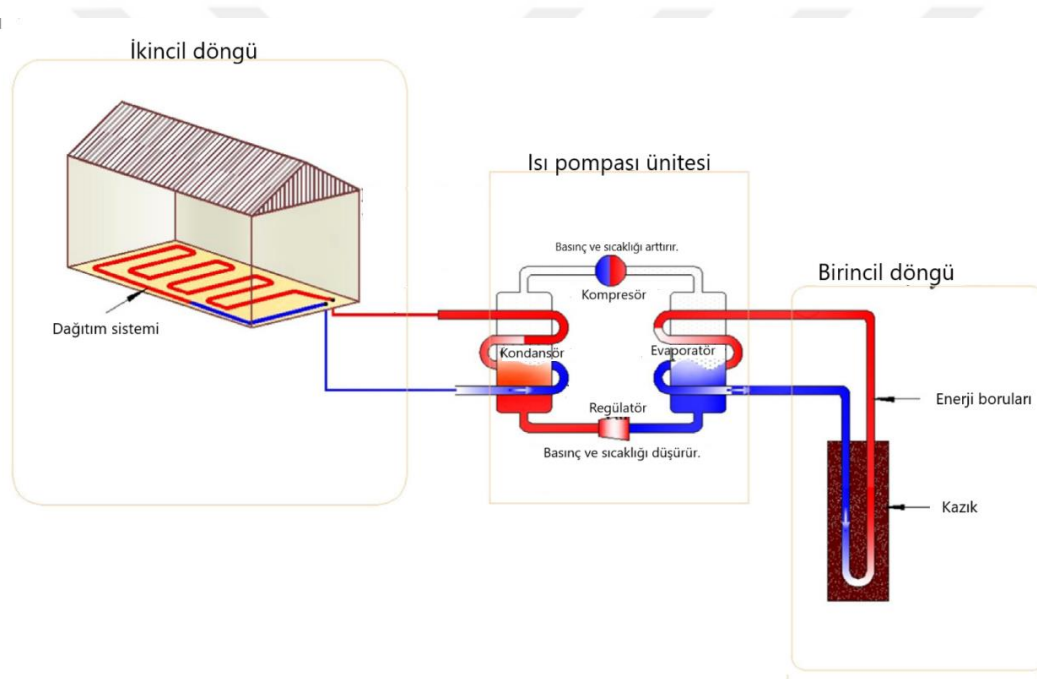
Sistem Verimliliği: Bir ısı pompasının enerji performans katsayısı (*Coefficient of Performance*, COP), üretilen enerjinin tüketilen enerjiye oranını ifade etmektedir. Geotermal sistemlerde COP değerinin genellikle 4'ün üzerinde olduğu raporlanmıştır, bu da harcanan her birim enerji karşılığında dört kat daha fazla ısıtma veya soğutma enerjisi üretildiğini göstermektedir. Bu özellik, sistemi hem enerji verimli hem de ekonomik bir seçenek haline getirmektedir.

Uygulamalarda Kullanılan Isı Pompaları: Farklı türde ısı pompalarının performansına dair yapılan çalışmalar, entegrasyonun sistem verimliliğini nasıl etkilediğini göstermiştir. Cunha ve Bourne-Webb (2022) doğru optimize edilen ısı pompası entegrasyonunun enerji kazıklarının ısı performansını önemli ölçüde artırdığını belirtmiştir.

Sonuç olarak ısı pompası entegrasyonu, enerji kazıklarının dört mevsim boyunca sürdürülebilir enerji sağlamasına katkıda bulunmaktadır. Bu entegrasyon, ısı transfer süreçlerini destekleyen bir katalizör görevi görmekte ve binaların hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlamasını mümkün kılmaktadır.

2.1.3. Döngüsel enerjinin kullanılması

Geotermal enerji kazıkları, yıl boyunca enerji alışverişini sürekli ve dengeli bir şekilde gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Bu sistemler, kış aylarında zeminle enerji alışverişi yaparak toprak sıcaklığından yararlanmakta ve depolanan ısıyı bina içerisine taşımaktadır. Yaz aylarında ise tam tersi bir süreç izlenmektedir; bina içerisindeki fazla ısı, zemin tarafından emilerek dengelenmektedir. Bu döngüsel enerji hareketi, sistemin uzun vadeli verimliliğini arttırmakta ve zemin sıcaklıklarının aşırı değişim göstermesini engellemektedir. Bu enerji alışverişi sayesinde, geotermal enerji kazıkları sadece binanın enerji ihtiyacını karşılamakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir rol oynar. Şekil 2.2’de döngüsel sistem tanıtılmıştır.



Şekil 2.2. Enerji kazığı döngü sistemi (Sani ve ark. (2019)’tan uyarlanmıştır).

2.1.4. Sistemin verimliliği ve uzun vadedeki performansı

Geotermal enerji kazıklarının verimliliği, sistemin tasarımına, zemin özelliklerine ve kullanılan ısı pompasının performansına bağlıdır. Bu sistemlerde verimlilik, genellikle Coefficient of Performance (COP) olarak ifade edilen katsayıyla ölçülmektedir.

Uzun vadeli performans ise zemin sıcaklığının zamanla korunmasına bağlıdır. Eğer zemin sıcaklığı sürekli olarak aynı yönde değiştirilirse, sistem verimliliği azalabilmektedir. Bu tür sorunların önüne geçmek için, zeminle yapılan enerji alışverişi dengelenmelidir. Örneğin, yaz aylarında bina içerisinden zemine aktarılan

enerji miktarının, kış aylarında zeminden alınan enerjiyle dengeli olması sağlanmalıdır. Bu dengeleme süreci, sistemin sürdürülebilirliğini artırmak ve zemindeki termal dengesizliklerin önüne geçmek için gereklidir. Ancak genel olarak, enerji kazıkları ile yapılan bu döngüsel kullanım, geleneksel ısıtma ve soğutma yöntemlerine kıyasla daha çevre dostu ve enerji açısından daha verimli bir çözüm sunmaktadır.

Zeminin termal kapasitesinin korunması amacıyla, uzun dönem enerji alışverişinin düzenli ve dengeli bir şekilde yapılması önerilmektedir. Bunun yanı sıra, zemin sıcaklığının korunması için mevsimsel enerji depolama ve transfer yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tür stratejiler hem enerji kazıklarının hem de bağlı oldukları sistemlerin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Uzun vadeli performansın sağlanması, enerji kazıklarının çevresel etkilerini en aza indirmek ve enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkarmak açısından kritik bir öneme sahiptir.

2.2. Geotermal Enerji Kazıklarının Uygulama Alanları ve Örnek Projeler

Son yıllarda artan çevresel farkındalık ve enerji maliyetlerindeki yükseliş, geotermal kazık uygulamalarının dünya genelinde daha fazla benimsenmesini sağlamıştır. Bu bölümde, farklı coğrafyalarda gerçekleştirilen örnek projeler ve bu sistemlerin uygulama projelerinden birkaç örnek ele alınmıştır.

İlk uygulamalardan biri olarak, Avusturya'nın Bad Schallerbach kentinde, bir rehabilitasyon merkezi inşaatı sırasında 143 kazıklı bir yer kaynaklı ısı pompası (GSHP) sistemine entegre edilen enstrümente bir test kazığı örnek verilebilir. Yedi katlı yapıyı taşıyan kazıklı radye temel sistemi içinde yer alan test kazığı, kazık başı ve ucuna yerleştirilen basınç hücreleri, üç farklı seviyede fissürometreler ve beş seviyede termo-elemanlarla donatılmıştır. Binanın yapısal sistemi 1996 sonbaharında %90 ölü yüküyle tamamlanmış ve GSHP sistemi 1997'de tam olarak devreye alınmıştır. Kazıktan 1996-1998 yılları arasında, yılın farklı dönemlerinde veri toplanmış ve sistemin uzun vadeli performansı değerlendirilmiştir.

Texas A&M Üniversitesi'nin Riverside kampüsünde Briaud (1997) tarafından kapsamlı bir test sahası oluşturulmuştur. Yaklaşık 5.500 m² büyüklüğündeki bu saha, özellikle enerji kazıkları ve geoteknik araştırmalar için kullanılmakta olup, biri kil diğeri kum olmak üzere iki ana test alanına ayrılmıştır. Akrouch ve ark. (2014) bu sahada yürüttükleri çalışma özelinde kil alanında testler gerçekleştirmişlerdir. Test

kazığında kullanılan grout malzemesinin 28 günlük basınç dayanımı ortalama 25,7 MPa, elastisite modülü yaklaşık 17.400 MPa olarak belirlenmiş; ısı transferinde ise standartlara uygun borular kullanılmıştır. Enerji kazıklarında sıcaklık artışı kaynaklı termal gerilmeler oldukça düşük seviyede kalmış, ancak yüksek plastisiteli killerde uzun vadeli deplasmanları arttırmıştır. Özellikle sadece soğutma modunda çalışan sistemlerde, enerji kazığının 50 yıllık deplasmanının normal kazığa göre 2.35 kat fazla olduğu bulunmuştur. Bu nedenle enerji kazıklarının simetrik yerleştirilmesi gerektiği, oturmaların en aza indirilmesi gerektiği ve uzun vadeli davranış için farklı zemin türlerinde yükleme testlerinin yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Lambeth Koleji (Londra, İngiltere) yerleşkesinde 2008 yılında inşa edilen yeni beş katlı altıncı sınıf eğitim merkezi kapsamında, enerji kazıklarının hem yapısal hem de termal performansını inceleyen kapsamlı bir uygulama gerçekleştirilmiştir (Amis ve ark., 2008; Borne-Webb ve ark., 2009a; Amatya ve ark., 2012). Projede toplam 143 temel kazığı, bina içindeki ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılamak amacıyla enerji kazığı olarak tasarlanmış ve yer kaynaklı ısı pompası (GSHP) sistemine entegre edilmiştir. Ana test kazığına 1200 kN sabit düşey yük uygulanmış ve kazık başı serbest bırakılarak yük kontrolü sağlanmıştır. Isı değişimi amacıyla kullanılan ikinci kazıkta ise sadece termal yükleme gerçekleştirilmiştir. Ana kazık, bazı ankraj kazıkları ve ısı kazığına optik fiber sensörler yerleştirilerek 53 gün süren kapsamlı bir izleme yapılmıştır. Bu süre zarfında kazık 31 gün boyunca soğutulmuş, 12 gün ısıtılmış ve ardından üç günlük ısıtma-soğutma döngülerine tabi tutulmuştur. Bu uygulama, hem yenilenebilir enerji entegrasyonu hem de enerji kazıklarının uzun dönemli termomekanik davranışlarının değerlendirilmesi açısından önemli bir örnektir.

Lozan Federal Teknoloji Enstitüsü'nde (İsviçre), 2006 yılında yapılan yeni bir binanın inşası sırasında enerji kazığı uygulaması gerçekleştirilmiştir (Laloui ve ark., 2006). Dört katlı yapının kenarında yer alan test kazığı, hem taşıyıcı hem de enerji değiştirici olarak işlev görmüştür. Kazığa yerleştirilen optik fiber sensörler, ekstansometreler ve kazık tabanındaki yük hücresi ile yük ve sıcaklık verileri izlenmiştir. Termal testler, her kat inşaatının tamamlanmasının ardından farklı düşey yükler altında gerçekleştirilmiş; her biri yaklaşık 28 gün süren yedi ayrı ısıtma ve geri kazanım döngüsü uygulanmıştır. Maksimum kazık başı yükü yaklaşık 1300 kN'a ulaşmıştır. Uygulama, enerji kazıklarının yapı inşasıyla eşzamanlı kullanımına dair önemli saha verileri sunmaktadır.

3. ENERJİ KAZIKLARININ SAYISAL MODELLEMESİ

Enerji kazıklarının sayısal olarak modellenmesi, genellikle ısı transferi ve zemin-kazık etkileşimlerinin detaylı bir şekilde temsil edildiği sonlu farklar, sonlu hacimler ve sonlu elemanlar yöntemlerine dayanmaktadır. Bu modeller, kazık içindeki akışkanın sıcaklık dağılımı, dolgu malzemesi içinden geçen eksenel ısı akışı, çevre zemin ile olan ısı alışverişi gibi fiziksel süreçleri dikkate alarak, enerji kazıklarının termal performansını zamanla değerlendirebilmektedir. Modelleme sürecinde, kazığın geometri özellikleri, boru düzeni, termal iletkenlik ve özgül ısı gibi parametreler temel alınır. Böylece, enerji kazıklarının ısıtma ve soğutma uygulamalarındaki verimlilikleri öngörülebilir ve sistem tasarımı optimize edilebilir.

3.1. Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)

Enerji kazıklarının ve geotermal sondaj borularının ısı performansını değerlendirmek amacıyla geliştirilen sonlu farklar yöntemi (*finite difference method*, FDM) tabanlı modeller, sıcaklık dağılımını hem zamansal hem de mekânsal olarak çözümleyebilen güçlü sayısal araçlardır. Bu modellerde kazık, boru, dolgu ve çevre zemin belirli düğüm noktalarına bölünerek, ısı iletimi denklemine dayalı fark denklemleri ile çözüm yapılır. Eskilson (1987)'un geliştirdiği ilk modellerden itibaren zamanla gelişen bu yaklaşım, farklı araştırmacılar tarafından çeşitli detayları içerecek biçimde uyarlanmıştır. Örneğin Hellström (1991) tarafından geliştirilen FDM modeli, mevsimsel ısı depolama uygulamaları için kısa zaman adımlarıyla çalışan geçici analizler yapabilmektedir. Yavuztürk (1999) gibi araştırmacılar ise, boru içindeki akışkanın, dolgunun ve zemin malzemesinin ısı kapasitelerini dikkate alan daha gelişmiş yapılar önermiştir. Radyal ve eksenel yönlerdeki ısı transferlerinin ayrı ayrı modellenmesiyle sistemin ayrıntılı bir termal analizine imkân tanınmaktadır. Ayrıca, modellerin çoğunda boruların geometrik yerleşimi, ısı akış yönü ve sınır koşulları (örneğin yüzey sıcaklığı veya sabit zemin sıcaklığı) kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. Özellikle Ghasemi-Fare ve Basu (2013) tarafından geliştirilen modellerde, yüzey sıcaklığının zamanla değişmesi gibi gerçekçi koşullar modele dâhil edilerek enerji kazığı ile zemin-yapı arayüzü daha doğru temsil edilebilmektedir.

Yapılan doğrulama çalışmalarında, bu yöntemle elde edilen çıkış sıcaklıklarının deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmüş; böylece bu modeller, tasarım ve performans analizlerinde güvenilir bir temel sunmuştur. Sonlu farklar yöntemi, gerek kısa vadeli sistem tepkisini analiz etmede gerekse zemin özelliklerinin ısı performans üzerindeki etkisini incelemeye geniş olanaklar sağlamaktadır.

3.2. Sonlu Hacim Yöntemi (FVM)

Enerji kazıkları, sonlu hacim yöntemi (*finite volume method, FVM*) ile de ayrıntılı şekilde modellenebilmektedir. Bu yöntemde, modelleme alanı küçük hacimsel hücrelere bölünerek her hücre için enerji denklikleri kurulmakta ve bu denklemler üzerinden sıcaklık dağılımı ve ısı transferi hesaplanmaktadır. FVM özellikle kompleks geometrilerin daha doğru temsil edilmesi ve kütle/enerji korunumu açısından avantaj sağlamaktadır.

Bu yöntemle örnek olarak, Yavuztürk ve ark. (1999) tarafından geliştirilen iki boyutlu bir sonlu hacim modeli verilebilir. Bu model, sondaj kuyusunun ve içindeki boru sisteminin geometrisine göre hesaplama ağını otomatik olarak oluşturmakta ve bu yapıyı kullanarak enerji kazığının termal davranışını analiz etmektedir. Model, ayrıca g-fonksiyonu değerlerini hesaplamak üzere analitik çözümlerle de ilişkilendirilmiştir.

He ve ark. (2010) ise FVM'yi hem iki hem de üç boyutlu olarak kullanmış, daha detaylı bir analiz için GEMS2D/3D adlı bir çözümleyici ortamında modellerini geliştirmiştir. Bu modellerde, sondaj borusunun çevresindeki karmaşık geometri sınırla uyumlu ağ yapılarıyla temsil edilmekte, boru içindeki akışkan hareketi ve sıcaklık değişimleri derinlik boyunca modellenebilmektedir. Ayrıca, farklı zemin katmanları, yüzeydeki iklim koşullarına bağlı sınır şartları, başlangıç sıcaklık gradyanları ve kuyu altındaki ısı geçişi de açıkça tanımlanabilmektedir. Ancak bu tür ayrıntılı üç boyutlu modellerin en büyük dezavantajı, oldukça yüksek hesaplama süresine ihtiyaç duymasıdır.

Genel olarak, FVM yöntemi enerji kazıklarının daha gerçekçi ve kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanırken, özellikle çok katmanlı zemin profilleri ve zamana bağlı yüzey sıcaklıklarının etkisini dikkate almak isteyen çalışmalar için önemli bir alternatif sunmaktadır.

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Enerji kazıkları, sonlu elemanlar yöntemi (*finite element method, FEM*) kullanılarak da yüksek doğrulukta ve ayrıntılı şekilde modellenenbilmektedir. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometrilere sahip yapılar, heterojen zemin özellikleri ve zamana bağlı çoklu fiziksel süreçlerin birlikte modellenmesi gereken durumlarda önemli avantajlar sunar. FEM ile yapılan modellemelerde, analiz alanı küçük sonlu elemanlara ayrılarak her eleman için enerji, kütle ve/veya momentum denklikleri çözülür. Bu sayede, hem geçici (*transient*) ısı transferi hem de zemin-su etkileşimi gibi termal-hidrolik-mekanik süreçler eş zamanlı olarak incelenebilir. FEM' in en büyük avantajlarından biri olan karmaşık geometri ve malzeme dağılımlarını tanımlayabilme yeteneği, bu tür uygulamalarda önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte, FEM modelleri genellikle yüksek hesaplama süresi gerektirir; ancak bu durum, modelin çözüm hassasiyeti ve fiziksel gerçekçiliği açısından kabul edilebilir bir bedeldir.

