

Helisel Kazıklarda Helis Çapının Basınç Yüküne Etkisinin Laboratuvar Deneyleri ile Araştırılması

Yakup TÜREDİ¹ ORCID 0000-0001-9197-5214

Buse EMİRLER^{*2} ORCID 0000-0002-0234-7177

Murat ÖRNEK¹ ORCID 0000-0002-0809-2531

Abdulazim YILDIZ² ORCID 0000-0002-6755-1902

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, Hatay

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi:05.09.2023

Kabul tarihi:25.12.2023

Atıf şekli/How to cite: TÜREDİ, Y., EMİRLER, B., ÖRNEK, M., YILDIZ, A., (2023). Helisel Kazıklarda Helis Çapının Basınç Yüküne Etkisinin Laboratuvar Deneyleri ile Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 1013-1022.

Öz

Geleneksel kazıklara karşı alternatif bir temel olarak kullanımları giderek artan helisel kazıklar, zemine tork kuvveti ile döndürülerek yerleştirilen çelik temel sistemleridir. Bu çalışmada, gevşek ve sıkı kumlu zemine yerleştirilen dört farklı çaptaki helisel kazığın basınç yükü altındaki davranışı laboratuvar model deneyleri ile araştırılmıştır. Ayrıca her iki zemin sıklığında düz (helissiz) kazık için deneyler yapılmıştır. Nihai yük değerleri, literatürdeki analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Helis çapı artışının kazık kapasitesini önemli oranda artırdığı görülmüştür. Özellikle sıkı zeminde, düz kazık çapının (şaft çapı) 5,5 katı büyüklüğünde helis plakası mevcudiyetinin, nihai yük kapasitesini yaklaşık 17 kata kadar artırdığı belirlenmiştir. Sıkı zemine yerleştirilmiş helisel kazığın kapasitesinde gevşek zemine kıyasla 10 kata varan artış elde edilmiştir. Analitik yaklaşımın, deneyden elde edilen nihai yük değerleriyle uyum içinde olduğu görülmüş ve ayrıntı taşıma yönteminin ise her iki zemin sıklığında başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Helisel kazık, Basınç yükü, Kumlu zemin, Nihai yük

Investigation of the Effect of Helix Diameter on Compression Load in Helical Piles by Laboratory Tests

Abstract

Helical piles, which are increasingly being used as an alternative foundation to traditional piles, are steel foundation systems that are placed on the ground by rotated with torque force. In this study, the behavior of model helical piles with four different diameters placed in loose and dense sandy soils under compression load has been investigated by laboratory model tests. In addition, tests have been carried out for straight

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Buse EMİRLER, bemirler@cu.edu.tr

piles (without helix) at both soil densities. The ultimate load values have been compared with analytical approaches in the literature. It has been seen that the increase in helix diameter significantly increased the pile capacity. It has been determined that the presence of a helix plate with a size of 5.5 times the straight pile diameter (shaft diameter) increases the ultimate load capacity up to approximately 17 times, especially in dense soil. An increase of up to 10 times has been achieved in the capacity of helical piles placed in dense soil compared to loose soil. It has been seen that the analytical approach was compatible with the ultimate load values obtained from the test, and it has been concluded that the individual bearing method was successful in both soil densities.

Keywords: Helical pile, Compression load, Sandy soil, Ultimate load

1. GİRİŞ

Helisel kazıklar, kurulum ve galvaniz teknolojisinin gelişmesiyle birlikte popüleritesi giderek artan bir temel sistemi olarak geoteknik mühendisliğinin birçok uygulama alanında tercih edilmektedir. Çelikten üretilen helisel kazıklar, üzerinde çoğunlukla bir veya daha fazla helis plakası bulunduran konik uç kısım ve bağlantı aparatları ile bağlanan uzatma bölümlerinden oluşmaktadır. Birçok zemin çeşidi ve inşaat alanında, hemen hemen tüm hava koşullarında, yer altı suyunun bulunduğu ortamlarda, sınırlı ve dar alanlarda, geçici yapıların desteklenmesinde, eğimli yüzeylerde vb. ortamlarda kurulumları yapılabilir. Ayrıca kurulumlarının gürültüsüz yapılabilmesi, herhangi bir bakım ve kalıp maliyetlerinin olmaması, birçok farklı temel sistemi ile çalışabilmesi, basınç, çekme ve yanal yüklerle karşı koyabilmesi gibi birçok avantajları mevcuttur. Enerji yapıları (kompresör temelleri, rüzgâr santralleri, güneş tarlaları, trafo merkezi temelleri, gergi kabloları vb.), altyapı (demiryolu tabelaları, zemin çivilemesi, istinat yapıları, yaya köprüleri, güvenlik bariyerleri, aydınlatma direkleri vb.), deniz yapıları, konutlar (yeni yapı temelleri, tarihi yapıların temelleri) ve sanayi yapıları gibi kullanım alanları mevcuttur [1-6].

