4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

RADYEYE BAĞLI ENERJİ KAZIKLARININ SERBESTLİK DERECELERİNİN BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF THE DEGREES OF FREEDOM OF ENERGY PILES INTEGRATED WITH A RAFT FOUNDATION

Veysel HALİFEOĞLU[1], **Özer ÇİNİCİOĞLU**[2]

ÖZET

Taşıyıcı kazıklar, oldukça düşük bir ek maliyetle enerji kazığı olarak tasarlanabilmektedir. Bu sistemler, zeminin nispeten sabit olan sıcaklığından faydalanarak binanın enerji verimliliğini artırır. Ancak, ısıl yüklere maruz kalan kazıklar, zeminin ve üst yapının kısıtlayıcı etkileri nedeniyle serbestçe kısalıp uzayamazlar. Çalışma kapsamında hem zemini hem de üst yapıyı içeren modelleri analiz etmek amacıyla özel sonlu elemanlar çözücüsü geliştirilmiştir. Sayısal verilerin oluşturulmasında termal yük, zemin dayanımı, kazıklar arası mesafe, bina kat sayısı, enerji kazıklarının yerleşimi ve sayısı ile kazık ve yapısal eleman boyutları gibi çeşitli parametreler dikkate alınmıştır. Elde edilen veri seti, enerji kazığı tepkisinin hızlı ve güvenilir tahminlerini sağlamak amacıyla makine öğrenmesi modellerinde kullanılmıştır. Farklı tasarım senaryolarını, ısıl yüklü kazıklar üzerindeki kısıtlayıcı etkilerle ilişkilendirmek amacıyla, tasarım parametreleri ile kazık hareketlerinin kısıtlanması arasındaki etkileşim incelenmiştir. Önerilen çerçeve, ön tasarım için etkili bir temel sağlamakta ve enerji kazığı sistemlerinde kazık-zemin ile kazık-yapı etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Enerji Kazıkları, Makine Öğrenmesi, Sonlu Elemanlar Analizi, Termo-Mekanik Davranış, Kısıtlamalar*

ABSTRACT

Load-bearing piles can be designed as energy piles at a very low additional cost. These systems benefit from the relatively stable temperature of the soil, thereby enhancing the energy efficiency of the building. However, thermally loaded piles are restricted from shortening and elongating freely due to the restraining effects of the soil and the superstructure. Within the scope of the study, a tailored finite element solver was developed to analyze models that incorporate both the ground and the superstructure. Various parameters, such as temperature load, soil strength, pile spacing, number of stories, arrangement and number of the energy piles, and pile and structural element dimensions, were considered in numerical data generation. The generated dataset was used in machine learning models to provide rapid and reliable predictions of energy pile response. The interaction between design parameters and pile restraint was examined in order to relate

[1] İnş.Y.Müh., FMZ Müh.Müş.LTD. ŞTİ, mvhoglu@gmail.com (sorumlu yazar)
[2] Prof.Dr., Boğaziçi Üniversitesi, ozer.cinicioglu@bogazici.edu.tr

different design scenarios to the restraining effects acting on thermally loaded piles. The proposed framework provides an efficient basis for preliminary design and contributes to a better understanding of pile and soil and pile and the superstructure interaction in energy pile systems.

Keywords: *Energy Piles, Machine Learning, Finite Element Analysis, Thermo-Mechanical Behavior, Restraints*

1. GİRİŞ

Binaların altındaki zemin, dış ortam koşullarına kıyasla yazın serin, kışın sıcak ısı dağılımı sergileyen yenilenebilir bir enerji deposudur (Banks, 2012). Bu potansiyele zemine temas eden elemalar aracılığıyla erişilebilir (Brandl, 2013). Başlıca görevleri yapısal yükleri taşımak olan kazıklar, zemin ile ısı alışverişini sağlayan akışkan boruları yerleştirilerek enerji kazıklarına dönüştürülebilir (Sani vd., 2019).

Zemin ile ısı alışverişi esnasında oluşan sıcaklık değişimi, kazıklar üzerinde birim şekil değiştirme talepleri oluşturmaktadır. Kazıkların zemin ve üst yapı tarafından şekil değiştirmeleri kısıtlandığından bu taleplerin bir kısmı eksenel yük olarak ortaya çıkmaktadır (Bourne-Webb vd., 2013). Literatürdeki bazı çalışmalar, enerji kazıklarının davranışının üzerlerine etkiyen kısıtlamalarla ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır (Amatya vd., 2012; Sutman vd., 2019). Gözlenen şekil değiştirmenin serbest termal şekil değiştirmeye oranı olarak tanımlanan serbestlik derecesi (DOF) bu çalışmanın temel çıktılarından biridir (Bourne-Webb vd., 2013).

Enerji kazıklarının grup ve tekil davranışları birbirinden farklıdır. Yapılan saha çalışmalarında aynı anda ısıtılan enerji kazıklarının birbirini etkileyerek serbestlik derecelerini artırdığı ve eksenel gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir (Mimouni ve Laloui, 2015). Bazı sayısal çalışmalarda ise, kazıkların sadece belli bir kısmı ısıtıldığında ısıtılmayan kazıkların çekme gerilmelerine maruz kaldığı (Di Donna vd., 2016) ve enerji kazıklarının kazık matrisi içindeki yerleşiminin, diğer parametrelerle birlikte kazık davranışını büyük ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir (Jeong vd., 2014). Ayrıca literatürde çoklu fizik programları vasıtasıyla farklı parametrelerin enerji kazıklarının davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır (Batini vd., 2015; Polat vd., 2024).

