

Yanal Yüklü Kısa Kazıkların Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

Erdal UNCUOĞLU*
Mustafa LAMAN**

ÖZ

Bu çalışmada, kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazıkların zemin yüzeyi üzerinden belirli bir yükseklikte uygulanan yanal yük etkisindeki davranışları araştırılmıştır. Bu amaçla, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda, bir seri küçük ölçekli model deney çalışması yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda; kazık boyu, kazık çapı, kazık en kesit geometrisi ve kazık malzemesinin yanal yük taşıma kapasitesine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, zemin sıklığının yanal yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte; mevcut analitik yöntemlerde kullanılan eşdeğer dairesel alan kabulü ile özellikle gevşek kum zemin durumunda muhafazakar yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yanal yük, kısa kazık, model deney, kum zemin

ABSTRACT

Experimental Investigation of the Behaviour of the Laterally Loaded Short Piles

In this study, the behaviour of short rigid piles founded in sand subjected to a lateral load applied at a certain height above sand surface has been investigated. For this purpose, a series of small-scale model tests have been conducted both in loose and dense sand conditions. In the experimental studies, the effects of pile embedment length, pile diameter, the geometry of pile's cross-section and pile material on the lateral load capacity have been explored. The results obtained from experimental studies indicate that the relative ground density significantly affect the lateral load capacity. However, the equivalent circular area assumption used by existing analytical approaches produces conservative lateral load capacities, especially in loose sand conditions.

Keywords : Lateral load, short pile, model test, sand

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11.08.2010 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2013 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri - erdal@erciyes.edu.tr

** Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana - mlaman@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Yüksek gerilim hattı kuleleri, otobanlarda yolun üst kısmında belirli bir yükseklikte yer alan işaret ve bilgilendirme levhaları ile trafik ışıklarını taşıyan köprü veya konsol tipi direkler ile büyük reklam panolarını taşıyan direkler için kullanılan temel sistemleri esas olarak zemin yüzeyi üzerinden oldukça yüksekte etkiyen yanal yüklere karşı koyacak şekilde tasarlanmalıdır. Büyük devrilme momentlerine maruz bu tip yapıların temel sistemleri rölatif olarak küçük sayılan düşey ve yatay kuvvetlere de maruzdurlar. Bahsedilen yapılar için temel sistemi olarak, genellikle, rijit kısa kazık temeller kullanılmaktadır.

Kısa kazıklar, narin yapılı uzun flexible kazıkların aksine çapları veya genişlikleri büyük ancak gömülü uzunlukları küçük olan oldukça rijit yapı elemanlarıdır.

Yanal yüke maruz kazıkların davranışı üç boyutlu ve non-lineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup, zeminin gerilme-deformasyon davranışı (zeminin kayma mukavemeti, elastisite modülü ve hacim değiştirme karakteri) ve zemin-kazık ara yüzey davranışından önemli derecede etkilenmektedir. Bununla birlikte; yanal yüklü kazık temellerde yük-transfer mekanizması son derece karmaşık olup aksenel yüke maruz kazıkların davranışı kadar iyi anlaşılammıştır [1, 2]. Yanal yüke maruz rijit kısa kazık probleminin çözümü birçok parametrenin dikkate alınmasını gerektirdiğinden problemin çözümü ile ilgili kesin sonuç veren genel bir çözüm tekniği hala geliştirilememiştir.