Muraya (1994) tarafından geliştirilen iki boyutlu FEM modeli, sondaj kuyusu çevresindeki zeminde zamana bağlı ısı ve kütle transferini modellemiş ve zemin su içeriği ile dolgu (*grout*) malzemesinin enerji kazığının performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu model, ayrıca zemin içindeki suyun taşınım etkilerini de hesaba katarak ısı transferinin yalnızca iletim yoluyla değil, hareketli sıvı ortamıyla da gerçekleştiği durumları analiz edebilmektedir. Gashti ve ark. (2014), COMSOL yazılımını kullanarak beş farklı enerji kazığı senaryosunu sonlu elemanlarla modellemiş ve bu modelleri 28 gün boyunca alınan deneysel verilerle doğrulamıştır. Modelde zemin-su taşınımı dahil edilebilmesine rağmen, çalışma alanında yeraltı suyu akışı ihmal edilecek kadar düşük seviyede kalmıştır. Bu çalışmanın amacı, enerji kazığının soğutma ve ısıtma modundaki ısı rejimini incelemek ve bu koşulların kazığın mekanik davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Modelde güneş kollektörüyle entegre edilen bir GSHP sistemi simüle edilmiş ve soğuk iklim koşullarında (örneğin Finlandiya) yeraltına ısı geri beslemesi sağlanarak sistem verimliliğinin uzun vadede korunması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar, ısıtma modunda yaklaşık 1.5 °C'lik, soğutma modunda ise kazık yüzeyinde 15 °C'ye kadar çıkan sıcaklık farklarının oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu durum, termal yüklemelerin kazık-mekanik davranışı üzerinde önemli etkiler yaratabileceğini ve bu etkilerin tasarım sürecinde dikkate alınması gerektiğini göstermiştir.

Dupray ve ark. (2014) ise Lagamine yazılımı ile enerji kazıkları ve zemin etkileşimini iki boyutlu olarak modellemiş, kazık iç yapısı sadeleştirilerek sadece zeminle etkileşime odaklanılmıştır. Zemin, tamamen doymuş kil olarak tanımlanmış ve su akışı hesaba katılmasa da boşluk suyu basıncındaki değişimler modellenmiştir. Her bir kazığa 3 MPa'lık mekanik yük uygulanmış ve bu yük tipik bir bina sistemini temsil edecek şekilde seçilmiştir. Beş yıllık simülasyon süresi boyunca farklı ısı çıkarma ve geri besleme senaryoları denenmiş, yüksek sıcaklıklı ısı depolamasının kazık performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. 245 W/m enjeksiyon ve 225 W/m ekstraksiyon oranlarıyla yapılan çalışmalarda, başlangıç zemin sıcaklığında yaklaşık 13 °C'lik bir artış gözlemlenmiş, ortalama depolama sıcaklığındaki her 1 °C'lik artışın verimliliği %1.4 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, tekil kazıklar yerine kazık grubu modellemesinin mekanik ve ısıl davranış açısından daha gerçekçi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır. Di Donna ve ark. (2016), enerji kazıklarının grup halinde termo-mekanik davranışını incelemek amacıyla üç boyutlu bir termo-hidro-mekanik sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Model, İsviçre'deki Teknoloji Kongre Merkezi'nde yer alan dört kazıklı bir sistem üzerinde uygulanmış ve kapsamlı saha verileriyle doğrulanmıştır. Bu doğrulamanın ardından model, daha yüksek sıcaklık değişimleri ve homojen olmayan ısıtma senaryolarını test etmek için kullanılmıştır. Çalışmada, boru içi akış göz ardı edilerek kazıkların ısıl yükler altındaki yer değiştirme ve gerilme tepkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, işletme koşullarında ısı kaynaklı gerilmelerin beton dayanımı sınırları içinde kaldığını ancak sıcaklık arttıkça hem oturmaların hem de iç gerilmelerin belirgin şekilde yükseldiğini göstermiştir. Model, enerji kazıklarının tasarımında grup etkilerinin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Bui ve ark. (2020), aynı sahadan elde edilen verileri kullanarak Plaxis 2D yazılımı ile enerji kazıklarının davranışını modellemiştir. İlk olarak, zemin ısıl iletkenliği ve kazığın ısıl direncini tahmin etmek amacıyla yapılan geçici ısıl yanıt testi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardından, tekil bir enerji kazığının termal yük döngüsü altındaki davranışını incelemek üzere termo-hidro-mekanik bir analiz yürütülmüştür. Bu analizde, zemin-yapı etkileşimini daha doğru yansıtmak amacıyla çeşitli modelleme bileşenleri (örneğin, davranış modelleri ve arayüz elemanları) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, hem literatürdeki benzer sayısal analizlerle hem de deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmış ve bu sayede Plaxis'in enerji temellerinin tasarım ve analizinde kullanılabilirliği gösterilmiştir.

4. HASSASLIK VE PARAMETRE DEĞİŞİMİ ANALİZİ

Hassaslık ve parametre değişimi analizi, sayısal modellemede kullanılan zemin ve yapı parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkilerini değerlendirmeye yönelik önemli bir aşamadır. Bu analiz, her bir parametrenin kabaca varyasyon katsayısı oranlarında artırılıp azaltılmasıyla modelin tepkisinin nasıl değiştiğini ortaya koyar. Böylece, hangi parametrelerin sonuçlar üzerinde daha etkili olduğu belirlenebilir. Bu yöntem, özellikle karmaşık geoteknik problemlerde modelin güvenilirliğini artırmak, kritik parametreleri tespit etmek ve tasarım sürecine yön vermek açısından faydalı bilgiler sağlar. Ayrıca, modelin genel kararlılığı ve doğruluğu açısından da önemli bir değerlendirme aracıdır.

4.1. Hassaslık Analizi

Parametrik bir çalışmada, bazı parametrelerin sonuçlar üzerinde diğerlerine göre çok daha belirgin etki yaratabileceği, bazılarının ise ihmal edilebilecek düzeyde etkisiz kalabileceği unutulmamalıdır. Analizde ele alınacak kombinasyon sayısını azaltmak için ilk adım, her bir parametrenin etkisini “hassaslık analizi” ile belirlemektir; etkisi düşük olanlar sonraki çözümlerden elenir. Bu yaklaşım, makine öğrenmesindeki “özellik seçimi” (*feature selection*) kavramına benzer.

Hassaslık analizinde, incelenecek her parametrenin minimum ve maksimum sınır değerleri için hesaplamalar yapılır. Literatürde, zemin sınır değerlerini ifade etmek için değişim katsayısı (*coefficient of variation*, COV) gibi istatistiksel ölçütler sıkça kullanılmaktadır. Bu ölçüt, denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır.

$$COV = \frac{\text{Standart sapma}}{\text{Ortalama değer}} \quad (4.1)$$

Farklı zemin özelliklerine ait yüzdelik COV değerleri Tablo 4.1’ de verilmiştir. Tablodaki değerler farklı araştırmacılara ait çalışmalardan elde edilmiştir (Harr, 1984; Phoon ve Kulhawy, 1999; Duncan, 2000).

Tablo 4.1. Farklı zemin özellikleri ve arazi deneyleri için değişim katsayısı değerleri.

Zemin parametresi	COV (%)
Birim hacim ağırlık	3-7
Batık birim hacim ağırlık	0-10
Efektif kayma direnci açısı	2-13
Drenajsız kayma direnci	13-40
Drenajsız direnç oranı	5-15
Sıkışma indisi	10-37
Önkonsolidasyon basıncı	10-35
Doygun killer için geçirimsizlik katsayısı	68-90
Kısmen doymuş killer için geçirimsizlik katsayısı	130-240
Konsolidasyon katsayısı	33-68
Standart penetrasyon katsayısı	15-45
Koni penetrasyon uç direnci (elektrik)	5-15
Koni penetrasyon uç direnci (mekanik)	15-37
Dilatometre testi uç direnci (elektrik)	5-15
Veyn kesme testi drenajsız kayma direnci	10-20

Phoon ve Kulhawy (1999), yaptıkları kapsamlı istatistiksel değerlendirmelerde, elastisite modülüne ait değişim katsayısının %14 ile %68 arasında, kayma direnci açısının ise %6 ile %21 aralığında değiştiğini ortaya koymuştur. Harr (1984) ise kayma direnci açısı için bu oranın %2 ile %13 arasında seyrettiğini ifade etmiştir. Lumb (1974) tarafından yapılan çalışmada ise drenajsız kil zeminler için kohezyon değerine ait değişim katsayısı %20 ile %50 arasında, kum içeren zeminlerde ise bu oranın %25 ile %30 arasında olduğu belirtilmiştir. Bu veriler, zemin parametrelerinin doğal değişkenliğini dikkate alarak analizlerde uygun minimum ve maksimum değerlerin belirlenmesinde önemli bir referans oluşturmaktadır.

Hassaslık analizlerinde etkisi incelenecek parametre sayısı n ise yürütülecek toplam analiz sayısı $2n+1$ olur (buradaki “+1” ana modeli temsil eder). Analiz sonunda, daha önceden tanımlanan bir kritere göre (örneğin deplasman, gerilme ya da güvenlik katsayısı) en etkili zemin parametreleri hassaslık oranlarıyla belirlenir. Hassaslık oranı (η_{SR}) sonuçtaki değişim yüzdesinin girdideki değişim yüzdesine oranı ile denklem 4.2’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\eta_{SR} = \frac{\left[\frac{f(x_{L,R}) - f(x)}{f(x)} \right] \cdot 100\%}{\left[\frac{x_{L,R} - x}{x} \right] \cdot 100\%} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de, x herhangi bir özelliğin referans değerini, $x_{L,R}$ ise bu özelliğin değiştirilmiş değerini temsil etmektedir. $f(x)$ ve $f(x_{L,R})$ ifadeleri ise sırasıyla referans ve değiştirilmiş değerlerin kullanımıyla elde edilen sonuçları göstermektedir. Hesaplanan hassaslık oranının, girdi değişiminin normalize edilmiş haliyle çarpılması sonucunda hassaslık sayısı (η_{SS}) değeri denklem 4.3 ile elde edilir. Bu değer, sonuçların daha sade ve karşılaştırılabilir şekilde yorumlanmasına olanak tanır.

$$\eta_{SS} = \eta_{SR} \cdot \frac{(\max x_R - \min x_R)}{x} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3’te, $\max x_R$ ve $\min x_R$, incelenen zemin parametresinin sırasıyla en yüksek ve en düşük değerlerini; x ise başlangıçta referans olarak kabul edilen değerini ifade etmektedir. Hassaslık analizi kapsamında, her bir hesaplama aşaması için seçilen parametrelerin (örneğin elastisite modülü, içsel sürtünme açısı gibi) model sonuçları (örneğin deplasman, iç kuvvet, güvenlik katsayısı vb.) üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla hassaslık sayıları ($\eta_{SS,i}$) hesaplanır. Hassaslık analizinden elde edilen hassaslık sayıları, her bir girdi ve her bir çıktı için düzenlenerek Şekil 4.1’deki gibi bir hassaslık matrisi oluşturulur.

	Sonuçlar					
	A	B		Z	Σ	α (%)
Girdiler						
x_1	η_{SS,A_1}	η_{SS,B_1}	...	η_{SS,Z_1}	$\Sigma\eta_{SS,1}$	$\alpha(x_1)$
x_2	η_{SS,A_2}	η_{SS,B_2}	...	η_{SS,Z_2}	$\Sigma\eta_{SS,2}$	$\alpha(x_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
x_N	η_{SS,A_N}	η_{SS,B_N}	...	η_{SS,Z_N}	$\Sigma\eta_{SS,N}$	$\alpha(x_N)$

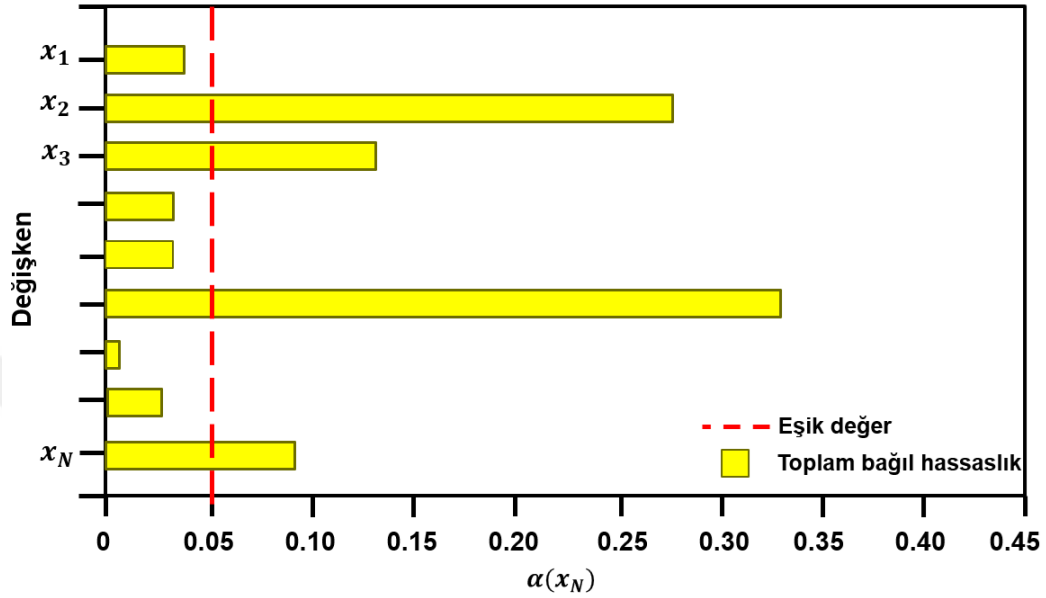
Şekil 4.1. Hassaslık matrisinin oluşturulması.

Bu matris, hangi girdinin (örneğin zemin parametrelerinin) hangi sonuç (örneğin deplasman, iç kuvvet, güvenlik katsayısı) üzerinde ne düzeyde etkili olduğunu sayısal olarak gösterir. Matrisin satırları analiz edilen parametreleri ($x_1, x_2, \dots, x_n$), sütunları ise model çıktısını temsil eder (A, B, ..., Z). Her hücrede yer alan η_{SS} değeri, ilgili girdinin belirli bir sonuca etkisini temsil eder. Bu matris kullanılarak ilk olarak her bir parametre için toplam hassaslık sayısı hesaplanır. Bu değer, o parametreye ait tüm sonuçlara karşılık gelen hassaslık sayılarının toplamı ile elde edilir ve $\Sigma\eta_{SS,i}$ sembolü ile ifade edilir. Bu sayede, her bir değişkenin modelin genel davranışı üzerindeki toplam etkisi sayısal olarak ortaya konur. Parametrelerin göreceli önemini karşılaştırmak için toplam denklem 4.4 ile verilen bağıl hassaslık değeri hesaplanır. Peschl (2004) tarafından önerilen bu yöntem, bir parametrenin toplam hassaslık sayısının ($\Sigma\eta_{SS,i}$), tüm parametrelerin toplam hassaslık sayıları toplamına ($\sum_{i=1}^N \eta_{SS,i}$) oranlanması ile bulunur. Bu oran $\alpha(x_i)$ ile gösterilir ve her bir değişkenin sistem içindeki bağıl etkisini yüzdesel olarak ortaya koyar.

$$\alpha(x_i) = \frac{\Sigma\eta_{SS,i}}{\sum_{i=1}^N \eta_{SS,i}} \quad (4.4)$$

Toplam bağıl hassaslık değerleri, Şekil 4.2'deki gibi grafiksel olarak gösterildiğinde, analiz edilen tüm değişkenler arasında karşılaştırma yapılmasına olanak tanır. Bu grafiklerde genellikle bir eşik değeri de belirtilir. Bu eşik değerinin altında kalan değişkenler sistem üzerinde düşük etkili kabul edilirken, üzerinde kalanlar kritik parametreler olarak değerlendirilir. Böylece, hem hesap yükü azaltılır hem de analiz süreci optimize edilir.

Sonuç olarak, hassaslık analizi ile elde edilen bu değerler sayesinde, modelde hangi parametrelerin daha dikkatli tanımlanması gerektiği belirlenebilir ve ileri analizlerde yalnızca önemli değişkenlere odaklanılarak daha verimli ve güvenilir sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 4.2. İncelenen değişkenlere ait bağıl hassaslık değerlerinin dağılımı.

4.2. Parametre Değişimi Analizi

Parametre değişimi analizi, modellenen sistemde yer alan her bir parametrenin alt ve üst sınır değerlerinin bir araya getirilmesiyle tüm olası kombinasyonların oluşturulmasına dayanır. Bu analizde, her kombinasyon için model ayrı ayrı çalıştırılır ve tüm yapım aşamaları yeniden hesaplanır. Böylece, yalnızca ana model üzerinden elde edilen sonuçlara değil, farklı parametre kombinasyonlarının model davranışı üzerindeki etkilerine de bütüncül bir bakış sağlanır. Bu yöntem, özellikle karmaşık zemin-yapı etkileşimlerinde, parametreler arası etkileşimlerin sistematik şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Analiz sürecinde, öncelikle ana model çalıştırılarak doğal gerilme durumu ve yer değiştirme gibi referans çıktıları elde edilir. Ardından, belirlenen her bir kombinasyon için hesaplama tekrar yapılır ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılır.