Geoenerji yapıları, tasarımları karmaşık olan yapılardır. Bu durum sonlu elemanlar yöntemini kullanan karmaşık modellerin kullanımını gerektirmektedir. Bazı çalışmalarda çeşitli makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak kazık davranışı modellenmeye çalışılmıştır (Kumar ve Samui, 2022; Pei vd., 2022). Bu çalışmada ise XGBoost (XGB) ve yapay sinir ağı (ANN) algoritmalarıyla makine öğrenmesi modelleri eğitilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, üst yapıyı ve zemini beraber modelleyen sonlu elemanlar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen programla kazık davranışı parametrik olarak ele alınıp kazıkların her iki ucundaki eksenel kuvvetler, yer değiştirmeler, temsili kısıtlayıcı yaylar, ve tüm kazığın serbestlik dereceleri geniş bir veri setinde depolanmıştır. Elde edilen veri setiyle farklı algoritma ve eğitim stratejileriyle makine öğrenimi modelleri eğitilmiştir. Modellerin sonuçları, parametrik sette yer almayan bağımsız bir modelin SAP2000 (CSI, 2024) ile yapılan analiziyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Eğitilen modeller, kullanıcının parametrelerini girerek çıktıları tahmin edebileceği bir arayüzle sunulmuştur.

2. PARAMETRELER VE YÖNTEM

2.1. Parametreler

Bu bölümde, enerji kazıklarının davranışını incelemek için kullanılan parametreler açıklanmıştır. Çalışma kapsamında üç kazık matrisi boyutu, 4x4, 6x6 ve 8x8 ele alınmıştır. Parametrelerin özeti Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Model grupları ve parametrelerin özeti.

Grup	Matris boyutu	Modeller	Aralıklar (Kazık Çapı)	Çaplar (cm)	Boylar (m)	Kat sayıları	Kolon boyutu	Döşeme kalınlığı	Yükleme durumu
1	4x4	1–192	3; 4,5; 6	45, 60, 75, 90	8, 12, 16, 20	2, 4, 6, 8	3	3	8
2	6x6	193–240	3; 4,5; 6	45, 60, 75, 90	8, 12, 16, 20	2	2	2	16
3	8x8	241–288	3; 4,5; 6	45, 60, 75, 90	8, 12, 16, 20	2	2	2	20

Pozitif ve negatif olmak üzere üçer farklı termal yük kazıklara etki ettirilmiştir. Kazıkların uzama durumları için +6, +12 ve +24 °C; kısalma durumları için −6, −12 ve −24 °C sıcaklık yükleri uygulanmıştır. Termal yükler,

$$F_{termal} = EA\varepsilon_{termal} = EA\alpha\Delta T \quad (1)$$

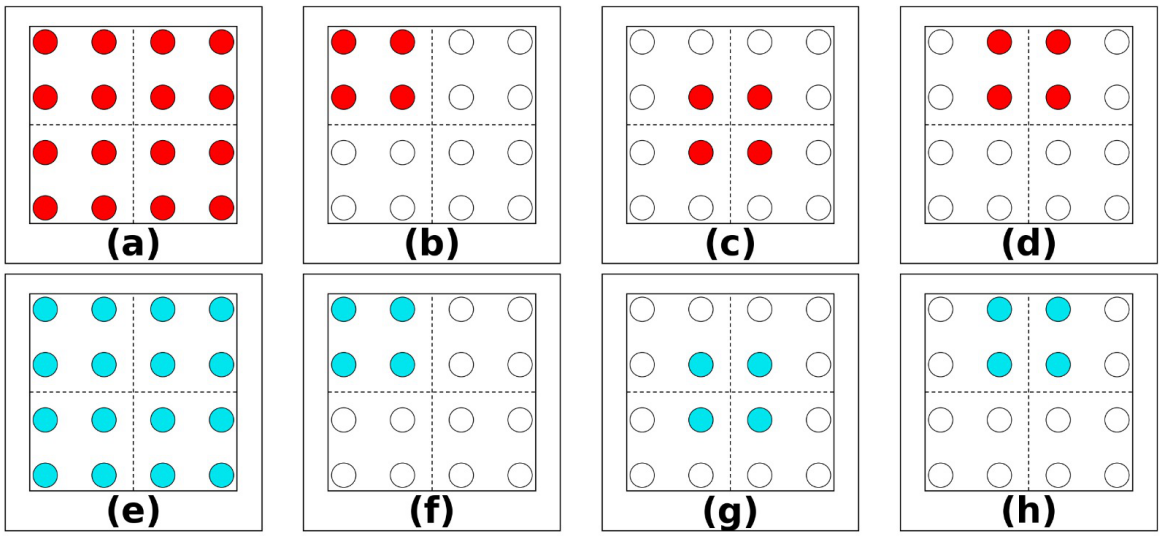
bağıntısı kullanılarak her kazığın iki ucuna birbirine zıt eksenel yönlerde uygulanmıştır. Aynı sıcaklık değişimi bütün kazık boyunca uygulanmıştır. Gereçekte zeminin sıcaklık profili yüzeye yakın yerlerde mevsimsel sıcaklıklıklardan daha fazla etkilenip bu etki derinlere inildikçe azalmaktadır (Banks, 2012). Uygulamayı ve hesapları sadeleştirmek amacıyla zeminin sıcaklık profili homojen ve sabit alınmıştır. Bu yaklaşım ön tasarım için güvenli tarafta kalan bir üst limit vererek sıcaklık farkını tek bir parametre olarak mümkün kılmıştır.

Dört kazık çapı ve dört kazık uzunluğu olmak üzere toplamda 16 farklı kazık geometrisi kullanılmıştır. Kazıklar arası mesafe, kazık çapı cinsinden 3D, 4,5D ve 6D olmak üzere üç farklı değerde parametrik olarak incelenmiştir. Zemin üç boyutlu sürekli bir ortam olarak modellenmediğinden, kazıklar arası mesafenin etkisi analizlerde üst yapının rijitliği üzerinden yakalanmaktadır.