Literatürde, yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışları ile ilgili olarak yapılmış küçük ölçekli laboratuvar (1g) ve santrifüj (Ng) model deney çalışmaları sınırlı sayıdadır [3,4,5,6,7,8,9,10,11]. Bu çalışmaların çoğunluğunda kazık boyu, zemin sıklığı ve zemin yüzeyi profilinin yanal yük taşıma kapasitesine etkileri araştırılmış bununla birlikte yanal zemin basınçlarının kazık uzunluğu boyunca dağılımı incelenmiştir. Shen ve ark. [3] tarafından yapılmış olan çalışmada; düz ve şevli zemin yüzeyine sahip kum ve siltli kil zeminler içerisinde yer alan fore kazıkların davranışları donatılmış model rijit kazıklar üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar model deneyleri ile araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda; kazık boyu, şev eğimi, yükleme doğrultusu ve model kazığın şev tepesine olan uzaklığı gibi parametrelerin yanal yük taşıma kapasitesine etkileri incelenmiş ve farklı yanal yük değerlerinde kazığın uzunluğu ve çevresi boyunca kazığa etkiyen yanal zemin basınçları ölçülmüştür. Yalçın ve Meyerhof [4] yaptıkları çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan model rijit kazıklar ile küçük kazık gruplarının düşey, yatay ve eğik yükleme etkisi altındaki davranışlarını model deneyler yaparak araştırmışlardır. Deneyler, üniform ve tabakalı kum zemin durumlarında gerçekleştirilmiştir. Model rijit kazıklar zemin içerisine hem çakma yoluyla hem de gömülü halde olmak üzere iki farklı yöntem ile yerleştirilmiş ve kazığın zemine yerleştirilme yönteminin kazık taşıma gücüne etkileri incelenmiştir. Prasad ve Chari [5], kum zemin içerisinde yer alan donatılmış model rijit kazıklar üzerinde laboratuvar model deneyleri yapmışlardır. Deneylerde, kazık uzunluğu ve kazık genişliği boyunca zemin tarafından kazığa etkitilen yanal zemin basınçları ölçülmüştür. Çalışma sonucunda; zemin özellikleri ve kazık geometrisine dayalı zemin basınç dağılımı tanımlanmış ve bu basınç dağılımından hareketle yanal yük taşıma kapasitesinin tahmin edildiği kapsamlı bir yöntem önerilmiştir. Dickin ve Nazir [6] yapmış oldukları çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan kısa kazık temellerin büyük devrilme momentleri etkisi altındaki davranışlarını hem santrifüj hem de laboratuvar model deneyleri yaparak araştırmışlardır. Deneyler hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; zemin sıklığı, çekme kuvveti uygulama yüksekliği, kazık boyu ve zemin yüzeyi profilinin kısa kazıkların moment taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Dickin ve Laman [7], kum zemin içerisinde yer alan farklı boyutlara sahip dikdörtgen kesitli kısa ayak temeller üzerinde santrifüj model deneyleri yaparak ayak temellerin moment taşıma kapasitelerini araştırmışlardır. Deneyler hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiş ve ayak temelin en kesit uzunluğu ile boyunun moment taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Santrifüj model deneylerdeki prototip boyutlar kullanılarak üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sawwaf [8] tarafından yapılmış olan çalışmada; geogrid tabakaları ile güçlendirilmiş kumlu bir şev yakınında yer alan düşey bir kazığın yanal yük etkisi altındaki davranışının güçlendirilmiş şevden ne şekilde etkilendiğini belirlemek amacı ile bir seri laboratuvar model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda; geogrid parametreleri, kum zeminin sıklığı, kazığın şev tepesine uzaklığı ve kazık boyunun yanal yük taşıma kapasitesine etkileri araştırılmıştır. Hu ve ark. [9] tarafından yapılan çalışmada; ankastre kollu direk yapılarının temeli olarak görev yapan fore kazıkların yatay yük ve burulma momenti etkisindeki davranışları santrifüj model deney çalışmaları yapılarak araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; yanal yüklenmiş bir fore kazığın aynı zamanda bir burulma momenti etkisine de maruz kalması durumunda yanal yük taşıma kapasitesinde %50'lere varan azalmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Bununla birlikte; kazığın burulma momenti taşıma kapasitesinin yanal yükün varlığından etkilenmediği görülmüştür. Laman ve Uncuoğlu [10], farklı bir yaklaşım uygulayarak yapay sinir ağları yöntemi ile kısa kazık temellerin moment taşıma kapasitelerini tahmin etmişlerdir. Ağ modellerinin eğitilmesi ve test edilmesi işlemlerinde kullanılan veriler çok sayıdaki santrifüj model deney çalışmasından elde edilmiştir. Çalışmada; ağ modeli için seçilen giriş parametrelerinin çıkış parametresi olan moment taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve sonuç olarak kısa kazık temelin moment taşıma kapasitesinin kazık temelin genişliği ve boyunu ifade eden giriş parametrelerinden önemli derecede etkilendiği görülmüştür. Uncuoğlu ve Laman [11]; yapmış oldukları çalışmada, gevşek ve sıkı durumdaki kum tabakalarından oluşan iki tabakalı kum zemin içerisinde yer alan yanal yüklü rijit kısa kazıkların davranışlarını bir seri model deney çalışması yaparak araştırmışlardır. Bununla birlikte; yapmış oldukları üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri ile kum zemine ait elastisite modülü ve dilatasyon açısı parametreleri ile kazık-zemin ara yüzey davranışının yanal yük taşıma kapasitesine etkilerini incelemişlerdir. Tabakalı kum zemin durumlarındaki yanal yük taşıma kapasiteleri Brinch-Hansen [12] ve Meyerhof ve ark. [13] tarafından önerilen yöntemler kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler deneysel ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; deneysel çalışmaların çoğunlukla çelik ya da alüminyumdan imal edilmiş dairesel en kesitli model kazıklar üzerinde gerçekleştirildikleri görülmektedir. Bununla birlikte; aynı çaptaki model kazıkların farklı gömülü uzunluk değerlerinde yapılan deneylerle de kazık boyunun etkisi araştırılmaktadır. Bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan rijit kısa kazıkların yanal yük etkisi altındaki davranışlarını araştırmak amacı ile bir seri küçük ölçekli model deney çalışması yapılmış ve elde edilen sonuçların gelecekteki çalışmalar için yararlı bir birikim sağlaması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda gerçekleştirilmiştir. Yapılan model deney çalışmalarında; farklı en kesit geometrisine sahip model kazıklar üzerinde

gerçekleştirilen yanal yükleme deneyleri ile kazık en kesit geometrisinin yanal yük taşıma kapasitesine etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte; farklı malzemelerden imal edilmiş model kazıkların, aynı koşullar altında, yanal yük etkisindeki davranışları araştırılmıştır. Aynı çapta farklı gömülü uzunluklara sahip model kazıklar ile aynı boyda farklı çaplara sahip model kazıklar üzerinde yapılan deneylerle de kazık çapı ve kazık boyundaki değişimden hangisinin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde daha etkili olduğu incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar iç ölçüleri 960 mm × 480 mm × 500 mm (uzunluk × genişlik × yükseklik) olan dikdörtgen kesitli kasa içerisinde gerçekleştirilmiştir. Deney kasasının iskeleti 5 mm kalınlıktaki çelik profilden olup yan yüzeyleri 10 mm kalınlıktaki cam, ön ve arka yüzeyleri ile alt tabanı ise 20 mm kalınlıktaki ahşap malzemeden oluşmaktadır. Deney kasası boyutları sınır etkisini minimize edecek yeterli büyüklükte seçilmiştir. Kum zemin ve kasa iç yüzeyleri arasında oluşabilecek sürtünmenin en aza indirilebilmesi için kasa iç kısmında yer alan cam ve ahşap yüzeyler cilalanarak pürüzsüz hale getirilmiştir.