Helisel kazıklar, çekme ve yanal gibi farklı yüklerin etkisi altındaki yapılara destek sağlarken birçok alanda da basınç yüklerine karşı yapıları desteklemektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, basınç yüküne maruz helisel kazıklarla ilgili deneysel, analitik ve sayısal analiz çalışmaları mevcuttur. George ve arkadaşları [7] tarafından kohezyonsuz zemine yerleştirilen helisel kazıkların eksenel çekme ve basınç

kapasitelerini etkileyen faktörleri incelemek için laboratuvar model deneyleri yapılmıştır. Şaft çapı, helis çapı ve zemin sıklığı gibi parametrelerin kazık kapasitesi üzerinde önemli bir etki yaptığı belirlenmiştir. Livneh ve El Naggar [8] tarafından yapılan çalışmada arazi ortamında çekme ve basınç yükleri altında on dokuz adet kazık yükleme deneyi yapılarak helisel kazıkların eksenel yük taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Mittal ve Mukherjee [9] yaptıkları çalışmada kum zemine yerleştirilen basınç yükü etkisindeki helisel kazıkların davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Gömülme oranı ve yerleşim düzenindeki değişimlerin araştırıldığı çalışmada, helis sayısı ve gömülme oranının artmasıyla kapasitenin arttığı belirlenmiştir. George ve arkadaşları [10] tarafından kum zemine gömülü helisel kazıkların davranışı sayısal analizlerle parametrik olarak araştırılmıştır. Zemin sıklığı ve helis varlığının kazık kapasitesini önemli oranda etkilediği, şaft çapının ise helis çapına kıyasla kapasite üzerinde önemli bir rol oynamadığı tespit edilmiştir.

Basınç yükü altındaki helisel kazıklarda eksenel taşıma gücünü belirlemeye yönelik “silindirik kayma” ve “ayrık taşıma” olmak üzere iki analitik yaklaşım mevcuttur. Kazıklardaki helis plakalarının birbirine olan uzaklıklarına ve bağımsız veya grup halinde çalışmalarına bağlı olarak bu ayrım ortaya çıkmaktadır (Şekil 1). Silindirik kayma ve ayrık taşıma yöntemleri arasındaki belirleyici parametre helis aralığı olmakla birlikte birden fazla helis plakası bulunan helisel kazıklarda silindirik yenilme modelinin kullanılması önerilir [11]. Şekil 1a’da verilen silindirik kayma yüzeyinde oluşan kayma dayanımı ve üst helisin üzerindeki şaft dayanımı toplamı, taşıma gücünü vermektedir.

Mitsch ve Clemence [12] tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen nihai basınç kapasiteleri aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Eşitlik 1).

$$Q_c = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \phi + \gamma' H A_h N_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (1)$$

Burada;

Q_c = nihai basınç kapasitesi, D_a = ortalama helis çapı, γ' = efektif birim hacim ağırlık, H_b = en alttaki helisin derinliği, H_t = en üstteki helisin derinliği, K_s = yanal zemin basıncı katsayısı, ϕ = içsel sürtünme açısı, H = gömülü kazık derinliği, A_h = en alttaki helisin net yüzey alanı, N_q = taşıma kapasitesi faktörü, P_s = şaft çevre uzunluğu, H_{eff} = efektif şaft boyu olarak ifade edilmiştir.

Gömülme oranı (H/D) 5'ten az (yüzeysel durum) ise Nasr [13] şaft sürtünmesinin ihmal edilebileceğini ortaya koymuştur. Böylece eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır (Eşitlik 2).

$$Q_c = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \phi + \gamma' H A_h N_q \quad (2)$$

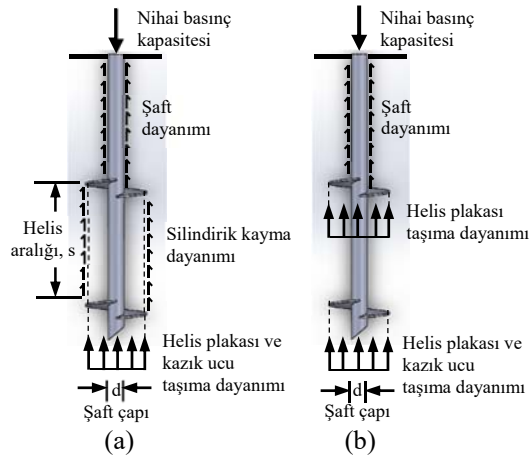
Şekil 1b'de gösterilen ayrıık taşıma yöntemi, her bir helis plakasının bağımsız davranması durumunu dikkate alır. Toplam nihai kapasite, şaft dayanımı ile helis kapasitelerinin toplamından oluşmaktadır [8,14,15].