Hesapları kolaylaştırmak için yalnızca kohezyonlu zemin tipi değerlendirilmiştir. Drenajsız kayma dayanımları 30, 50 ve 100 kPa olan üç zemin dayanımı dikkate alınmıştır. Zeminin yapıyla etkileşimi; kazıklar boyunca çevre sürtünmesi yayları, kazık uçlarında yalnızca basınca çalışan uç yayları ve temel plağının altındaki alan yayları ile temsil edilmiştir. Kazık yaylarının rijitlikleri; kazık ebatları, etkiyen termal yük ve zemin dayanımı göz önünde bulundurularak API standardına (API, 2011) göre hesaplanmıştır. Yay rijitlikleri, kazığın serbest termal deformasyonundan türetilen yer değiştirme düzeyine karşılık gelen mobilizasyon oranları üzerinden belirlenmiştir. Kazık boyunca tanımlanan sürtünme yayları çekmede ve basınçta doğrusal elastik olup, uç yayları yalnızca basınç durumunda aktif olacak şekilde tanımlanmıştır. Temel döşemesinin altındaki alan yayları ise yalnızca bütün kazıkların kısaldığı durumlarda tanımlanmıştır.

Giriş katı dahil olmak üzere 2, 4, 6 ve 8 katlı yapılar; değişken döşeme ve temel kalınlıkları ile kolon yerleşimleri ve ebatlarıyla birlikte modellenmiştir. Özellikle artan kat sayısı çözülecek matrisin boyutunu büyüttüğü için 6x6 ve 8x8 matrisler için sadece 2 katlı yapılar ele alınmıştır. Analizlerde temel kalınlığı olarak 30, 50 ve 100 cm; döşeme kalınlığı olarak 15, 20 ve 25 cm kullanılmıştır. Yapının düşey taşıyıcılarının yalnızca kolonlardan oluştuğu varsayılarak, değişen kolon yerleşimleriyle birlikte 50x50, 75x75 ve 100x100 cm kolon ebatları hesaplarda kullanılmıştır. Yapı malzemesi olarak TS 500'de (TSE, 2000) tanımlanan C30 betonu esas alınmıştır.

Enerji kazıklarının matris içindeki yerleşimi yükleme durumu olarak kabul edilip ayrı bir parametre olarak ele alınmıştır. Termal yük ile yüklenen kazık grubunun konumu birleştirilerek sekiz ana yükleme durumu tanımlanmıştır. Verilen kısaltmalarda ilk harf yük durumunu temsil ederken, ikinci kısım kazık grubunun matris içindeki konumunu ifade etmektedir. Burada E uzama, S kısalma, C köşe, M orta, CM kenar ve A tüm kazıkların yüklendiği durumu tanımlamaktadır. Harf sembolleri, İngilizce isimlendirmelerle uyumlu olacak şekilde korunmuştur. Matris boyutu büyüdükçe olası dizilim sayısı arttığından farklı sayıda yüklü kazık içeren alt durumlar eklenmiştir. 4x4 matris için 8, 6x6 için 16 ve 8x8 için 20 yükleme durumu tanımlanmıştır. 4x4 matrisler için yükleme durumları Şekil 1'de özet olarak verilmiştir.

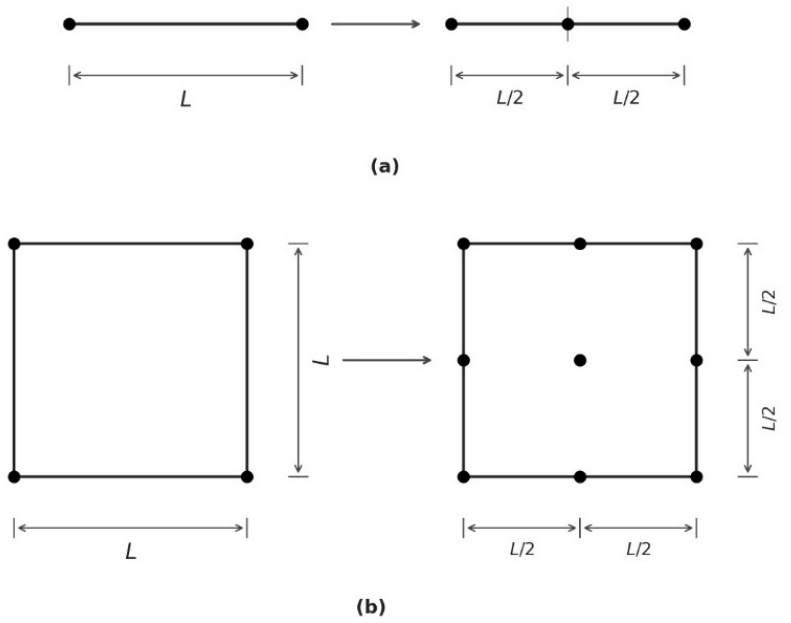


Şekil 1. 4x4 kazık matrisi yükleme durumları: (a) EA, (b) EC, (c) EM, (d) ECM, (e) SA, (f) SC, (g) SM, (h) SCM.

2.2. Sonlu Elemanlar

Birbirini takip eden çok boyutlu parametrik analizleri sistematik bir şekilde yapmak ve yalnızca basınca çalışan kazık uç yaylarıyla analiz etmek için sonlu elemanlar çözücüsü geliştirilmiştir. Ayrıca bu sayede analizler paralel olarak birden fazla işlemcide çözülebilmiş ve elde edilen analiz sonuçları otomatik bir şekilde depolanarak insan kaynaklı hatalar minimize edilmiştir. Modelleme arayüzü olarak Blender (Blender Foundation, 2026) kullanılarak, elemanları tanımlayan düğüm noktaları, yükler ve mesnetler dışarı aktarılarak çözücüde kullanılmıştır.

