



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.11.2024
Kabul Tarihi : 21.01.2025

Received Date : 01.11.2024
Accepted Date : 21.01.2025

KUM ZEMİNDE KAZIK TAŞIMA KAPASİTESİNİN LABORATUVAR MODEL KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF PILE BEARING CAPACITY IN SAND SOIL BY LABORATORY MODEL PILE LOADING TESTS

Murat GÜLEN¹* (ORCID: 0000-0003-4143-9266)
Havvanur KILIÇ² (ORCID: 0000-0001-9455-1687)

¹ Siirt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Siirt, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar : Murat GÜLEN, murat.gulen@siirt.edu.tr

ÖZET

Kazık ve kazıklı temellerin taşıma kapasiteleri genellikle arazi kazık yükleme deneylerinden ve ya literatürde kabul gören yaklaşımlardan faydalanılarak belirlenmektedir. Son yıllarda laboratuvar ortamında gerçekleştirilen model kazık yükleme deneylerinden de kazıkların taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için çalışmalar devam etmektedir. Özellikle taşıma kapasitelerinin tamamını veya bir kısmını kazık-zemin sürtünmesi ile sağlayan kazıklar için ara yüzey sürtünme mukavemeti parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, daha gerçekçi ve güvenilir tasarımların yapılmasına olanak sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında enstrümante edilen ve eksenel yükleme koşullarına maruz bırakılan alüminyum bir kazığın yük taşıma kapasitesi laboratuvar model kazık yükleme deneyleri ile araştırılmıştır. Deneysel ölçümlerden belirlenen yük-oturma eğrisi dikkate alınarak kazık taşıma kapasitesi literatürde kabul gören yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak benzerlikler ve farklılıklar yorumlanmıştır. Laboratuvar ortamında sınırlı bir durumu temsil eden model kazık yükleme deney sonuçlarından genel değerlendirmelerin yapılabilmesi için çalışmaların farklı kazık çapları ve türleri, zemin sınıfları ve yükleme koşulları dikkate alınarak desteklenmesi gerekmektedir. Böylelikle kazıkların taşıma kapasitesinin arazi kazık yükleme deneylerine alternatif bir yöntemle laboratuvar ortamında belirlenebileceği açıktır.

Anahtar Kelimeler: Zemin-kazık etkileşimi, kazık yükleme deneyleri, kazık taşıma kapasitesi

ABSTRACT

The bearing capacities of piles and piled foundations are typically determined through pile loading tests conducted in the field or by applying accepted methodologies from the literature. Recent studies have continued to investigate the potential for determining pile bearing capacity utilising model pile loading tests conducted in laboratory. For piles that derive all or part of their bearing capacity from pile-soil friction, there is a clear necessity for accurately determining the interface frictional strength parameters in developing more realistic and reliable designs. This study investigates the bearing capacity of an instrumented aluminium pile subjected to axial loading conditions using pile loading tests conducted in a laboratory. The pile's bearing capacity was determined from the load-settlement curve derived from measurements, in accordance with accepted methods from the literature. A comparison was subsequently done, with particular attention focused on identifying any similarities and differences in the results. While the results of these model pile loading tests represent a limited situation in laboratory conditions, they highlight the necessity for further experimental studies considering different pile dimensions and types, soils, and loading conditions. These findings indicate the potential for determining pile bearing capacity in laboratory conditions as an alternative to field pile loading tests.

Keywords: Soil-pile interaction, pile loading tests, pile bearing capacity

ToCite: GÜLEN, M., & KILIÇ, H., (2025). KUM ZEMİNDE KAZIK TAŞIMA KAPASİTESİNİN LABORATUVAR MODEL KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 430-440.

GİRİŞ

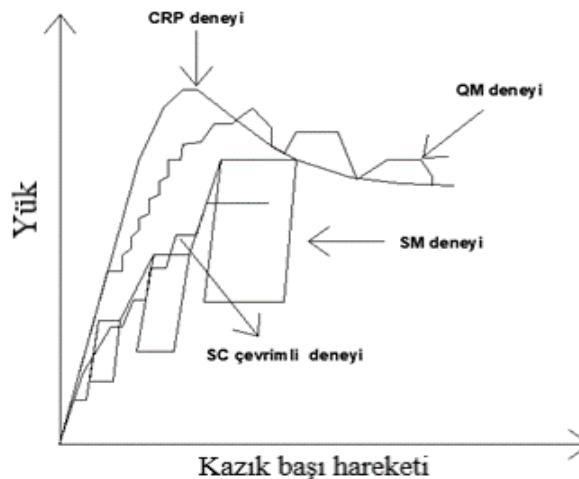
Kazıklar, kazıklı temeller, ankrajlı sistemler, diyafram duvarlar gibi geoteknik yapıların tasarımlarında ara yüzey sürtünme mukavemeti parametreleri (δ , c_a) genellikle kayma mukavemeti parametrelerine (c , ϕ) bağlı olarak Terzaghi ve Peck (1948) tarafından önerilen ampirik eşitliklerden elde edilmektedir. Buna ek olarak, NAVFAC (1986) tarafından önerilen δ ve c_a değerleri de tasarımlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Potyondy (1961), farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip ara yüzey elemanları ile farklı dane çapı dağılımına sahip zeminler için δ ve c_a değerleri belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda su muhtevasını (w), dane çapını, zemin türünü, farklı yapısal elemanları ve farklı yüzey pürüzlülüğünü dikkate alarak c_a/c ve δ/ϕ oranlarını önermiştir. Kishida ve Yoshimi (1981), farklı kum zeminler ile çelik ara yüzey sürtünme mukavemetini incelemiş ve sürtünme mukavemetinin ara yüzey elemanın pürüzlülüğüne ve zeminin ortalama dane çapına (D_{50}) bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Cerato ve Lutenege (2006), farklı boyuttaki direkt kesme kutusu deney aleti ile farklı sıklıklardaki 5 kumun ϕ değerlerini belirlemişlerdir. Çalışmalarda rölatif sıklığın (Dr) artışına bağlı olarak ϕ değerinin arttığını ve kesme kutusu deney aletinin boyutları büyüdükçe ϕ değerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Samanta vd. (2018), farklı dane şekline ve dane boyutuna sahip kumlar ile farklı pürüzlülüğe sahip beton ve çelik ara yüzey etkileşimini incelemişlerdir. Bu etkileşim için Dr (%), yüzey pürüzlülüğü, dane şekli ve D_{50} 'nin en önemli parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Tiwari ve Al-Adlath (2014) kum zeminler ile farklı yapısal elemanlar için kuru ve suya doymun olarak hazırlanarak yapılan deneylerde, Dr (%) artışına bağlı olarak ara yüzey sürtünme mukavemetinin arttığını ve kuru hazırlanan numunelerden elde edilen mukavemetin doymun hazırlanan numunelerden daha büyük olduğunu rapor etmişlerdir.

