

Afet Sonrası Acil Yerleşim Bölgelerinde Vidalı Kazıkların Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Talha SARICI¹, Mustafa ÖZCAN^{2*}

^{1,2}Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya

¹<https://orcid.org/0000-0001-8488-5851>

²<https://orcid.org/0000-0001-5745-8694>

*Sorumlu yazar: mustafa.ozcan@inonu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 25.09.2024

Kabul tarihi: 07.01.2025

Online Yayınlanma: 12.03.2025

Anahtar Kelimeler:

Vidalı kazık

Afet sonrası yerleşim

Model yükleme deneyi

Sonlu elemanlar analizi

ÖZ

Bu çalışma kapsamında vidalı kazıkların afet sonrası acil yerleşim bölgelerinde kullanılabilirliğini araştırmak üzere deneysel çalışmalar, sayısal ve parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, farklı helezon sayısına sahip vidalı kazıklar ve geleneksel kazığın kohezyonsuz zeminde basınç kuvveti altındaki davranışı incelenmiştir. Sayısal ve parametrik analizlerde literatürde yaygın kullanılan vidalı kazık modellerinden farklı olarak parçalı helezon modellemesi geliştirilmiş ve deneysel çalışmalar ile önemli uyum elde edilmiştir. Bununla beraber parametrik çalışmalarda farklı helezon çapları, gömülme derinlikleri ve helezon sayıları gibi parametreler araştırılarak bu değişkenlerin taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen taşıma kapasiteleri, iyileştirme oranları ve helezon sayısı verimliliği gibi bulgular değerlendirildiğinde afet sonrası yerleşimde sıklıkla tercih edilen konteyner yapılan vidalı kazıklar kullanılarak güvenle taşınabildiği görülmüştür. Bununla beraber vidalı kazıkların farklı üretim opsiyonlarının bulunması sayesinde, prefabrik elemanlar ile daha kolay bağlantı sağlayabilmesi, vidalı kazıkların sahada farklı arazi koşullarında dahi kolaylıkla uygulanabilmesi, depolama kolaylığı gibi avantajları sayesinde acil durum eylem planlarında kendine yer bulacağı düşünülmektedir.

Investigation of the Applicability of Screw Piles in Post-Disaster Emergency Settlement Areas

Research Article

Article History:

Received: 25.09.2024

Accepted: 07.01.2025

Published online: 12.03.2025

Keywords:

Screw pile

Post-disaster settlement

Model loading test

Finite element analysis

ABSTRACT

Within the scope of this study, experimental studies, numerical and parametric analyses were carried out to investigate the usability of screw piles in post-disaster emergency settlement areas. The behavior of screw piles with different number of helixes and traditional piles under compressive force in cohesionless soil were investigated. In the numerical and parametric analyses, unlike the screw pile models commonly used in the literature, a segmented helix modeling was developed and significant agreement with experimental studies was obtained. In addition, in parametric studies, parameters such as different helix diameters, embedment depths and number of helixes were investigated and the effect of these variables on the bearing capacity was investigated. When the findings obtained within the scope of the study such as bearing capacities, improvement ratios and helix number efficiency are evaluated, it is seen that the containers, which are frequently preferred in post-disaster settlement, can be safely carried by using screw piles. In addition, due to the availability of different production options of screw piles, it is thought that it will find a place in emergency action plans thanks to its advantages such

as easier connection with prefabricated elements, easy application of screw piles in the field even in different terrain conditions, and ease of storage.

To Cite: Sarıcı T., Özcan M. Afet Sonrası Acil Yerleşim Bölgelerinde Vidalı Kazıkların Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(2): 754-772.

1. Giriş

Depremler, ilk etapta yanlış inşa edilmiş yer altı ve yer üstü yapılarını tehdit ediyor gibi görünse de afet anı birkaç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar afet öncesi, afet anı ve afet sonrası olarak tanımlanabilmektedir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar ışığında elverişsiz zeminlerin rehabilite edilmesi, taşınması ya da derin temel çözümleri vb. ile pek çok sorun aşularak afet öncesi zamanda inşaat mühendisliği yapıları daha güvenli hale getirilebilmektedir (Demir ve Ok, 2015a; b; Demir ve Sarıcı, 2017; Ateş ve Şadoğlu, 2021a; b; Altaf ve ark., 2024; Demir ve ark., 2024). Son yıllarda elde edilen teknolojik gelişmeler ve yapılan çalışmalar sayesinde zemin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerin birçok probleme aynı anda cevap verebildiği de görülmüştür (Sarıcı ve Özcan, 2024a; 2024b). Bu çözümlerden biri olarak kazıklı temel kullanımı ile yapılardan gelen yükler zeminin daha derin tabakalarına aktarılabilen, oturmayı sınırlayabilmekte ve bununla beraber deprem anında ortaya çıkabilecek sınırlama potansiyellerini engelleyebilmektedir (Mohajerani ve ark., 2016; Ateş ve Şadoğlu, 2022a; b; Sarıcı ve Özcan, 2024a; b). Vidalı kazıklar, icadının üzerinden uzunca zaman geçmiş olmasına karşın teknolojik gelişmeler ile beraber günümüzde kendine daha çok yer bulabilmektedir. Başlıca özellikleri arasında depolanabilir oluşu, uygulama kolaylığı ve uygulama yerinde ekosistemi tahrip etmiyor olması sıralanabilir (Perko, 2009; Mohajerani ve ark., 2016). Yine birkaç metreden birkaç yüz metreye varan uygulama derinliklerine sahip olması sebebiyle de pek çok inşaat mühendisliği projesinde tercih edilebilmektedir (Özcan, 2024). Ayrıca vidalı kazık uygulamaları ile eğimli arazilerde kazı-hafriyat çalışmalarına ihtiyaç duyulmadan imalatlar gerçekleştirilebilmektedir (Perko, 2009; Feng ve ark., 2021). Farklı örüntü ve sayıda oluşturulan vidalı kazık grupları ile küçük ve büyük ölçekli projelerde vidalı kazık uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca kohezyonlu veya kohezyonsuz zeminlerde, açık deniz yapılarında vidalı kazıklar kendine gün geçtikçe daha da fazla yer bulmaktadır (Vignesh ve Muthukumar, 2023; Sarıcı ve Özcan, 2024c).

Deprem sonrası dönemde ise, inşaat mühendisliği yapılarının zarar görmemiş olması durumunda dahi olabilecek artçı depremler sebebiyle insanlar ikamet ettikleri yapılara geri dönememektedir. Afetin büyüklüğüne bağlı olarak artçıların devam etme süresi ya da yapıların alanında uzman kişiler tarafından güvenli olduğunun belgelenmesi çok uzun sürebilmektedir. Nitekim 2023 yılının şubat ayında meydana gelen Kahramanmaraş depremleri sonrasında bu durum daha da iyi görülmüş ve anlaşılmıştır. Bahse konu incelemelerin tamamlanmasına kadar geçen sürede merkezi ve yerel yönetimler geçici konaklama merkezleri oluşturarak ihtiyaçlara cevap vermek üzere harekete geçmiştir. Ancak bu noktada geliştirilen çözümler tedarik ve üretim zincirine doğrudan bağlı olduğu için ne yazık ki bu süreç de uzamak durumunda kalmıştır. Geçici yerleşim merkezleri prefabrik konteyner evlerden oluşturulmak üzere planlanmış ancak konumlandırılacakları alanların düzeltilmesi, tesisatların yerleştirilmesi, konteyner altlarına beton dökülmesi ve çevre asfaltlarının imalatı gibi kalemlerde yaşanan tedarik aksamaları

ihtiyaçlara verilecek cevapları geciktirmiştir. Depremlerin kendi periyotları dahilinde tekrar ediyor olmaları sebebiyle gelecek afetler için önlemlerin alınması hayati önem taşımaktadır. Bu noktada, vidalı kazık sistemleri ile geçici yerleşim alanlarının inşasının hızlanabileceği düşünülmüş ve bu çalışmanın gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