Ancak bu yöntemin en önemli dezavantajı, hesaplama sayısının parametre sayısına bağlı olarak üstel şekilde artmasıdır. n adet parametre kullanılması durumunda, her biri için iki uç değer (minimum ve maksimum) dikkate alındığında, toplamda 2^{n+1}

adet model çözümü yapılması gerekmektedir. Bu da parametre sayısı arttıkça analiz sayısının katlanarak artmasına neden olur. Örneğin 3 parametre için 9 model gerekirken, 6 parametre için bu sayı 65'e, 9 parametre için ise 513'e çıkmaktadır. Bu artış, hem çözüm süresinin uzamasına hem de hesaplama kaynaklarının aşırı kullanımına yol açar; dolayısıyla zaman ve maliyet açısından sürdürülebilir olmayan bir durum oluşturur.

Bu nedenle, parametre değişimi analizinin etkin şekilde kullanılabilmesi için öncelikle hassaslık analizinden elde edilen sonuçlara başvurulması önerilir. Hassaslık analizi sonucunda yüksek skor alan, yani model çıktıları üzerinde anlamlı etkisi bulunan parametreler belirlenerek, yalnızca bu parametreler parametre değişimi analizine dahil edilmelidir. Böylelikle önemsiz parametrelerin kombinasyonları elenmiş olur ve gereksiz hesaplamaların önüne geçilir. Bu yaklaşım hem analiz süresini optimize eder hem de elde edilen sonuçların doğruluğunu ve anlamlılığını korur.

Sonuç olarak, hassaslık ve parametre değişimi analizlerinin bir arada ve birbirini tamamlayacak şekilde kullanılması, modelleme sürecinin hem verimliliğini hem de güvenilirliğini artırır. Bu sayede, karar vericilere yalnızca genel eğilimleri değil, aynı zamanda değişkenlerin karşılıklı etkileşimlerini de göz önünde bulundurarak daha sağlıklı bir mühendislik değerlendirmesi yapma imkânı sunulur.

4.3. Plaxis Programında Hassaslık ve Parametre Değişimi Analizi

Plaxis 2D'nin gelişmiş sürümlerinde yer alan “Hassaslık Analizi” ve “Parametre Değişimi” araçları, zemin parametrelerinin mühendislik tasarım sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmeye olanak tanıyan güçlü hesaplama modülleridir. Bu araçlar sayesinde modelde kullanılan her bir zemin parametresinin sistem davranışı üzerindeki etkisi hem nicel hem de görsel olarak analiz edilebilmektedir. Kullanıcı, bu analizleri farklı inşaat aşamalarında yer değiştirme, gerilme dağılımı ve güvenlik faktörü gibi mühendislik çıktıları üzerinden gerçekleştirebilir.

Plaxis yazılımında hassaslık analizi, teorik olarak oldukça basit bir prensibe dayanır: seçilen bir parametrenin belirli bir aralıkta alt ve üst sınır değerleriyle değiştirilmesiyle model yeniden hesaplanır ve sonuçlardaki farklılıklar karşılaştırılarak o parametrenin sisteme olan duyarlılığı ölçülür. Bu analiz manuel olarak da yapılabilir; ancak Plaxis'in sunduğu otomatik analiz aracı sayesinde bu işlem hem daha kısa sürede gerçekleştirilmekte hem de kullanıcı kaynaklı hataların önüne geçilmektedir.

Hassaslık analizinde her bir parametre için biri parametrenin minimum değeri, diğeri ise maksimum değeri esas alınarak iki farklı senaryo oluşturulur. Bu iki senaryoya ek olarak, referans model (yani başlangıç parametreleri ile oluşturulan model) de analizde yer alır. Dolayısıyla, n adet parametrenin analiz edildiği bir durumda toplam çözüm sayısı $2n+1$ olacaktır. Bu sayı, sadece alt ve üst değerlerin etkisini görmek için yeterlidir; ancak parametrelerin olası tüm kombinasyonlarının etkisini görmek isteyen kullanıcılar için "Parametre Değişimi" seçeneği devreye girer. Bu yöntemde ise her parametrenin alt ve üst değeri kullanılarak tüm kombinasyonlar hesaplanır ve modelin tüm aşamaları her bir kombinasyon için yeniden çözülür. Bu durumda çözüm sayısı 2^{n+1} olur ve özellikle parametre sayısı arttıkça hesaplama süresi katlanarak artar.

Plaxis yazılımı, hassaslık analizinden elde edilen verileri değerlendirmek için özel metrikler kullanır. Bu metriklerden biri Hassaslık Oranı (*Sensitivity Ratio*, η_{SR})'dır. Bu oran, parametredeki değişimin çıktılarıdaki görece etkisini sayısal olarak gösterir. Ancak tek başına hassaslık oranı her zaman yeterli bir gösterge değildir. Bu nedenle Hassaslık Sayısı (*Sensitivity Score*, η_{SS}) adı verilen bir başka parametre daha hesaplanır. Bu değer, hassaslık oranının parametrenin değişim aralığı ile çarpılması sonucu elde edilir ve farklı parametreler arasında kıyaslama yapılmasını kolaylaştırır. Bu şekilde oluşturulan hassaslık matrisi, hangi parametrelerin model sonuçlarına en fazla etki ettiğini açıkça ortaya koyar.

Uygulamada, hassaslık analizi genellikle modelleme sürecinin başlarında yapılır ve etkisi düşük parametreler eğer tasarım açısından kritik değilse daha sonraki analizlerde ihmal edilebilir. Bu durum, analiz süresini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, yüksek duyarlılığa sahip parametrelerin doğruluğu üzerinde daha dikkatli durulması gerektiğini de gösterir.

Sonuç olarak, Plaxis'te hassaslık ve parametre değişimi analizleri, sayısal modelin güvenilirliğini artırmak, tasarım sürecinde kritik parametreleri önceliklendirmek ve zaman-kaynak yönetimini optimize etmek için son derece faydalı araçlardır. Özellikle karmaşık geoteknik problemlerde model davranışının hangi girdilere ne ölçüde bağlı olduğunu anlamak açısından vazgeçilmez bir yöntemdir. Bulgular, tasarım kararlarını rasyonelleştirerek gereksiz güvenlik katsayılarının önüne geçer. Belirleyici parametreler için ek laboratuvar testleri veya yerinde ölçümler planlanarak model girdilerinin belirsizliği azaltılabilir. Böylece, kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında zaman kaybı en aza indirilir. Nihayetinde, hassaslık analizlerine dayanan bu sistematik

yaklaşım, geoteknik projelerde performans temelli tasarım kültürünün yerleşmesine katkı sağlar.



5. MALZEME VE YÖNTEM

5.1. Vaka Analizi

Bu tezde çalışılan örnek vaka, İsviçre Lozan Federal Teknoloji Enstitüsü (EPFL) yerleşkesinde bulunan deneysel bir sahayı kapsamaktadır. Mimouni ve Laloui (2015) tarafından geliştirilen bu sahada enerji kazıklarının tasarımı, yerleştirilmesi ve kapsamlı testleri tamamen bu araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, yalnızca bu tezdeki analizler için bir temel oluşturmakla kalmamış, aynı zamanda alanda sonradan yapılan birçok çalışmaya ilham veren bir öncü olmuştur (Di donna ve ark., 2016; Bui ve ark., 2019; Bui ve ark., 2020).

Mimouni ve Laloui (2015) tarafından yürütülen deneysel çalışma, arazi testleri aracılığıyla termoaktif temel sistemlerindeki etkileşim mekanizmalarının değerlendirilmesine odaklanmıştır. Araştırma, yağmur suyunu toplayan bir su deposunu taşıyan toplam 20 kazıktan enerji kazığı olarak kullanılan dört tanesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sahanın jeolojik profili; moren, kumtaşı ve alüvyon tabakalarını içermektedir. Araştırmacılar, zemin tabakalarının parametrelerini Swiss Tech Kongre Merkezi'nden elde edilen geoteknik verilerle ve yakında yapılan önceki bir çalışmadan (Laloui ve ark., 2003) alınan değerlerin enterpolasyonu ile tanımlamışlardır.

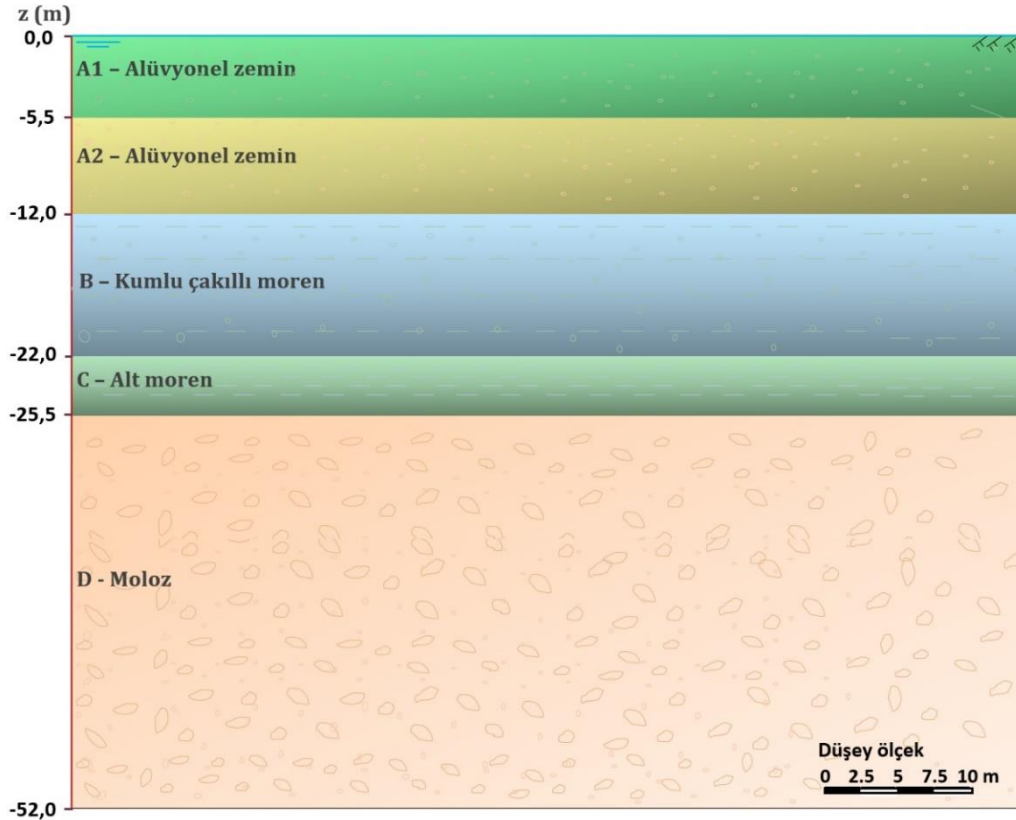
Her bir enerji kazığı, Mimouni ve Laloui (2015) tarafından, sürekli bir döngü oluşturacak şekilde yerleştirilmiş 24 metre uzunluğunda dört adet polietilen U-borusu ile donatılmıştır. Boruların giriş ve çıkış bölümleri, ısı kaybını en aza indirmek için ısı yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Kazıkların malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla, sahadan alınan beton numuneleri 28 günlük kür süresinden sonra tek eksenli basınç testine tabi tutulmuştur. Bu testler sayesinde betonun yoğunluğu, basınç dayanımı ve elastik modülü gibi temel parametreler elde edilmiştir.

Deformasyon ölçümleri, kazık eksenini boyunca belirli aralıklarla ve kazık başlarında yerleştirilen titreşimli tel gerinim ölçerler aracılığıyla elde edilmiştir. Bu sayede hareketler ve yüklerin yeniden dağılımları izlenebilmiştir. Ayrıca, radyal termal

deformasyonları ve temel gerilmelerini izlemek amacıyla optik fiber sensörler ve basınç hücreleri de kurulmuştur.

Di Donna ve ark. (2016), aynı sahada mevcut arazi verilerini kullanarak 3 boyutlu termo-hidro-mekanik (THM) sonlu eleman analizleri gerçekleştirmiş ve enerji kazık grubunun termal yükleme altındaki davranışını değerlendirmişlerdir. Bui ve ark. (2019) da aynı saha verilerini kullanarak, Plaxis yazılımı ile tümüyle bağlaışık bir THM çerçevesi içinde geçerlilik çalışması yapmışlardır. Bu yaklaşımlarında özel zemin ve akış modelleri kullanılarak sistemin termal ve hidrolik davranışlarının ayrıntılı ve gelişmiş bir biçimde modellenmesi sağlanmıştır.

Bui ve ark. (2020), deneysel verilerden faydalanarak yeni bir çalışma gerçekleştirmiş ve bir enerji kazığı ile zemin arasındaki etkileşimi ve davranışı, termal tepki testleri ve termal yükleme döngüleri altında modellemişlerdir. Bu çalışmada da, Mimouni ve Laloui (2015) tarafından inşa edilen enerji kazığı benzer şekilde tek kazık olarak modellenmiş ve Bui ve ark. (2020)'nin yaklaşımı izlenmiştir. Bu tezdeki örnek vaka çalışmasına ait zemin profili, Şekil 5.1'de gösterildiği üzere Bui ve ark. (2020) tarafından kullanılan konfigürasyon ile tutarlı şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 5.1. Örnek vaka çalışmasına ait zemin profili.

5.2. Sayısal Modelleme

Bu tez çalışmasında, Swiss Tech Kongre Merkezi'nin altına yerleştirilen dört beton enerji kazığından biri, sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal modelleme süreci, Bui ve ark. (2020) tarafından izlenen yöntem adımları esas alınarak Plaxis 2D ortamında gerçekleştirilmiştir. Modelleme, eksenel simetri koşulları altında yapıldığından, yalnızca modelin yarısının çizilmesi yeterli olmuştur. Hesaplamalarda 15 düğüm noktasına sahip sonlu elemanlar tercih edilmiştir. Bu elemanlar, daha yüksek hassasiyet ve daha düzgün gerilme-deformasyon dağılımı sağladıkları için tercih edilmiştir. Modelin boyutları; düşey yönde zemin tabakalanmasını doğru temsil edecek şekilde, yatay yönde ise sınır etkilerinin gerilme ve deformasyonlar üzerindeki etkisini minimize edecek kadar geniş olarak belirlenmiştir.

5.2.1. Zemin ve enerji kazığının modellenmesi

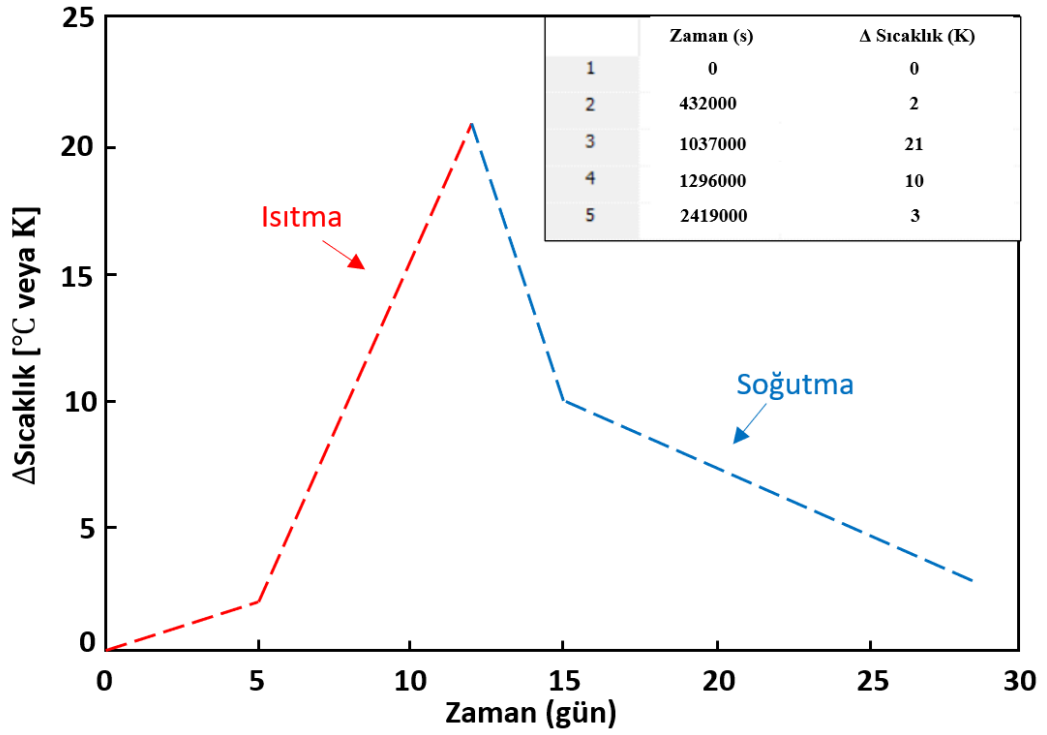
Sayısal modellemenin ilk aşamasında, yeraltı su seviyesinin yüzeyde olduğu bir zemin tabakalanması tanımlanmış ve zemin parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler Tablo 5.1'de sunulmuştur. Modelleme için Bui ve ark. (2020)'dan yararlanılmıştır. 1 m çap ve 26 m uzunluğunda olan enerji kazığı, eksenel simetri varsayımıyla yalnızca sağ yarısı modellenerek sınırları bir çizgi ile tanımlanmıştır. Kazık için Tablo 5.1'de belirtilen beton malzeme modeli atanmıştır. Kazığın sınır çizgilerine ise, daha sonraki aşamada “*thermal flow boundary condition (BC)*” tanımlı bir arayüz uygulanmıştır.