Kazıkların yük altındaki davranışının belirlenmesi için kullanılan en yaygın yöntem arazi kazık yükleme deneyleridir. Yankı (2015), kazık yükleme deneylerinden elde edilen sonuçların statik taşıma gücü formülleri ve sayısal analizlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bu durumun tasarım sonrası oluşacak sorunların minimize edilmesinde önemli rol oynadığını belirtmiştir. Özellikle kazık yükleme deneylerinden belirlenen yük-oturma eğrisi için farklı hesaplama yöntemleri dikkate alınarak taşıma kapasitesi belirlenmektedir [Broms (1981), Tomlinson (2004), Fleming vd. (2009)]. Fellenius (2004) kazık yükleme deneyi sonuçlarının değerlendirilme yöntemlerini üç ana başlıkta gruplandırmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Kazık Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Yöntemler [Fellenius (2004)]

Yöntemler	Referans	Yükleme yöntemi
Matematiksel	Chin (1970)	CRP-QM-SM
Grafiksel	De Beer (1972)	SM
	Brinch-Hansen (1963)	CRP
	Teğet Yöntemi	-
	Mazurkiewicz (1972)	-
Oturmayı Sınırlandıran	Davissan (1972)	OM-CRP-SM

Tablo 1'deki yöntemlerden sabit penetrasyon oranı ile yükleme deneyi (CRP), yavaş (SM) ve hızlı (QM) kademeli yükleme ile çevrimli yükleme (SC) deney yöntemleri için belirlenen yük-oturma ilişkisi, deneyin yapıldığı yükleme koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Aynı yükleme koşulları için bu yöntemlerden belirlenen yük-oturma eğrileri Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Farklı Deney Yöntemleri İçin Yük-Oturma İlişkisinin Karşılaştırılması [Toğrol (1970)]

Bir kazığa etki eden düşey yüklerin bir kısmı kazığın uç direnci (Q_p) tarafından taşınırken, bir kısmı da çevre sürtünmesi (Q_s) ile karşılanır. Nihai durumunda kazığın taşıma kapasitesi (Q_{ult}), Q_p+Q_s 'nin toplamı olarak ifade edilir. Özellikle kazıklar Q_p ve Q_s değerlerine farklı oturma miktarlarında ulaşırlar. Bowles (1996), uç direncinin çakma kazıklarda kazık çapının (D) %10'unda ve fore kazıklarda %30'unda; Tomlinson (2004) ve Woodward (2006), kumlu zeminlerde uç direncin kazık çapının %10-%20'sinde; Das (2007), uç direncinin kazık çapının %10-%25'i oturma değerinde ulaştığını ifade etmişlerdir.

Baca vd. (2019), laboratuvar model kazık deneyleri ile çelik bir kazığın taşıma kapasitesini orta sıklıktaki kum için incelemişlerdir. Kazıkların iki farklı statik yükleme durumu için yük-oturma eğrileri belirlenmiştir. Yükleme türünün yük-oturma ilişkisini etkilediğini ve taşıma kapasitesinin yükleme türüne bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Baca ve Rybak (2018), pürüzlü ve pürüzsüz yüzeye sahip çelik dairesel bir kazığın nihai taşıma kapasitesini Brinch Hansen (1963) yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Aynı deney koşulları için pürüzlü kazık yüzeyine sahip kazığın nihai taşıma kapasitesi, pürüzsüz yüzeydeki taşıma kapasitesinden %34 daha büyük hesaplanmıştır. Rybak ve Krol (2018), prefabrik olarak üretilen ve zemine sürülerek yerleştirilen 30 farklı arazi kazık yükleme deneyinden elde edilen yük-oturma ilişkisi için yükleme hızı ve sıklığının kazık taşıma kapasitesini Tablo 1'deki yöntemleri kullanarak hesaplamışlardır. Belirlenen kazık taşıma kapasiteleri için ilk yükleme kademelerindeki noktaların önemli olmadığını ve nihai taşıma kapasitesi için plastik bölgedeki değerlerin belirleyici olduğunu ifade etmişlerdir. Yenginlar (2015), kum tankı içerisinde imal edilen ve farklı boyutlardaki kazıklar için laboratuvar model kazık yükleme deneyleri ile Q_s ve Q_p değerlerini araştırmıştır. Çalışmalar sonucunda kazıklardaki maksimum Q_s ve Q_p değerlerinin sırasıyla kazık çapının %10 ve %15-%20'sinde oluştuğunu belirtmiştir.

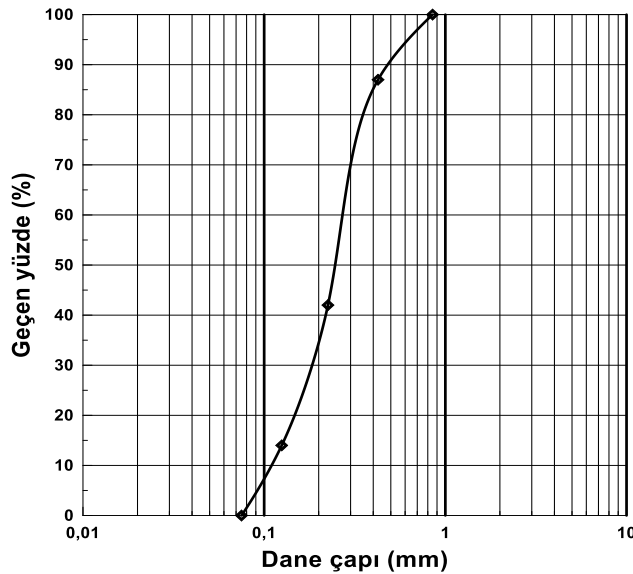
Bu çalışma kapsamında alüminyum bir kazığın aksel olarak yüklenmesi sonucunda yük-oturma eğrisi elde edilmiştir. Bu yük-oturma eğrisi dikkate alınarak Tablo 1'deki yöntemler için kazık taşıma kapasiteleri belirlenerek karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak farklı D_r (%) değerlerindeki kum-alüminyum ara yüzeyi için δ değerleri kesme kutusu deneyleri ile belirlenerek Q_s değeri hesaplanmıştır. Arazi kazık yükleme deneylerinin yapılamadığı koşullarda laboratuvar kazık yükleme deneylerinin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında kullanılan Şile kumuna ait özellikler, kayma mukavemeti parametreleri ve ara yüzey sürtünme açıları, kazık yükleme deneyi için kullanılan model deney sistemi, alüminyum kazık için gerçekleştirilen kalibrasyon ve enstrümantasyon aşamaları alt başlıklar halinde açıklanacaktır.