Kohezyonsuz zeminlerde helisel kazıkların basınç kapasitesi, ayrıık taşıma yöntemi ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir (Eşitlik 3).

$$Q_c = \gamma' H_i A_i N_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (3)$$

Burada;

Q_c = nihai basınç kapasitesi, γ' = efektif birim hacim ağırlık, H_i = helis derinliği, A_i = helis net yüzey alanı, N_q = taşıma kapasitesi faktörü, P_s = şaft çevre uzunluğu, H_{eff} = efektif şaft boyu, K_s = yanal zemin basıncı katsayısı, ϕ = içsel sürtünme açısı olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1. Helisel kazık için önerilen analitik yaklaşımlar (a) Silindirik kayma (b) Ayrıık taşıma [16]

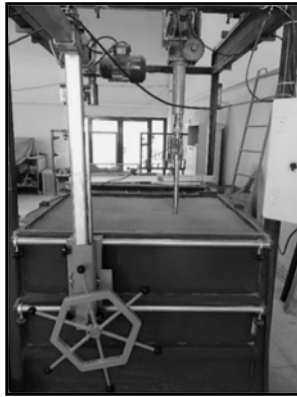
George ve arkadaşları [7] tarafından yapılan çalışmada bir kazığın nihai kapasitesinin genel olarak zemin tipine, kazık boyutuna ve kazık kurulum yöntemine bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu amaçla taşıma kapasitesi faktörlerinin (N_q ve N_γ) $0,7R_q$ ve $0,55R_\gamma$ azaltma faktörleri ile (%30 ve %45 azalma olduğu varsayımı) çarpılması sayesinde kurulum yönteminin etkisi formülasyona yansıtılmıştır. Elsherbiny ve El Naggat [17] tarafından yapılan çalışmada da benzer bir taşıma kapasitesi azaltma faktörü (R) kullanılarak kum zemindeki helisel kazıklar için ayrıık taşıma yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada ayrıık taşıma yöntemi için N_q değerleri $0,7R_q$ azaltma faktörü ile çarpılarak hesaplamalar yapılmıştır. Azaltma faktörü eklenmiş haliyle eşitlik, aşağıdaki gibi olmuştur (Eşitlik 4).

$$Q_c = \gamma' H_i A_i N_q R_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi \quad (4)$$

Bu çalışmada, sıkı ve gevşek kumlu zemine yerleştirilen düz (helissiz) ve dört farklı çaptaki helisel kazıkların basınç yüklemesi altındaki davranışları incelenmiştir. Şaft çapı $d=22$ mm olan düz ve helis çapı $D=60-80-100-120$ mm olan helisel kazıklar kullanarak on adet model deney yapılmıştır. Deney sonuçları literatürde sunulan iki farklı analitik yaklaşım (silindirik ve ayrıık) ile değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Deneyisel çalışmalar, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneyler, 1500 mm×1200 mm×1000 mm (uzunluk×genişlik×yükseklik) boyutlarında olan dikdörtgen kesitli kasa içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Deney kasası

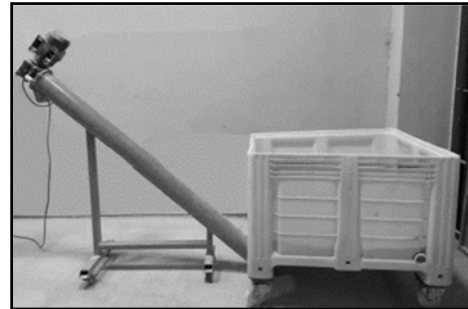
Çalışmada kullanılan kum zemin, taş ocağından alınarak ve laboratuvarında özel elek sistemi ile 0,18 mm-2,00 mm arasında elenerek elde edilmiştir. Zemine ait elek analizi ve mukavemet parametre sonuçları Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Deney kumunun mühendislik özellikleri

Parametre	Değer
D_{10} (mm)	0,26
D_{30} (mm)	0,44
D_{60} (mm)	0,78
Üniformluk katsayısı, C_u	2,97
Süreklilik katsayısı, C_r	0,96
Özgül ağırlık, G_s	2,72
Maksimum kuru birim hacim ağırlık, γ_{kmaks} (sıkı) (gr/cm ³)	1,68
Minimum kuru birim hacim ağırlık, γ_{kmin} (gevşek) (gr/cm ³)	1,55
İçsel sürtünme açısı, ϕ (sıkı) (°)	41-44
İçsel sürtünme açısı, ϕ (gevşek) (°)	30-32
Zemin sınıfı (USCS)	SP