Literatür çalışmalarında da görülebileceği üzere vidalı kazıklar zayıf zeminlerde, eğimli arazilerde, küçük ya da büyük ölçekli yapılarda kullanılabilir. Ayrıca deprem sonrası yapılan incelemelerde de ülkemizde deprem etkisi altındaki bölgelerde yerleşim ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanılan yöntemlerin afet sonrası zaman diliminde yeterli hız ve kapasitede olmadığı görülmüştür. Vidalı kazıkların kohezyonsuz zayıf zeminde basınç kuvveti altındaki davranışını ve acil durum eylem planlarında kullanılabilirliğini araştırmak üzere farklı değişkenler belirlenerek bu çalışmanın gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Bu bağlamda farklı helezon sayısı ve gömülme derinliğine sahip vidalı kazıklar kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenip elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında uyum elde edildikten sonra, parametrik çalışmalar kapsamında helezon sayısı, gömülme derinliği ve helezon çapı gibi değişkenlerin taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Modellemelerde kullanılan katmanlı helezon modellemesi ile vidalı kazık davranışının daha doğru yansıtıldığı da görülmüştür. Bununla beraber deprem sonrası oluşturulan acil yerleşim bölgelerinde gözlemlenen sorunlara (konteynerlerin farklı oturma yapması, konteynerlerin sele kapılıp can ve mal kayıplarına sebep olması, dengeli bir yerleşim elde edilmediği için konteynerlerin yapısal deformasyona uğraması, konteyner yerleşimi için kazı, tesviye ve betonlama işlemlerinin uzun sürmesi vb.) cevap verilebilmesi hedeflenmiştir. Bu yönleriyle bu çalışmanın bahse konu sorunlara çözüm sağlaması ve genel/yerel yönetimler tarafından acil durum eylem planlarında karar alırken yol gösterici olması gibi sebeplerle özgün, yol gösterici ve faydalı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar çalışmada kullanılan vidalı kazıklar ve özellikleri belirtilmiş kohezyonsuz zemin için yapılacak uygulama üzerine yerleştirilecek sonraki bölümlerde bahsi geçen konteyner tarzı yapı için geçerlidir. Saha uygulamalarında ve gelecek çalışmalarda, çalışmaya özgü zemin koşulları ve yapı elemanlarını içeren çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar fikir verici mahiyette olup tasarımda tek başına kullanılamaz.

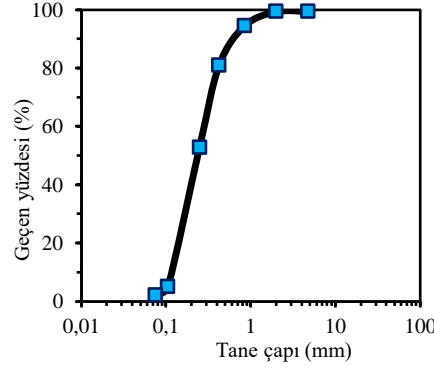
2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Çalışmalar

2.1.1. Kohezyonsuz zemin

Deney tankı içerisinde zayıf zemin ortamı oluşturmak için kullanılan kohezyonsuz zemin Malatya iline bağlı Yazlıhan ilçesinden temin edilmiştir. Temin edilen zeminin mühendislik özelliklerini belirlemek üzere, elek analizi, piknometre deneyi, maksimum minimum boşluk oranı tayini deneyleri, el penetrometresi, kesme kutusu ve Kaliforniya taşıma gücü oranı deneyleri ilgili standartlara göre gerçekleştirilmiştir. Kohezyonsuz zeminin dane dağılımı eğrisi Şekil 1’de verilmiştir ve zemine ait diğer

özellikler Tablo 1’de görülmektedir. Kohezyonsuz zemin Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi’ne (USCS) göre kötü derecelendirilmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmıştır.



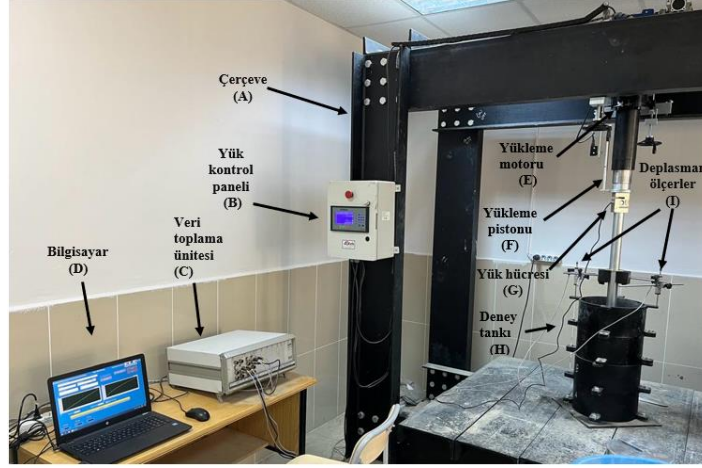
Şekil 1. Kohezyonsuz zeminin dane dağılımı eğrisi

Tablo 1. Kohezyonsuz zemine ait özellikler

Parametre	Birim	Değer	Standart
Özgül yoğunluk (G_s)	-	2,74	ASTM-D854
Maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax})	Mg/m ³	1,65	ASTM-D4254
Minimum kuru yoğunluk (ρ_{kmin})	Mg/m ³	1,45	ASTM-D4254
Üniformluk katsayısı (C_u)	-	2,375	ASTM-D422
Eğrilik katsayısı (C_c)	-	0,926	ASTM-D422
Sınıflandırma	-	SP	ASTM-D2487
İçsel sürtünme açısı (ϕ)	Derece (°)	40	ASTM-D3080

2.1.2. Model yükleme deney düzeneği

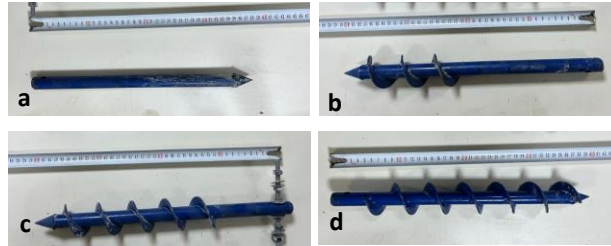
Deneyisel çalışmalarda kazıklar üzerine yükleme yapmak için model yükleme test düzeneği kullanılmıştır. Model yükleme test düzeneğinin resmi Şekil 2’de verilmiştir. Model yükleme test düzeneği, çelik çerçeveye (Şekil 2-A) sabitlenmiş servo motor (Şekil 2-E) aracılığıyla yükleme pistonlarını (Şekil 2-F) hareket ettirerek çelik tank (Şekil 2-H) içine yerleştirilen yapıya kuvvet uygular. Yükleme pistonuna bağlı yük hücresi (Şekil 2-G) yük değerlerini, LVDT’ler (Şekil 2a-I) ise yer değiştirme değerlerini okumakta ve veriler veri kaydedici (Şekil 2-C) aracılığıyla bilgisayara (Şekil 2-D) aktarılmaktadır. Deneyisel süreci ayarlamak için çelik çerçeve üzerine bir kontrol paneli (Şekil 2-B) yerleştirilmiştir. Yükleme hücresi ve LVDT’ler deneylere başlamadan önce yetkili firma tarafından kalibre edilmiştir. Model yükleme deney seti, piston 1 mm/dk hızda düşey yönlü hareket edecek şekilde ayarlanmış ve deney deplasman kontrollü olarak tamamlanmıştır. Vidalı kazık üst yüzeyi hemen piston altına yerleştirilmiş ve yük vidalı kazık üzerine uygulanmıştır. Deney tankı helezon çapının 6 katı ve deney tankının derinliği 60 cm olacak şekilde belirlenmiştir. Böylelikle vidalı kazığın zemin içerisinde oluşturacağı gerilmelerin deney tankının tabanı ve çevresi ile etkileşime girmemesi sağlanabilmiştir (Vignesh ve Muthukumar, 2023; Sarıcı ve Özcan, 2024a; b). Daha fazla ayrıntı için Özcan (2024) incelenebilir.