Şile Kumunun Özellikleri

DeneySEL çalışma kapsamında kullanılan Şile kumu için yapılan elek analizi ile belirlenen dane çapı dağılımı Şekil 2'de sunulmuştur. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre kötü derecelenmiş kum (SP) sınıfında yer alan Şile kumunun laboratuvar ortamında belirlenen fiziksel özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 2. Şile Kumuna Ait Dane Çapı Dağılımı

Tablo 2. Şile Kumuna Ait Malzeme Özellikleri

Zemin sınıfı	Gs	Cu	Cc	e_{max}	e_{min}
SP	2,65	3	1,33	0,80	0,50

Direkt Kesme Kutusu Deney Sonuçları

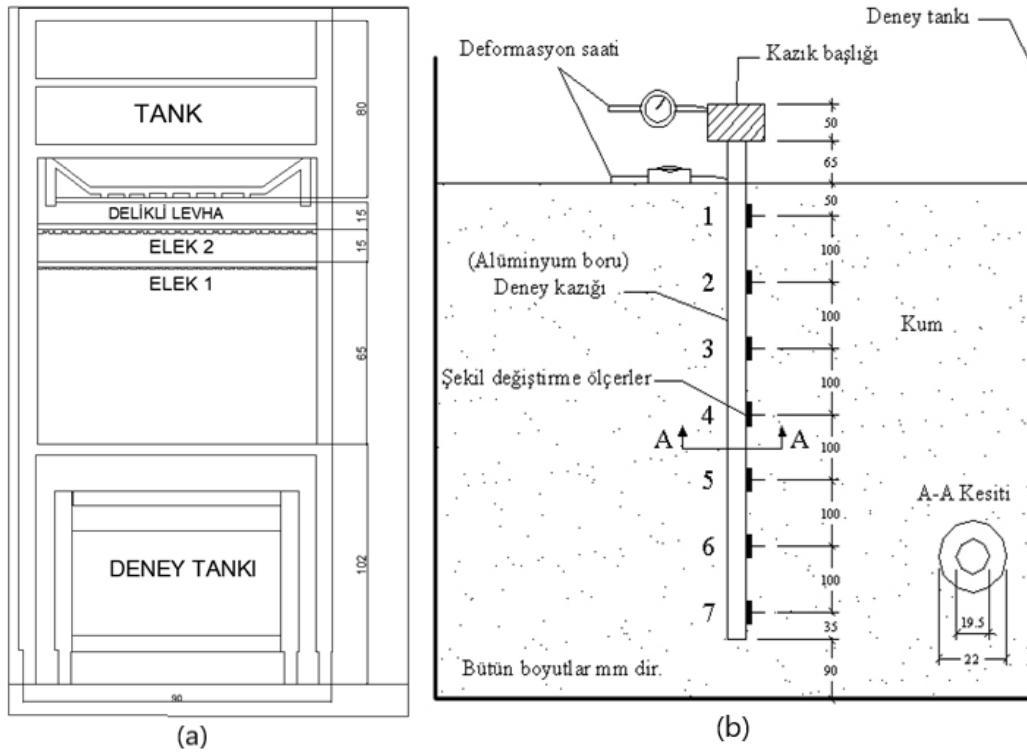
Şile kumunun ϕ ve Şile kumu-alüminyum ara yüzey sürtünme açısı (δ), $Dr(\%)=70$ için 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa normal gerilmelerde ve 1 mm/dk kesme hızında küçük ölçekli direkt kesme kutusu deney aleti kullanılarak belirlenmiştir. Tablo 3'te sunulan δ/ϕ oranı farklı yapısal elemanlar-kum ara yüzeyi için ASCE (1993), Kulhawy (1984) ve NAVFAC (1988) ve tarafından önerilen değerlerle uyumludur.

Tablo 3. Şile Kumunu İçin Direkt Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Dr (%)	ϕ (°)	δ (°)	δ/ϕ
70	36	28	0,78

Model Deney Düzenegi ve Deney Prosedürü

Laboratuvarda model kazık yükleme deneylerinde kullanılan deney düzenegi Şekil 3'te detaylandırılmıştır.

**Şekil 3.** Deneyel Ekipman a) Yağmurlama Düzenegi b) Deney Sistemi Ve Gerinim Ölçerin Konumu

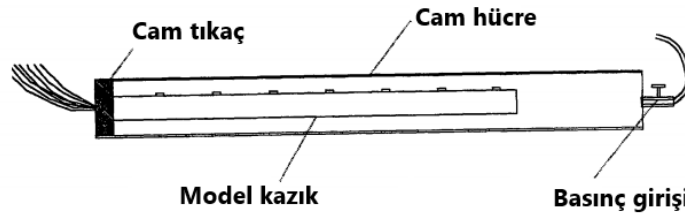
Deneyler sırasında boyu 75 cm ve çapı 2,2 cm olan alüminyum kazık üzerindeki gerilmeleri belirlemek için farklı derinliklere gerinim ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Şile kumunun deney tankında aynı boşluk oranında ve uniform olarak yerleştirilmesi amacıyla yağmurlama sistemi tercih edilmiştir. Şekil 3a'da gösterilen yağmurlama düzeneginde, zeminden 2,1 m yükseklikte tekerlekli bir aksan üzerine monte edilen 0,9 m x 1,0 m x 0,8 m boyutlarındaki tank içinde kontrollü açılıp kapanan iki delikli plaka ve bunların altında 0,15 m aralıklarla yerleştirilmiş iki elek yer almaktadır. 1 mm aralıklı olan bu elekler yardımıyla kumun yerleşmesi sağlanmıştır.