Çubuk elemanlar 3, kabuk elemanlar 9 düğüm noktaya tamamlanarak ikinci dereceden elemanlara yükseltilmiştir. İkinci dereceden elemanlar Şekil 2'de verilmiştir. Bu sayede kesme kilitlenmesi engellenmiştir. Her bir düğüm noktasında 3 öteleme 3 dönme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi tanımlanmıştır. Yalnızca zemin etkilerini tanımlayan yaylar sadece eksenel yönde serbestlik derecesi olan yaylar olarak modellenmiştir. Mesnetlemeler yalnızca yayların uzak düğüm noktalarına uygulanmıştır.



Şekil 2. Eleman derecesi artırımı: (a) tek boyutlu çubuk eleman, (b) iki boyutlu düzlem eleman.

Çubuk elemanların rijitlik matrislerinin hesabı için Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır. Elemanların dönme ve kayma rijitlikleri Denklem (2)'de verilen bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$k^e = \int_{-1}^{+1} EI_y B_b^T B_b J \, d\xi + \int_{-1}^{+1} \kappa GA \, B_s^T B_s J \, d\xi \quad (2)$$

Burada $B_b$ve B_ssırasıyla dönme ve kayma şekil değiştirme matrisleri, E elastisite modülünü, I_y dönme atalet momentini, G kayma modülünü, J Jakobiyen ve κ dikdörtgen kesitler için 5/6 alınan kayma düzeltme katsayısıdır. Eksenel ve burulma rijitlikleri ise Denklem (3)'te verilen bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$k_{ij}^e = \int_{-1}^{+1} k \, \frac{d\psi_i}{d\xi} \frac{d\psi_j}{d\xi} \frac{1}{J} \, d\xi \quad (3)$$

Burada ψi ve ψj interpolasyon fonksiyonlarını k ise eksenel veya dönme rijitliklerini tanımlamaktadır. Denklem (3) ve Denklem (4)'te verilen integraller doğal koordinatlarda -1 ile +1 arasında tanımlanmıştır.

Döşeme ve temellerin kayma ve dönme serbestlik dereceleri Mindlin kalın plak teorisi kullanılarak rijitlik matrisleri hesaplanmıştır. Düzlem içi serbestlik davranışı da eklenerek iki boyutlu plak elemanların rijitlik matrisleri Denklem (4)'te verilen bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$k^e = \int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}((h^3/12)\, B_b^T C_b B_b + hB_s^T C_s B_s + hB_m^T C_m B_m)\, det\, J\, d\xi\, d\eta \quad (4)$$

Burada h plak kalınlığını, $C_b$dönme, C_s kesme, C_m düzlem içi malzeme; B_m ise düzlem içi şekil değiştirme interpolasyon matrisleridir. Bu bağıntıdan her bir düğüm noktası için toplam 5 serbestlik derecesinin rijitliği tanımlanabilmektedir. Hesapları kolaylaştırmak amacıyla düzlem normali etrafında dönme serbestlik derecesi Hughes ve Brezzi'nin (1989) Denklem (5)'te verilen formülüyle hesaplara eklenmiştir.

$$\gamma \int_\Omega \left(\frac{1}{2}\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{2}\frac{\partial v}{\partial x} + \theta_z\right)^2 d\Omega \quad (5)$$

Burada γ parametresi 0,3Gh alınmıştır; sonuçlar γ değerine duyarlı değildir (Ibrahimbegovic vd., 1990). Eleman formülasyonları, yakınsama çalışmaları ve SAP2000 karşılaştırmalarıyla ayrıca doğrulanmıştır.

Kazık uç yaylarının yalnızca basınca çalıştıran iteratif bir çözüm algoritması geliştirilmiştir. Buna göre başlangıçta bütün uç yaylarının basınca çalıştığı varsayılarak sistem çözülmektedir. Her çözümden sonra kazıkların alt segmentlerindeki eksenel yükler kontrol ediererek varsayılan yay durumlarıyla karşılaştırılır. Varsayıma uymayan yayların durumları güncellenerek 3-4 iterasyonda sistem belirli bir toleransla çözülebilmektedir.

Her analizden en çok ve en az kısıtlanmış enerji kazıklarının 4 analiz çıktısı saklanmıştır. Bu çıktılar, kazıkların üst ve alt noktalarındaki yer değiştirmeler ile üst ve alt segmentlerinde oluşan eksenel kuvvetlerden oluşmaktadır. Çalışma boyunca bu büyüklükler sırasıyla UGT, UGB, NT ve NB olarak gösterilmiştir. Bu 4 sonuçtan diğer 3 değer hesaplanmıştır. Buna göre kazıkların serbestlik derecesi Denklem (6)'da verildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$DOF = \frac{UGT - UGB}{L\, \alpha\, \Delta T} \quad (6)$$

Üst yapının ve zeminin kazık uçlarındaki kısıtlayıcı etkisini temsil eden iki yay ise sırasıyla Denklem (7)'de verilen bağıntılarla Hooke yasasından elde edilmiştir.

$$K_{\text{üst}} = \frac{NT}{UGT}, \quad K_{alt} = \frac{NB}{UGB} \quad (7)$$

2.3. Makine Öğrenmesi

Bu çalışmada 2 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Bunlar karar ağacı ve yapay sinir ağları algoritmalarıdır. Karar ağacı algoritması olarak XGBoost (Chen ve Guestrin, 2016), yapay sinir ağları algoritması olarak scikit-learn (Pedregosa vd., 2011) kütüphanesi kullanılmıştır.