Şekil 2. Model yükleme deney seti

2.1.3. Vidalı kazıklar

Deneyisel çalışmalarda kohezyonsuz zemini güçlendirmek için kullanılan kazıklar yerel bir üreticiden temin edilmiştir. Kazıklar aynı uzunluk (39 cm), şaft çapı (2 cm) ve helezon çapına (5 cm) sahiptir ve paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Helezonlar vidalı kazıkların üzerine 5 cm helezonlar arası mesafe olacak şekilde kaynaklanarak yerleştirilmiştir. Çelik elemanlar 4 mm et kalınlığına sahiptir. Vidalı kazıklar aşınmayı engelleyecek şekilde üretim sonrası üretici tarafından boyanmıştır. Kazıkların görüntüleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Kazıklar vidasız geleneksel kazık (TP), 3 helezonlu vidalı kazık (3HSP), 5 helezonlu vidalı kazık (5HSP) ve 7 helezonlu vidalı kazık (7HSP) olarak seçilmiştir.



Şekil 3. Deneyisel çalışmalarda kullanılan vidalı kazıklar (a. TP, b. 3HSP, c. 5HSP, d. 7HSP)

2.2. Sayısal Analizler

Deneyisel çalışmaları modellemek üzere sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan bir paket program olan Plaxis 3D kullanılmıştır. Modellemede zayıf zemin ortamını temsil etmek üzere 50 cm derinliğe ve 30 cm genişliğe sahip zemin hacmi oluşturulmuştur. Tanelerin yük altında daha da pekleştiği model olan hardening soil modeli zayıf zeminin davranışını temsil etmek üzere tercih edilmiştir. Kazık gövdesi rijit bir zemin hacmi olarak modellenmiş ve bu hacim zayıf bir plate tabakası ile çevrelenerek helezonlar ile bağlantı yapılabilmesi sağlanmıştır. Vidalı kazıkların helezonları için ise 90 derecelik dilimlerden oluşan dört parça plate eleman kademeli olarak kazık şaftı etrafına yerleştirilmiştir. Modelleme kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2'de, zayıf zemini oluşturmak için kullanılan parametreler ise Tablo 3'te görülmektedir. Sayısal analizlerde oluşturulan mesh görüntüsü ve vidalı kazıkların görüntüleri ise Şekil 4'te verilmiştir. Mesh oluştururken uygun tane boyutunu belirlemek üzere

kullanılan yazılımın sunduğu aralıklar ile analizler gerçekleştirilmiş ve mesh hassaslığı grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik (Şekil 5) incelendiğinde optimum mesh dağılımının “medium (17409 adet node)” olarak seçilmesi uygun görülmüştür.

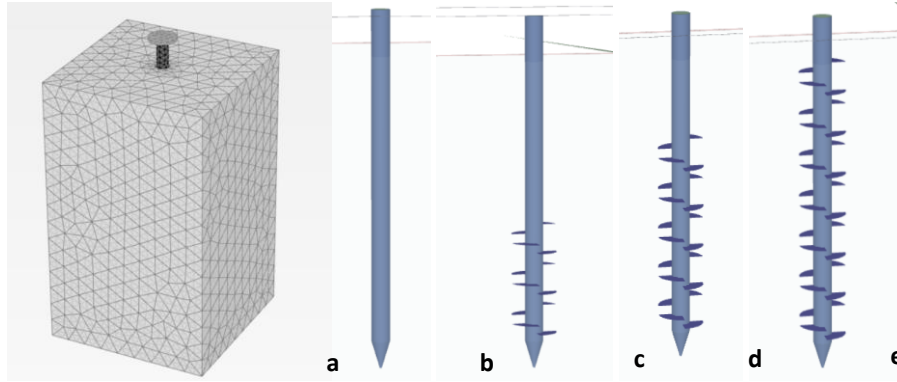
Tablo 2. Sayısal analizlerde kullanılan materyaller (Sarıcı ve Özcan, 2024a; b)

Materyal	Model	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Yükleme pistonu	Linear Elastic (Non- porous)	78,5	E= 200 x 10 ⁶	0,3
Kazık gövde hacmi	Linear Elastic (Non- porous)	78,5	E= 200 x 10 ⁶	0,3
Kazık gövdesi çevresi	Plate/Elastic	0,0785	E=200	-
Helezonlar	Plate/Elastic	78,5	E=200x10 ⁶	-

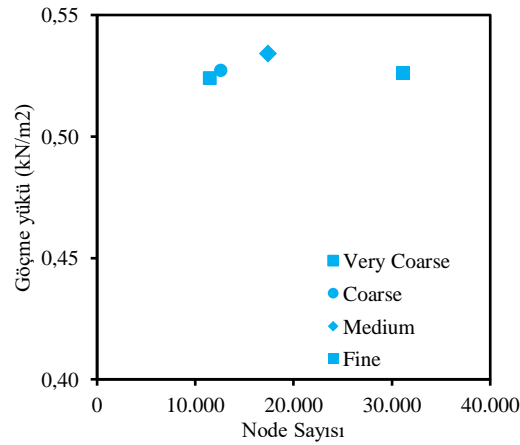
Burada; γ birim hacim ağırlık, E Young's modülü ve ν Poisson oranıdır.

Tablo 3. Sayısal analizlerde kullanılan zemin özellikleri (Sarıcı ve Özcan, 2024a)

Parametre	Kohezyonsuz Zemin
Zemin modeli	Hardening Soil (Drained)
Young modülü (kN/m ²)	E ₅₀ ^{ref} = 4250 E _{ur} ^{ref} = 4250 E _{oed} ^{ref} =12750
Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	14
İçsel sürtünme açısı	42
Dilatasyon açısı	12



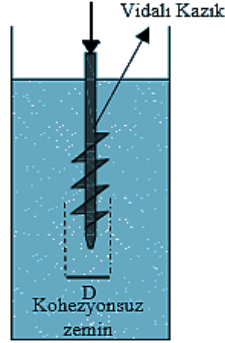
Şekil 4. Sayısal modelleme görüntüleri (a. Oluşturulan mesh, b. TP, c. 3HSP, d. 5HSP, e. 7HSP)



Şekil 5. Sayısal modelleme için yapılan mesh hassaslığı analizi

2.3. Deneysel Çalışmaların Gerçekleştirilmesi

Deneysel çalışmalar tek seri halinde kohezyonsuz zemine yerleştirilen vidalı kazıklar üzerine basınç kuvveti uygulayarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların şematik gösterimi Şekil 6’da verilmiştir. Deneysel çalışma programı ise Tablo 4’te görülmektedir.



Şekil 6. Deneysel çalışmaların şematik gösterimi

Tablo 4. Deneysel çalışma programı

Deneysel Numarası	Kazık Türü	Kuvvet Yönü
1	TP	Basınç
2	3HSP	Basınç
3	5HSP	Basınç
4	7HSP	Basınç

Deneysel çalışmalar kapsamında vidalı kazıkların kohezyonsuz zeminde basınç kuvveti etkisi altında davranışını incelemek üzere model yükleme deney seti ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Zayıf zemin ortamı oluşturmak için seçilen kohezyonsuz zemin %30 sıklıkta 5 cm yüksekliğinde tabakalar halinde toplam 10 tabaka olacak şekilde deney tankına yerleştirilmiştir. Her tabaka eşit enerji kullanılarak yağmurlama yöntemi ile yerleştirilmiş ve yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra her tabaka el penetrometresi ile kontrol edilmiştir. Tabaka yerleşimleri tamamlandıktan sonra zemin yüzeyi eşit parçalara bölünerek yüzey merkezi belirlenerek vidalı kazığın zemin yüzeyinin merkezine yerleştirilmesi sağlanmıştır. TP kazık zemine çakılarak; vidalı kazıklar ise döndürülerek monte edilmiştir. Daha sonra model yükleme deney setine deplasman ölçerler takılmış ve data logger ile bağlantısı sağlanmıştır. Deney hızı olarak 1 mm/dk seçilmiş ve deneyler bu hızda gerçekleştirilmiştir. Veriler bilgisayar üzerinden model yükleme setine ait yazılım kullanılarak işlenmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Deplasman ölçerler, yük ölçerler ve diğer ekipmanlar deneyler başlamadan önce üretici firma tarafından kalibre edilmiştir.