Thermal flow bc, ısı iletimini simüle eden ve belirli bir yüzeye ya sabit sıcaklık (Dirichlet koşulu) ya da sabit ısı akısı (Neumann koşulu) tanımlanmasına olanak tanıyan bir sınır koşuludur. Bu sayede, kazık içerisinde ayrı ayrı boruların ve içlerinden geçen akışkanın modellenmesine gerek kalmamıştır. Kazık başı eksene 11 °C sabit sıcaklık içeren bir thermal flow BC atanarak başlangıç ve çevre sıcaklığı koşulları temsil edilmiştir. Diğer sınır koşulları ise, arazi test verilerine uygun olarak Şekil 5.2'deki zamana bağlı sıcaklık döngüsü fonksiyonu kullanılarak tanımlanmıştır. Ayrıca modelin simetri eksenine de bir *thermal flow bc* atanmış ve bu sınır ısı geçişine kapalı olarak tanımlanmıştır. Zemin ile beton arasındaki arayüzler, dayanım azaltma katsayısının (R_{inter}) dahil edilmesini kolaylaştırmış, böylece farklı malzemeler arasındaki temas yüzeyinde kesme dayanımındaki azalma doğru bir şekilde temsil edilmiştir. Bu arayüzler, kazığın geçirimsiz doğasını yansıtacak şekilde sıvı akışına karşı geçirimsiz olarak tanımlanmış, ancak ısı transferine karşı tamamen iletken kalmıştır.

Tablo 5.1. Enerji kazığının sayısal modellemesinde kullanılan zemin özellikleri.

Sembol ¹	Beton	A1	A2	B	C	D	Birim
Model	Lineer elastik			Mohr Coulomb			-
Drenaj	Geçirimsiz	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Geçirimsiz	-
$\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$	25	14/20	15,5/19	16/20	18/22	25	kN/m ³
e_{init}	0,1111	0,1111	0,1111	0,5385	0,4286	0,1111	-
E'_{ref}	29,2x10 ⁶	20x10 ³	70x10 ³	84x10 ³	90x10 ³	3x10 ⁶	kN/m ²
ν	0,1760	0,2200	0,2200	0,4000	0,4000	0,3000	-
c'_{ref}	-	5	3	0,006	20	2000	kN/m ²
ϕ'	-	30	27	23	27	35	°
ψ	-	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	°
k_x	-	2x10 ⁻⁶	0,7x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁶	0	m/s
c_s	800	795	795	526	597	782,5	J/kg/K
λ_s	2,100	1,200	1,200	1,200	1,200	1,320	W/m/K
ρ_s	2500	2769	2769	2735	2740	2556	kg/m ³
α_{sv}	0,3*10 ⁻⁴	0,3*10 ⁻⁴	0,3*10 ⁻⁴	0,3*10 ⁻⁴	0,3*10 ⁻⁴	0,3*10 ⁻⁴	1/K
R_{inter}	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	-
$K_{0,x}$	1	1	1	1	1	1	-

¹ γ_{unsat} γ_{sat} doygun olmayan ve doygun birim hacim ağırlıklarını; e_{init} başlangıç boşluk oranını, E'_{ref} elastisite modülünü; c'_{ref} , ϕ' , ve ψ kohezyon, sürtünme açısı ve kabarma açısını; k_x yanal geçirimsizlik katsayısını; c_s ısı kapasitesini, λ_s termal iletkenliği; ρ_s katı yoğunluğu; α_{sv} termal genleşme katsayısını; R_{inter} arayüzey azaltma katsayısını, $K_{0,x}$ ise yanal toprak basıncı katsayısını simgelemektedir.



Şekil 5.2. Örnek vaka çalışmasında kazıya uygulanan sıcaklık döngüsü.

Sınır koşullarına ilişkin olarak, deformasyon sınırları, modelin mekanik kısıtlarını gerçekçi bir şekilde simüle edecek biçimde tanımlanmıştır. Sol ve sağ sınırlar (*BoundaryXMin* ve *BoundaryXMax*) normal şekilde sabitlenmiş, düşey yer değiştirmelere izin verilmiş ancak yatay hareketler sınırlandırılmıştır. Alt sınır (*BoundaryYMin*) tamamen sabit olarak tanımlanmış, hem yatay hem de düşey yer değiştirmeler engellenmiştir. Üst sınır (*BoundaryYMax*) ise serbest bırakılmış, yüzey koşullarını simüle etmek amacıyla herhangi bir hareket kısıtlamasına tabi tutulmamıştır. Yer altı suyu akışı için *BoundaryXMin* ve *BoundaryYMin* kapalı olarak tanımlanmış, bu sınırlar boyunca herhangi bir akışın gerçekleşmesi etkili bir şekilde engellenmiştir. Buna karşılık, *BoundaryXMax* ve *BoundaryYMax* açık olarak tanımlanmış, gerektiğinde model alanına yer altı suyu girişine veya çıkışına olanak tanımıştır.

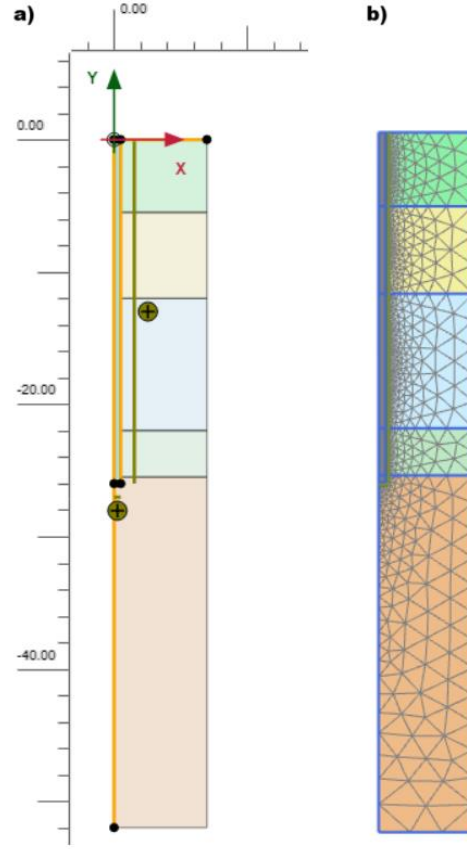
5.2.2. Geometri ve sonlu eleman ağı

Sonlu eleman modellerinde, ağ (*mesh*) oluşturma işlemi, modelin küçük sonlu elemanlara bölünmesini sağlayarak zeminlerin ve yapıların karmaşık davranışlarının sayısal olarak yaklaştırılmasına olanak tanıyan kritik bir süreçtir. Plaxis yazılımında, analizin iki boyutlu (2D) ya da üç boyutlu (3D) olarak gerçekleştirilmesine bağlı olarak, ağ elemanları üçgen veya tetrahedral biçiminde olabilir. Her bir eleman, yer

değiştirme ve gerilmelerin hesaplandığı düğüm noktalarıyla tanımlanmaktadır. Plaxis, 2D modellerde genellikle 15 düğümlü üçgen elemanlar kullanmakta olup, bu elemanlar gerilme ve deformasyon değişimlerini daha hassas şekilde yakalayarak daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. Ek olarak yer alan kenar ortası ve iç düğümler, eğrisel sınırların ve karmaşık gerilme dağılımlarının daha iyi temsil edilmesine olanak tanımaktadır. Gerilmeler genellikle eleman içindeki gerilme noktalarında hesaplanırken, yer değiştirmeler düğüm noktalarında belirlenmektedir.

İyi bir ağ yapısı, özellikle gerilme yoğunlaşmalarının ve malzeme arayüzlerinin bulunduğu bölgelerde, sonuçların doğruluğunu ve kararlılığını arttırmaktadır. Uygun ağ boyutunun belirlenmesi, sayısal analizlerde doğruluk ile hesaplama verimliliği arasında denge sağlamak açısından hayati öneme sahiptir (Brinkgreve ve ark., 2004). Plaxis'te ağ yoğunluğu, modelin farklı bölgelerinde gerek duyulan detay seviyesine göre yerel olarak sıklaştırılabilir ya da seyreltilmiş şekilde bırakılabilir. Bu kontrol, belirli sınır veya bölgelerdeki ağ yoğunluğunu ayarlayan kabalık faktörü (*coarseness factor*) aracılığıyla sağlanmaktadır. Daha küçük faktör değeri, daha ince ağ (görece küçük elemanlar) üretirken; bu sayede keskin gerilme ve ısı gradyanlarının daha hassas şekilde yakalanmasına olanak tanınmaktadır. Buna karşılık, daha büyük bir faktör, doğruluğun kritik olmadığı bölgelerde hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla daha kaba bir ağ üretmektedir.

Bu çalışmada, ince bir ağ yapısı uygulanmıştır. Kazık-zemin arayüzü boyunca gerilme yoğunlaşmaları ve ısıl etkileşimlerin doğru bir şekilde simüle edilebilmesi amacıyla kabalık faktörü değeri 0,03125 olarak belirlenmiştir. Kazık başının yer aldığı üst sınırda, ısıl sınır koşullarının yeterli çözünürlükle tanımlanabilmesi için 0,1 değeri atanmış; böylece eleman sayısı gereksiz şekilde artırılmadan çözünürlük sağlanmıştır. Kazık geometrisini tanımlayan çokgenin içinde, kazık gövdesindeki ağ yoğunluğunu dengeli tutmak ve çevresindeki zeminle etkileşimi korumak amacıyla kabalık faktörü değeri 0,05 olarak belirlenmiştir. Tüm modelde genel ağ boyutu 0,04 metre olarak seçilmiş ve yüksek doğrulukta gerilme, deformasyon ve sıcaklık alanlarının temsil edilmesi amacıyla 15 düğümlü üçgen elemanlar kullanılmıştır. Sayısal modelde kullanılan geometri ve ağ yapılandırması Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Sayısal modellemeye ait; a) geometri, b) sonlu eleman ağı.

5.2.3. Modele ait kademeli inşaat aşamaları

Plaxis'te kademeli inşaat (*staged construction*) yöntemi, yapı elemanlarının ve yüklerin aşama aşama etkinleştirilip devre dışı bırakılması yoluyla inşaat sürecinin daha gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Buna istinaden, bu tez kapsamında yürütülen sayısal modele ait kademeli inşaat, ilk başlangıç fazı hariç, birbirini takip eden toplamda beş farklı aşamadan oluşmuştur.

Başlangıç aşamasında, ısı akışı (*thermal flow*) etkinleştirilmiş, sabit yerel sıcaklık gradyeni sıfır olarak ayarlanmış ve referans sıcaklık 284,2 K olarak tanımlanmıştır. Yer altı suyu akışı için yatay eksenin minimum sınırı (simetri eksen) kapalı olarak tanımlanmış ve emme etkileri dikkate alınmıştır. Bu aşamada, yapısal yükler uygulanmaksızın modelin başlangıç termal ve hidrolik koşulları oluşturulmuştur. Boşluk suyu basıncı hesaplaması yeraltı su seviyesine dayalı yapılmış, termal hesaplama türü ise yerel sıcaklık gradyeni (*earth gradient*) olarak belirlenmiştir. 1. aşamada, kazığın yerleştirilmesi simüle edilmiş; kazığın bulunduğu zemin hacimlerine beton malzemesi atanmıştır. Zemin ve kazık arasındaki sınırları (şaft ve taban sınırları)

temsil eden termal sınır koşulları 284,15 K referans sıcaklıkla etkinleştirilmiş ancak bu aşamada genel termal akış hesaplaması devre dışı bırakılmıştır; bu da ısı transferinin henüz simüle edilmediği anlamına gelmektedir. Kazık ile çevresindeki zemin arasındaki arayüzler etkinleştirilerek zemin-yapı etkileşimi dikkate alınmıştır. Bu sınırlar için yer altı suyu koşulları sızıntı davranışı ile tanımlanmış ve yine emme etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Boşluk suyu basıncı, yine yeraltı su seviyesine dayalı olarak hesaplanmış, termal hesaplama türü ise “önceki aşamanın sıcaklıklarını kullan” olarak ayarlanmış; böylece model, başlangıç aşamasında tanımlanan termal durumu kullanmış ancak bu aşamada yeni bir ısıl işlem gerçekleşmemiştir. 2. aşamada, ilk ısıtma aşaması simüle edilmiştir. Hesaplama türü “tam bağlı akış-deformasyon” (*fully coupled flow-deformation*) olarak tanımlanmış; böylece zemin-yapı sisteminde termal, hidrolik ve mekanik tepkiler eşzamanlı olarak analiz edilmiştir. Önceki aşamada kazık shaftı ve tabanı boyunca termal akış etkinleştirilmiş olsa da, hesaplama tipi plastik olduğu için ısı alışverişi gerçekleşmemiştir. Bu aşamada, kazık başı ve simetri eksenini boyunca ek termal akış sınırları etkinleştirilmiştir. Tam bağlı akış-deformasyon hesaplama türü sayesinde uygulanan sıcaklık sınır koşulları model içinde gerçek ısı alışverişine yol açmış ve termal yükleme süreci başlamıştır. Termal hesaplama tipi yine “önceki aşamanın sıcaklıklarını kullan” olarak seçilmiştir. Bu aşamanın süresi 400000 saniye (yaklaşık 4,63 gün) olarak belirlenmiş; önceki aşamaların etkilerini izole edebilmek için yer değiştirmeler sıfırlanmıştır. Zaman çözünürlüğünü daha hassas kontrol edebilmek amacıyla varsayılan yineleme ayarları yerine manuel zaman adımlaması kullanılmıştır. Özellikle ilk, minimum ve maksimum zaman adımları 8640 ile 25920 saniye arasında belirlenmiştir. Bu yapılandırma, ısıl yüklemenin neden olduğu geçici (*transient*) etkilerin doğru bir şekilde yakalanması açısından kritik önem taşımaktadır. 3. aşamada, yani ısıtmanın ikinci kısmında, ısıl yükleme süreci devam etmiştir. Analizde hesap yöntemi yine tam bağlı akış-deformasyon olarak tanımlanmış ve böylece termal, hidrolik ve mekanik tepkiler eş zamanlı olarak değerlendirilmiştir. Termal hesaplama tipi yine “önceki aşamanın sıcaklıklarını kullan” olarak belirlenmiş; böylece önceki aşamadaki sıcaklık dağılımı başlangıç durumu olarak alınmış ve sınır koşullarına bağlı olarak ısı alışverişi devam etmiştir. Bu aşamanın süresi 636800 saniye (yaklaşık 7,37 gün) olarak tanımlanmış ve önceki aşamayla tutarlılık sağlamak amacıyla manuel zaman adımlaması yine kullanılmıştır: ilk, minimum ve maksimum zaman adımları sırasıyla 8640, 8640 ve 25920 saniye olarak ayarlanmıştır. Bu düzenleme, uzayan ısıtma süresince geçici ısıl

etkilerin ve buna bağılı deformasyonların doğıru şekilde analiz edilmesini sağılamıştır. 3. aşamadan itibaren, kazık-zemin arayüzündeki termal akış sınır koşullarının davranışı, her yeni aşamada “önceki aşamanın fonksiyonunu sürdür” olarak güncellenmiş ve bu fonksiyon Şekil 5.2’de sunulmuş olan ısıtma programına göre devam ettirilmiştir. 4. aşamada, enerji kazığının soğuma süreci simüle edilmiştir. Bu aşamada da tam bağılı termo-mekanik analiz gerçekleştirilmiş, termal ve deformasyon davranışları eş zamanlı olarak değerlendirilmiştir. Önceki aşamadan elde edilen sıcaklık dağılımı, başlangıç termal durumu olarak kullanılmıştır. Bu fazın süresi 300000 saniye (yaklaşık 3,47 gün) olarak belirlenmiş; ilk ve minimum zaman adımları 8640 saniye, maksimum zaman adımı ise 25920 saniye olarak ayarlanmıştır. Kazık shaftı boyunca bir önceki aşamadan gelen termal sınır koşulları korunmuş ve böylece ısıl yüklemde süreklilik sağılanmıştır. Bu faz, enerji kazığı sisteminde soğuma döngüsünün ilk aşamasını temsil ederek sıcaklık değişimlerinin ve bunlara bağılı mekanik etkilerin değerlendirilmesine olanak tanımıştır. 5. aşamada, enerji kazığının uzun vadeli soğuma davranışlarını analiz etmek amacıyla termo-mekanik analiz sürdürülmüştür. Bu analizde de tam bağılı akış-deformasyon hesaplaması kullanılmış, devam eden termal yükleme koşulları altında termal ve mekanik tepkiler birlikte değerlendirilmiştir. Önceki aşamadan alınan sıcaklık dağılımı, başlangıç termal durumu olarak kullanılmıştır. Bu fazın süresi önemli ölçüde artırılarak 1082400 saniye (yaklaşık 12,52 gün) olarak tanımlanmıştır. Zaman adımları yine manuel olarak kontrol edilmiş; ilk ve minimum zaman adımları 8640 saniye, maksimum zaman adımı ise 25920 saniye olarak belirlenmiştir. Bu aşama, sistemdeki ısıl evrimi daha da ileri taşıyarak uzun süreli soğumanın çevreleyen zemin kütleindeki ısı yayılımı ve deformasyon üzerindeki etkilerinin anlaşılmasını sağılamıştır. Hesaplama aşaması öncesinde, kazık boyunca ve çevresindeki zemin içinde bazı çıktı noktaları tanımlanmış; bu noktalar aracılığıyla gerilme ve sıcaklık gibi temel tepkiler izlenmiştir. Bir düğüm noktası kazık başında (0,4, 0) seçilmiş; kazık-zemin arayüzü yakınlarında -0,79 m ile -25,87 m arasında çeşitli derinliklerde birçok gerilme noktası yerleştirilmiştir. Bu noktalar, yükleme ve yükleme sonrası aşamalarda sistemin termo-mekanik davranışlarının değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

5.2.4. Hassaslık ve parametre değişimi analizi

Sayısal modellemede, tüm giriş parametreleri çıktı tepkilerine eşit düzeyde katkı sağılamamaktadır. Bazı parametreler önemli etkilere sahipken, diğerlerinin etkisi

oldukça düşük ya da ihmal edilebilir düzeydedir (Arslan ve ark., 2025). Bu tez kapsamında, analiz sürecini sadeleştirmek ve verimliliği artırmak amacıyla, öncelikle hangi parametrelerin seçilen bir yanıt kriteri (örneğin yer değiştirme veya gerilme) üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu belirlemek için hassaslık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, düşük etki gösteren parametreler hesaplama yükünü azaltmak için çıkarılmıştır. Bu süreç, veri odaklı çalışmalardaki özellik seçimi yöntemine benzerlik göstermektedir. Hassaslık analizi sürecinde her bir parametre, minimum ve maksimum değerleriyle birlikte bir referans modelde değerlendirilmekte ve böylece n parametre için toplamda $2n + 1$ adet simülasyon gerçekleştirilmektedir. Elde edilen çıktı değişimlerine dayanarak, parametreler etkilerine göre sıralanmakta ve en yüksek etkiye sahip olanlar duyarlılık skorları aracılığıyla belirlenmektedir.