Girdi olarak iki özellik seti tanımlanmıştır. Bunlar parametrelerin SI birimlerinde doğrudan kullanıldığı ham, ve özelliklerin kazık çapıyla normalize edildiği türetilmiş set olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca enerji kazıklarının konumları ve yükleme durumları sonuçlarda etkili olmasından dolayı bütün yükleme durumlarının tek bir modelde toplandığı küresel strateji ve her yükleme durumu için ayrı modelin eğitildiği durum bazlı strateji olmak üzere iki eğitim stratejisi uygulanmıştır.

Her algoritmanın her iki özellik seti ve her iki eğitim stratejisiyle eğitilmesi sonucunda 7 çıktı için algoritma başına 14 küresel 112 durum bazlı olmak üzere algoritma başına 126,

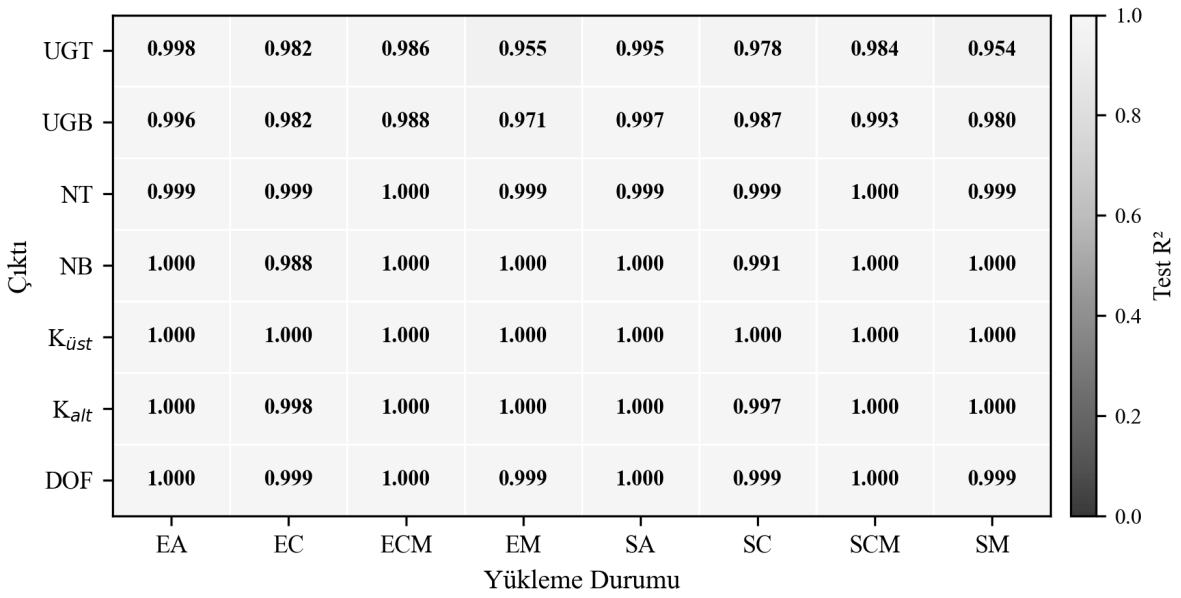
toplamda 252 makine öğrenmesi modeli elde edilmiştir. Tüm modellerde veri %80 eğitim %10 doğrulama ve %10 test olarak olmak üzere bölünmüştür. Modellerin performansları belirlilik katsayısı (R^2) ile değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

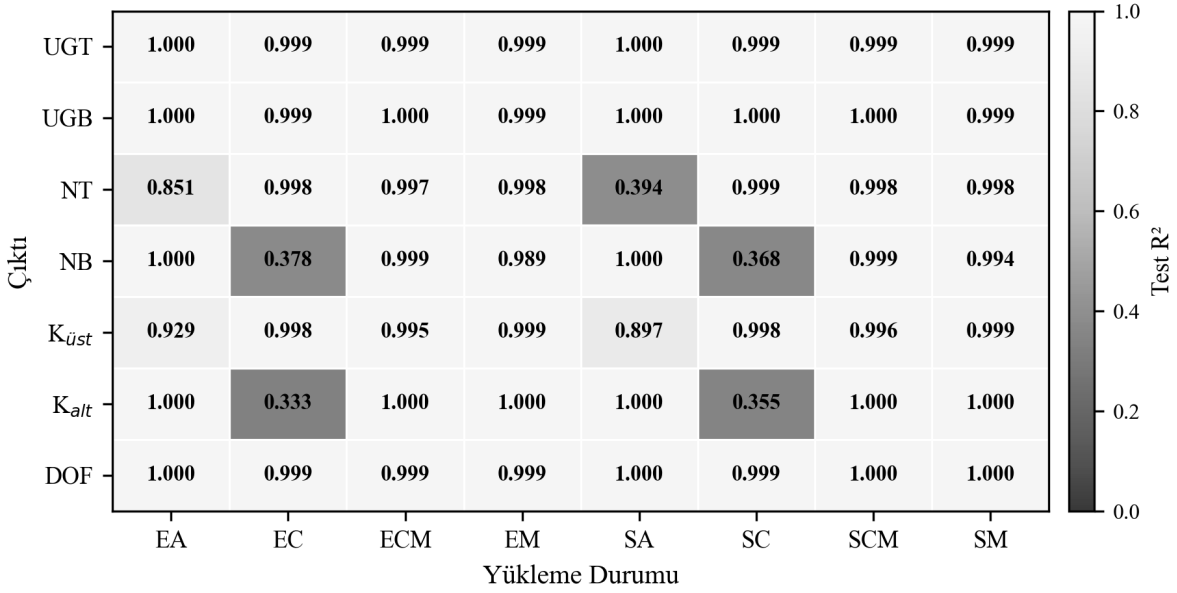
3.1. Makine Öğrenmesi Sonuçları

XGBoost ve YSA modellerinin test seti R^2 değerleri, her çıktı ve yükleme durumu için en başarılı konfigürasyonlarında Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmuştur. Her yükleme durumu için ayrı model eğitilmesi, ana varyans kaynağını ortadan kaldırdığından tüm çıktılarda tahmin sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca, her çıktı ve yükleme durumu için dört yöntem arasından en yüksek test R^2 değerini veren model belirlenmiş ve arayüze optimum model olarak gömülmüştür. Her çıktı ve yükleme durumu için seçilen optimum yöntemler Şekil 5'te özetlenmiştir.