2.4. Sayısal Analizlerin Gerçekleştirilmesi

Vidalı kazıkların kohezyonsuz zemin içerisinde basınç kuvveti altında davranışını incelemek üzere gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları ile sayısal analizlerin sonuçları arasında uyum elde edildikten sonra parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrik analizlerde değişkenler olarak tank

boyutu, gömülme derinliği ve helezon çapı seçilmiştir. Sayısal ve parametrik analiz programı Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Sayısal ve parametrik analiz programı

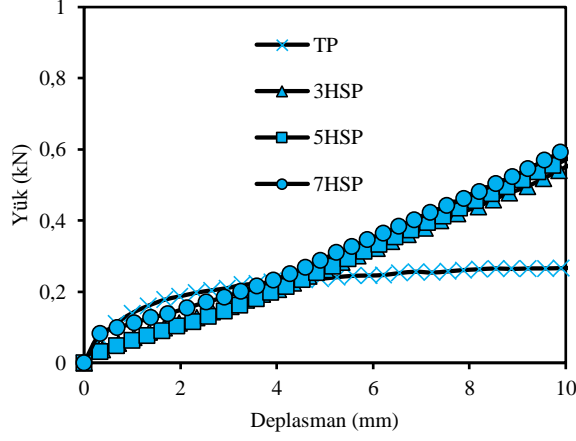
Analysis No	Güçlendirme Türü	Kuvvet Yönü
1	TP	Basınç
2	3HSP	Basınç
3	5HSP	Basınç
4	7HSP	Basınç
5	1HSP BT D=5 cm	Basınç
6	3HSP BT D=5 cm	Basınç
7	5HSP BT D=5 cm	Basınç
8	7HSP BT D=5 cm	Basınç
9	1HSP BT D=7,5 cm	Basınç
10	3HSP BT D=7,5 cm	Basınç
11	5HSP BT D=7,5 cm	Basınç
12	7HSP BT D=7,5 cm	Basınç
13	1HSP BT D=10 cm	Basınç
14	3HSP BT D=10 cm	Basınç
15	5HSP BT D=10 cm	Basınç
16	7HSP BT D=10 cm	Basınç
17	5HSP GD D=5 cm	Basınç
18	7HSP GD D=5 cm	Basınç
19	5HSP GD D=7,5 cm	Basınç
20	7HSP GD D=7,5 cm	Basınç
21	5HSP GD D=10 cm	Basınç
22	7HSP GD D=10 cm	Basınç

BT: Büyütülmüş tank, GD: Büyütülmüş gömülme derinliği, D: Helezon çapı

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deneysel Çalışmaların Sonuçları

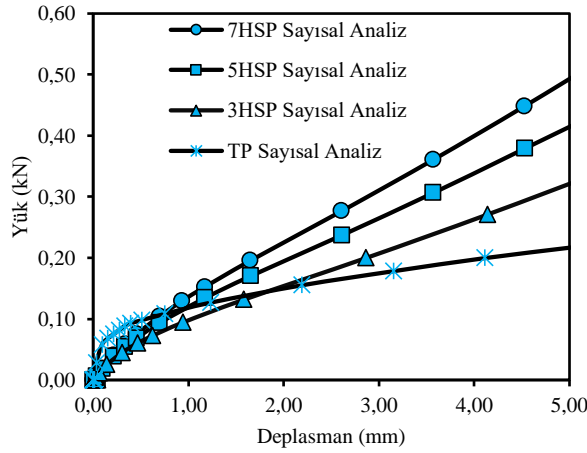
Kohezyonsuz zayıf zemin ortamına yerleştirilen vidalı kazıkların basınç kuvveti altındaki davranışını araştırmak üzere gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait yük-deplasman eğrileri Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde basınç kuvveti etkisi altında taşıma kapasiteleri yüksekte düşüğe; 7HSP, 5HSP ve 3HSP olarak sıralanmaktadır. Her vidalı kazık türü için artan deplasmana karşılık yük doğrusal bir şekilde artmaktadır. Geleneksel helezonsuz kazık (TP) ise 4 mm’lik deplasmana kadar diğer vidalı kazık türlerine yakın dayanım gösterse dahi daha sonra azalan artış rejimine geçmiştir. Bu durumun kazık ucunda oluşan uç kuvvetleri kaynaklı daha da sıkılaştıran bölgenin daha gevşek çevre zemininden daha erken deformasyonda sıyrılması sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Ancak vidalı kazıklarda en üst helezondan en alt helezona kadar uzanan bölgede oluşan ve en alt helezondan kazık ucuna kadar helezon alanı boyunca aktarılan gerilmeler nedeniyle sıkışmaya, dolayısıyla direnç göstermeye zorlanan zemin hacmi daha büyüktür. Bu hacmin uç kuvvetleri ile birleşerek helezonsuz kazığa oranla daha yüksek taşıma kapasitelerine ulaştığı öngörülmüştür. Bununla beraber artan helezon sayısı da zemin içerisinde gerilme oluşan hacimleri arttıracığı için en fazla helezon sayısına sahip olan 7HSP’nin en iyi performansı gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 7. Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçların yük-deplasman eğrileri

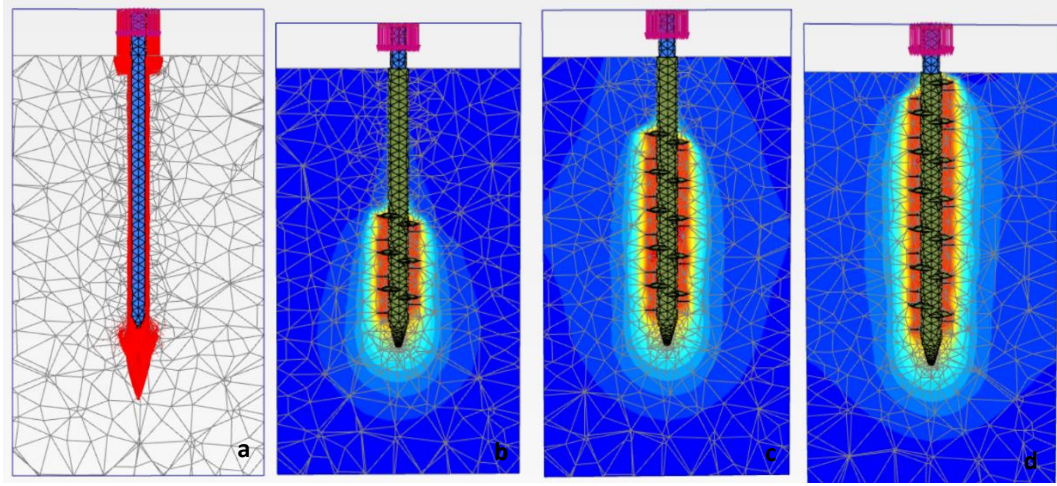
3.2. Sayısal Analiz Sonuçları

Sayısal analizlerde vidalı kazıkların davranışını incelemek üzere daha detaylı araştırma yapmak ve bu davranışı görselleştirebilmek üzere analizler gerçekleştirilmiştir. Modelleme tamamlandıktan sonra ön tanımlı deplasman tanımlanarak vidalı kazıklar basınç yüküne maruz bırakılmış ve elde edilen yük-deplasman eğrileri Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Sayısal analizler kapsamında elde edilen sonuçların yük-deplasman eğrileri

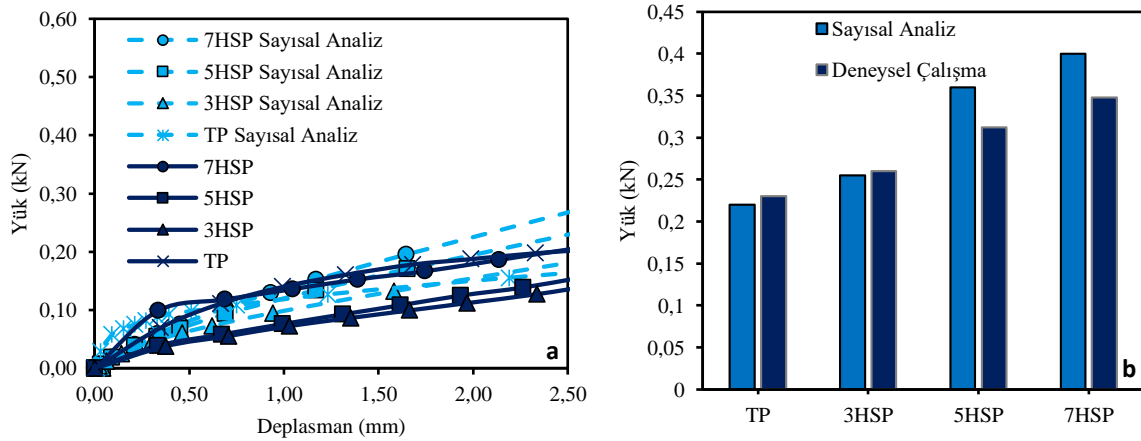
Şekil 8’de de görüleceği üzere deneysel çalışmalarda olduğu gibi artan deplasmana karşılık doğrusal yük artışı görülmektedir. Yine sayısal analizlerde de en iyi performansı 7HSP göstermiştir. Sayısal analiz sonuçlarının çıktıkları ile oluşturulan vidalı kazık davranışı görselleri Şekil 9’da verilmiştir. Görseller incelendiğinde TP için gerilmelerin kazık shaftı çevresinde ve kazık uç bölgesinde, vidalı kazıklar için ise en üst helezondan en alt helezona kadar silindirik bir kayma düzlemi boyunca devam ederek kazık uç kuvvetleri ile birleştiği görülmektedir. Gerilme alanlarının helezon sayısındaki artış ile artması sonucunda da taşıma kapasitesi bu davranışa bağlı olarak daha da artmaktadır. Daha az helezon sayısında kazık yüzeyinde meydana gelen sürtünme kuvvetlerinin büyüklüğü ise, helezonlar tarafından oluşturulan gerilme alanlarına kıyasla çok küçüktür.