Boyutları 0,70 m x 0,95 m x 0,80 m olan model deney tankı çelik profiller kullanılarak duvarları camdan imal edilmiştir. Kum yağmurlama düzenegi yardımıyla deney tankına yerleştirilmeden önce, alüminyum model kazık yükleme başlığı hizasında ve tank tabanından 90 mm yukarıda askıya alınarak sabitlenmiştir. Akabinde yağmurlama düzenegi ile deney tankı, kazık başında 50 mm kalıncaya kadar $Dr(\%)=70$ ve birim hacim ağırlığı (γ) 19 kN/m³ olacak şekilde kontrollü olarak sıkıştırılarak doldurulmuştur. Yükleme hazır olan deney tankı yükleme başlığı altında konumlandırılmıştır. Kazık yükleme deneyleri için kullanılan sistem kademeli yüklemeye elverişli olarak tasarlanmıştır. Deney başında yükleme adımlarını 0,04 kN, 0,08 kN, 0,12 kN, 0,16 kN ve 0,20 kN olarak

belirlenmiştir. Deney sistemi bu tanımlanan yükleri, model kazık üzerine imal edilen kazık başlığına 0,45 mm/dk olacak şekilde uygular. Her yükleme kademesi için tanımlanan yük değeri kazık başına uygulandıktan sonra yükleme sistemi servo motor yardımıyla bu yükü sabit tutar. Yüklemler boyunca kazık başı hareketini ölçmek için kazık başına yer değiştirme ölçer konumlandırılmıştır (Şekil 3b). Uygulanan yük altında kazığın düşey oturması tamamlandıktan sonra kazık başı oturması (Δh) kaydedilmiş ve sonraki yükleme kademesine geçilmiştir. Deney aletinin yükleme aşamaları dikkate alındığında deneylerin gerilme kontrollü gerçekleştirildiğini söylemek mümkündür. Her yükleme kademesinde Omega SGK-B3A-K350U-PC11-E marka gerinim ölçerlerdeki okumalar veri toplama sisteminde kaydedilmiştir. Tüm yükleme kademelerinde uygulanan bu süreç sonunda yükleme adımları tamamlanmış ve yük- oturma eğrisi elde edilmiştir. Model deneylerin tekrarlanabilirliğini kontrol için deneyler tekrarlanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında tekrarlanan deney sonuçlarından sadece iki tanesi değerlendirilmiştir. Yapılan her deneyden sonra tank boşaltılarak tekrar doldurulmuş ve bütün deneylerde benzer koşulların oluşturulması sağlanmıştır.

Deneyler sırasında aksel yüklemeye ile birlikte kazıktaki aksel ve teğetsel doğrultudaki şekil değiştirmeleri belirlemek için tek sıra halinde kullanılan gerinim ölçerler (şekil değiştirme ölçerler), et kalınlığı 1,25 mm ve boyu 750 mm olan içi boş kazık üzerine alttan itibaren ilki kazık ucundan 35 mm yukarıda ve diğerleri 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir (Şekil 3b). Yüklemler altında elastik olarak uzama ve kısalma hareketi yapan ve bilgisayar destekli veri toplama sistemine bağlı olan bu gerinim ölçerlerin çıktı verisi milivolttur. Yetkili firmadan temin edilen kalibrasyon verileri kullanılarak bu milivolt verileri aksel ve teğetsel şekil değiştirmelere dönüştürülmüştür.

Alüminyum kazık üzerine yapıştırılan gerinim ölçerlerin kalibrasyonu 60 mm çapında ve 1200 mm boyunda dairesel kesitli iki ucu kapalı cam hücre içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Kazığın bir ucu cam hücreye sabitlendikten sonra cam hücre içerisine kademeli olarak basınç uygulanarak gerinim ölçerlerden okumalar alınmıştır. Yapılan kalibrasyon deneyleri göz önüne alındığında, gerilme kontrollü yapılan bu işlemler sonucunda kazığın E modülü (E) yaklaşık $4,35 \times 10^7$ kN/m² olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Kalibrasyon Deneylerinin Yapıldığı Cam Hücre Kesiti [Göçek (2001)]

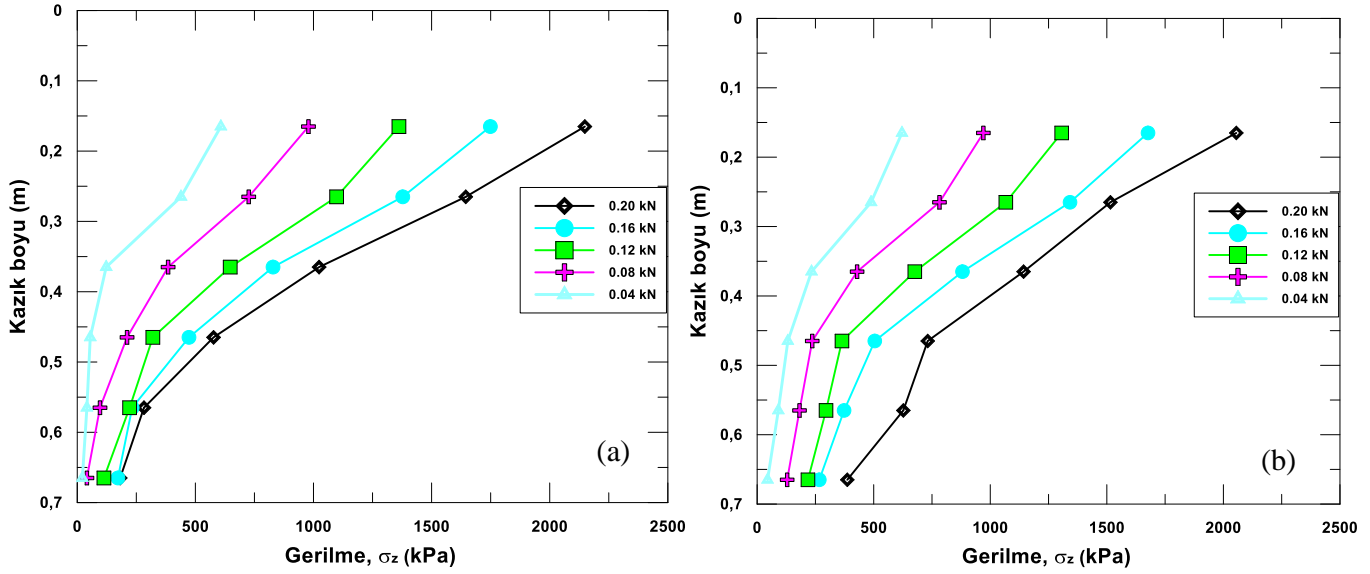
DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Model Kazık Boyunca Gerilmelerin Belirlenmesi

DeneySEL çalışmalarda deney koşulları ve ölçüm ekipmanından kaynaklanan aksaklıklardan dolayı ölçüm hataları olasıdır. Bu çalışma kapsamında özellikle deneme deneylerinde bu durum açıkça görülmüş ve deneme deneylerinde aksaklıklar giderilerek hata oranı minimize edilmiştir. Bu çalışma kapsamında sunulan sonuçlar üzerinde belirli bir hata payının olduğunu göstermek için aynı koşullarda ve yükleme adımlarında gerçekleştirilen 2 deneye ait sonuçlar sunulmuştur.