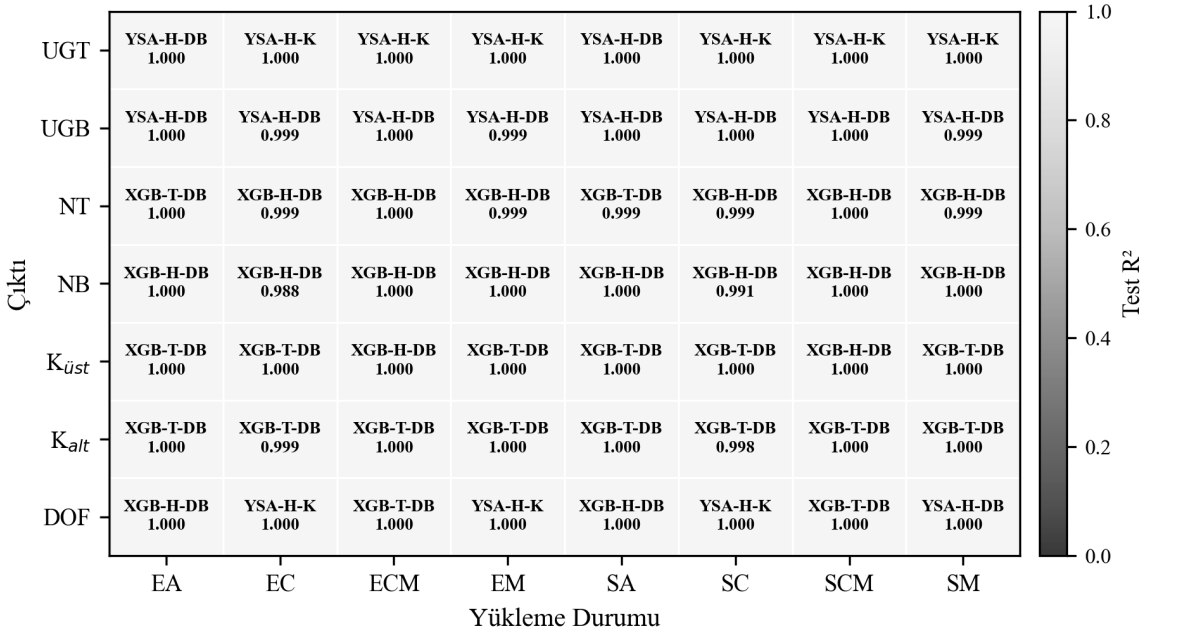
Özellik seti tercihi iki algoritmada zıt yönde etki göstermiştir: XGBoost ham (SI birimli) sette, YSA ise kazık çapına normalize edilmiş türetilmiş sette daha başarılıdır. En yüksek başarım, ham özellik seti ve durum bazlı stratejiyle eğitilen XGBoost modellerinde elde edilmiştir. Durum bazlı YSA modelleri buna yakın, ancak bir miktar düşük R^2 değerleri vermiştir. YSA tahminleri çıktı uzayında daha pürüzsüz yüzeyler üretmekte olup bu özellik sürekli davranışlarda avantaj, keskin geçişlerde dezavantaj oluşturmaktadır.



Şekil 3. Ham özellik seti ile durum bazlı eğitilen XGBoost modellerinin test R^2 değerleri.



Şekil 4. Türetilmiş özellik seti ile durum bazlı eğitilen YSA modellerinin test R^2 değerleri.

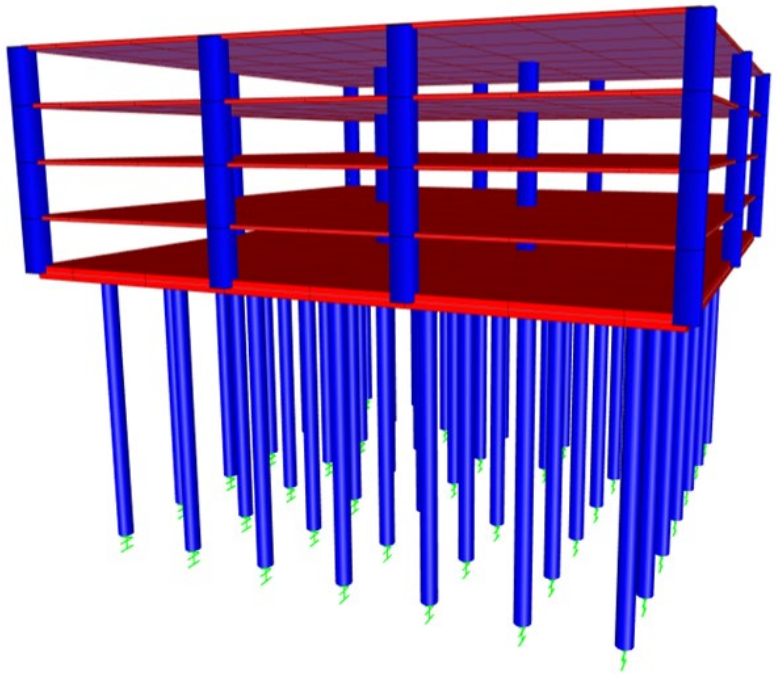


Şekil 5. Her çıktı ve yükleme durumu için en yüksek test R^2 değerini veren yöntemler (H: ham, T: türetilmiş, K: küresel, DB: durum bazlı).