Şekil 9. Vidalı kazık-zemin etkileşimi görüntüleri (a. TP, b. 3HSP, c. 5HSP, d.7HSP)

3.2. Deneysel Çalışma Sonuçları ile Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneysel çalışmalar ve sayısal analizler tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçlar modelin doğruluğunu incelemek üzere karşılaştırılmıştır (Şekil 10). Eğriler incelendiğinde deneysel çalışmalarda ve sayısal analizlerde basınç kuvveti etkisi altındaki vidalı kazıkların davranışlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Elde edilen uyum sonrasında oluşturulan bu yeni modelin parametrik çalışmalar için uygun olduğu düşünülmüştür.



Şekil 10. Deneysel çalışmaların ve sayısal analizlerin sonuçlarının karşılaştırılması (a. Yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması, b. Göçme yüklerinin karşılaştırılması)

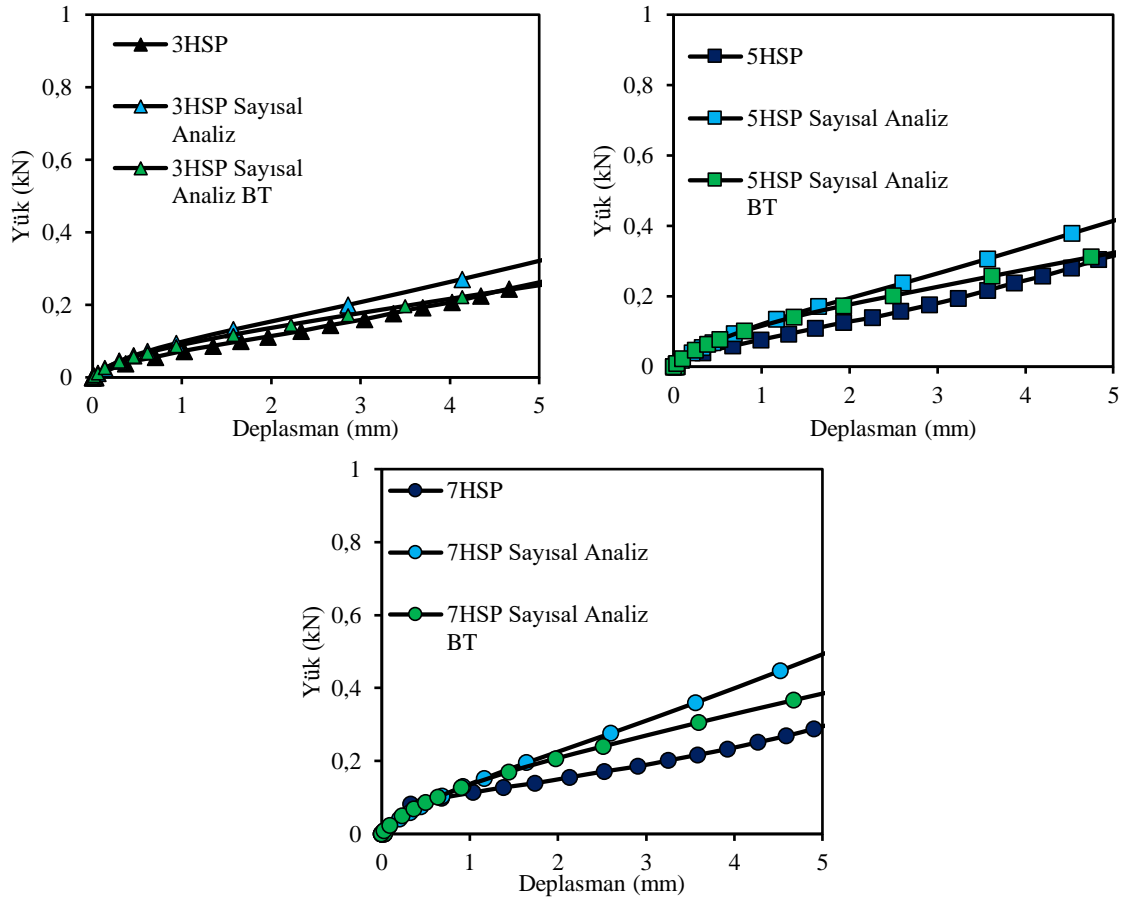
3.4. Parametrik Analizler

Sayısal analizler için oluşturulan modelin doğrulaması yapıldıktan sonra parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışmalar için ilk önce gerilmelerin model sınırları içerisinde kalıp kalmadığını anlamak üzere ölçek etkisi araştırmaları yapılmıştır. Ölçek etkisi araştırmasında modellenen zemin ortamı büyütülerek yük-deplasman eğrileri oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra vidalı kazıkların performansını değerlendirmek üzere iyileştirme yüzdeleri ve helezon verimliliği gibi parametreleri elde edebilmek için tek helezonlu vidalı kazık (1HSP)

modellenmiştir. Sonraki aşamalarda ise farklı helezon çapları ile (5 cm, 7,5 cm ve 10 cm) analizler gerçekleştirilmiştir. Vidalı kazıkların taşıma kapasitesine ve yük altındaki davranışına gömülme derinliğinin etkisini araştırmak için ise 5HSP ve 7HSP için gömülme derinliği 3HSP ile aynı seviyeye (18 cm) getirilmiş ve analizler tamamlanmıştır.

3.4.1. Ölçek etkisi araştırmaları

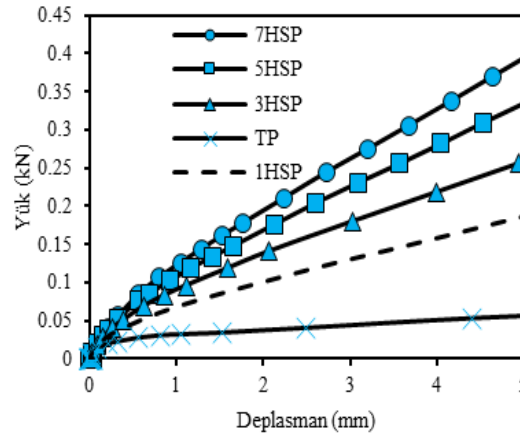
Modellenen zemin ortamı boyutları ölçek etkisi olup olmadığını araştırmak üzere arttırılmıştır (1,2 m x 1,2 m x 1,2 m x 1,5 m). Model boyutları arttırıldığında mesh için tercih edilen tane boyutunun da değiştirilmesi gerekmektedir. Çünkü “node” sayısını aynı tutmak daha geniş zemin ortamında daha büyük tane parçalarının oluşmasına sebep olarak daha rijit taneler oluşturmaktadır. Bu bağlamda büyütülmüş model için mesh tane boyutu “very fine” olarak değiştirilmiştir. Ölçek etkisi araştırması kapsamında elde edilen yük-deplasman eğrileri Şekil 11’de görülmektedir. Yük-deplasman eğrileri incelendiğinde büyütülmüş model için de yük altında vidalı kazıkların davranışının çok yakın olduğu görülmektedir. Arada oluşan farkın ise “very fine” opsiyonundan daha ince bir seçenek olmaması sebebiyle oluştuğu ve ihmal edilebilir seviyede olduğu düşünülmüş ve modellemelerde ölçek etkisi olmadığı kabul edilmiştir.