En etkili parametreler belirlendikten sonra, bu parametrelerin tanımlanan minimum ve maksimum sınırlar içinde sistematik olarak değiştirilmesiyle bir parametre değişim analizi gerçekleştirilmektedir. Hassaslık analizinden farklı olarak, parametre değişim yöntemi birden fazla değişkenin birleşik etkisini değerlendirmektedir. Ancak değişken sayısı arttıkça simülasyon sayısı da üstel olarak artmakta ve bu durum hesaplama zamanını önemli ölçüde yükseltmektedir. Bu nedenle, analiz yalnızca yüksek duyarlılık skoruna sahip en kritik parametrelerle sınırlandırılarak daha verimli hale getirilmektedir. Çünkü n parametre için gereken toplam simülasyon sayısı $2^n + 1$ şeklinde hızlıca artış göstermektedir. Bu çalışmada, İsviçre’de yer alan Teknoloji Kongre Merkezi altındaki enerji kazıklarından biri için geliştirilen eksenel simetrik sayısal model temel alınarak Plaxis’te bulunan hassaslık ve parametre değişim analizi seçenekleri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler, termo-mekanik çevrimsel yükleme etkisi altında kazık başındaki yer değiştirmelerin, çevredeki zemin tabakalarının geoteknik özelliklerinden nasıl etkilendiğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Sayısal modelin kademeli inşaat yaklaşımıyla oluşturulmuş olması nedeniyle, duyarlılık ve parametre değişim analizleri termal çevrimin ısıtma ve soğutma aşamaları için ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu kapsamda, kilit zemin parametrelerinin kazık başı yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi her bir aşama için bağımsız olarak değerlendirilmiş ve çevrimsel termal yükleme koşulları altında zemin-yapı etkileşiminin kapsamlı bir şekilde anlaşılması sağlanmıştır.

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, İsviçre Lozan Federal Teknoloji Enstitüsü'nde (EPFL) Mimouni ve Laloui (2015) tarafından sahada yerleştirilen bir enerji kazığı, Bui ve ark. (2020) tarafından önerilen sayısal yaklaşıma dayalı olarak Plaxis program aracılığıyla modellenmiştir. Çalışmada, Bui ve ark. (2020)'nin geliştirdiği eksenel simetrik model birebir yeniden oluşturulmaya çalışılmış; kazık ve çevresindeki zemin tabakaları, ısıtma-soğutma çevrimleri, sınır koşulları ve malzeme özellikleri aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Modelleme süreci, enerji kazığının termo-mekanik davranışlarını analiz etmeye olanak tanıyacak şekilde kademeli inşaat yaklaşımıyla yapılandırılmış; hem ısıtma hem de soğutma aşamaları ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu kapsamda, kazık-zemin etkileşiminin ve termal yüklemeye bağlı zemin tepkilerinin detaylı olarak incelenebileceği bir sayısal altyapı oluşturulmuştur.

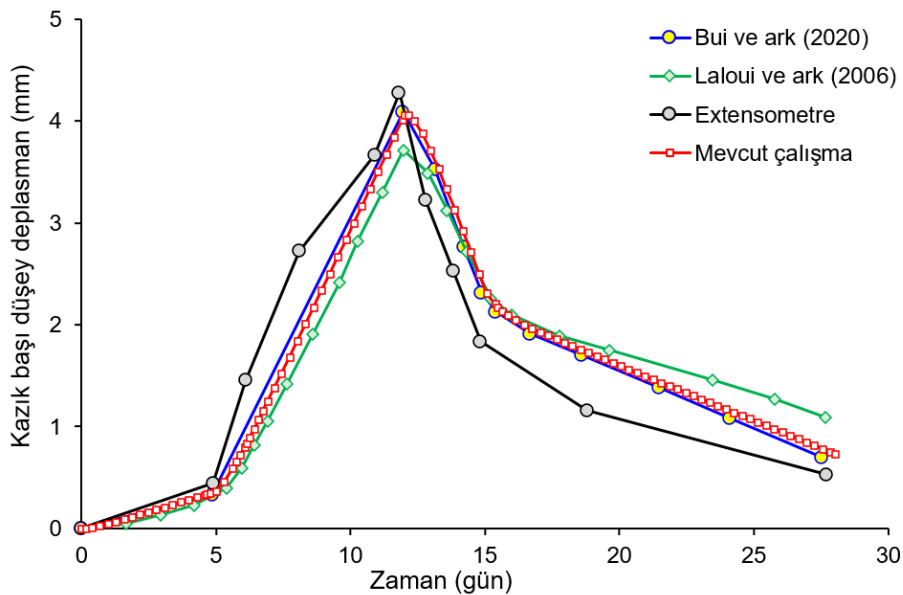
6.1. Sayısal Modelin Doğrulanması ve Temel Bulgular

Bu çalışma kapsamında oluşturulan sayısal modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla, elde edilen sonuçlar literatürdeki sayısal ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Öncelikle, modelin geçerliliğini test etmek üzere, Bui ve ark. (2020) tarafından aynı saha verileri kullanılarak geliştirilen sayısal modelden elde edilen sonuçlarla doğrudan bir kıyaslama yapılmıştır. Buna ek olarak, yine aynı sahaya ait benzer koşullarda oluşturulmuş bir başka model olan Laloui ve ark. (2006) çalışmasındaki sayısal veriler de karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Sayısal modellerin yanı sıra, saha uygulamasından elde edilen deneysel veriler (özellikle kazık boyunca yerleştirilen ekstansometrelerden alınan ölçümler) de referans olarak kullanılmıştır.

Şekil 6.1'de, bir tam ısıtma-soğutma çevrimi sonrasında zamanla kazık başında meydana gelen düşey yer değiştirmeler sunulmuştur. İlgili grafik incelendiğinde, bu tez kapsamında geliştirilen model ile Bui ve ark. (2020) tarafından raporlanan sonuçlar arasında yüksek düzeyde bir uyum olduğu görülmektedir. Bu durum, oluşturulan modelin doğruluğunu ve literatürde kabul görmüş bir modelle yapısal benzerlik taşıdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, elde edilen bulguların Laloui ve ark. (2006) çalışmasındaki model sonuçlarıyla ve sahadan elde edilen gerçek ekstansometre

ölçümleriyle de önemli ölçüde tutarlılık göstermesi, benimsenen sayısal modelleme yaklaşımının uygulamaya dönük açıdan güvenilirliğini pekiştirmiştir. Bu kapsamlı kıyaslamalar, modelin enerji kazıklarının termo-mekanik davranışlarını gerçekçi bir şekilde yansıtmaya kabiliyetini doğrulamaktadır.

Şekil 6.1 incelendiğinde, kazık başında zamanla gelişen düşey deplasman eğrisinin, doğrudan ısıtma-soğutma döngüsüne bağlı olarak şekillendiği görülmektedir. Grafikte pozitif yönde gösterilen değerler, kazık başında meydana gelen kabarma (yukarı yönlü yer değiştirme) davranışını temsil etmektedir. Isıtma süreci boyunca, artan sıcaklıkla birlikte kazık ve çevresindeki zemin ortamında termal genleşme oluşmuş, bu da kazığın yukarı doğru hareket etmesine neden olmuştur. Sıcaklık yaklaşık 21 K'e ulaştığında kazık başında maksimum kabarma değeri gözlemlenmiş, bu nokta aynı zamanda ısıtma sürecinin sonunu işaret etmiştir. Takip eden soğutma evresinde, sıcaklığın düşmesiyle birlikte termal büzülme meydana gelmiş ve kazık başı yer değiştirmesi azalmaya başlamıştır. Ancak bu azalma sürecinde, kazık başı başlangıç konumuna tam olarak dönememiş; bu durum kabarma davranışında kalıcı bir deformasyon bileşeni olduğunu göstermiştir. Elde edilen bu sonuçlar, ısıtma ve soğutma gibi çevrimsel termal yüklemelerin enerji kazığı-zemin sisteminde geri dönüşsüz yapısal etkiler yaratabileceğini ve bu etkinin zamanla birikim gösterebileceğini ortaya koymaktadır.



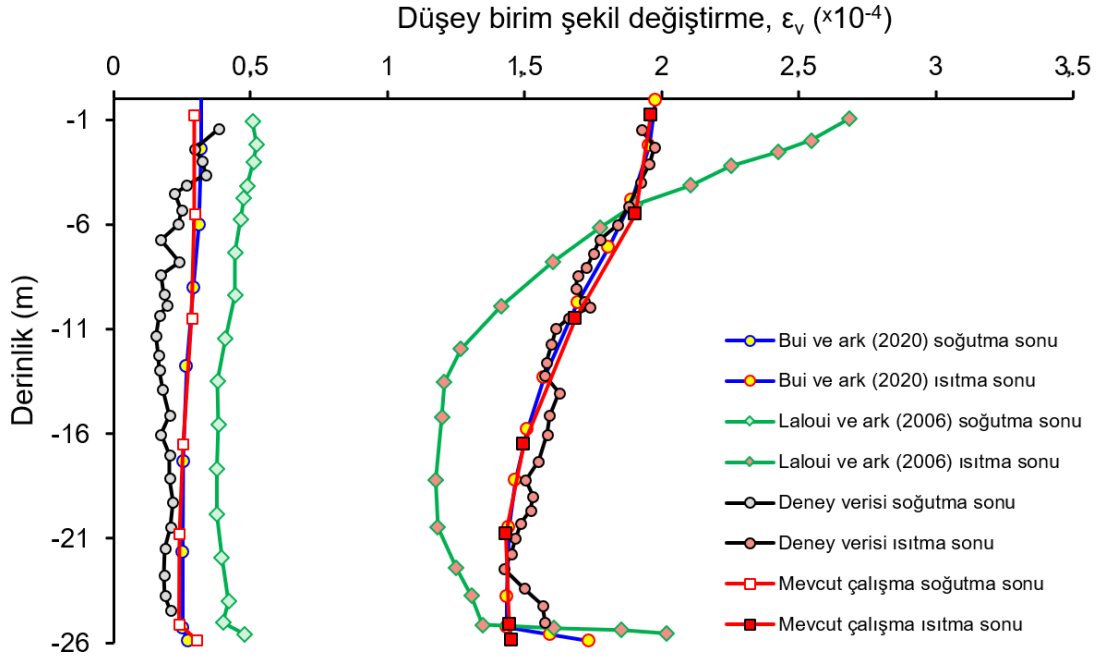
Şekil 6.1. Kazık başında oluşan düşey deplasmanların zamana bağlı değişimi.

Sonuç olarak, termal yükleme ve boşaltma çevrimlerinin, kazık shaftı boyunca düşey deformasyonlara neden olduğu belirlenmiştir. Bu deformasyonlara karşılık gelen düşey birim şekil değiştirme dağılımı, Şekil 6.2’de sunulmuştur. Şekil değiştirmeler, kazık başındaki deplasmanlarda olduğu gibi, Bui ve ark. (2020) tarafından raporlanan deneysel ve sayısal verilerle olduğu kadar, Laloui ve ark. (2006) tarafından sunulan sayısal sonuçlarla da yüksek düzeyde uyum göstermiştir. Bu bulgular, geliştirilen modelin enerji kazığının termal yükleme altındaki fiziksel davranışını gerçekçi bir şekilde yansıtmaya kabiliyetini doğruladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, derinliğe bağlı olarak şekil değiştirme dağılımındaki değişim, zemin tabakalarının geoteknik özelliklerinin bu dağılım üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Özellikle, tabakalar arası geçişler ve zemin rijitliğindeki farklılıklar, şekil değiştirme profilinin oluşumunda kritik bir rol oynamıştır. Genel olarak, bu çalışmanın sonuçları, enerji kazıklarının termal ve mekanik davranışlarının kapsamlı bir şekilde analizinde sayısal modellemenin önemini vurgulamaktadır.

Şekil 6.2 zemin özellikleri ile birlikte detaylı incelendiğinde, ısıtma evresinde kazığa verilen 21 K’lık sıcaklık artışının, shaft boyunca termal genişlemeye yol açtığı, özellikle yüzeye yakın yumuşak katmanlarda en yüksek değerlere ($\varepsilon_v \approx 2 \times 10^{-4}$) ulaştığı, derinliğin artmasıyla birlikte giderek azaldığı tespit edilebilmektedir. Birim şekil değiştirmenin azaldığı aralık, yumuşak alüvyonel A2 zemininden ($E'_{ref} \approx 70$ MPa) daha rijit kum-çakıl karışımı B morenine ($E'_{ref} \approx 84$ MPa) geçişi içermektedir. Bu durum, A1-A2 alüvyonlarının görece düşük rijitliği nedeniyle kazığın termal genişmesine daha fazla uyum sağlayabilmesiyle açıklanabilmektedir. Kazık shaftı yukarı yönlü itildiğinde, yumuşak alüvyon zeminde eksenel gerilme rahatlıkla deformasyona dönüşmüş ve böylece büyük birim şekil değiştirmeler gelişmiştir. Kazık boyunca derine inildikçe, önce kum-çakıl karışımı B morenine, sonra da daha rijit C morenine geçilmiştir. Bu katmanların elastisite modülü arttığından, aynı termal genişme gerilmesi altında ilerleyen deformasyon miktarı azalmaktadır. Kazığın ucu -26 m civarında sert C moreninde sonlandığı için, uca en yakın noktada şekil değiştirme neredeyse minimuma yaklaşmakta; kazık, gerilmeyi artık uç direnciyle değil çevresel sürtünme yoluyla aktarmakta ve rijit zemin genişmeyi kısıtlamaktadır.

Soğutma çevrimi sonunda kaydedilen eğri, tüm derinliklerde $\varepsilon_v \approx 0,2-0,4 \times 10^{-4}$ mertebesinde dar bir banda sıkışmıştır. Büzülme sırasında, ısıtma sırasında oluşan deformasyonun büyük bölümü geri alınmış olsa da tamamen ortadan kalkmamıştır.

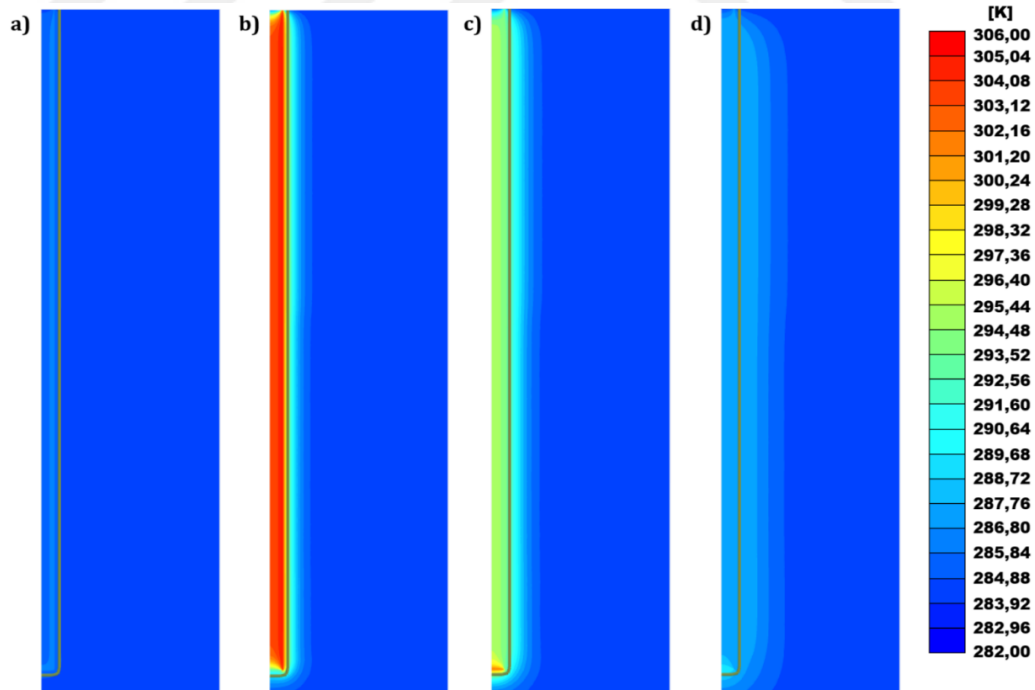
Özellikle alüvyon tabakalarında kalıcı bir bileşen kaldığı görülmektedir. Rijit morenlerde ise hem ısıtma sırasında daha küçük şekil değiştirmeler meydana geldiği için hem de lineer elastik özellikler daha etkin olduğu için soğutma sonu değerleri yüzeye göre daha düşüktür. Dolayısıyla grafik, termal genişlemeye zemin rijitliğinin nasıl etki ettiğini net biçimde ortaya koymaktadır. Yumuşak üst katmanlar büyük ama kısmen geri dönen deformasyonlar sergilerken, derindeki rijit katmanlar küçük ve büyük ölçüde geri dönen deformasyonlara sahip olmaktadır.