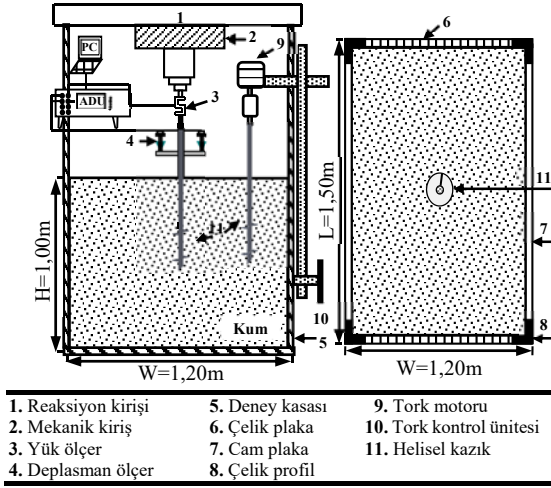
Deneyler sıkı ve gevşek zemin sıklıklarında gerçekleştirilmiştir. Zemin içerisine yerleştirilen

helisel kazıklar çelik malzemeden üretilmiş, şaft ve helis plakası olmak üzere iki parçadan meydana gelmiştir. $d=22$ mm sabit şaft çapında ve $D=60-80-100-120$ mm farklı helis çaplarında kazıklar kullanılmıştır. Deneylerde, yük ve deplasman verileri sırasıyla 2 ton kapasiteli S-tipi yük ölçer ile 10 mm ve 200 mm'ye kadar deplasman ölçebilen iki farklı deplasman ölçer kullanılarak elde edilmiştir. Kum zemin, özel aktarma düzeneği vasıtasıyla deney kasasına aktarılmıştır. Zemin aktarma düzeneği, deneyel çalışmalar sırasında deney kasasına yakın yerdeki haznenin zemin malzemesinin alınarak deney kasasına homojen biçimde aktarılması ve iş gücü açısından kolaylık sağlanması için tasarlanmıştır. Düzeneğin üst kısmında 50 d/dk. hızda dönme yapabilen elektrik motoru yer almaktadır. Motorun devamında 25 cm çapında 45° eğimli, zemini aktarmaya yarayan helizonlu çelik boru mevcuttur. Borunun alt kısmında ise zemini helizonlu sisteme iletmesi için 25° eğimli bir hazne bulunmaktadır (Şekil 3).

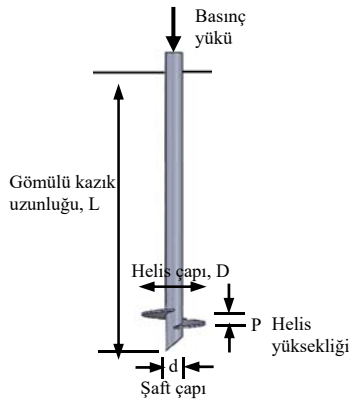


Şekil 3. Zemin aktarma düzeneği

Sıkı zemin özel olarak imal edilen kompaktör kullanılarak, gevşek zemin ise yağmurlama tekniğiyle göz açıklığı 5 mm×5 mm boyutlarında elek kullanılarak hazırlanmıştır. Deney kasasına yerleştirilen zeminin düzgünlüğü su terazisi ile kontrol edildikten sonra kazıklar helisel kazık tork motoru montaj düzeneği yardımıyla döndürülerek zemine yerleştirilmiştir. Helisel kazıkların zemine kurulumundan sonra yük hücresi helisel kazık üzerindeki uç kısma girecek şekilde, deplasman ölçerler ise yükün uygulandığı eksenin her iki tarafına yerleştirilerek yük-deplasman ilişkileri incelenmiştir. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 4'te, kazık geometrisi ve deney planına ait bilgiler ise Şekil 5 ve Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 5. Helisel kazık kesiti

Çizelge 2. Laboratuvar model deneyleri

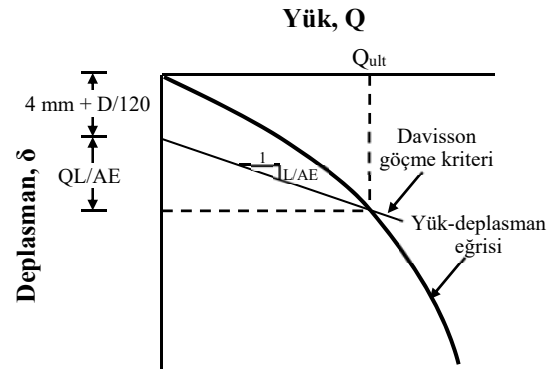
Zemin sıklığı	Deney kodu	Helis çapı, D (mm)
Sıkı	LBSD-1	-
	LBSD-2	60
	LBSD-3	80
	LBSD-4	100
	LBSD-5	120
Gevşek	LBGD-1	-
	LBGD-2	60
	LBGD-3	80
	LBGD-4	100
	LBGD-5	120

LBSD : Laboratuvar-Basınç-Sıkı-Deney
LBGD : Laboratuvar-Basınç-Gevşek-Deney

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kazıkların aksel basınç kapasitelerini belirlemek için kazık yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrilerinden yararlanılan; Davisson göçme kriteri [18], Brinch Hansen yöntemi [19], L1-L2 yöntemi, FHWA (%5D) yöntemi [20] ve ISSMFE (%10D) [21] yöntemi gibi kapasite tespit yöntemleri bulunmaktadır.