Şekil 11. 3HSP, 5HSP ve 7HSP için ölçek etkisi araştırmasının yük-deplasman eğrileri

3.4.2. Tek helezonlu vidalı kazık

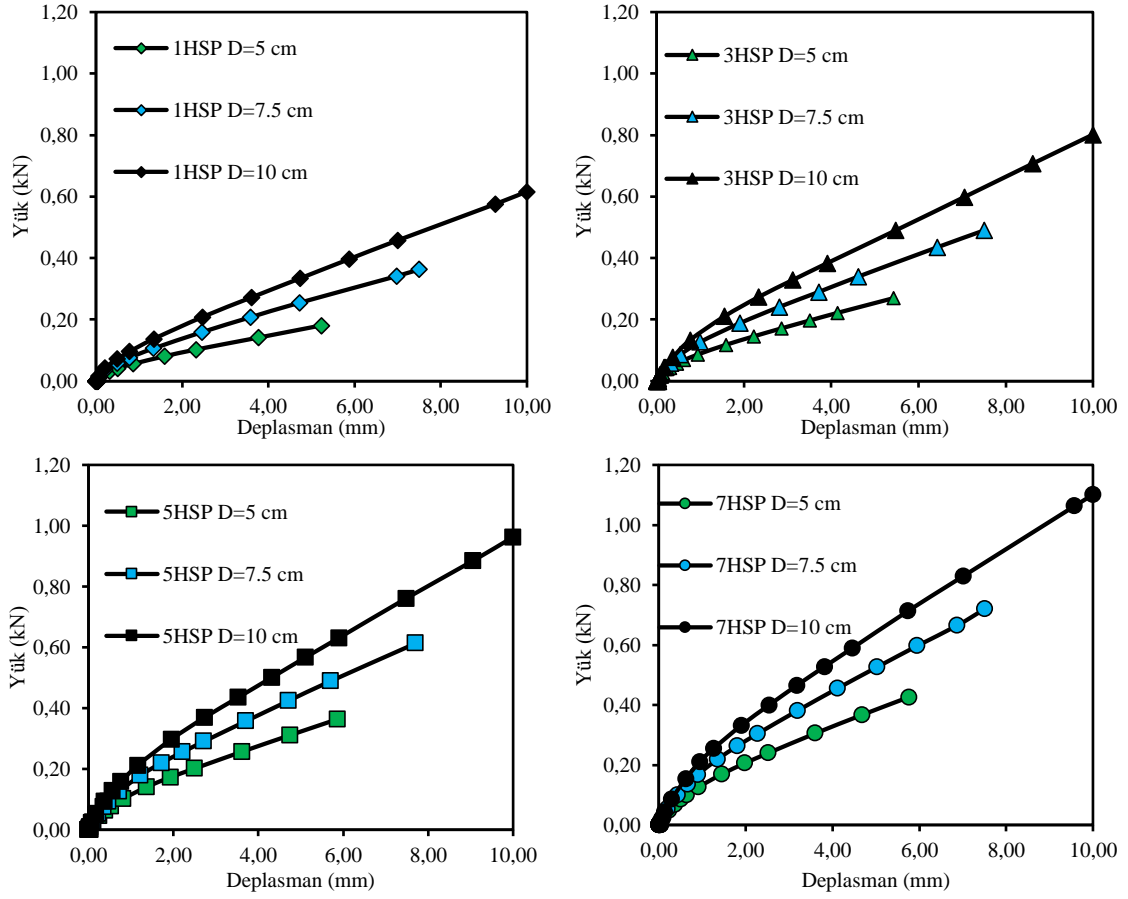
Ölçek etkisi araştırmaları tamamlandıktan sonra vidalı kazıkların performansını daha detaylı irdeleyebilmek üzere iyileşme yüzdesi ve helezon sayısı verimliliği parametrelerini hesaplayabilmek için ilk aşamada tek helezonlu vidalı kazık (1HSP) modellenmiştir. 1HSP için elde edilen yük-deplasman eğrisi ve diğer kazıklara ait eğriler Şekil 12’ de verilmiştir. Eğriler incelendiğinde 1HSP’nin davranışının diğer vidalı kazıklar ile benzer olduğu görülmektedir. Kazık şaftı boyunca sürtünme kuvvetleri, kazık ucuna doğru helezondan kazık ucuna doğru oluşan gerilme alanları nedeniyle TP kullanımına oranla daha yüksek taşıma kapasitesi sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen yük-deplasman eğrisinde 3HSP’den daha az ve TP’den daha yüksek değerler okunması da modelin doğruluğunu desteklemektedir.



Şekil 12. 1HSP kullanımı için elde edilen yük-deplasman eğrileri

3.4.3. Helezon apı etkisi

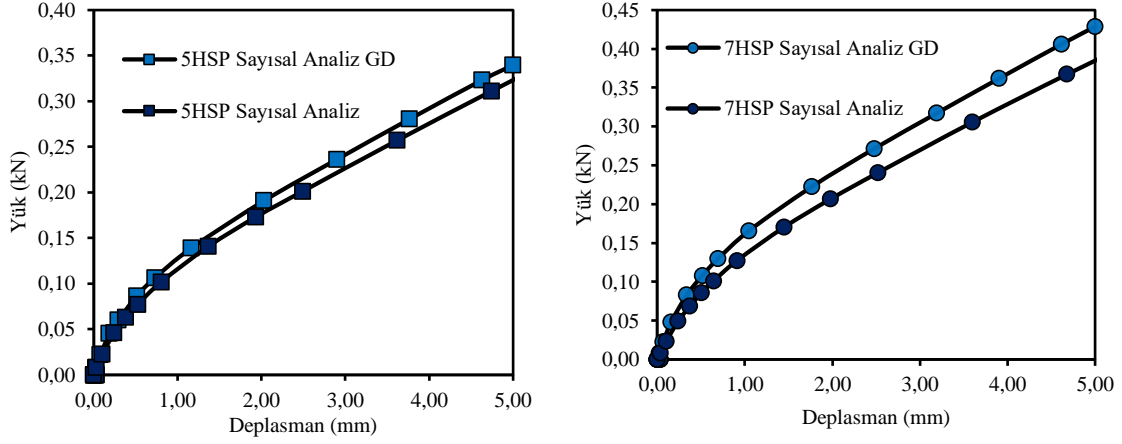
Sonraki aşamada helezon çapının taşıma kapasitesine ve yük altındaki vidalı kazık davranışına etkisini araştırmak üzere farklı helezon çaplarında (5 cm, 7,5 cm ve 10 cm) vidalı kazıklar modellenerek analizler gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları Şekil 13’te verilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde tüm vidalı kazık türleri için helezon çapı arttıķa taşıma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeninin Helezonlar arası mesafenin helezon çapına eşit/küçük olması sebebiyle daha büyük helezon kullanımında da silindirik kayma yenilmesi gerçekleşmiştir. Zemin içerisinde vidalı kazıklar tarafından oluşturulan gerilme bölgelerinin helezonlar boyunca devam etmesi ve dolayısıyla helezon çapındaki artışın gerilme oluşan bölgenin büyümesine sebep olması sebebiyle; kohezyonsuz zeminlerde vidalı kazıkların helezon çapındaki artışın taşıma kapasitesine olumlu bir katkısı olduğu görülmektedir.



Şekil 13. 1HSP, 3HSP, 5HSP ve 7HSP kullanımında farklı helezon çaplarının etkisi

3.4.4. Gömülme derinliği etkisi

Sonraki aşamada gömülme derinliğinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemek üzere 5HSP ve 7HSP'nin gömülme derinliği 3HSP ile aynı seviyeye (18 cm) çıkarılmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlere ait yük-deplasman eğrileri Şekil 14'te görülmektedir. Eğriler incelendiğinde taşıma gücünde ufak da olsa bir artış görülmektedir. Bu duruma gömülme derinliği ile beraber zemin ile etkileşime geçen shaft uzunluğunun artmasının ve shaft etrafında sürtünme kaynaklı daha fazla gerilme oluşmasının neden olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda gömülme derinliği artışı ile taşıma kapasitenin arttığını söylemek mümkündür.