Şekil 6.2. Zemin katmanları boyunca farklı derinlik ve döngülerde oluşan birim şekil değiştirmeler.

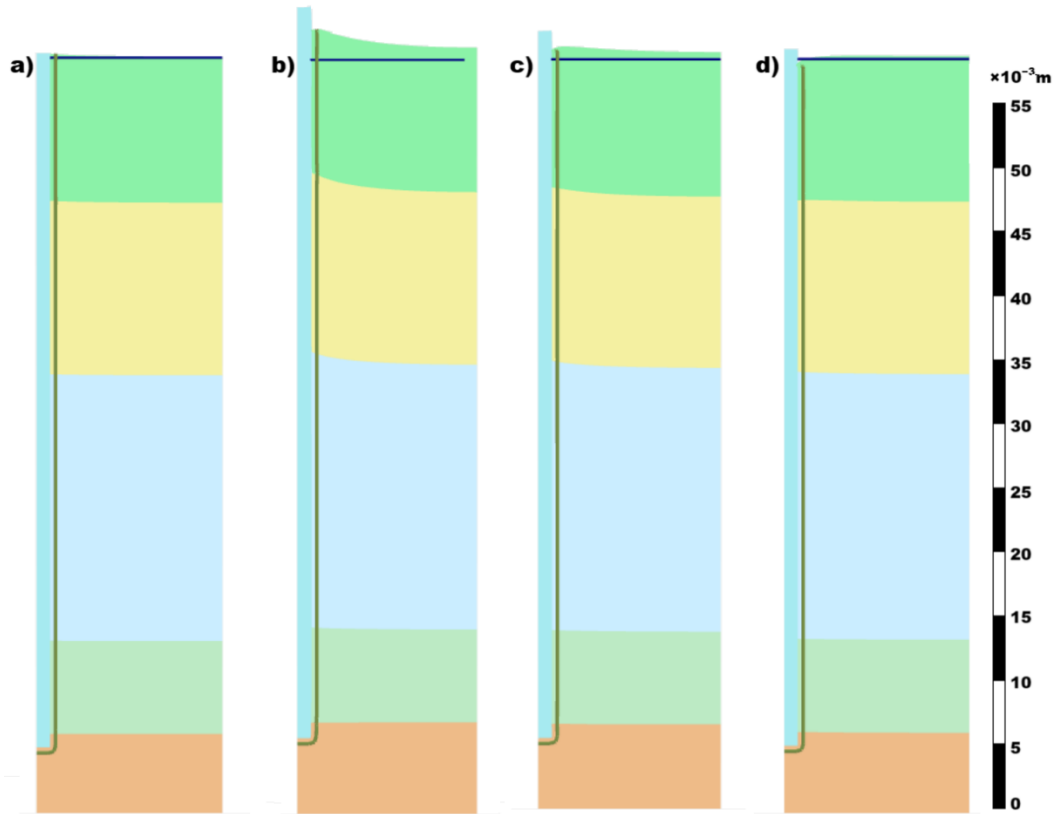
Şekil 6.3'te kazık boyunca oluşan sıcaklık değişimlerine yer verilmiştir. Şekildeki sıcaklık alanı, termal yüklemenin her aşamasında (ısıtmanın ilk aşaması, ısıtmanın son aşaması, soğutmanın ilk aşaması ve soğutmanın son aşamasında) ısının kazık ve zemin kütlesi içinde nasıl yayıldığını açıkça ortaya koymaktadır. Isıtmanın ilk aşamasını temsil eden Şekil 6.3a'da, kazık shaftının tamamı boyunca henüz sınırlı bir sıcaklık artışı gözlenmektedir. Isı, beton shaftın yüksek iletkenliği sayesinde çeper boyunca hızla ilerlemiş ve çevredeki alüvyonel tabakalara doğru radyal olarak sönümlenmiştir. Bu evrede ısı yalnızca kazığın taban ve shaft sınırlarında etkinleştiklerinden zemin kütlesinin büyük bölümü hâlâ başlangıç sıcaklığındadır. Isıtma çevriminin ikinci bölümünün sonunda elde edilen Şekil 6.3b'deki dağılımda, kazığa uygulanan ΔT 'nin +21 K'e ulaşmasıyla birlikte shaft çevresinde tüm kesitte kırmızı tonlara varan belirgin bir ısı bölgesinin oluştuğu, ısı akışının yarıçapa doğru yayılarak yaklaşık 0,5-0,6 m

mesafede sarı-yeşil geçiş kısmı ile son bulduğu görülmektedir. Bu aşamada sıcaklık konturları, ısı iletkenlikleri benzer olsa da alüvyon-moren sınırlarında (yaklaşık -12 m ve -22 m derinlikler) hafif kamburlaşma göstermiştir. Bu durum, farklı tabakalarda ısı hacim kapasitesinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Soğutmanın ilk bölümünü temsil eden Şekil 6.3c'deki dağılımda, shaft etrafındaki sıcaklık farkı +10 K'e gerilemiştir. Isı çekilmesinin, yüzeye yakın gevşek alüvyonlarda daha hızlı gerçekleştiği, derin moren tabakalarında ise sıcaklığın daha uzun süre tutulduğu görülmektedir; bu nedenle alt katmanlarda daha yüksek sıcaklıklar kalmıştır. Soğutma çevriminin sonunda (Şekil 6.3d), kazıkla zemin arasındaki sıcaklık farkının +3 K düzeyine indiği; ısı akışının büyük bir kısmının artık sona erdiği görülmektedir. Kazık tabanındaki küçük sıcak nokta, yüksek termal kütle nedeniyle derin moren içinde hâlâ bir miktar ısının depolandığını göstermektedir. Dağılım, beton-zemin arayüzündeki ısı akışının radyal ilerlediğini, zemin tabakalarının benzer iletkenlikleri nedeniyle kontur şeklinin tabaka sınırlarında ancak sınırlı kırılma sergilediğini ortaya koymaktadır. Isı depolama ve yayılım süreçlerinin fazlar ilerledikçe giderek sönümlenmesi, kazık etrafındaki sıcaklık bölgelerinin değişimine neden olarak modelin zamana bağlı termal sönümlemeyi doğru simüle ettiğini göstermiştir.



Şekil 6.3. Kazık boyunca oluşan sıcaklık dağılımı; a) ısıtma döngüsünün ilk aşaması (aşama 2), b) ısıtma döngüsünün devamı (aşama 3), c) soğutma aşamasının ilk kısmı (aşama 4), d) soğutma aşamasının son kısmı (aşama 5).

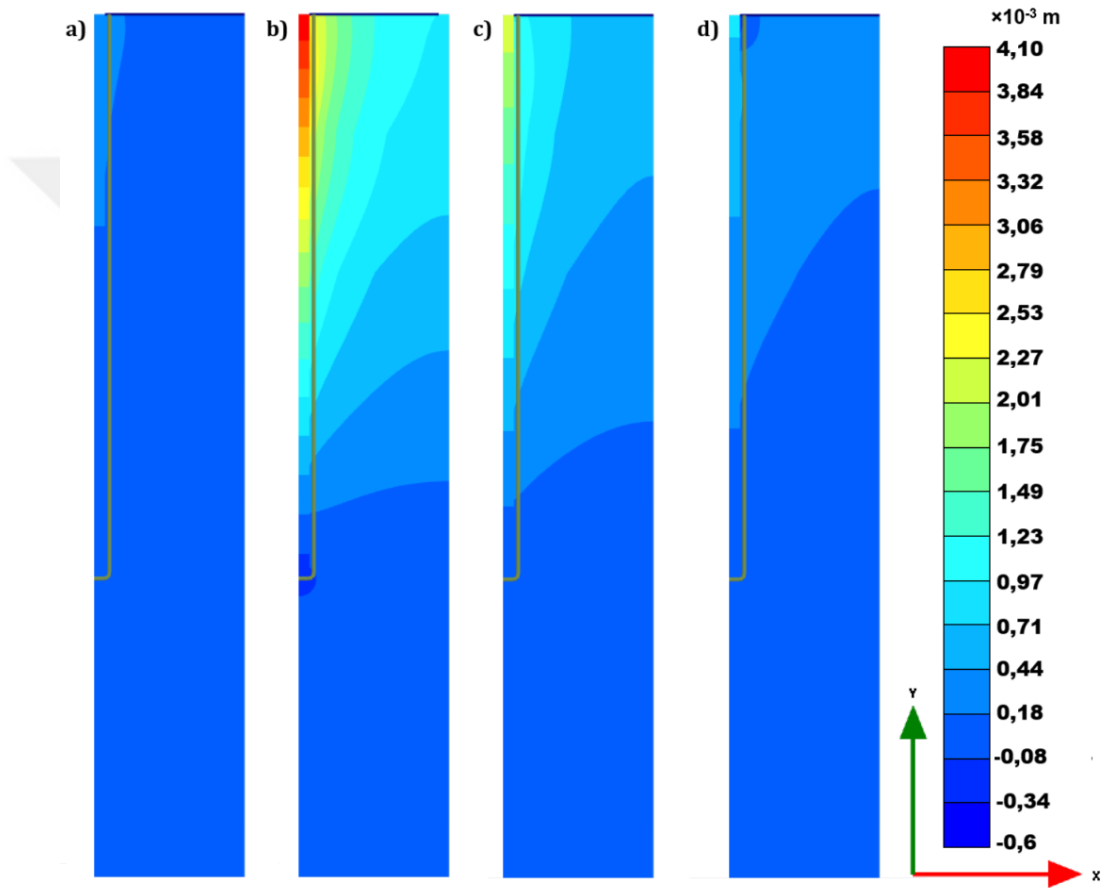
Şekil 6.4'te, ısıtma-soğutma çevriminin dört aşaması boyunca modelin deformasyona uğramış hâli gösterilmiştir. Isıtmanın ilk bölümünde (Şekil 6.4a) deformasyon çok sınırlı iken, sıcaklık artışının tepe noktasına ulaştığı ikinci bölümde (Şekil 6.4b) özellikle yumuşak alüvyon tabakada belirgin kabarma gelişmiş ve kazık başı yükselmiştir. Soğutmanın başlangıcını temsil eden üçüncü aşamada (Şekil 6.4c) bu kabarma önemli ölçüde geri çekilmiş, son aşamada (Şekil 6.4d) ise deformasyon alanı büyük ölçüde sönümlenerek sistem neredeyse başlangıç konumuna dönmüştür; yalnızca küçük, kalıcı yer değiştirmeler kalmıştır. Bu dağılım, ısı genleşmenin üst tabakalarda baskın etki yarattığını, soğutmanın ise bu etkinin çoğunu tersine çevirerek zemini dengeye yaklaştırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.4. Deforme olmuş sonlu eleman ağı; a) ısıtma döngüsünün ilk aşaması (aşama 2), b) ısıtma döngüsünün devamı (aşama 3), c) soğutma aşamasının ilk kısmı (aşama 4), d) soğutma aşamasının son kısmı (aşama 5).

Şekil 6.5'te her bir aşamada oluşan düşey deplasmanların dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılım incelendiğinde, ısıtma-soğutma çevriminin dört ayrı aşamasında (Isıtma 1, Isıtma 2, Soğutma 1 ve Soğutma 2) kazık çevresindeki düşey yer değiştirmelerin nasıl geliştiği anlaşılmaktadır. İlk ısıtma evresinde sıcaklık artışı sınırlı kaldığından, kabarma yalnızca yüzeye yakın bölgeyle sınırlı kalmıştır. Sıcaklığın en yüksek değere

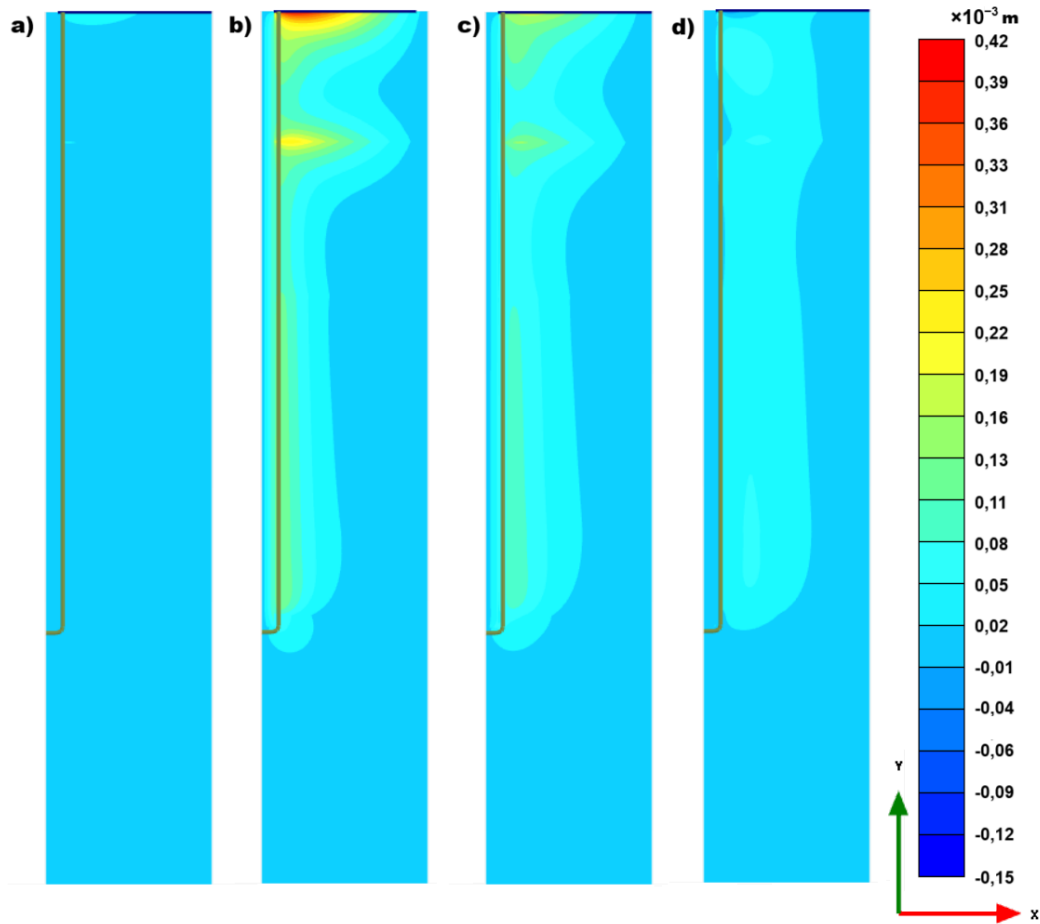
ulaştığı ikinci ısıtma evresinde ise kazık shaftı boyunca, özellikle de kazık başında belirgin yukarı yönlü yer değiştirmeler oluşmuştur. Bu durumun, yumuşak alüvyon tabakalarının beton shaftın genişlemesine uyum sağlamasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Soğutma evrelerine geçildiğinde, zeminin sıcaklığını kaybettiğçe büzölmeye başladığı ve oluşan kabarmanın giderek azaldığı görölmektedir. Soğutma 1 sırasında yer değiştirmeler düşmeye başlamış, soğutma 2 sonunda ise profil daha dengeli hâle gelmiştir. Böylece, tabakalar arası rijitlik farklarının ısıl çevrimler sırasında deformasyon dağılımını belirleyen temel etken olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.5. Düşey deplasmanların dağılımı; a) ısıtma döngüsünün ilk aşaması (aşama 2), b) ısıtma döngüsünün devamı (aşama 3), c) soğutma aşamasının ilk kısmı (aşama 4), d) soğutma aşamasının son kısmı (aşama 5).

Şekil 6.6’da enerji kazığı çevresindeki x yönlü (yatay) deplasmanların ısıtma-soğutma döngüsüne bağlı dağılımı gösterilmiştir; önceki şekilde izlenen y yönlü düşey deformasyonlara kıyasla bu yatay yer değiştirmelerin oldukça sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. İlk ısıtma adımında (Şekil 6.6a) kayda değer bir yatay hareket görölmezken, sıcaklık artışının en yüksek düzeye ulaştığı ikinci ısıtma aşamasında (Şekil 6.6b) kazık başı ve yumuşak alüvyon tabakaları hizasında dışa doğru küçük

genleşme zonları oluşmuştur. Bu zonlar, zemin-kazık arayüzündeki kayma kuvvetlerinin ve tabaka geçişlerindeki rijitlik farklarının birleşik etkisiyle dar kuşaklar halinde kalmış, radyale doğru hızla sönümlenmiştir. Soğutmanın ilk (Şekil 6.6c) ve son (Şekil 6.6d) kısımlarında bu yatay genleşmeler geri büzülmeye dönmüş, hareketler azalarak neredeyse başlangıç düzeyine yaklaşmıştır. Genel olarak, yanal deplasmanların düşük kalması, çevre zemin kütlelerinin kazığı sıkıca kuşatması ve ısıtma-soğutma döngüsü boyunca radyal kısıtlamanın düşey yönde olduğundan daha güçlü olması ile açıklanabilir. Dolayısıyla sistemdeki hâkim deformasyon bileşeni düşey kabarma-büzülmedir ve yatay hareketler ise ikincil düzeyde kalmıştır denilebilir.