E değeri $4,35 \times 10^7$ kN/m² olan bir kazığın gerinim ölçerlerden belirlenen aksel şekil değiştirme (ϵ_z) değerleri kullanılarak aksel gerilme (σ_z) değerleri Model Deney 1 (MD1) ve Model Deney 2 (MD2) için Eşitlik 1'den hesaplanmıştır. Fakat 1 nolu gerinim ölçerden anlamlı veri alınamadığı için sonuçları bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir. Kademeli olarak 0,20 kN aksel yüke maruz kalan ve detayları Şekil 3b'de sunulan kazık başlık bölgesinden kazık kesitine aktarılan 2454 kPa değerinin derinlikle değişimi Şekil 5'te sunulmuştur. Deneyler sırasında alüminyum kazığa maksimum 0,20 kN yükleme yapılmıştır. Bu yükleme altında kazık yapısal olarak göçmemiş ve kazığın yapısal olarak göçtüğü yük değeri bu çalışma kapsamında belirlenmemiştir. Uygulanan maksimum 0,20 kN yük değeri de deneme deneyleri ve Chin (1970) yöntemi dikkate alınarak belirlenmiştir.

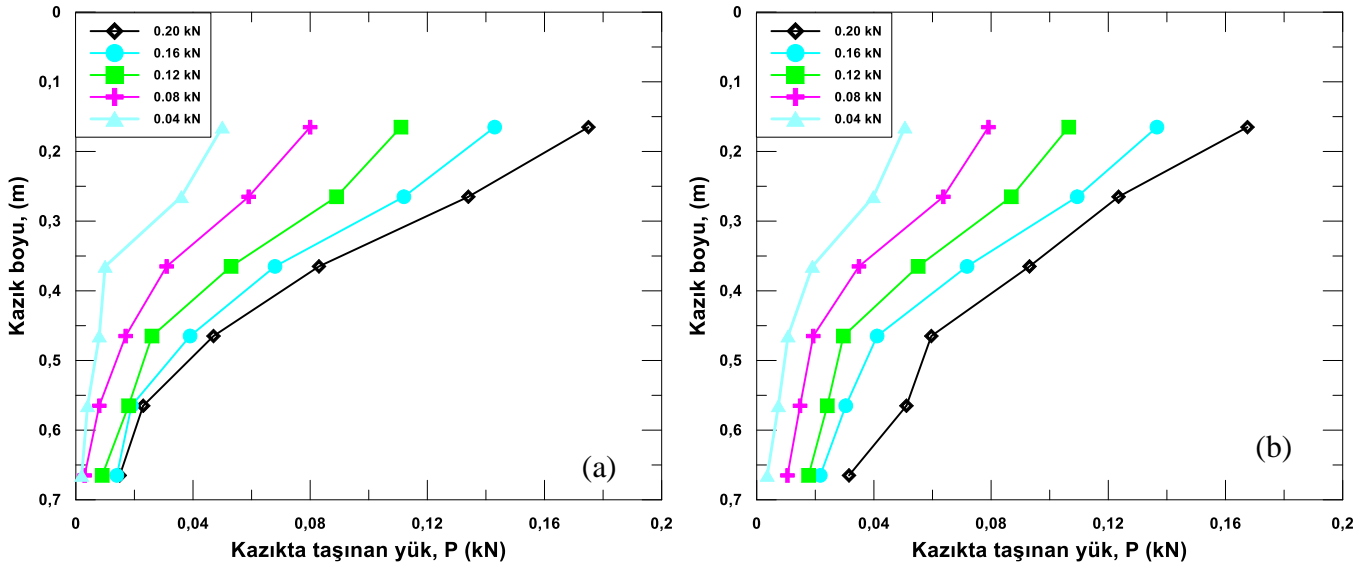
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$



Şekil 5. Eksenel Gerilmelerin Kazık Boyunca Değişimi a) MD1 b) MD2

Deneyler sırasında kazığın zemin içerisinde kalan kısmı zemin ile etkileşim halinde olduğundan dolayı kazık taşıdığı yükün bir kısmını bu etkileşim sonucu sürtünme ile zemine aktarır. Kazık-zemin sürtünmesi sonucu zemine aktarılan yük miktarı, sürtünen alan ve yanıl toprak basınçlarına bağlı olarak derinlikte artacaktır. Bu ara yüzey sürtünme mekanizması ile zemine aktarılan yük miktarı artmış ve kazık gövdesinde taşınan yük miktarı azalmıştır (Şekil 5).

Şekil 6'da MD1 ve MD2 için uygulanan yükün kazık boyunca değişimi sunulmuştur. Kazık-zemin ara yüzey sürtünmesi sonucu kazıktan zemine yük aktarımı olacağından kazık gövdesinde taşınan yük değeri kazık üst noktasından alt noktasına doğru azalmaktadır. Bu azalma miktarının derinlikle doğrusal olmayıp belirli bir derinlikten sonra değişimi oldukça sınırlıdır.