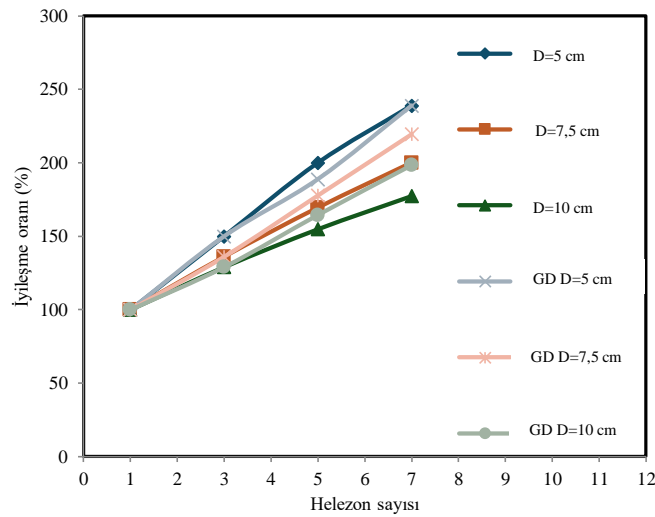


Şekil 14. Gömülme derinliği artışı analizlerinin yük-deplasman eğrileri

3.5. İyileşme Oranları ve Helezon Sayısı Verimliliği

Deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve parametrik analizler tamamlandıktan sonra vidalı kazıkların kohezyonsuz zeminde basınç kuvveti altındaki performansını daha detaylı irdeleyebilmek için iyileşme oranları ve helezon sayısı verimliliği değerleri hesaplanmıştır.

İyileşme oranı; elde edilen taşıma kapasitesinin tek helezonlu vidalı kazığın taşıma kapasitesine oranının yüzde ile gösterimini ifade etmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ile hesaplanan iyileşme oranı yüzdelere ait grafik Şekil 15’te verilmiştir. Şekil 15 incelendiğinde helezon sayısındaki artış, helezon çapındaki artış ve gömülme derinliğindeki artış ile iyileşme oranlarının arttığı görülmektedir. Bu artışlar değişken türüne farklı yüzdelerde olmakla beraber, %238 mertebelerine kadar ulaşabilmıştır. Böylelikle ekstra kazıklar eklemek yerine parametrik analizlerde kullanılan değişkenler yardımıyla kazıklardan elde edilecek performansın daha ekonomik olacak şekilde elde edilebileceği düşünülmektedir.



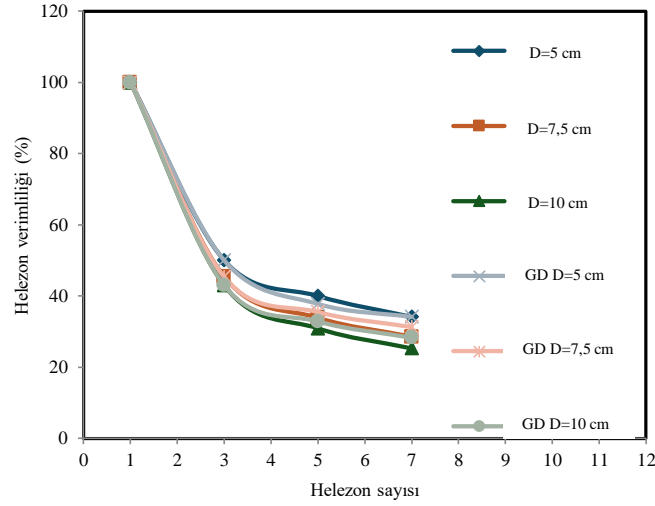
Şekil 15. İyileşme oranı eğrileri

Helezon sayısı verimliliği farklı helezon sayılarının kullanımının vidalı kazıkların performansı üzerindeki etkisini araştırmak üzere kullanılan Lutenegeger (2011) tarafından önerilen Bağıntı 1.

yardımıyla hesaplanan bir parametredir. Bu hesaplamada çok helezonlu vidalı kazığın taşıma kapasitesi helezon sayısına bölünerek tek helezonlu vidalı kazığın taşıma kapasitesine oranlanmaktadır. Böylelikle helezon sayısındaki artış ile elde edilen taşıma kapasitesi oranı yorumlanmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen helezon sayısı verimliliği eğrileri Şekil 16’da görülmektedir.

$$\eta = (Q_{MU}/N)/Q_{IU} \times 100\% \quad (1)$$

Burada; η , helezon sayısı verimliliği, Q_{MU} çok helezonlu kazığın taşıma gücünü, N , helezon sayısını, Q_{IU} tek helezonlu kazığın taşıma kapasitesini ifade etmektedir.



Şekil 16. Helezon sayısı verimliliği eğrileri

Şekil 16 incelendiğinde helezon sayısındaki artış ile elde edilen verimliliğin azaldığı görülmektedir. Ancak helezon sayısı arttıkça verimlilik kaybı daha da azalmaktadır. Verimlilikte görülen azalma olumsuz bir durum gibi görünse dahi iyileşme yüzdeleri ve taşıma kapasiteleri değerlendirildiğinde en az verimlilik kaybı ile seçilecek vidalı kazıktan optimum performans alınması mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla projeler için uygun yöntemi seçerken elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi elzemdir.

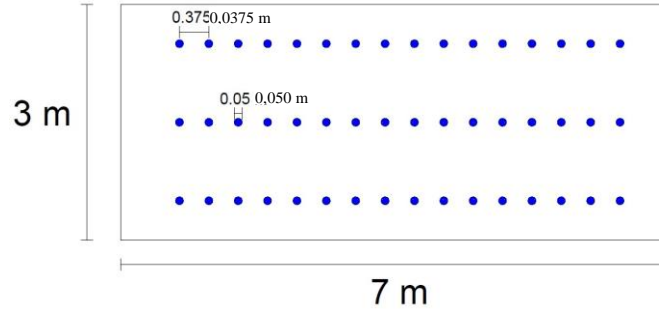
3.6. Prefabrik Konteyner Yapı İçin Örnek Hesaplama

Halihazırda ülkemizde konteyner üretimi yapan firmaların verilerine göre (Anonim, 2024a; 2024b; 2024c) deprem sonrası oluşturulan konteyner kentlerde kullanılan konteynerlerin (Şekil 17) kütlesi boş konteyner için 10,96 kN ile 15,94 kN olarak değişmekte ve dolu hali için maksimum taşıma kapasitesi konteyner ağırlığına ek olarak 0,78-1,96 kN/m² arasında değişmektedir ve bu da 3 m x 7 m ölçülerindeki konteynerler için 27,90 kN ile 50,82 kN olarak değişmektedir. Bu çalışma kapsamında 7HSP ve 10 cm helezon çapı için elde edilen taşıma kapasitesi 1,09 kN 'dur. Bu bağlamda boş konteyner kurulumu için minimum 10 maksimum 15 adet vidalı kazık gerekmektedir. Tamamen dolu olduğu durumda ise minimum 26 maksimum 47 adet vidalı kazığa ihtiyaç vardır. Bu hesaplamalarda konteynerden gelen

yükün tamamının kazıklar tarafından taşınacağı düşünülmüştür. Örnek vidalı kazık yerleşimi Şekil 18’de görülmektedir. Ancak bu çalışma kapsamında kullanılan kazıklar mikro kazıklar olup saha uygulamalarında kullanılan daha büyük ölçekli ve grup halindeki kazıklar değerlendirildiğinde (Sarıcı ve Özcan, 2024c) 0,06 m shaft çapı, 0,074 m helezon çapı ve 0,60 m kazık uzunluğuna sahip 4 adet 8 helezonlu vidalı kazığın yaklaşık 10 kN yük taşıdığı görülmektedir. Dolayısıyla boş konteyner için gereken vidalı kazık maksimum 8 adet olacaktır. Konteyner kapasitesinin tamamı kadar yük aldığı anda ise bu sayılar minimum 12 ve maksimum 21 adet olacaktır. Burada bahse konu maksimum kapasitesi prefabrik elemanların taşıyabileceği maksimum yükler olup yerleşim bölgelerinde bu yüklerle ulaşılmadığı da görülmektedir.