Davisson göçme kriterinde, nihai yük kapasitesi doğrudan toplam yer değiştirmeye, diğer bir ifadeyle kazığın elastik sapmalarına ve ötelenmenin toplamına bağlıdır (Şekil 6). Nihai yük kapasitesi Eşitlik 5 kullanılarak belirlenmektedir.



Şekil 6. Davisson göçme kriteri [18]

$$Q_{ult} = QL/AE + (4 + D/120) \text{ (mm)} \quad (5)$$

Burada;

Q_{ult} = nihai yük, Q = uygulanan yük, L = kazık boyu, A = kazık kesit alanı, E = elastisite modülü, D = kazık çapıdır.

FHWA (%5D) yönteminde, kazık uç çapının %5'i kadar deplasmana karşılık gelen yük değeri, nihai aksel basınç kapasitesi olarak kabul edilmektedir. Helisel kazıklarda helis çapına, çakma kazıklarda ise şaft çapına eşit olarak alınmaktadır [20].

Livneh ve El Naggari [8] tarafından küçük çaplı helise sahip ince helisel kazıklara yönelik olarak %8D yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde nihai yük değeri, kazığın elastik sapması ile en büyük helis çapının %8'inin oluşturduğu kazık başı hareketine karşılık gelen yük değerinin toplamı olarak

tanımlanmıştır. Göçme anındaki deplasman değeri (S) Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır.

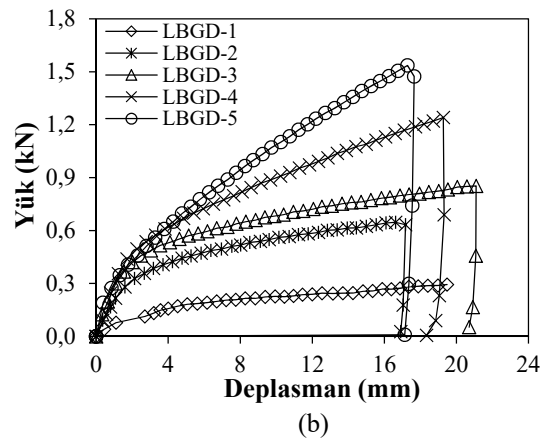
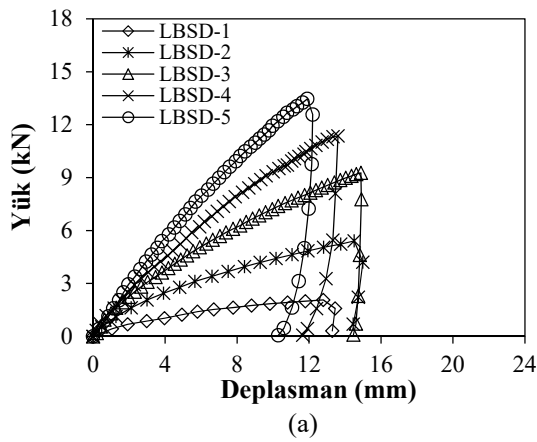
$$S = \frac{PL}{AE} + 0,08D \quad (6)$$

Burada;

P= göçme anında uygulanan yük, L= kazık uzunluğu, A= kazık kesit alanı, E= elastisite modülü, D= en büyük helis çapıdır.

ISSMFE (%10D) yönteminde, kazık çapının %10'u kadar deplasman değerine karşılık gelen yük değeri, nihai kazık kapasitesi olarak ifade edilmektedir [21].

Bu çalışmada; Davisson göçme kriteri [18] ile FHWA (%5D) [20], %8D [8] ve ISSMFE (%10D) [21] yöntemleri kullanılmıştır.



Şekil 7. Helis çapının etkisi (a) Sıkı zemin (b) Gevşek zemin

Sıkı ve gevşek zemine gömülü helisel kazıkların, eksenel basınç altındaki davranışları laboratuvar model deneyler ile araştırılmıştır. Deneylerde, helis çapı (D) ve zemin sıklığı (D_r) parametrelerinin helisel kazıkların basınç kapasitesi üzerine etkileri incelenmiştir.

Eksenel basınç deneyleri sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrileri Şekil 7'de grafik olarak verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, her iki zemin sıklığı için helis çapının artmasına bağlı olarak yük değerlerinde büyük ölçüde artışlar meydana geldiği görülmüştür. Kazık kapasitesinin önemli oranda helis plakası ve gömülü olduğu zemin bölgesinden gelmesi, ayrıca çapın artması ile helisin etkilediği zemin bölgesinin büyümesi kapasitedeki artışın sebebi olarak düşünülmüştür.