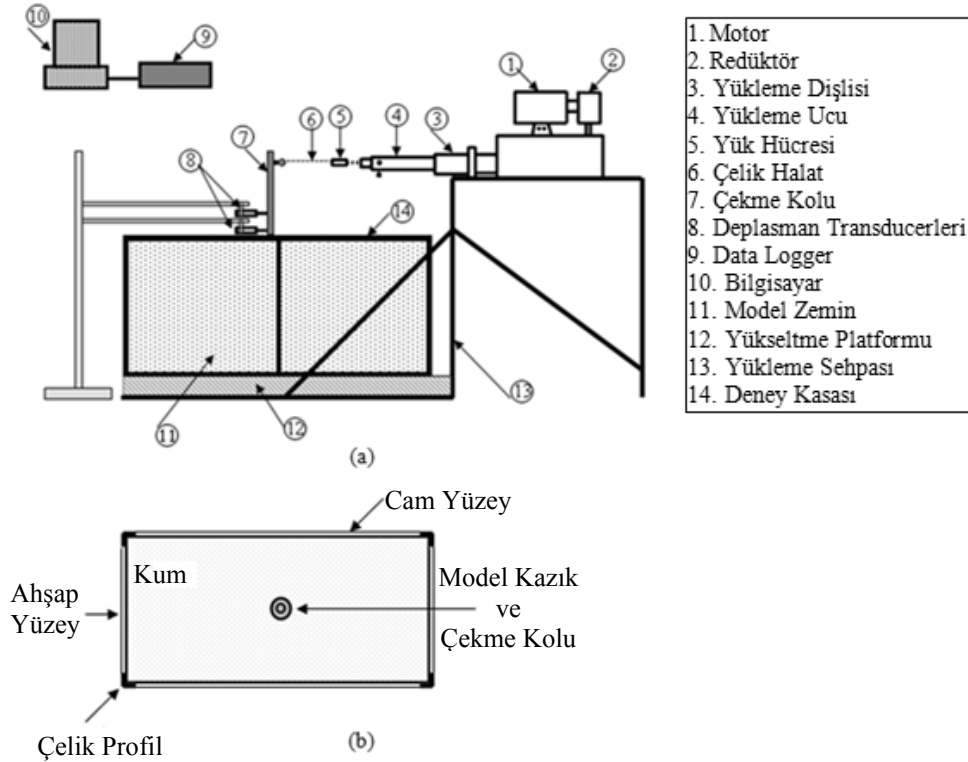
Yanal yük, zemin yüzeyi üzerinde 300 mm yükseklikten çekme kuvveti olarak uygulanmıştır. 1/20 ölçekli tasarlanan model düzeneğe seçilmiş olan bu yükseklik prototip boyutlarda 6 m'lik bir yüksekliği temsil etmektedir. Bu yükseklik değeri; karayolları kenarında, dışında veya üzerinde inşa edilecek olan levhalar, ışıklar ve yüksek gerilim enerji nakil hatları için kullanılan ilgili yönetmelikte [14] belirtilen yükseklik değeri ile de uyumludur.

Yanal çekme kuvveti bir ucu elektrik motoru tarafından hareket ettirilen yükleme dişlisine diğer ucu da kazık başına vidalanmış çekme koluna bağlı olan bir çelik halat yardımı ile uygulanmıştır. Yapılan deneylerin tamamında yanal yük uygulama hızı 1 mm/dak. dır. Deneysel çalışmalar sırasında model kazıklara etkiyen yük değerleri 1 kN kapasiteli bir yük hücresi ile, çekme kolunun yanal yük etkisindeki ötelenmeleri ise zemin yüzeyi üzerinden 26 mm ve 86 mm yüksekliklerde yer alan deplasman transducerleri ile ölçülmüştür. Yük hücresi ve deplasman transducerleri kullanılarak elde edilen veriler ADU veri toplama cihazına aktarılmış ve daha sonra DIALOG programı yardımı ile sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Yanal yükleme deneyleri zemin yüzeyi üzerinden 86 mm yükseklikte yer alan deplasman transducerinde 10 mm'lik yanal ötelenme oluşuncaya kadar devam ettirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmiştir.

Deneysel çalışmalarda model kazık olarak çelik, alüminyum ve derlin malzemeden imal edilen model kısa kazıklar kullanılmıştır. Malzeme etkisinin araştırıldığı deneyler dışında çalışmalar çelik model kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yanal yük, model kısa kazıklara vidalanmış bir çekme kolu aracılığı ile uygulanmış olup, çekme kolu olarak da çelik, alüminyum ve derlin malzemeden imal edilen çubuklar kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan model kısa kazıklara ve çekme kollarına ait çap (D), gömülü uzunluk (L), birim hacim ağırlık (γ), elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda model zemin olarak Devlet Su İşleri (DSİ) Adana Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen Çukurova Bölgesi Çakıt dere yatağından alınmış kum

numuneler kullanılmıştır. Kum numunelere ait dane çapı dağılımı eğrisi Şekil 2’de, elek analizi sonuçları da Çizelge 2’de verilmiştir. Model kum zeminin sınıfı dane çapı dağılımı eğrisinden yararlanılarak, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre kötü derecelenmiş ince ve temiz kum (SP) olarak tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalar hem gevşek hem de sıkı halde hazırlanmış kum zeminde gerçekleştirilmiştir. Deney kumunun dane birim hacim ağırlığı (γ_s), gevşek ve sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlıkları (γ_k) ve gevşek ve sıkı haldeki boşluk oranı değerleri Çizelge 3’de özetlenmiştir.