Şekil 17. Afet sonrası konteyner kentlerde kullanılan prefabrik konteyner görüntüsü (Anonim, 2024d)



Şekil 18. Hesaplama için kullanılan vidalı kazık yerleşimi

Şekil 18 incelendiğinde vidalı kazıkların konteyner taban alanı içerisinde örnek dağılımı görülebilmektedir. Ayrıca bu yerleşim ile kazıkların arasında kalan merkezden merkeze mesafe değeri 375 cm olup helezon çapının 7 katından fazladır. Bu yerleşim ve kazıklar arası mesafe ile kazıklar arasında grup etkileşimi olmayacağı literatürdeki çalışma sonuçlarından (Ateş ve Şadoğlu, 2023; Vignesh ve Muthukumar, 2023; Sarıcı ve Özcan, 2024c) yola çıkarak öngörülmektedir. Bu bağlamda hem bu çalışmadaki tekli kazık taşıma kapasiteleri değerlendirildiğinde hem de literatürde grup halindeki kazıklar üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile deprem sonrası acil eylem planları içerisinde yer alan geçici yerleşim merkezlerinin oluşturulmasında, vidalı kazık sistemlerinin

güvenle kullanılabilmesi ve ekonomik bir çözüm olacağı düşünülmektedir. Ayrıca temin edilen vidalı kazıkların yeniden kullanılabilmesi, bakım maliyetlerini çok düşük olması, monte edildiği ekosisteme zararının çok küçük olması gibi avantajları ile de kullanım ömrü boyunca önemli kazançlar sağlayacaktır.

3. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında kohezyonsuz zayıf zemine monte edilen vidalı kazıkların basınç kuvveti altındaki davranışını incelemek üzere deneysel çalışmalar, sayısal analizler ve parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile helezon verimliliği ve iyileşme yüzdesi gibi parametreler hesaplanarak vidalı kazık davranışı daha detaylı irdelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Kohezyonsuz zeminde vidalı kazık kullanımı zeminin taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırmaktadır. Helezon sayısı, helezon çapı ve gömülme derinliğindeki artışlar taşıma kapasitesine olumlu etkiler sağlamaktadır. Öyle ki iyileşme oranları değerlendirildiğinde, bu değişkenler ile taşıma kapasitesinde %238 mertebelerine kadar artışlar gözlemlenmiştir. Helezon sayısı verimliliği ve iyileşme oranı birlikte değerlendirilerek, yerleşim bölgelerinde vidalı kazık sayısı ve/veya vidalı kazık değişkenleri değerlendirilerek optimum yerleşim belirlenebileceği düşünülmektedir.
- Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, afet sonrası yerleşim bölgelerinde kullanılan prefabrik yapıların vidalı kazık sistemleri ile güvenle taşınabileceği düşünülmektedir. Ayrıca vidalı kazıklarında uygulamada sahip olduğu avantajlar sayesinde acil durum eylem planlarında kendine daha çok yer bulacağı öngörülmektedir.
- Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ilgili zemin ve kazıkları kapsıyor olup, başka projelerde ve tasarımda tek başına kullanılamaz. Her inşaat mühendisliği projesi öncesinde uygun temel yöntemini belirlerken ilgili şartname ve yönetmeliklerin takip edilmesi ve uygulanması şarttır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Talha Sarıcı: Araştırma; Metodoloji; Proje yönetimi; Kaynaklar; Yazılım; Gözden geçirme; Doğrulama; Yazım—orijinal taslak; Yazım—inceleme & düzenleme. Mustafa Özcan: Biçimsel analiz, Modelleme, Veri Toplama, Yazım-inceleme ve düzenleme. Tüm yazarlar makalenin bu versiyonunu yayınlamayı kabul etmiştir.

Kaynakça

- Altaf S., Sharma A., Singh KA. Sustainable utilization of waste foundry sand in soil stabilization: a review. *Bull Eng Geol Environ* 2024; 83: 143. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03638-5>.
- Anonim. Konteyner ölçüleri. 2024a. <https://www.konteyner.com/konteyner-teknik-ozellikleri/> (Erişim tarihi: 23/06/2024)
- Anonim. Konteyner ölçüleri. 2024b. <https://www.prefabrikyapi.com/konteyner/> (Erişim tarihi: 23/06/2024)
- Anonim. Konteyner teknik özellikleri. 2024c. <https://www.novaprefabrik.com/konteyner-teknik-ozellikleri/> (Erişim tarihi: 23/06/2024)
- Anonim. 3m x 7m Konteyner. 2024d. <https://www.konteynervar.com/urun/uygun-fiyata-tek-odali-konteyner/> (Erişim tarihi: 23/06/2024)
- ASTM D422 - 63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Astm Int', 2007.
- ASTM D854-02 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Astm Int'L, 2022.
- ASTM D2487 – 11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Astm Int'L, 2011.
- ASTM D3080 / D3080M – 11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Astm Int'L, 2011.
- ASTM D4254-16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. Astm Int'L, 2016.
- Ateş B., Şadoğlu E. Experimental investigation of optimum piles spacing for piled raft foundation in sandy soils. *Technical Journal* 2021; 32(1): 10477-10494.
- Ateş, B., Şadoğlu, E. Experimental investigation of pile addition and length on bearing capacity and settlement of rafts on loose sandy soil. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*. 2021; 2: 399-407.
- Ateş B., Şadoğlu E. Experimental and numerical investigation of load sharing ratio for piled raft foundation in granular soils. *KSCE J. Civ. Eng.* 2022; 26: 1662–1673.
- Ateş B., Şadoğlu E. Experimental and numerical investigation for vertical stress increments of model piled raft foundation in sandy soil. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.* 2022; 46: 309–326.
- Ateş B., Şadoğlu E. Experimental investigation for group efficiency of driven piles embedded in cohesionless soil. *KSCE J. Civ. Eng.* 2023; 27: 5123-5134. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1580-0>.
- Demir A., Ok B. Uplift response of multi-plate helical anchors in cohesive soil. *Geomechanics and Engineering* 2015; 8(4). <https://doi.org/10.12989/gae.2015.8.4.615>
- Demir A., Ok B. Helisel ankraj plakalarının tabakalı zeminlerdeki çekme kapasitelerinin incelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2015; 3(2).

- Demir A., Ok B., Sarici T. Evaluation of rockfill stabilized-geosynthetics reinforced road base with repeated plate loading tests. *Applied Sciences* 2024; 14(7): 3042. <https://doi.org/10.3390/app14073042>.
- Demir A., Sarici T. Bearing capacity of footing supported by geogrid encased stone columns on soft soil. *Geomechanics and Engineering* 2017; 12(3): 417-439. <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.3.417>
- Feng SJ., Fu WD., Chen HX., Li HX., Xie YL., Lv SF., Li J. Field tests of micro screw anchor piles under different loading conditions at three soil sites. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2021; 80: 127–144. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01956-y>.
- Lutenegger AJ. Behavior of multi-helix screw anchors in sand. In *Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011, Toronto, Canada.
- Mohajerani A., Bosnjak D., Bromwich D. Analysis and design methods of screw piles: a review. *Soils and Foundations* 2016; 56(1): 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.01.009>.
- Özcan M. Vidalı kazıkların zayıf zeminlerde taşıma kapasitesinin deneysel ve sayısal çalışmalarla incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 2024.
- Perko HA. *Helical piles: A Practical Guide to Design and Installation*, New York: John Wiley & Sons; 2009.
- Sarıcı T., Özcan M. Using geopolymer coated and uncoated geotextile as a hybrid method to improve uplift capacity of screw piles in cohesionless soil. *Alexandria Engineering Journal* 2024; 105, 666-681. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.08.042>
- Sarıcı T., Özcan M. Investigation of screw pile behavior in cohesive soil under uplift and compressive forces by experimental studies and numerical analyses. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2024; 1-22. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09553-x>
- Sarıcı T., Özcan M. Vidalı kazıkların çekme ve basınç kuvveti altında davranışının incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2024; 13(3). <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1380651>.
- Vignesh V., Muthukumar M. Experimental and numerical study of group effect on the behavior of helical piles in soft clays under uplift and lateral loading. *Ocean Engineering* 2023; 268. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113500>.