Şekil 6. Uygulanan Yükün Kazık Boyunca Değişimi a) MD1 b) MD2

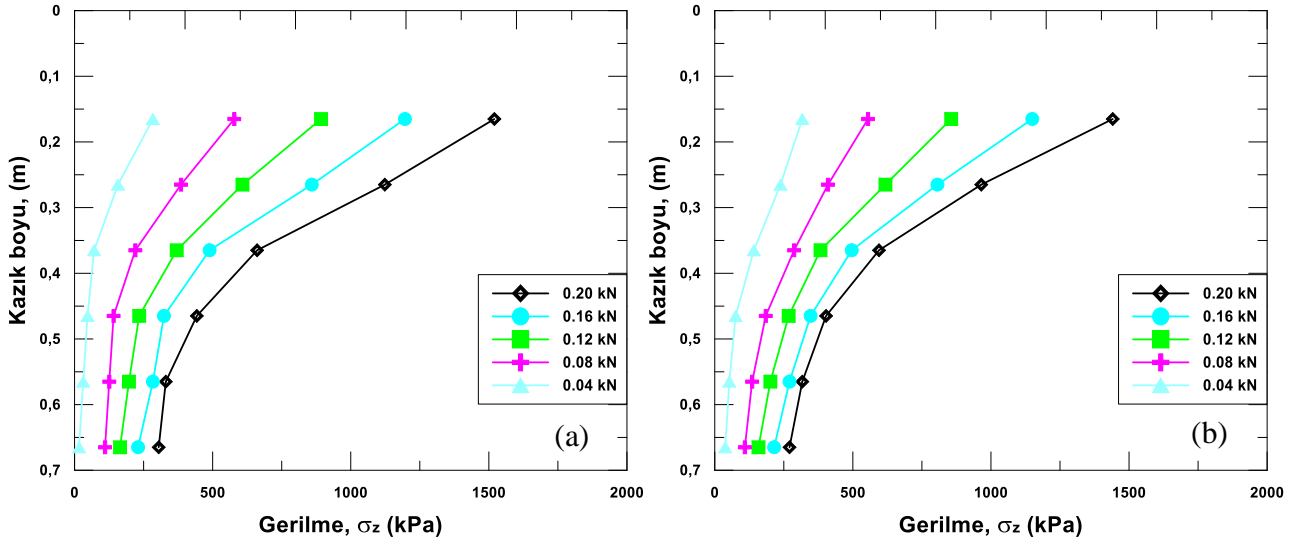
Model Kazık Boyunca Gerilmelerin Belirlenmesi

Model deneylerden ölçülen gerinim değerleri kullanılarak kazık kesitindeki gerilmeler, Eşitlik 2'de ifade edilen ve elastisite teorisinde yer alan silindirik kabukların gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlikte radyal şekil değiştirmeler ihmal edilirse;

$$\sigma_z = \frac{E}{[(1+\nu) \times (1-2\nu)]} \times [(1-\nu) \times \epsilon_z + \nu \times \epsilon_\phi] \quad (2)$$

Eşitlik 2'de ν poisson oranı, ϵ_z eksenel şekil değiştirme ve ϵ_ϕ teğetsel şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

Alüminyum kazık için v değeri 0,33 ve E değeri $4,35 \times 10^7$ kN/m² alınarak gerilmeler hesaplanmıştır. MD1 ve MD2'ye ait beş farklı yükleme kademesi için Eşitlik 2 kullanılarak elde edilen σ_z değerlerinin kazık boyunca değişimi Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Ampirik Eşitlikle Belirlenen σ_z 'nin Kazık Boyunca Değişimi a) MD1 b) MD2

Kalibrasyon deneylerinden belirlenen E kullanılarak MD1 ve MD2 için kazık boyunca hesaplanan düşey gerilme ile Eşitlik 2'den hesaplanan düşey gerilmeler Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Kazık Boyunca Oluşan Düşey Gerilmelerin Kazık Boyunca Değişimi

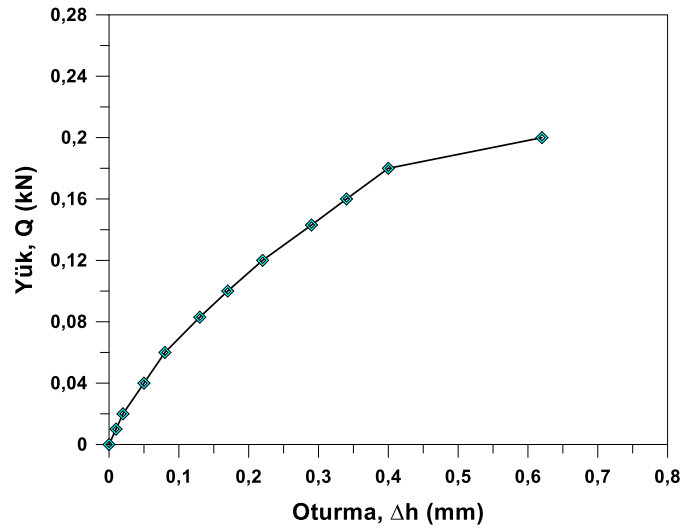
Yük (kN)	Derinlik (m)	Gerinim Ölçer No	MD1 σ_z (kPa)	MD2 σ_z (kPa)	Eşitlik 2 σ_z (kPa)
0,20	0,065	1	-	-	-
	0,165	2	2149	2055	1441
	0,265	3	1644	1516	965
	0,365	4	1064	1123	595
	0,465	5	597	702	403
	0,565	6	327	283	317
	0,665	7	182	187	271

Kazık tarafından taşınan yük miktarı için MD1 ve MD2'den elde edilen gerilme değerleri (gerinim ölçer 7 dışında) Eşitlik 2'den belirlenenlerden daha büyüktür. Özellikle model deneylerden ölçülen ve Eşitlik 2'den hesaplanan gerilme değerleri arasında %40'lara varan önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu durum elastisite teorisindeki silindirik kabukların gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin eksenel yüklü kazıklarda anlamlı sonuçlar vermediğini göstermektedir.