Şekil 6.6. Yatay deplasmanların dağılımı; a) ısıtma döngüsünün ilk aşaması (aşama 2), b) ısıtma döngüsünün devamı (aşama 3), c) soğutma aşamasının ilk kısmı (aşama 4), d) soğutma aşamasının son kısmı (aşama 5).

6.2. Hassaslık ve Parametre Değişimi Analizi Sonuçları

Bu çalışmada, enerji kazığı çevresindeki zemin davranışını etkileyen temel mekanik parametreleri belirlemek amacıyla Plaxis yazılımında bir hassaslık analizi gerçekleştirilmiştir. İlk değerlendirme, ısıtma ve soğutma evrelerinin sonunda ayrı ayrı elde edilen kazık başı düşey yer değiştirmesi değerlerine dayanmıştır. Her iki termal evre için parametreler minimum, referans (ana değeri) ve maksimum değerlerinde test edilmiştir. Hassaslık analizinde kullanılan zemin parametrelerinin minimum ve maksimum değerlerinin belirlenmesi, analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Bu değerler, genellikle literatürde yer alan istatistiksel çalışmalar ve saha gözlemlerine dayalı araştırmalardan elde edilen değişim katsayılarına (*coefficient of variation*) göre belirlenmektedir. Harr (1984), Phoon ve Kulhawy (1999) ile Duncan (2000) gibi araştırmacılar, farklı zemin parametrelerine ait değişim aralıklarını ortaya koyarak mühendislik uygulamaları için önemli bir kaynak sağlamıştır. Bu çalışmada da hassaslık analizinde kullanılacak parametrelerin alt ve üst sınır değerleri, söz konusu literatür kaynakları dikkate alınarak belirlenmiştir. Böylece, analizde kullanılan parametre değerleri bilimsel temele dayandırılmıştır. Ortaya çıkan yer değiştirme farkları kullanılarak ilgili hassaslık yüzdeleri (*SensiScores*) her bir evrenin sonunda ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Tablo 6.1’de hassaslık analizinde seçilen her bir zemin parametresinin değer aralıkları ve analiz sonucunda elde edilen skora yer verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, kazığın elastisite modülü %29 ile hem ısıtma hem de soğutma sonunda en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, A1 (%5 ısıtma sonu ve %4 soğutma sonu), A2 (%12 ısıtma sonu ve %2 soğutma sonu) ve B (%12 ısıtma sonu ve %11 soğutma sonu) zeminlerinin elastisite modülleri ile B zemininin Poisson oranı (%16 ısıtma sonu ve %6 soğutma sonu) da yüksek etkiye sahip parametreler arasında yer almıştır. Hassaslık analizi sonuçlarının ayrıntılı incelenmesi, her parametrenin etkisinin tabaka özelliklerine, derinliğe ve kazığın gömülü uzunluğuna bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Yaklaşık ilk 12 m’yi kaplayan üstteki A1 ve A2 alüvyon tabakalarının, shaft çevresindeki hacimsel deformasyonun büyük bölümünü kontrol ettiği görülmektedir. Bu tabakalarda görece düşük rijitlik nedeniyle elastisite modülü, hem ısıtma hem de soğutma evrelerinin sonunda yer değiştirmeleri en fazla etkileyen özellik olarak öne çıkmıştır. Aynı tabakalarda sürtünme açısının (ϕ') yüksek hassaslık yüzdeleri alması, bu zemin tabakalarının kohezyonsuz karakteriyle ilişkili

olabilmektedir. Bu tabakalarda sürtünme açısı ve kohezyonun soğutma evresinde görece olarak daha hassas hâle geldiği görülmektedir. Sıcaklık düşüşünün, özellikle alüvyon tabakalarında efektif gerilmeyi düşüren negatif termal boşluk suyu basınçları üretebilme ihtimali, kayma direnci parametrelerindeki değişimin soğuma kaynaklı düşey hareketleri kontrol etmesinde önemli hale getirmiştir. Buna karşılık, alüvyon zeminlerinde Poisson oranının (ν) düşük duyarlılık yüzdesi aldığı görülmektedir. Bu durum, zayıf yanal kısıtlanma etkisinde ve gevşek dokudaki zeminlerde hacimsel şekil değiştirmelerin esasen elastisite modülü tarafından belirlenmiş olduğunu, eksenel-yanal şekil değiştirme bağıntısının ikincil önemde kaldığını göstermiştir. Orta derinlikteki B ve C moren tabakaları (≈ 10 m kalınlık), daha yüksek rijitliğe sahip olup yük transfer mekanizmasında kritik bir kilitleme elemanı görevi görmüştür. Bu tabakalarda Poisson oranı, özellikle ısıtma sonunda yüksek hassaslık yüzdelere ulaşmıştır. Bu durum, rijit ve yarı-drenajlı zeminlerde eksenel ve yanal şekil değiştirmeler arasındaki güçlü etkileşimi yansıtmaktadır. Termal yükleme sırasında hacimsel genişleme kısıtlandığında, ν 'deki değişimler kazık çevresindeki yanal gerilme alanını ve dolayısıyla kazık başı yer değiştirmesini kayda değer biçimde etkilemiştir. Aynı tabakalarda elastisite modülünün de yüksek hassaslık gösterdiği görülmektedir. Bu durumda rijitliğin artması gerilmeleri yukarıya taşımış ve yer değiştirmeleri sınırlamışken, rijitliğin azalması ters etki yaratmıştır. Kohezyon hassasiyet değerindeki belirgin artış, yüksek rijitlik ve kohezyona sahip moloz birimi D tabakasında en net biçimde görülmüştür. Sıcaklığın hızla düşmesi, yerel olarak boşluk suyu basınçlarını düşüren negatif termal basınçlar üretebilmekte ve drenaj yollarını değiştirerek kazık çevresindeki efektif gerilmeleri azaltabilmektedir. Bu tabakanın yüksek rijitliği hacimsel deformasyonu sınırladığından, soğuma kaynaklı büzülme esasen kayma davranışı şeklinde ortaya çıkmıştır. Bu nedenle D zemininin yüksek kohezyonu, kazık-zemin arayüzünde oluşan kayma gerilmelerini soğurarak büzülmeye bağlı düşey yer değiştirmeleri kısıtlayan kilit faktör hâline gelmiştir. Elde edilen sonuçlar, geotermal enerji kazığı tasarımında sadece her bir zemin tabakasının elastik parametrelerinin değil; aynı zamanda moren gibi tabakalardaki Poisson oranının ve alüvyon tabakalarındaki sürtünme açısı ile kohezyonun dikkatle kalibre edilmesinin gerekli olduğunu göstermiştir. Bu parametrelerin, termal çevrimler boyunca kazığın servis performansını kontrol eden kritik mekanizmaları belirlediği anlaşılmaktadır. Parametrelerin ise zemin tabakalarının genel özellikleri ile değişebildiği anlaşılmaktadır.

Tablo 6.1. Hassaslık analizi sonuçları (kazık başı deplasman kriteri).

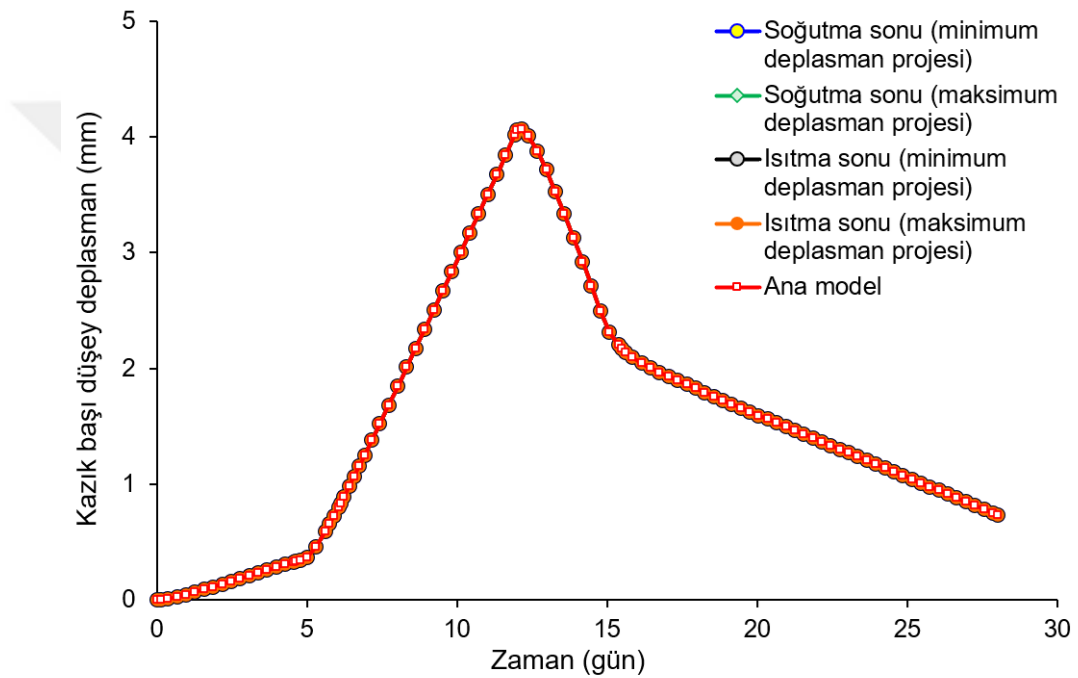
Malzeme	Parametre	Min	Ref	Max	Birim	Isıtma SensiScore	Soğutma SensiScore
Kazık	E'_{ref}	23,36x10 ⁹	29,20x10 ⁹	35,04x10 ⁹	N/m ²	29	29
Kazık	ν	0,1408	0,1760	0,2112	-	0	1
A1	E'_{ref}	16x10 ⁶	20x10 ⁶	24x10 ⁶	N/m ²	5	4
A1	c'_{ref}	4000	5000	6000	N/m ²	1	4
A1	φ'	24,79	30,00	34,72	°	1	6
A1	ψ	6,390	7,500	8,610	°	0	0
A1	ν	0,1760	0,220	0,2640	-	1	0
A1	k_x	1x10 ⁻⁶	2x10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁶	m/s	0	0
A2	E'_{ref}	56x10 ⁶	70x10 ⁶	84x10 ⁶	N/m ²	12	2
A2	c'_{ref}	2400	3000	3600	N/m ²	0	2
A2	φ'	22,18	27,00	31,44	°	3	20
A2	ψ	6,390	7,500	8,610	°	0	0
A2	ν	0,1760	0,2200	0,2640	-	1	2
A2	k_x	0,35x10 ⁻⁶	0,70x10 ⁻⁶	1,05x10 ⁻⁶	m/s	0	0
B	E'_{ref}	67,20x10 ⁶	84x10 ⁶	100,8 x10 ⁶	N/m ²	12	11
B	c'_{ref}	4800	6000	7200	N/m ²	0	0
B	φ'	18,76	23,00	27,00	°	0	0
B	ψ	6,390	7,500	8,610	°	0	0
B	ν	0,3200	0,4000	0,4800	-	16	6
B	k_x	0,50x10 ⁻⁶	1,00x10 ⁻⁶	1,50x10 ⁻⁶	m/s	0	0

Tablo 6.1. (Devamı) Hassaslık analizi sonuçları (kazık başı deplasman kriteri).

Malzeme	Parametre	Min	Ref	Max	Birim	Isıtma SensiScore	Soğutma SensiScore
C	E'_{ref}	72×10^6	90×10^6	108×10^6	N/m ²	3	1
C	c'_{ref}	16×10^6	20×10^6	24×10^6	N/m ²	0	0
C	φ'	22,18	27,00	31,44	°	0	0
C	ψ	6,390	7,800	8,610	°	0	0
C	ν	0,3200	0,4000	0,4800	-	9	1
C	k_x	$0,50 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-6}$	$1,50 \times 10^{-6}$	m/s	0	0
D	E'_{ref}	$2,40 \times 10^9$	$3,00 \times 10^9$	$3,60 \times 10^9$	N/m ²	8	0
D	c'_{ref}	$1,60 \times 10^6$	$2,00 \times 10^6$	$2,40 \times 10^6$	N/m ²	0	9
D	φ'	29,26	35,00	40,04	°	0	0
D	ψ	6,390	7,500	8,610	°	0	0
D	ν	0,2400	0,3000	0,3600	-	0	3

Hassaslık yüzdesi %5'i aşan parametreler parametre değişim analizine tabii tutulmuştur. Şekil 6.7'de ana modelin yanı sıra, parametre değişim analizinden elde edilen “en düşük (minimum)” ve “en yüksek (maksimum)” deplasmanı veren ısıtma-sonu ve soğutma-sonu projelerinin sonuçları verilmiştir. Şekilde bu sonuçların tümünün neredeyse birbirleriyle çakıştığı görülmektedir. Başka bir ifadeyle, çalışma kapsamında seçilen parametre aralıklarının tamamı tarandığında bile, kazık başındaki kabarma tepe değerinin (≈ 4 mm) ve soğutma sonundaki kalıcı deformasyon eğrisinin ana modelden kayda değer biçimde sapmadığı görülmektedir. Bu sınırlı farkın temel nedeni, kazık başı yer değiştirmesinin büyük ölçüde termal yükleme genliği ($\Delta T \approx 21$ K) ve kazık eksenel rijitliği tarafından kontrol edilmesidir. Analizlerdeki en hassas parametre olan kazık elastisite modülünün değişim aralığının (yaklaşık yüzde ± 20) sınırlı aralıklarda denendiği anlaşılmaktadır. Bu aralıkların kazığın ısı uzamasından kaynaklanan toplam kabarma üzerinde belirgin bir fark yaratmadığı görülmüştür.

Bir diğer etken, zeminin genel olarak rijit-yarı rijit karakterde olmasıdır. B ve C morenlerindeki yüksek elastisite modülleri ve A1-A2 alüvyonel zeminlerinin kalınlıkça sınırlı oluşu, şaft çevresindeki yerel deformasyonların yığılması yerine katmanlar arasında paylaştırılmasına yol açmıştır. Böylece, tek tek tabakaların rijitliğini değiştirmek kazık başındaki deformasyonu ancak sınırlı ölçüde etkileyebilmiştir. Ayrıca, ısıtma-soğutma çevriminde uygulanan sıcaklık farkı 21 K ve 3 K arasında değişmektedir. Buradan sıcaklık değişiminin daha geniş olacağı olası durumlarda hem zemin deformasyonlarının hem de parametre değişimi analizlerinin mutlak etkisinin daha belirgin çıkabileceği söylenebilir.



Şekil 6.7. Parametre değişimi analizleri sonucu elde edilen kazık başı düşey deplasmanların zamana bağlı değişimi.

Sonuç olarak parametre değişim analizi, mevcut sıcaklık genliği ve tanımlanan parametre değişim aralıkları altında kazık başı deplasmanının oldukça rijit davrandığını, yani seçilen zemin parametrelerindeki belirsizliklerin servis performansını anlamlı biçimde değiştirmeyeceğini göstermektedir. Deplasmandaki değişimin ancak daha yüksek termal yükleme genliklerinde ve yumuşak alüvyon ortamlarında daha baskın hâle gelebileceği anlaşılmıştır. Ayrıca kazık rijitliğini temsil eden beton elastisite modülünün, termal uzama üzerinde birincil dereceden belirleyici olduğu görülmüştür. Bu noktada, ısı değişim akışını sağlamak amacıyla kazık içerisine yerleştirilen ısı değiştirici boruların (U-boru, çift U-boru, W boru vb.) kesit alanını

azaltarak veya beton içindeki boşluk oranını artırarak kazığın efektif rijitliğinin düşürebileceği dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla enerji kazıklarının tasarımında, boru düzeni, boru-beton aderansı ve beton kalitesi birlikte değerlendirilerek hem ısı performans hem de yapısal rijitlik açısından optimize edilmiş detaylar geliştirilmelidir. Aksi hâlde, boruların neden olduğu rijitlik kaybı termal çevrimler sırasında beklenenden daha yüksek yer değiştirmelere yol açabilir.