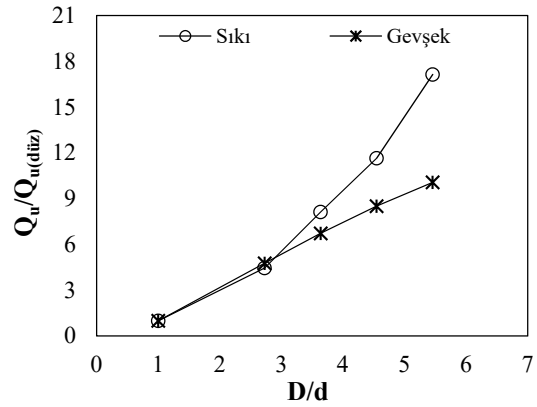
Yük-deplasman eğrilerinden Davisson göçme kriteri ile %5D, %8D ve %10D yöntemleri

kullanılarak elde edilen nihai basınç yükü değerleri ile analitik yaklaşım (silindirik ve ayrıık) yük değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Sıkı ve gevşek zeminde %5D yöntemine göre tespit edilen nihai yük değerlerinin, düz kazık nihai yük değerlerine göre oranları belirlenmiş ve helis çapının etkisi Şekil 8'de grafik olarak sunulmuştur. Şekil 8 incelendiğinde, $D/d=1$ (helis çapı/şaft çapı) düz kazık durumunu ifade etmektedir. D/d oranının artmasıyla sıkı zeminde nihai yük değerlerinin sırasıyla yaklaşık olarak 4,5-8,1-11,7 ve 17,1 kat arttığı görülmüştür. Gevşek zemin durumunda ise artış miktarları 4,8-6,7-8,5 ve 10,8 kat olarak tespit edilmiştir. Nihai yük artış oranlarına bakıldığında her iki zemin sıklığında da çapın artış oranından daha fazla bir artışın meydana geldiği gözlenmiştir. Sıkı zeminde D/d oranının 2,73'ten 5,45'e yaklaşık 2 kat arttığı durumda nihai yük değerinde yaklaşık 4 kata varan bir artış olduğu görülmüştür. Ayrıca helis çapının artması, sıkı zeminde gevşek zemine

kıyasla nihai yükü daha fazla artırmıştır. Çizelge 3'te %5D yöntemi sonuçları dikkate alındığında sıkı zeminde gevşek zemine kıyasla yaklaşık 10 kata varan artış elde edilmiştir. Bu durum, sıkı zemindeki yüzey sürtünmesinin gevşek zemine oranla daha fazla olmasıyla açıklanabilir. Kazığın gömülü olduğu derinlik boyunca kasa içerisine yerleştirilen zeminin, sıklığının artmasıyla birlikte birim hacim ağırlığı arttığından ve kazık yüzeyi boyunca direnç gösterilen zemin kütlesi daha fazla olduğundan sıkı zeminde kapasite gevşek zemine kıyasla daha fazla meydana gelmiştir.

Çizelge 3'te sıkı ve gevşek zemin için verilen deneysel ile analitik nihai yük değerleri, grafik olarak Şekil 9'da sunulmuştur. Şekil 9 incelendiğinde analitik yaklaşımların, göçme yöntemlerinden elde edilen nihai yük değerlerine yakın değerler verdiği görülmüştür. Sıkı zeminde silindirik kayma yöntemi %8D yöntemine, ayırık taşıma yöntemi ise Davisson göçme kriteri ve %5D yöntemine daha yakın çıkmıştır. Gevşek zeminde silindirik kayma yöntemi deney sonuçlarına uzak, ayırık taşıma yöntemi ise %10D yöntemine yakın sonuçlar vermiştir. Ayırık taşıma yönteminin her iki