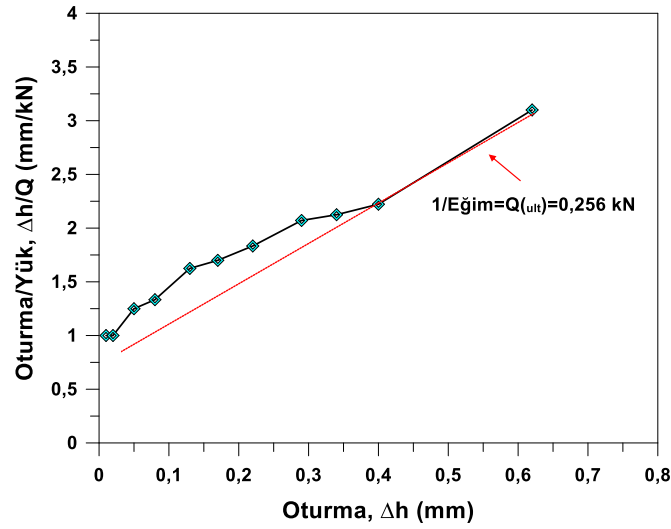
Model Kazık İçin Yük-Oturma Eğrisinin Değerlendirilmesi

Laboratuvar model kazık yükleme deneyinde 0,20 kN eksenel yüklemeye maruz kalan MD1 ve MD2 için ortalama değerleri yük-oturma eğrisi Şekil 8'de sunulmuştur. Bu yük-oturma eğrisi için Tablo 1'deki yöntemler kullanılarak kazık taşıma kapasitesi (Q_{ult}) hesaplanmıştır. Davison yöntemi deplasman kontrollü bir yöntem olduğu için bu çalışma kapsamında hesaplamalara dahil edilmemiştir. Q_{ult} değerinin belirlenmesi için uygulanan tüm yöntemlerin hesaplama adımlarını detaylandırmak yerine, matematiksel yöntemlerden ve grafiksel yöntemlerden sadece biri için hesaplama adımları sunulmuştur.

Chin (1970) yönteminde, sabit yük (Q) kademesinde ölçülen kazık oturmasının o yükleme kademesindeki Q değerine bölünerek $\Delta h/Q$ ve Δh grafiği çizilir. Grafiği oluşturan noktalar, belirli bir kısımdan sonra doğrusallaşır. Bu doğrunun eğiminin (C_1) tersi ($1/C_1$) kazık taşıma kapasitesini verir. Özellikle bu doğrunun eğimi sabit olduğundan yükleme deneyinin tamamlanması beklenilmeden kazık taşıma kapasitesinin hesaplanabilir. Fakat Chin (1970) yönteminin diğer yöntemlere göre daha büyük taşıma kapasiteleri verdiği de bilinmektedir (Dalkılıç 2020). Bundan dolayı deney sonuçlarından belirlenen kazık taşıma kapasitesinin genel kabul gören farklı yöntemlerle kontrol edilmesi gerekir. Şekil 8'deki yük oturma eğrisine Chin (1970) yönteminin uygulanması sonucu belirlenen kazık taşıma kapasitesi Şekil 9'da sunulmuştur.

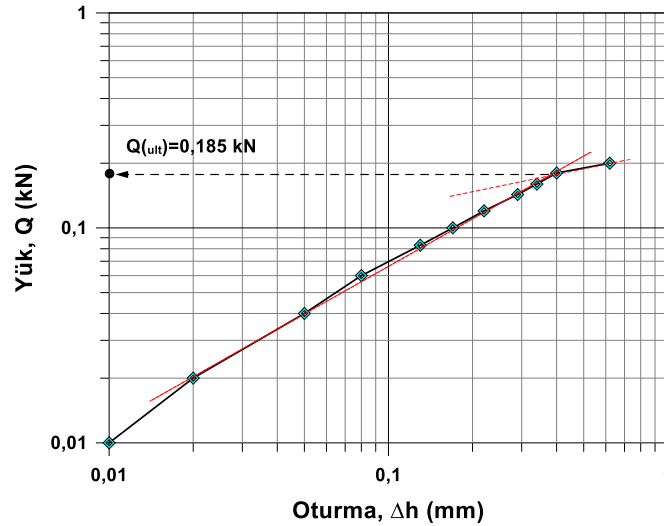


Şekil 8: Ortalama Değerleri İçin Elde Edilen Yük-Oturma Eğrisi



Şekil 9: Chin (1970) Yöntemi İle Nihai Kazık Taşıma Yükünün Belirlenmesi

SM yükleme türü olan ve De Beer (1972) tarafından önerilen yöntemde yük - oturma grafiği, çift eksenli logaritmik ölçekte olacak şekilde çizilir. Bu eğrideki ölçüm noktalarının birleştirilmesi ile eğimleri farklı olan iki doğru elde edilir. Bu iki doğrunun kesiştiği noktaya karşılık gelen yük değeri, kazığın taşıma kapasitesidir. Şekil 8'e De Beer (1972) yönteminin uygulanması ile belirlenen kazık taşıma kapasitesi Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10: De Berr (1972) Yöntemine Göre Kazık Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi

0,20 kN eksenel yüklemeye maruz kalan kazık için yük-oturma eğrisi için farklı yöntemler dikkate alınarak belirlenen kazık taşıma kapasiteleri Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. Farklı Yöntemlerden Belirlenen Nihai Kazık Taşıma Yüğü

Chin (1970)	De Beer (1972)	Brinch-Hansen (1963)	Teğet yöntemi	Mazurkiewicz (1972)
0,256 kN	0,185 kN	0,160 kN	0,170 kN	0,225 kN

Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında Chin (1970) yöntemi ile belirlenen kazık taşıma kapasitesi en büyük olurken, en düşük değer Brinch-Hansen (%90) yönteminden elde edilmiştir. Bu sonuçların Şekil 1 ve Tablo 1 ile uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen arazi deneylerinden ve sayısal analizlerden de elde edilmiştir [Ünküp (2024), Pulat (2024)].

Kazık Çevresinde Taşınan Yüğüün Hesaplaması

Model kazık üzerine yerleştirilen gerinim ölçerlerin konumu ve kazığa etkiyen yanal toprak basınç dağılımı için zeminden kazığa etkiyen yanal toprak basınçları 15D kritik derinliği dikkate alınarak çizilmiştir. Bu gerilme dağılımında kazık çevresinde 15D mesafede çevre sürtünmesi ile taşınan yük miktarı Q_{s1} ve 15D mesafesinden sonra taşınan yük miktarı Q_{s2} olarak adlandırılmıştır. Bu değerler Tablo 2'de özetlenen δ değerleri kullanılarak Eşitlik 3'ten hesaplanmıştır. Hesaplamalarda K değeri 1.4 olarak dikkate alınmıştır. Genellikle kazık türü ve kazığın zemine yerleştirilme yöntemine göre değişkenlik gösteren bu K değeri, NAVFAC (1988) tarafından önerilen değerlerle uyumludur.

$$\Sigma p. \Delta L. K. \sigma'_v \tan(\delta) \quad (3)$$

Kritik derinlik kullanılarak hesaplanan kazığın çevresinde taşınan yük değeri $\delta=28^\circ$ $Q_s = Q_{s1} + Q_{s2} = 0,1753$ kN olarak hesaplanmıştır. Bu değer Şekil 6'daki verilerle uyumludur.