Ek olarak, zemin-kazık arayüzeyindeki dayanım aktarımı termo-mekanik davranışın bir başka belirleyicisidir. Isıl genleşme sırasında şaft çevresinde mobilize edilen kayma gerilmelerinin büyüklüğü, arayüzey kayma sertliği ile dayanım azaltma katsayısına bağlıdır. Boru yerleşimi veya beton kalitesine bağlı rijitlik düşüşü, aynı genleşme için arayüzeyde daha fazla deplasmana yol açarak kayma direncinin erken mobilize olmasına neden olabilir. Bu nedenle enerji kazıklarının tasarımında, tabakalar arası rijitlik farklarının yanı sıra beton-zemin arayüzeyinin kayma parametrelerinin (ör. kayma dayanımı ve sertliği) doğru belirlenmesi şarttır; aksi hâlde öngörülen servis deplasmanları aşarak performans kayıpları ortaya çıkabilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında gerçek bir sahada yer alan bir enerji kazığı sayısal olarak modellenmiş ve oluşan yer değiştirmeler hassaslık ve parametre değişimi analizleri ile irdelenmiştir. Çalışmada geliştirilen enerji kazığı modeli, EPFL sahasından alınan gerçek ölçümlerle ve aynı sahada sayısal modellemenin yapıldığı başka çalışmaların çıktılarıyla kıyaslandığında yüksek bir tutarlılık sergilemiştir. Buna göre çalışmanın ana çıktıları şunlardır:

- Model, hem ısıtma hem de soğutma evrelerindeki düşey deplasman ve birim şekil değiştirme dağılımlarını gerçeğe yakın biçimde yeniden üretmiş; böylece Plaxis 2D ortamında kurulan eksenel simetrik yaklaşımın hem akademik araştırmalar hem de mühendislik uygulamaları için güvenilir bir öngörü aracı olduğunu kanıtlamıştır.
- Isıtma-soğutma döngüsü sonunda elde edilen sonuçlar, 21 K'lık sıcaklık artışının özellikle üst alüvyon tabakalarda kabarmaya yol açtığını, takip eden soğutma evresinde ise bu kabarmanın önemli ölçüde geri döndüğünü göstermiştir. Ancak alüvyon katmanlarında izlenen kalıcı deformasyon bileşeni, termal yüklemelerin ilerleyen çevrimlerde birikme potansiyeline işaret etmektedir. Böylece zemin rijitliği ile termal genleşme karşılıklı etkileşiminin, enerji kazıklarının uzun vadeli servis performansını belirleyen kritik bir mekanizma olduğu ortaya konmuştur.
- Hassaslık analizi, kazık başı yer değiştirmeleri üzerinde en baskın parametrenin kazığın elastisite modülü olduğunu ortaya koymuştur. Üst alüvyonun elastisite modülü ve sürtünme açısı ile orta derinlik morenlerinin Poisson oranı da yer değiştirmelerde ikinci dereceden fakat göz ardı edilemeyecek etkiler yaratmıştır. Bu bulgu, zemin tabakalarının elastik ve kayma direnci parametrelerinin titizlikle belirlenmesinin tasarım aşamasında kaçınılmaz olduğunu vurgulamaktadır.
- Parametre değişim analizi ise, çalışmada ele alınan ± 20 %'lık parametre aralıkları ve sınırlı sıcaklık genliği ($\Delta T \approx 21$ K) altında kazık başı kabarma ve kalıcı deformasyonların ana modelden anlamlı sapma göstermediğini ortaya koymuştur. Başka bir deyişle, bu termal senaryoda kazık sistemi rijit davranmış, olası

parametre belirsizlikleri servis kabiliyetini tehlikeye atacak boyutlara ulaşmamıştır. Bununla birlikte, daha büyük sıcaklık farklılıkları veya daha kalın yumuşak tabakalar içeren sahalarda aynı sonucun tekrarlanıp tekrarlanmayacağı gelecekte araştırılmalıdır. Tasarıma özel sıcaklık senaryoları, kabarma ve büzülme miktarını doğrudan etkilediğinden proje bazlı maksimum/minimum ΔT değerleri mutlaka analiz edilmelidir.

Araştırmanın genel katkısı, enerji kazıklarının termo-mekanik davranışını sahadan doğrulanmış ayrıntılı bir modelle inceleyip, hassaslık ve parametre değişim analizleriyle zemin özelliklerinin görelî etkisini sayısal olarak nicelleştirmiş olmasıdır. Sonuç olarak, bu çalışma enerji kazıkları için hem model doğrulama metodolojisi hem de tasarımda kritik parametrelerin seçimi açısından yol gösterici niteliktedir. İleride daha yüksek sıcaklık çevrimlerine, boru-beton-zemin arasındaki karmaşık etkileşimlere ve kazık grubu davranışına odaklanan çalışmalar, yerinde performans tahminlerini daha da ilerletecektir.

KAYNAKLAR

- Adam, D., & Markiewicz, R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique*, 59(3), 229–236. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.229>
- Akrouch, G. A., Sánchez, M., & Briaud, J. L. (2014). Thermo-mechanical behavior of energy piles in high-plasticity clays. *Acta Geotechnica*, 9, 399–412. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0312-5>
- Alqawasmeh, Q. I., Narsilio, G. A., & Makasis, N. (2024). Impact of geometrical misplacement of heat-exchanger pipe parallel configuration in energy piles. *Energies*, 17(11), 2580.
- Amatya, B. L., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T., & Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Geotechnique*, 62(6), 503–519. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.116>
- Amis, T., Bourne-Webb, P., Davidson, C., Amatya, B., & Soga, K. (2008, Ekim). *The effects of heating and cooling energy piles under working load at Lambeth College, UK* [Konferans bildirisi]. 33rd Annual/11th International Conference of the Deep Foundations Institute, New York, United States.
- Arslan, E., Akmaz, E., Çakır, U. F., Öztürk, Ö., Pir, H., Acartürk, S., Akça, N. Ç., Karakuş, Y., & Sert, S. (2025). Finite element modeling with sensitivity and parameter variation analysis of a deep excavation: From a case study. *Buildings*, 15(5), 658.
- Arson, C., Berns, E., Akrouch, G., Sanchez, M., & Briaud, J.-L. (2013). Heat propagation around geothermal piles and implications on energy balance. *Energy*, 628–635.
- Aydin, M., & Sisman, A. (2015). Experimental and computational investigation of multi U-tube boreholes. *Applied Energy*, 145, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.036>
- Bezayan, B., Porkhial, S., & Mehrizi, A. A. (2015). 3-D simulation of heat-transfer rate in geothermal pile-foundation heat exchangers with spiral pipe configuration. *Applied Thermal Engineering*, 87, 655–668.
- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., & Payne, P. (2009a). Energy pile test at Lambeth College, London: Geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Geotechnique*, 59(3), 237–248. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.237>
- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., & Soga, K. (2009b). A framework for understanding energy-pile behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 162(3), 147–158.

- Bourne-Webb, P. J., & Bodas Freitas, T. M. (2020). Thermally-activated piles and pile groups under monotonic and cyclic thermal loading – A review. *Renewable Energy*, 147, 2572–2581. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.025>.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56(2), 81–122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>
- Brandl, H. (2013). Thermo-active ground-source structures for heating and cooling. *Procedia Engineering*, 57, 9–18.
- Briaud, J. L. (1997). *The national geotechnical experimentation sites at Texas A&M University: Clay and sand* (Rapor no. NGES-TAMU-007). Department of Civil Engineering, Texas A&M University.
- Brinkgreve, R. B. J., Swolfs, W. M., & Vermeer, P. A. (2004). *PLAXIS 2D reference manual (Version 8)*. Plaxis BV.
- Bui, T., Casarella, A., Di Donna, A., & Brinkgreve, R. (2019). Advanced thermo-hydro-mechanical modelling features for practical applications in energy geotechnics. *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (Paper 0499). <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0499>
- Bui, T. A., Casarella, A., Di Donna, A., Brinkgreve, R., & Brasile, S. (2020). Numerical modelling of different applications in energy foundation technology. *E3S Web of Conferences, EDP Sciences*, 205, 06004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020506004>
- Cableizer (2025, 01 Haziran). Isıl iletkenlik toprak. https://www.cableizer.com/documentation/k_4/?utm_source
- Casagrande, B., Saboya, F., McCartney, J. S., & Tibana, S. (2021). Investigation of a field-scale energy micropile in stratified soil under cyclic temperature changes. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 29, 100263. <https://doi.org/10.1016/J.GETE.2021.100263>
- Choi, J. C., Lee, S. R., & Lee, D. S. (2011). Numerical simulation of vertical ground-heat exchangers: Intermittent operation in unsaturated soil conditions. *Computers and Geotechnics*, 38, 949–958. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.07.004>
- Cunha, R. P., & Bourne-Webb, P. J. (2022). A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112072.
- Di Donna, A., Loria, A. F. R., & Laloui, L. (2016). Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads. *Computers and Geotechnics*, 72, 126–142.
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: A crucial review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 157–175. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00011-8)
- Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316.

- Dupray, F., Laloui, L., & Kazangba, A. (2014). Numerical analysis of seasonal heat storage in an energy pile foundation. *Computers and Geotechnics*, 55, 67–77.
- Ekberli, İ., Gülser, C., & Dengiz, O. (2021). Toprakların ısısal özellikleri ile bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri arasında regresyon modellerinin belirlenmesi. *Toprak Su Dergisi*, 10(1), 68–77.
- Engineering Toolbox (2025, 1 Haziran). Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications! https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html
- Eskilson, P. (1987). *Thermal analysis of heat extraction boreholes* [Doktora tezi]. University of Lund.
- Fadejev, J., Simson, R., Kurnitski, J., & Haghighat, F. (2017). A review on energy-pile design, sizing and modelling. *Energy*, 122, 390–407.
- Faizal, M., & Bouazza, A. (2016). An experimental investigation of the influence of intermittent and continuous operating modes on the thermal behaviour of a full-scale geothermal energy pile. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 8, 8–29. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2016.08.001>
- Fei, K., & Dai, D. (2018). Experimental and numerical study on the behavior of energy piles subjected to thermal cycles. *Advances in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2018/3424528>
- Gashti, E. H. N., Malaska, M., & Kujala, K. (2015). Analysis of thermo-active pile structures and their performance under groundwater-flow conditions. *Energy and Buildings*, 105, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.026>
- Gashti, E. H. N., Uotinen, V. M., & Kujala, K. (2014). Numerical modelling of thermal regimes in steel energy-pile foundations: A case study. *Energy and Buildings*, 69, 165–174.
- Gawecka, K. A., Taborda, D. M. G., Potts, D. M., Cui, W., Zdravković, L., & Haji Kasri, M. S. (2017). Numerical modelling of thermo-active piles in London Clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 170(3), 201–219. <https://doi.org/10.1680/jgeen.16.00096>
- Ghasemi-Fare, O., & Basu, P. (2013). A practical heat-transfer model for geothermal piles. *Energy and Buildings*, 66, 470–479.
- Harr, M. E. (1984). Reliability-based design in civil engineering, 1984 Henry M. Shaw Lecture. North Carolina State University, Dept. of Civil Engineering, Raleigh, N.C.
- He, S., Rees, S., & Shao, L. (2010). Improvement of a two-dimensional borehole heat-exchanger model. *Proceedings of the IESD PhD Conference on Energy and Sustainable Development* (pp. 1–6). De Montfort University.
- Hellström, G. (1991). *Ground heat storage: Thermal analysis of duct storage systems* [Doktora tezi]. University of Lund.
- Jeong, S., Lim, H., Lee, J. K., & Kim, J. (2014). Thermally induced mechanical response of energy piles in axially loaded pile groups. *Applied Thermal Engineering*, 71, 608–615. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.007>

- Kalantidou, A., Tang, A. M., Pereira, J. M., & Hassen, G. (2012). Preliminary study on the mechanical behaviour of heat-exchanger pile in physical model. *Geotechnique*, 62(12), 1047–1051. <https://doi.org/10.1680/geot.11.T.013>
- Knellwolf, C., Peron, H., & Laloui, L. (2011). Geotechnical analysis of heat-exchanger piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), 890–902. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000513)
- Laloui, L., & Moreni, M. (1999). *In-situ thermo-mechanical load test on a heat-exchanger pile* [Konferans bildirisi]. 4th International Conference on Deep Foundation Practice, Singapore.
- Laloui, L., Moreni, M., & Vulliet, L. (2003). Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), 388–402.
- Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat-exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 763–781. <https://doi.org/10.1002/nag.499>
- Loveridge, F., & Powrie, W. (2013). Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. *Energy*, 57, 554–564. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.060>
- Lumb, P. (1974). *Application of statistics in soil mechanics* (Chapter 3). Soil mechanics – new horizon. Newnes Butterworth.
- McCartney, J. S., & Murphy, K. D. (2012). Strain distributions in full-scale energy foundations. *DFI Journal*, 6(2), 26–38. <https://doi.org/10.1179/dfi.2012.008>
- Mehrizi, A. A., Porkhial, S., & Lotfizadeh, H. (2016). Energy-pile foundation simulation for different configurations of ground-source heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 70, 105–114.
- Mimouni, T., & Laloui, L. (2015). Behaviour of a group of energy piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(12), 1913–1929. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0403>
- Muraya, N. K. (1994). *Numerical modeling of the transient thermal interference of vertical U-tube heat exchangers* [Doktora tezi]. Texas A&M University.
- Murphy, K. D., & McCartney, J. S. (2015). Seasonal response of energy foundations during building operation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 343–356. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9802-3>
- Ng, C. W. W., Shi, C., Gunawan, A., & Laloui, L. (2014). Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay. *Geotechnique Letters*, 4(4), 310–314. <https://doi.org/10.1680/geolett.14.00063>
- Ng, C. W. W., Ma, Q. J., & Gunawan, A. (2016). Horizontal stress change of energy piles subjected to thermal cycles in sand. *Computers and Geotechnics*, 78, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.05.003>
- Nguyen, V. T., Tang, A. M., & Pereira, J. M. (2017). Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand. *Acta Geotechnica*, 12, 729–737. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0539-z>

- Olgun, C. G., Özüdogru, T. Y., Abdelaziz, S. L., & Şenol, A. (2015). Long-term performance of heat-exchanger piles. *Acta Geotechnica*, 10, 553–569. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0334-z>
- Olgun, C. G., Geyin, M., & Özüdogru, T. Y. (2017). Long-term performance of heat-exchanger boreholes at different climatic conditions. *Geotechnical Frontiers*, 153–164. <https://doi.org/10.1061/9780784480472.016>
- Peschl, G. M. (2004). *Reliability analyses in geotechnics with the random set finite element method* [Doktora Tezi]. Graz University of Technology.
- Park, S., Sung, C., Jung, K., Sohn, B., Chauchois, A., & Choi, H. (2015). Constructability and heat-exchange efficiency of large-diameter cast-in-place energy piles with various configurations of heat-exchange pipe. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1061–1071.
- Phoon, K.K., Kulhawy, F.H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612–624.
- Polat, S., Güner, M., Erginağ, U. C., Sütman, M., & Çinicioğlu, Ö. (2023). Enerji kazıklarının sayısal modellenmesine dair vaka analizi. 9. *Geoteknik Sempozyumu Bildirileri*. İstanbul, Türkiye.
- Rotta Loria, A. F., Gunawan, A., Shi, C., Laloui, L., & Ng, C. W. W. (2015). Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 1, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2015.03.002>
- Sani, A. K., Martand, R., & Amis, T., et al. (2019). A review on the performance of geothermal energy-pile foundations, their design process and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 106, 54–78. <https://doi.org/10.1016/j>
- Santiago, C. D., Santayana, F. P., Groot, M. D., Urchueguía, J., Badenes, B., & Magraner, T., et al. (2016, Eylül). *Thermo-mechanical behavior of a thermo-active precast pile* [Konferans bildirisi]. European Geothermal Congress, Strasbourg, France.
- Szymkiewicz, F., Burlon, S., Guirado, F., Minatchy, C., & Vincelas, G. (2015). Experimental study of heating-cooling cycles on the bearing capacity of CFA piles in sandy soils. *Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 2647–2652). Edinburgh, United Kingdom.
- Wang, B., Bouazza, A., Singh, R. M., Haberfield, C., Barry-Macaulay, D., & Baycan, S. (2015). Post-temperature effects on shaft capacity of a full-scale geothermal energy pile. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(5), 04015008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001266](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001266)
- Wang, Z. J., Zhang, R. H., Fang, P. F., Wang, W. J., & Wang, H. Y. (2019). Analysis of an energy pile enduring cyclic temperature loads. *Geotechnical Research*, 6(3), 227–233. <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00043>
- Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J. M., & Hassen, G. (2014). Experimental study on the mechanical behaviour of a heat-exchanger pile using physical modelling. *Acta Geotechnica*, 9, 385–398.

- Yavuzturk, C. (1999). *Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground-source heat-pump systems* [Doktora tezi]. Oklahoma State University.
- Yavuzturk, C., Spitler, J. D., & Rees, S. J. (1999). A transient two-dimensional finite-volume model for the simulation of vertical U-tube ground-heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, 105(A), 465–474.
- Yılmaz, E., & Alagöz, Z. (2008). Organik madde–toprak suyu ilişkisi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 1(2), 15–21.
- Yoon, S., Lee, G. J., & Go, G. H. (2022). Linear thermal expansion behavior of compacted bentonite buffer materials. *Case Studies in Thermal Engineering*, 32, 101889.
- You, S., Cheng, X., Guo, H., & Yao, Z. (2016). Experimental study on structural response of CFG energy piles. *Applied Thermal Engineering*, 96, 640–651. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.127>
- Zarrella, A., Emmi, G., Zecchin, R., & De Carli, M. (2017). An appropriate use of the thermal-response test for the design of energy-foundation piles with U-tube circuits. *Energy and Buildings*, 134, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.053>
- Zhang, H., & Chen, Z. (2017). Study on heat-transfer performance of energy pile in GSHP system. *Procedia Engineering*, 205, 2393–2400. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.861>.
- Zhang, W., Yang, H., Lu, L., & Fang, Z. (2013). Analysis on solid cylindrical heat-source model of foundation-pile ground-heat exchangers with groundwater flow. *Energy*, 55, 417–425.
- Zhao, Q., Chen, B., & Liu, F. (2016). Study on the thermal performance of several types of energy-pile ground-heat exchangers: U-shaped, W-shaped and spiral-shaped. *Energy and Buildings*, 133, 335–344.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Utku Furkan ÇAKIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2024-2025 yılları arasında QIS Yapı Kimyasalları firmasında Bölge Satış Yöneticisi olarak çalıştı.
- 2023-2024 yılları arasında Ada Topçuoğlu Yapı Malzemeleri firmasında Satış Sorumlusu olarak çalıştı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Çakır U. F., Arslan E., Sert, S. (2025, 23-25, Mayıs). Numerical Investigation of Thermo-Mechanical Behavior of Geothermal Energy Piles in Clayey and Sandy Soils using Finite Element Analysis. *21. International İstanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture and Mathematical Science*, İstanbul, Turkey.

DİĞER ESERLER:

Arslan, E., Akmaz, E., Çakır, U. F., Öztürk, Ö., Pir, H., Acartürk, S., Akça, N. Ç., Karakuş, Y., Sert, S. 2025. Finite Element Modeling with Sensitivity and Parameter Variation Analysis of a Deep Excavation: From a Case Study. *Buildings*, 15(5), 658.