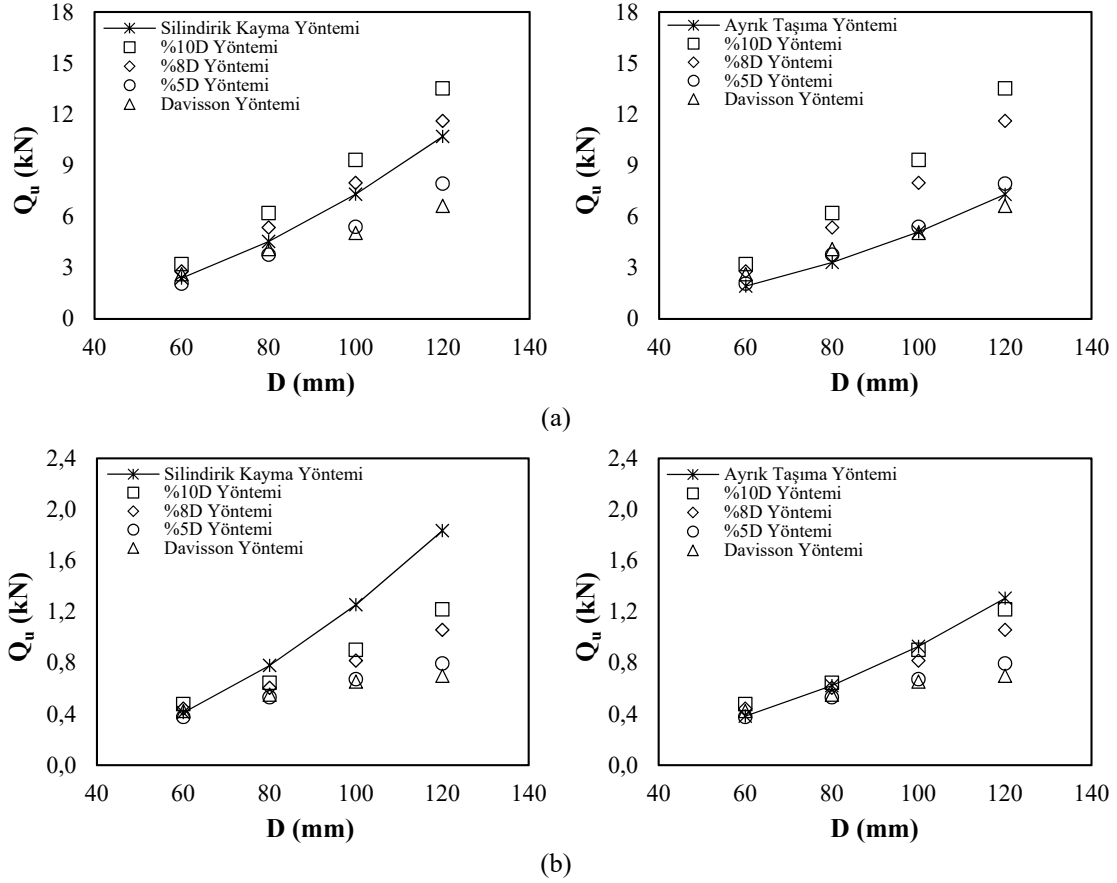
zemin sıklığındaki başarısı; tekli helisel kazığın silindirikten ziyade ayırık göçme mekanizması göstermeye yakın olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca literatürde [7,17] yöntem formülüne yapılan ilaveyle sıkı zemin için R_q azaltma faktörü kullanılarak kazıkların kurulum etkisinin analitik yaklaşımda da dikkate alınması başarının sebeplerinden biri olarak gösterilebilir.



Şekil 8. Helisel kazık nihai yüklerinin düz kazık nihai yüklerine göre artış oranları

Çizelge 3. Göçme yöntemlerine göre nihai yük değerleri

Zemin sıklığı	Deney kodu	Nihai yük (Deneysel) (kN)				Nihai yük (Analitik) (kN)	
		Davisson göçme kriteri	%5D yöntemi	%8D yöntemi	%10D yöntemi	Silindirik kayma yöntemi	Ayrık taşıma yöntemi
Sıkı	LBSD-1	1,050	0,463	0,646	0,740	-	-
	LBSD-2	2,618	2,066	2,792	3,217	2,397	1,926
	LBSD-3	4,092	3,765	5,362	6,206	4,550	3,321
	LBSD-4	5,047	5,397	7,986	9,325	7,318	5,113
	LBSD-5	6,632	7,939	11,611	13,522	10,702	7,304
Gevşek	LBGD-1	0,158	0,079	0,078	0,084	-	-
	LBGD-2	0,424	0,377	0,443	0,478	0,411	0,384
	LBGD-3	0,551	0,532	0,605	0,644	0,780	0,623
	LBGD-4	0,654	0,673	0,818	0,902	1,255	0,930
	LBGD-5	0,699	0,796	1,058	1,219	1,835	1,306



Şekil 9. Deneysel-analitik sonuçlar (a) Sıkı zemin (b) Gevşek zemin

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı sıklıktaki (sıkı ve gevşek) kum zemine yerleştirilmiş düz (helissiz) kazık ve dört farklı çaptaki helisel kazığın basınç yükü altındaki davranışları incelenmiştir. Deney sonuçlarından dört farklı göçme yöntemi ile nihai yükler tespit edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, literatürde sunulan analitik yaklaşımlar ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara istinaden;

- Her iki zemin sıklığında helis çapının artmasıyla taşıma gücü önemli oranda artmıştır. Düz kazıklara kıyasla helis çapının şaft çapına göre 2,73d-3,64d-4,55d ve 5,45d kat artması, sıkı zeminde nihai yük değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak 4,5-8,1-11,7 ve 17,1 kat, gevşek

zeminde ise sırasıyla 4,8-6,7-8,5 ve 10,8 kat artışa sebep olmuştur. Her iki zemin sıklığında yük miktarındaki artış, çap artış oranından daha fazla meydana gelmiştir.