Şekil 1 - Deney düzeneği (a) yan görünüş (b) plan görünüşü

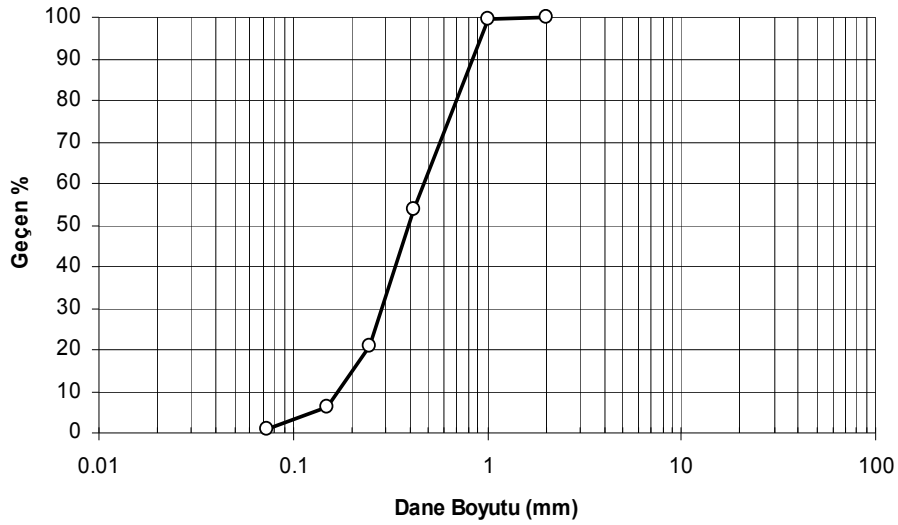
Deney kumunun gevşek ve sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlıklarını belirlemek için 423mmx423mm boyutlarında ve 78mm yüksekliğindeki kap içerisinde rölatif sıklık deneyleri yapılmıştır. Gevşek haldeki kuru birim hacim ağırlık değeri belirlenirken kum numune kap içerisine herhangi bir sıkıştırmaya tabii tutulmadan yerleştirilmiştir. Daha sonra zemin yüzeyi düzeltilerek yüzeyin düzlüğü su terazisi ile kontrol edilmiştir. İçerisinde gevşek kum zemin bulunan kap tartılarak ağırlığı bulunmuştur. Sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlık değeri elde edilirken, kum numune kap içerisine 5 tabaka halinde serilerek yerleştirilmiş ve her bir tabaka serildikten sonra titreşim cihazı ile sabit bir enerji verilerek sıkıştırılmıştır. Tabakaların her birinde uygulanan sıkıştırma enerjisinin aynı derecede

Yanal Yüklü Kısa Kazıkların Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

olmasına özen gösterilmiştir. Son tabaka serilip sıkıştırıldıktan sonra zemin yüzeyi düzeltilmiş ve su terazisi ile yüzeyin düzlüğü kontrol edilmiştir. Deneyler gevşek ve sıkı durumda 5'er kere tekrarlanmış ve elde edilen ağırlık değerlerinin ortalaması alınmıştır.

Çizelge 1 - Deneysel çalışmalarda kullanılan kazık ve çekme kolu özellikleri

	Malzeme	D (mm)	L (mm)	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν
Model Kısa Kazık	Çelik	50	200	77	210000	0.25
	Alüminyum	50	200	27	70000	0.33
	Derlin	50	200	14	3100	0.35
Çekme Kolu	Çelik	25	330	77	210000	0.25
	Alüminyum	25	330	27	70000	0.33
	Derlin	33	330	14	3100	0.35



Şekil 2 - Model kum zeminin dane çapı dağılımı eğrisi

Deneylerde kullanılan kumun kayma mukavemetini belirlemek amacı ile kum numuneler üzerinde hem kesme kutusu, hem de konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Hem gevşek hem de sıkı durumdaki kum numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde numuneler, $\sigma_1 = 28$ kPa, 56 kPa ve 112 kPa değerindeki normal gerilmeler altında yatay yönde kesmeye tabii tutulmuşlardır. Kesme kutusu deneyleri

sonucunda kum zeminin gevşek haldeki kayma mukavemeti açısı $\phi' = 39.27^\circ$ olarak belirlenirken sıkı haldeki kayma mukavemeti açısı $\phi' = 45.67^\circ$ olarak elde edilmiştir.

Çizelge 2 - Elek analizi sonuçları

Granülometri Parametreleri	Birim	Değer
Kaba Kum Yüzdesi	%	0.0
Orta Kum Yüzdesi	%	46.40
İnce Kum Yüzdesi	%	53.60
Efektif Dane Çapı, D_{10}	mm	0.18
D_{30}	mm	0.30
D_{60}	mm	0.50
Üniformluk Katsayısı, C_u	-	2.78
Derecelenme Katsayısı, C_c	-	1.00
Zemin Sınıfı	-	SP

Çizelge 3 - Deneysel kumunun özellikleri

Parametreler	Birim	Değer
Dane Birim Hacim Ağırlığı, γ_s	kN/m ³	26.800
Gevşek Haldeki Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{kmin}	kN/m ³	15.030
Sıkı Haldeki Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{kmaks}	kN/m ³	17.060
Gevşek Halde Boşluk Oranı, e_{maks}	-	0.783
Sıkı Halde Boşluk Oranı, e_{min}	-	0.570

Gevşek ve sıkı halde hazırlanan kum numuneler üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde numunelere $\sigma_3 = 50$ kPa, 100 kPa ve 150 kPa değerinde hücre basınçları uygulanmıştır. Yapılan konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyleri sonucunda gevşek kum zeminin kayma mukavemeti açısı $\phi' = 38^\circ$ sıkı kum zemininki ise $\phi' = 44^\circ$ olarak elde edilmiştir.