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında küçük boyutlu alüminyum bir kazığın taşıma kapasitesinin laboratuvar model kazık yükleme deneyleri ile belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Boyut etkisi göz ardı edilerek elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- ❖ Zemin ile yapı arasında sürtünmenin olduğu durumlarda δ değerinin ampirik eşitlikler yerine, laboratuvar deneyleriyle belirlenmesi daha gerçekçi tasarımların yapılmasına olanak sağlayacaktır.
- ❖ Kalibrasyon deneylerinden belirlenen E değeri kullanılarak model deneyler için kazık kesitindeki düşey gerilmeler ile Eşitlik 2'den belirlenen düşey gerilmeler arasında %40'lara varan farklılıklar elde edilmiştir. Kazık-zemin sürtünmesi ile zemine aktarılan gerilmelerden dolayı kazık kesitindeki düşey gerilmeler MD1, MD2 ve Eşitlik 2 için kazık başından kazık alt noktasına doğru azalmıştır. Fakat yükün mobilize olduğu derinlikler arasında farklılıklar tespit edilmiştir.
- ❖ Arazi kazık yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma ilişkisini dikkate alarak kazığın taşıma kapasitesini belirleyen yöntemler laboratuvar model kazık deneyleri için uygulanmış ve Chin (1970) yöntemi dışında yaklaşık birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- ❖ Kesme kutusu deneylerinden belirlenen δ ve kritik derinlik kavramı kullanılarak kazığın çevresinde taşınan yük değeri hesaplanmış ve elde edilen sonuçların MD1 ve MD2 ile uyumlu olduğu görülmüştür.
- ❖ Kazık yükleme deneylerinin yapılamadığı durumlarda kazık davranışını ve kazık-zemin ara yüzey sürtünmesini öngörmek için arazi zemin koşulları ve boyut etkisi dikkate alınarak laboratuvar model kazık deneyleri ile incelenmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

American Society of Civil Engineers. (1993). *Design of pile foundations technical engineering and design guides*. ASCE.

Baca, M., & Rybak, J. (2018). A first result of pipe pile static load test in small laboratory scale. *E3S Web of Conferences*, 251. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201825100001>

Baca, M., Lesny, J., Al-Khoury, R., & Wiczorek, M. (2019). Assessing the pile base capacity from a static load test on model piles. *E3S Web of Conferences*, 97. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199700011>

- Beer, E. E., & Wallays, M. (1972). Franki piles with overexpanded bases. *La Technique des Travaux*, 333.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Broms, B. B. (1981). *Precast piling practice*. Thomas Telford Ltd.
- Cerato, A., & Lutenegeger, A. (2006). Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands. *Geotechnical Testing Journal*, 29(6), 507–516. <https://doi.org/10.1520/GTJ100486>
- Chin, F. K. (1970). Estimation of the ultimate load of pile not carried to failure. In *Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering* (pp. 81–90). Singapore.
- Dalkılıç, B. (2020). *Göçme durumuna ulaşmamış kazık yükleme deneylerinde nihai kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesi* [Master's thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Das, B. M. (2007). *Principles of foundation engineering* (6th ed.). Thomson Canada Limited.
- Davisson, M. T. (1972). High capacity piles. In *Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction* (pp. 81–112). American Society of Civil Engineers, Chicago.
- Department of the Navy. (1988). *NAVFAC Design Manuals 7.1 and 7.2: Foundations and earth structures*. Alexandria, VA.
- Fellenius, B. H. (2004). Unified design of piled foundations with emphasis on settlement analysis. In *Geo-Trans Conference Proceedings* (pp. 253–275). Geo-Institute, Los Angeles.
- Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., & Elson, W. K. (2009). *Piling engineering* (3rd ed.). Taylor & Francis.
- Göçek, H. (2001). *Kazıkların eksenel yük taşıma kapasiteleri* [Master's thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi].
- Hansen, J. B. (1963). Hyperbolic stress-strain response of cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 89(1).
- Kishida, T., & Yoshimi, Y. (1981). A ring torsional apparatus for evaluations of friction between soil and metal surface. *Geotechnical Testing Journal*, 4(4), 145–152. <https://doi.org/10.1520/GTJ10909J>
- Kulhavy, F. H. (1984). Limiting tip and side resistance—Fact or fallacy. In I. R. Meyer (Ed.), *Analysis and design of pile foundation* (pp. 80–88). ASCE.
- Mazurkiewicz, B. K. (1972). Test loading of piles according to Polish regulations. *Royal Swedish Academy of Engineering Sciences Commission on Pile Research*, Stockholm.
- Potyondy, J. G. (1961). Skin friction between various soils and construction materials. *Geotechnique*, 11(4), 339–353. <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.4.339>
- Pulat, Ö. (2024). *Kazık taşıma kapasitesinin statik formüller, nümerik analiz ve yükleme deneyleri kullanılarak belirlenmesi üzerine bir çalışma* [Master's thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Rybak, J., & Krol, M. (2018). Limitations and risk related to static capacity testing of pile—Unfortunate case studies. *MATEC Web of Conferences*, 146. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20171460001>
- Samanta, M., Hazarika, H., & Yasufuku, N. (2018). Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surfaces. *Geomechanics and Engineering*, 14(4), 387–398. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.4.387>
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Tiwari, B., & Al-Adhadh, M. (2014). Influence of relative density on static soil-structure frictional resistance of dry and saturated sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(2), 411–427. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9720-4>
- Toğrol, E. (1970). *Kazıklı temeller*. Temel Araştırma A.Ş. Yayınları No. 1. İstanbul.
- Tomlinson, M. J. (2004). *Pile design and construction in practice*. E & FN Spon.
- Tomlinson, M., & Woodward, J. (2006). *Pile design and construction practice* (5th ed.). CRC Press.
- U.S. Department of Navy. (1986). *NAVFAC Engineering Manual (EM 7.02)*.

- Ünküp, L. (2024). *Vida kazık kapasitelerinin arazi deneyleri ve sayısal analizlerle belirlenmesi* [Master's thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi].
- Yankı, O. (2015). *İki yönlü statik yükleme deneyi ve nümerik analizlerle kazık davranışının incelenmesi* [Master's thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Yenginar, Y. (2014). *Kazıklı temellerde grup etkisinin model deneylerle araştırılması* [Master's thesis, Selçuk Üniversitesi].