3.2. Tartışma

Geliştirilen sonlu elemanlar çözücüsünü ve makine öğrenmesi modellerini doğrulamak amacıyla, parametrik sette yer almayan bağımsız bir referans model oluşturulmuştur. Modelin özellikleri 5 m aralıklı 7x7 kazık matrisi, 16 m boyunda ve 0,9 m çapında kazıklar, 0,7 m temel plağı ve beş katlı bir üst yapı olarak sıralanabilir. Doğrulama modelinin görseli Şekil 6'da verilmiştir. Isıtma ve soğutma modlarında toplam 20 yükleme durumu, hem

geliştirilen çözücüyle hem de SAP2000 ile analiz edilmiştir. Seçilen temsili kazıkların baş yer değiştirmeleri Tablo 2'de karşılaştırılmıştır. Geliştirilen çözücünün sonuçları SAP2000 ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Optimize makine öğrenmesi tahminleri de her iki sayısal çözümle uyumlu büyüklük ve işarette sonuçlar vermektedir (Halifeoğlu, 2026)



Şekil 6. SAP2000 referans modelinin katı görünümü.

Tablo 2. Her elde etme yöntemi için referans kazıklarının baş yer değiştirmeleri.

Durum	SAP2000 (m)	Geliştirilen çözücü (m)	MÖ optimize (m)
EA	0,00216	0,00237	0,00237
EC1	0,00237	0,00258	0,00222
EC2	0,00224	0,00241	0,00237
EC3	0,00216	0,00236	0,00247
SC1	-0,00207	-0,00203	-0,00174
SC2	-0,00197	-0,00191	-0,00186
SC3	-0,00189	-0,00185	-0,00194
EM1	0,00084	0,00109	0,00160
EM2	0,00224	0,00257	0,00175
EM3	0,00229	0,00247	0,00211
SM1	-0,00065	-0,00070	-0,00114
SM2	-0,00190	-0,00197	-0,00125
SM3	-0,00200	-0,00197	-0,00162
ECM1	0,00195	0,00219	0,00208
ECM2	0,00228	0,00248	0,00253
ECM3	0,00220	0,00239	0,00240
SCM1	-0,00167	-0,00166	-0,00157
SCM2	-0,00199	-0,00195	-0,00200
SCM3	-0,00199	-0,00188	-0,00181
SA	-0,00185	-0,00135	-0,00134

Sonuçlar genel eğilimleri net biçimde ortaya koymaktadır: zeminin ve üst yapının kısıtlaması nedeniyle uzayan kazıklarda basınç, kısalan kazıklarda çekme kuvvetleri gelişmektedir. Enerji kazıklarının matris içindeki yerleşimi en belirleyici parametredir. Bazı kazıklar, diğer kazıkların üst yapı ve temel plağı üzerinden aktarılan birleşik etkisiyle beklenenin tersi yönde davranış dahi sergileyebilmektedir.

Bulgular değerlendirilirken çalışmanın varsayımları göz önünde bulundurulmalıdır. Yalnızca kohezyonlu zemin ele alınmış, zemin ampirik bağıntılarla doğrusal elastik yaylara indirgenmiş ve ısı iletimi yapan sürekli bir ortam olarak modellenmemiştir. Yay rijitlikleri sıcaklıktan bağımsızdır; ölü yükler ve diğer yük türleri ihmal edilerek yalnızca termal yükler dikkate alınmıştır. Zeminin sıcaklık yayılım profili gerçekliğin aksine homojen kabul edilip, dış ortam ve termal yüklerden etkilenmediği kabul edilerek analizler sadeleştirilmiştir. Belirtilen nedenlerden dolayı elde edilen çıktılar, ön tasarım aşamasında kazık davranışının genel eğilimleri hakkında bilgi vermek üzere kullanılabilir.

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, üst yapıyı ve zemini birlikte modelleyen ikinci dereceden elemanlar kullanan ve yalnızca basınca çalışan uç yaylarını iteratif olarak hesaba katan özel amaçlı bir sonlu elemanlar çözücüsü geliştirilmiştir. Toplam 288 geometrik model oluşturulup 319.680 analiz gerçekleştirilmiştir. EA yükleme durumlarında bütün kazıkların verileri aynı olduğu kabul edilip tüm kazıkların sonuçları makine öğrenmesi veri setine dahil edilmiştir. Elde edilen 713.968 enerji kazığı verisiyle 252 makine öğrenmesi modeli eğitilmiştir. En yüksek tahmin başarımı, durum bazlı stratejiyle ham özellik setinde eğitilen XGBoost modellerinde elde edilmiştir.

Makine öğrenmesi ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarında, farklı parametrelerin ve kazıkların birbirleriyle etkileşimi nedeniyle enerji kazıklarının uç yer değiştirmeleri ve serbestlik dereceleri gibi çıktılar üzerinde tek bir parametrenin doğrusal etkisi çıkarılamamaktadır. Fakat kazık uç yer değiştirmeleri ve serbestlik dereceleri gibi çıktılar üzerinde en belirleyici faktör yükleme durumu, yani enerji kazıklarının kazık matrisi içindeki konumu, toplam kazık sayısına oranı ve termal yükün yönüdür.