Kum zemin, Fotoğraf 1' de görüldüğü gibi, hem gevşek hem de sıkı durumda, deney kasası içerisine 3 cm'lik tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Deney kasasının iç yüzeyleri 3 cm aralıklı yatay çizgiler ile bölünerek ölçeklendirilmiştir. Deneylerin başlangıcında her bir tabaka için gerekli olan kum ağırlığı hesaplanıp tartılarak hazırlanmıştır. Gevşek kum zemin durumunda, 3 cm'lik tabaka için gerekli olan kum miktarı kumun sıkışmasının önlenmesi için mümkün olan en yakın mesafeden deney kasası içerisine boşaltılmış ve

Yanal Yüklü Kısa Kazıkların Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

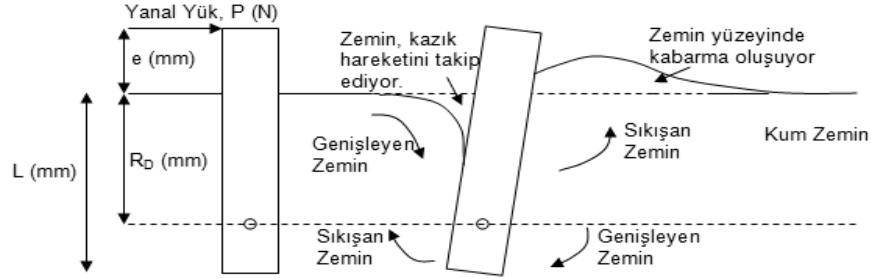
sonrasında kasa yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Sıkı kum zemin durumunda ise, anlatılan işlemlere ilave olarak zemin tabakası titreşim cihazı ile kontrollü bir şekilde sıkıştırılmış ve konulan kum zeminin gerekli tabaka yüksekliği seviyesine gelmesi sağlanmıştır. Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda yerleştirilen her bir tabakanın kalınlığı cam yüzeyler üzerinde bulunan ve tabaka sınırlarını belirleyen yatay çizgilere göre kontrol edilmiştir. Kazık ucunun oturacağı zemin yüzeyi seviyesine ulaşıncaya kadar kum zemin kasa içerisine belirtilen yol izlenerek doldurulmuştur. Bu seviyeye gelindiğinde, kazık sabitleyici aparat deney kasası profiline yerleştirilmiş ve ardından da model kazık kasa içerisine konmuştur. Model kazığın dikliği hem kasa uzun kenarı hem de kasa kısa kenarı doğrultusunda su terazisi ile kontrol edildikten sonra sabitleyici aparat yardımı ile model kazığın hareket etmesi önlenmiştir. Daha sonra, model kazığın üst kotu seviyesine kadar kum zeminin deney kasası içerisine yerleştirilmesi işlemine devam edilmiştir. Kazığın yerleştirilmesinden sonra serilen kum tabakalarında özellikle kazık çevresinde zeminin yerleştirilmesine azami özen gösterilmiş ve her bir tabakanın yerleştirilmesinin ardından kazığın dikliği kontrol edilmiştir.



Fotoğraf 1 - Model kum zeminin deney kasasına yerleştirilmesi

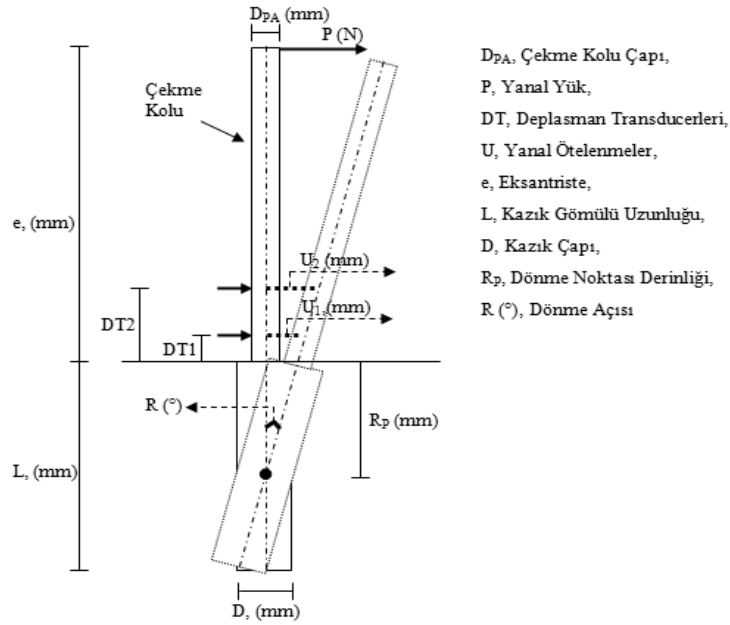
3. YANAL YÜKE MARUZ RİJİT KISA KAZIĞIN DAVRANIŞI

Rijit kısa bir kazığın yanal yük etkisi altındaki davranışı ve göçme mekanizması Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi zemin yüzeyi üzerinden e kadar yükseklikte etkiyen bir P yanal yüküne maruz rijit kısa kazık uzunluğu boyunca herhangi bir derinlikte yer alan bir nokta etrafında dönerek kendisini çevreleyen zemine yaslanmaktadır. Bunun sonucunda; dönme noktasının üst tarafında kazık ön yüzüne ve dönme noktasının alt tarafında da kazık arka yüzüne bitişik konumda yer alan zemin kütlesi sıkışma, dönme noktasının üst tarafında kazık arka yüzüne ve dönme noktasının alt tarafında da kazık ön yüzüne bitişik konumdaki zemin kütlesi ise genişleme davranışı göstermektedir. Zeminin sıkışma ve genişleme hareketi zeminde aktif ve pasif durum olarak adlandırılan sınır basınç değerlerine ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Göçme, dönme noktası üst tarafında kazık ön yüzüne ve dönme noktası alt tarafında da kazık arka yüzüne etkiyen yanal zemin basınçlarının değerinin zeminin pasif basınç değerine ulaşması ile meydana gelir.