- Sıkı zemine yerleştirilmiş kazığın taşıma kapasitesinde gevşek zemine göre yaklaşık 10 kata varan bir artış meydana geldiği görülmüştür.
- Analitik sonuçların, deneyden elde edilen nihai yük değerleriyle uyumlu sonuçlar verdiği ve deney sonuçlarını büyük oranda yakın tahmin ettiği belirlenmiştir. Ayrık taşıma yöntemi sıkı zeminde Davisson göçme kriteri ve %5D yöntemine, gevşek zeminde ise %10D yöntemine yakın tahminler ortaya koymuştur. Ayrık taşıma yönteminin her iki zemin sıklığındaki başarısı; tekli helisel kazığın

silindirikten ziyade ayırık göçme mekanizması göstermeye yakın olmasıyla ve özellikle sıkı zeminde R_q azaltma faktörünü kullanarak kazıkların kurulum etkisini analitik yaklaşımda da dikkate almasıyla açıklanabilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 218M571 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar.

6. KAYNAKLAR

1. Perko, H.A., 2009. Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation. John Wiley & Sons, New Jersey, 528.
2. Singh, S., Laddha, A., Hiranandani, P., Purohit, D.G.M. 2017. A Review on Pull-out Capacity of Helical Anchors in Clay and Sand. Journal of Architecture and Civil Engineering, 3(6), 24-32.
3. Lutenegeger, A.J., 2017. Uplift Behavior of Round Shaft Single-helix screw-piles for elevated Ground Mount Solar Panel Systems. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, 615-618.
4. Yılmaz, B., 2016. Helisel Kazıklar. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı, İstanbul, 137.
5. Blessen, J., Deardorff, D., Dikeman, R., Kortan, J., Malone, J., Olson, K., Waltz, N., 2017. Supportworks Technical Manual. Third Edition, Nebraska, 338.
6. Niroumand, H., Kassim, K.A., 2016. Design and Construction of Soil Anchor Plates. Butterworth-Heinemann, Oxford, 202.
7. George, B.E., Banerjee, S., Gandhi, S.R., 2019. Helical Piles Installed in Cohesionless Soil by Displacement Method. International Journal of Geomechanics, 19(7), 04019074.
8. Livneh, B., El Naggar, M.H., 2008. Axial Testing and Numerical Modeling of Square Shaft Helical Piles under Compressive and Tensile Loading. Canadian Geotechnical Journal, 45(8), 1142-1155.
9. Mittal, S., Mukherjee, S., 2015. Behaviour of Group of Helical Screw Anchors under Compressive Loads. Geotechnical and Geological Engineering, 33(3), 575-592.
10. George, B.E., Banerjee, S., Gandhi, S.R., 2020. Numerical Analysis of Helical Piles in Cohesionless Soil. International Journal of Geotechnical Engineering, 14(4), 361-375.
11. Mooney, J.S., Adamczak, S., Clemence, S.P., 1985. Uplift Capacity of Helical Anchors in Clay and Silt. In: Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, Proceedings of a Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention, Michigan, 48-72.
12. Mitsh, M.P., Clemence, S.P., 1985. The Uplift Capacity of Helix Anchors in Sand. In: Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, Proceedings of a Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention, Michigan, 26-47.
13. Nasr, M.H., 2004. Large Capacity Screw Piles. International Conference: Future Vision and Challenges for Urban Development, Cairo, 1-15.
14. Sakr, M., 2009. Performance of Helical Piles in Oil Sand. Canadian Geotechnical Journal, 46(9), 1046-1061.
15. Sakr, M. 2011. Installation and Performance Characteristics of High-Capacity Helical Piles in Cohesionless Soils. DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute, 5(1), 39-57.
16. Türedi, Y., 2021. Basınç Yüküne Maruz Helisel Kazık Davranışının Laboratuvar ve Arazi Deneyleri ile Araştırılması. Doktora Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 170.
17. Elsherbiny, Z.H., El Naggar, M.H., 2013. Axial Compressive Capacity of Helical Piles from Field Tests and Numerical Study. Canadian Geotechnical Journal, 50(12), 1191-1203.
18. Davisson, M.T., 1972. High Capacity Piles. Lecture Series, Innovations in Foundation

- Construction, American Society of Civil Engineers, Illinois Section, Chicago, 81-112.
19. Brinch Hansen, J., 1963. Discussion of "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils". Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 89(4), 241-242.
 20. O'Neill, M.W., Reese, L.C., 1999. Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure, Publication No. FHWA-IF-99-025, 537.
 21. ISSMFE, 1985. Axial Pile Loading Test - Part I: Static Loading. Geotechnical Testing Journal, 8(2), 79-90.