Geliştirilen arayüzde, her çıktı ve yükleme durumu için en yüksek test R^2 değerini veren algoritma ve modelin otomatik seçildiği bir seçenek sunulmuştur. Ayrıca kullanıcı, kazık matrisini, enerji kazığı dizilimini ve tasarım parametrelerini girerek kazık başına yedi çıktının (uç yer değiştirmeleri, eksenel kuvvetler, serbestlik derecesi ve temsili kısıtlama yayları) tahminini karmaşık bir sonlu elemanlar analizi gerektirmeden saniyeler içinde alabilmektedir. Sonuçların parametrik sette yer almayan bağımsız bir modelin SAP2000 analizleriyle doğrulanması, hem çözücünün hem de tahmin modellerinin güvenilirliğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, zeminin ısıl iletimini ve derinlikle değişen sıcaklık profilini kapsayan analizlerle, zenginleştirilmiş yükleme durumlarıyla genişletilebilip saha deneyleriyle doğrulanarak geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

Amatya, B., Soga, K., Bourne-Webb, P., Amis, T. ve Laloui, L. (2012), "Thermo-Mechanical Behaviour of Energy Piles", Géotechnique, Vol. 62, No. 6, 503–519.

API (2011), Geotechnical and Foundation Design Considerations (API RP 2GEO), American Petroleum Institute, Washington, D.C.

Banks, D. (2012), An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, Second Edition, Wiley-Blackwell, Chichester, UK.

Batini, N., Rotta Loria, A. F., Conti, P., Testi, D., Grassi, W. ve Laloui, L. (2015), "Energy and Geotechnical Behaviour of Energy Piles for Different Design Solutions", Applied Thermal Engineering, Vol. 86, 199–213.

Blender Foundation (2026), Blender: A 3D Modeling and Rendering Software (Version 4.5), Blender Foundation, Amsterdam, Netherlands.

Bourne-Webb, P. J., Amatya, B. ve Soga, K. (2013), "A Framework for Understanding Energy Pile Behaviour", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Vol. 166, No. 2, 170–177.

Brandl, H. (2013), "Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling", Procedia Engineering, Vol. 57, 9–18.

Chen, T. ve Guestrin, C. (2016), "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System", Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785–794.

CSI (2024), SAP2000: Integrated Software for Structural Analysis and Design (Version 24), Computers and Structures, Inc., Walnut Creek, CA.

Di Donna, A., Rotta Loria, A. F. ve Laloui, L. (2016), "Numerical Study of the Response of a Group of Energy Piles under Different Combinations of Thermo-Mechanical Loads", Computers and Geotechnics, Vol. 72, 126–142.

Halifeoğlu, V. (2026), "Numerical and Machine Learning Based Determination of Restraints for Energy Piles", Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Ün. Fen Bil. Enst., İstanbul.

Hughes, T. J. ve Brezzi, F. (1989), "On Drilling Degrees of Freedom", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 72, No. 1, 105–121.

Ibrahimbegovic, A., Taylor, R. L. ve Wilson, E. L. (1990), "A Robust Quadrilateral Membrane Finite Element with Drilling Degrees of Freedom", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 30, No. 3, 445–457.

Jeong, S., Lim, H., Lee, J. K. ve Kim, J. (2014), "Thermally Induced Mechanical Response of Energy Piles in Axially Loaded Pile Groups", Applied Thermal Engineering, Vol. 71, No. 1, 608–615.

Kumar, P. ve Samui, P. (2022), "Design of an Energy Pile Based on CPT Data Using Soft Computing Techniques", Infrastructures, Vol. 7, No. 12, 169.

Mimouni, T. ve Laloui, L. (2015), "Behaviour of a Group of Energy Piles", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 52, No. 12, 1913–1929.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. ve Duchesnay, É. (2011), "Scikit-learn: Machine Learning in Python", Journal of Machine Learning Research, Vol. 12, 2825–2830.

Pei, H., Song, H., Meng, F. ve Liu, W. (2022), "Long-Term Thermomechanical Displacement Prediction of Energy Piles Using Machine Learning Techniques", Renewable Energy, Vol. 195, 620–636.

Polat, S., Güner, M., Erginağ, U. C., Sutman, M. ve Çinicioğlu, Ö. (2024), "Enerji Kazıklarının Sayısal Modellenmesinde Yüzey Radyasyonu ve Rüzgarın Etkisi", Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 19. Ulusal Konferansı, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Sani, A. K., Singh, R. M., Amis, T. ve Cavarretta, I. (2019), "A Review on the Performance of Geothermal Energy Pile Foundation, Its Design Process and Applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 106, 54–78.

Sutman, M., Brettmann, T. ve Olgun, C. G. (2019), "Full-Scale In-Situ Tests on Energy Piles: Head and Base-Restraining Effects on the Structural Behaviour of Three Energy Piles", Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 18, 56–68.

TSE (2000), TS 500: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	**Açıklama**	**Sembol**	**Açıklama**
A	Kazık en kesit alanı	D	Kazık çapı
B_b, B_s, B_m	Dönme, kayma ve düzlem içi şekil değiştirme matrisleri	R^2	Belirlilik katsayısı
C_b, C_s, C_m	Dönme, kayma ve düzlem içi malzeme matrisleri	UGT, UGB	Kazık üst ve alt ucu yer değiştirmeleri
NT, NB	Üst ve alt segment eksenel kuvvetleri	α	Isıl genleşme katsayısı
DOF	Kazığın serbestlik derecesi	γ	Düzlem normali etrafında dönme parametresi
E	Elastisite modülü	ΔT	Sıcaklık farkı
G	Kayma modülü	θ_z	Düzlem normali etrafında dönme
h	Plak kalınlığı	κ	Kayma düzeltme katsayısı
J	Jakobiyen	ψ	İnterpolasyon (şekil) fonksiyonu
$K_{\text{üst}}, K_{alt}$	Üst ve alt temsili kısıtlama yayları	L	Kazık boyu
F_{termal}	Termal eksenel kuvvet	ε_{termal}	Termal birim şekil değiştirme
k	Eksenel veya dönme rijitliği	I_y	Dönme atalet momenti
k^e	Eleman rijitlik matrisi	ξ, η	Doğal koordinatlar