Şekil 3 - Yanal yüke maruz rijit kısa kazığın davranışı (Broms, 1964)

DeneySEL çalışmalar sırasında, uygulanan yanal yük etkisinde kazık başında meydana gelen yanal ötelenmeler, kazık başı dönme açıları ve dönme noktası derinlikleri Şekil 4'de gösterildiği gibi zemin yüzeyi üzerinden 26 mm ve 86 mm yüksekliklerde yer alan ve uygulanan yanal yük doğrultusuna paralel konumda bulunan iki deplasman transduceri tarafından ölçülmüş veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar, rijit kısa kazığın yanal yük etkisinde bir bütün olarak döndüğü kabul edilerek kazığın yanal yük etkisinde dönmüş durumdaki eksenini ile yanal yük uygulanmadan önceki eksenini kesştirilerek elde edilen üçgenlerin benzerliğinden faydalanılarak yapılmıştır.



Şekil 4 - Model deney geometrisi

4. DENEY SONUÇLARI

Model kısa kazıkların yanal yük etkisi altındaki davranışları 25 adet küçük ölçekli model deney çalışması yapılarak araştırılmıştır. Hem gevşek hem de sıkı durumda hazırlanmış kum zemin içerisinde yer alan model kazıklar üzerinde gerçekleştirilen yanal yükleme deneylerinde; kazık boyu, kazık çapı, kazık en kesit geometrisi, kazık malzemesi ve zemin sıklığının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yanal yüke maruz kazık temellerin tasarımındaki ana unsur; genellikle, kazığın nihai yanal yük taşıma kapasitesinden ziyade, kazık başında meydana gelen maksimum yanal ötelenme miktarıdır. Bu yüzden; kazık başında, kazık çapının %10'u kadar bir yanal ötelenmeye neden olan yanal yük değeri nihai yanal yük taşıma kapasitesi olarak tanımlanmıştır.

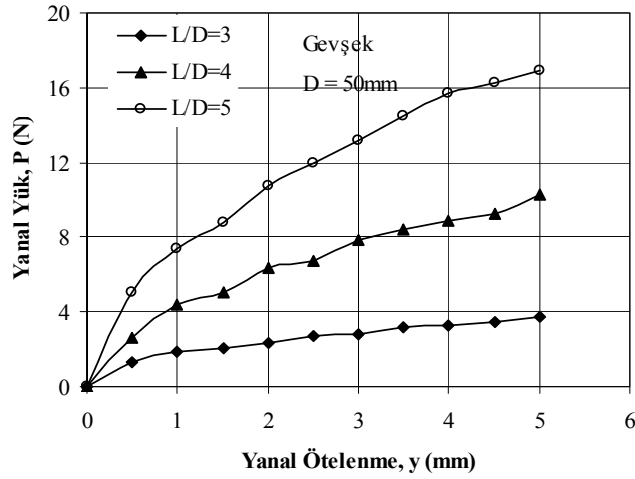
4.1. Kazık Boyu

Kazığın boyu sadece kazığın davranış şeklini (rijit ya da esnek) değil, aynı zamanda kazığın yanal yük taşıma kapasitesine de etkilemektedir. Yanal yük etkisine maruz rijit kısa bir kazığın davranışı üzerinde kazık boyunun (L) etkisi bir seri model deney çalışması yapılarak araştırılmıştır. Kazık çapı (D) sabit tutularak kazık boyunun değiştirildiği deneylerde D=50 mm çapında ve L=150, 200 ve 250 mm uzunluklarında dolu kesitli çelik model kazıklar üzerinde L/D oranının 3, 4 ve 5 değerleri için hem gevşek hem de sıkı durumda hazırlanmış kum zeminde yanal yükleme deneyleri yapılmıştır. Farklı L/D oranları için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi şeklinde gevşek ve sıkı kum zemin durumları için sırası ile Şekil 5 ve 6'da görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumlarında farklı L/D oranları için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri, kazık başı dönme açıları ve dönme noktası derinlikleri Çizelge 4'de özetlenmiştir.

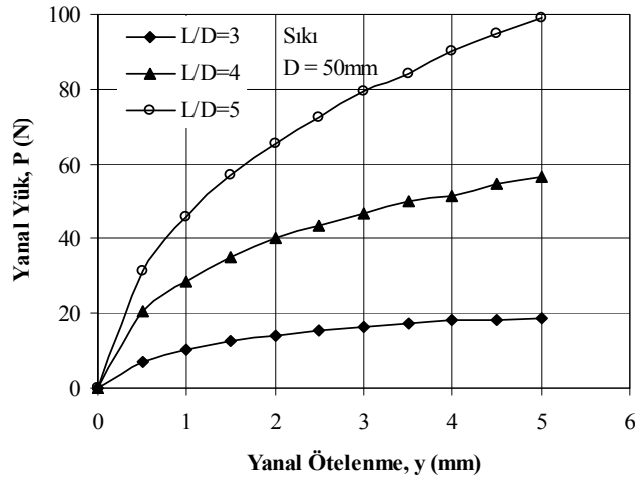
Şekil 5 ve 6'da görüldüğü gibi hem gevşek hem de sıkı kum zemindeki yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. L/D oranının büyümesi ile birlikte model kazığın ağırlığı da L/D değerleri arasındaki artım oranına eşit bir oranla artmaktadır. Bu durum; devrilme momenti etkisine maruz rijit kısa kazıkların stabilitesini artırıcı yönde bir etki yapmaktadır. Çizelge 4'den de görüldüğü gibi kazık boyunun artması hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda kazığın yanal yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Gevşek kum zemin durumunda L/D=3 ile L/D=4 arasında yanal yük taşıma kapasitesi L/D=3 durumundaki değerine göre %175 oranında artarken, L/D=4 ile L/D=5 arasında L/D=4 durumuna göre %64 oranında artmıştır. Sıkı kum zemin durumunda ise bu oranlar L/D=3 ile L/D=4 arasında %200 iken L/D=4 ile L/D=5 arasında da %75 dir. Görüldüğü gibi kazık boyunun artması yanal yük taşıma kapasitesine sıkı kum zemin durumunda gevşek kum zemin durumuna göre daha fazla katkı yapmaktadır.

Kazık boyunun artması ile birlikte hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda aynı kazık başı yanal ötelenme değeri için kazık başı dönme açısı değerleri azalmaktadır. Diğer taraftan, kum zeminlerde elastisite modülü derinlikle beraber doğrusal olarak artmamasına rağmen hesaplamalar elastisite modülünün derinlik ile doğrusal olarak arttığı kabulüne göre yapılmaktadır [16, 17]. Kazık boyunun artması ile birlikte kazık uzunluğu boyunca kazığı çevreleyen zemin daha rijit bir davranış sergileyecek ve kazığın yanal yöndeki hareketine karşılık daha büyük bir direnç gösterecektir. Bununla birlikte; kazığın etkileşim göstereceği

ve sıkıştırmaya çalışacağı zemin kütlesi hacminin büyümesi de kazığın yanal yük taşıma kapasitesini artıracaktır.



Şekil 5 - Gevşek kum zeminde yük-deplasman ilişkileri



Şekil 6 - Sıkı kum zeminde yük-deplasman ilişkileri

Bütün L/D oranları için sıkı kum zemin durumunda gevşek kum zemindeki yanar yük taşıma kapasitesi değerlerinin ortalama 5.40 katı büyüklüğünde yanar yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir. Kazık boyunun artması ile zemin sıkılığının yanar yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi de artmaktadır.

Çizelge 4 - Kazık boyunun yanal yük taşıma kapasitesine etkisi

		L/D = 3	L/D = 4	L/D = 5
Gevşek Kum	R _D (%)	77	77	78
	R (°)	2.45	1.85	1.44
	P (N)	3.74	10.30	16.95
Sıkı Kum	R _D (%)	74	75	76
	R (°)	2.56	1.89	1.49
	P (N)	18.82	56.64	99.15

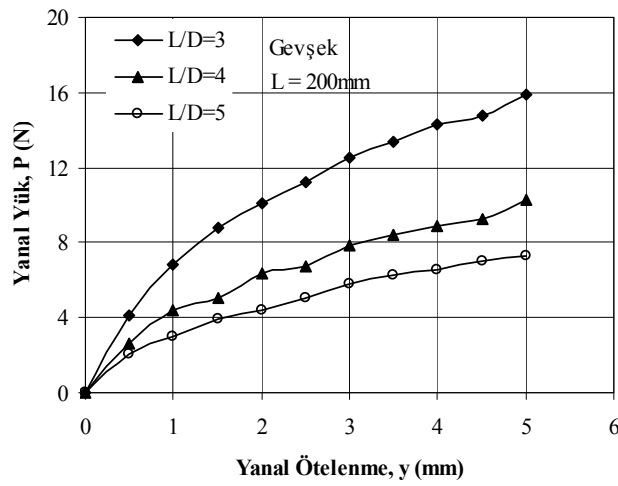
4.2. Kazık Çapı

Kazığın yanal yöndeki hareketine karşılık zeminin göstermiş olduğu direnç iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi; kazığın ön yüzüne etkiyen normal reaksiyon direnci ikincisi ise kenar yüzeylerde etkili olan kayma direncidir. Kazığın yanal yöndeki hareketi sonucu zeminde meydana gelecek göçme kaması kazık çapındaki değişimden etkilenmektedir. Bu nedenle; yanal yüke maruz rijit kısa kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde kazık çapının etkisi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda yapılmış olan bir seri model deney çalışması ile araştırılmıştır.

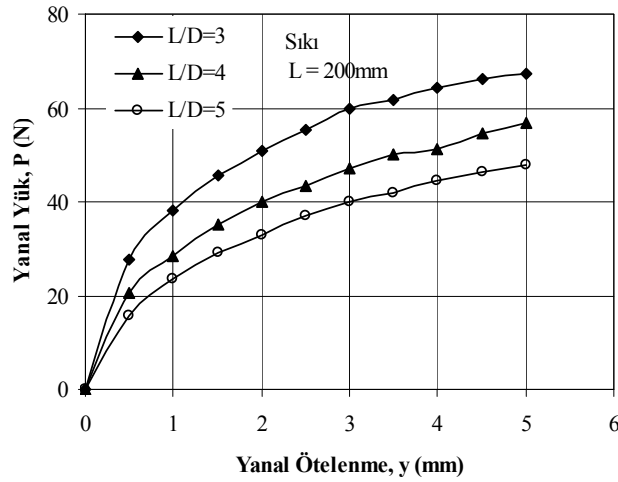
Kazık boyu sabit tutularak kazık çapının değiştirildiği deneylerde L=200 mm boyunda ve D=40, 50 ve 66.60 mm çaplarında dolu kesitli çelik model kazıklar kullanılarak L/D oranının 3, 4 ve 5 değerleri için yanal yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumu için yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi şeklinde sırası ile Şekil 7 ve 8'de sunulmuştur. Farklı L/D oranları için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri, kazık başı dönme açıları ve dönme noktası derinlikleri de Çizelge 5'de verilmiştir.

Şekil 7 ve 8'den görüldüğü gibi hem gevşek hem de sıkı kum zemindeki yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri çok küçük yanal ötelenme değerlerinde dahi doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Bununla birlikte; sıkı kum zeminde yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin daha rijit olduğu görülmektedir. Çizelge 5'den de görüldüğü gibi, gevşek kum zemin durumunda, L/D oranı 5 değerinden 4 değerine küçüldüğünde kazık çapının değeri %25, kazık ağırlığı ise %57 oranında artmaktadır. L/D=4 durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi L/D=5 durumundaki yanal yük taşıma kapasitesinden %40 daha fazladır. Benzer şekilde; L/D oranı 4' den 3' e indiğinde ise, kazık çapı %33 kazık ağırlığı ise %79 oranında artmakta ve L/D=3 durumunda L/D=4 durumundakinden %54 daha büyük bir yanal yük taşıma kapasitesi elde edilmektedir. Sıkı kum zemin durumunda da kazık çapının artması kazığın yanal yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Öyle ki; L/D=4 durumundaki yanal yük taşıma kapasitesi L/D=5 durumundakinden ve L/D=3 durumundaki yanal yük taşıma kapasitesi de L/D=4 durumundakinden %18 daha fazla elde edilmiştir. Kazık çapındaki artış kazığın yanal yük taşıma kapasitesine gevşek kum zemin durumunda daha fazla katkı sağlamaktadır.

Kazık çapının artmasına bağlı olarak kazığın zemin ile temas eden çevre yüzey alanı ve kazığın yanal yöndeki hareketi sonucu zeminde oluşan göçme kamasının hacmi artacaktır. Bunun sonucu olarak kazık ön yüzüne etkiyen normal reaksiyon direnci ve kenar yüzeylerde etkili olan kayma direnci değerleri de artacağından kazık çapının büyümesi ile birlikte daha büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilecektir. Kazık çapının büyümesi devirme momenti etkisine maruz rijit kısa kazıkların stabilitesini olumlu yönde etkilemekte ve özellikle gevşek kum zemin durumunda kazığın yanal yük taşıma kapasitesini belirgin şekilde artırmaktadır.



Şekil 7 - Gevşek kum zeminde yük-deplasman ilişkileri



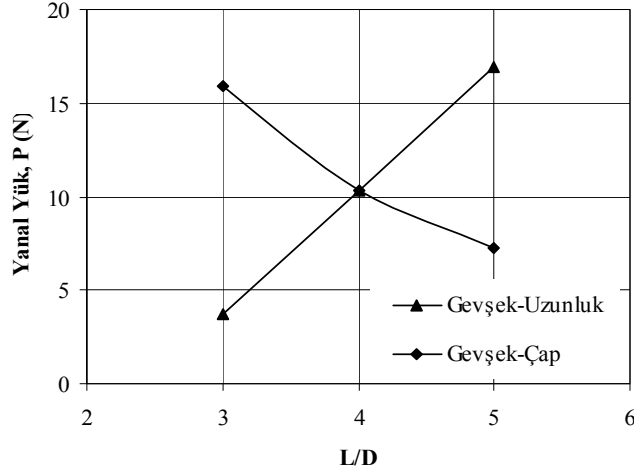
Şekil 8 - Sıkı kum zeminde yük-deplasman ilişkileri

Çizelge 5 - Kazık çapının yanal yük taşıma kapasitesine etkisi

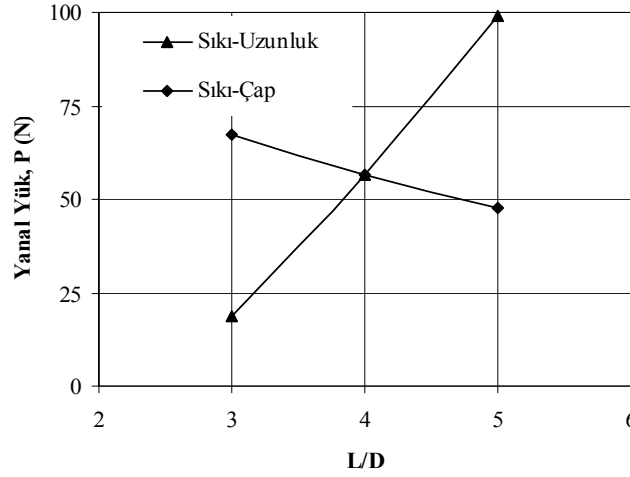
		L/D = 3	L/D = 4	L/D = 5
Gevşek Kum	R _D (%)	76	77	78
	R (°)	1.87	1.85	1.80
	P (N)	15.92	10.30	7.26
Sıkı Kum	R _D (%)	67	75	74
	R (°)	2.10	1.89	1.92
	P (N)	67.17	56.64	47.84

Kazık çapının artması ile birlikte zemin sıklığının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi de azalmıştır. Öyle ki; L/D=5 için sıkı kum zeminde elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri gevşek kum zemindekinin yaklaşık 6.60 katı iken bu oran L/D=4 için 5.50 ve L/D=3 için de 4.20 kat olarak elde edilmiştir.

L/D oranı hem kazık boyunun hem de kazık çapının değişiminden etkilenmektedir. Kazık boyu ve kazık çapındaki değişimlere bağlı olarak elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin L/D oranı ile değişimi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumu için Şekil 9 ve Şekil 10'da görülmektedir. Şekilde görülen L/D-yanal yük taşıma kapasitesi ilişkileri ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kazık boyunun artması sonucu kazığın yanal yük taşıma kapasitesinde daha büyük artışlar elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 9 - Gevşek kum zeminde L/D-yanal yük taşıma kapasitesi ilişkileri



Şekil 10 - Sıkı kum zeminde L/D-yanal yük taşıma kapasitesi ilişkileri

4.3. Kazık En Kesit Geometrisi

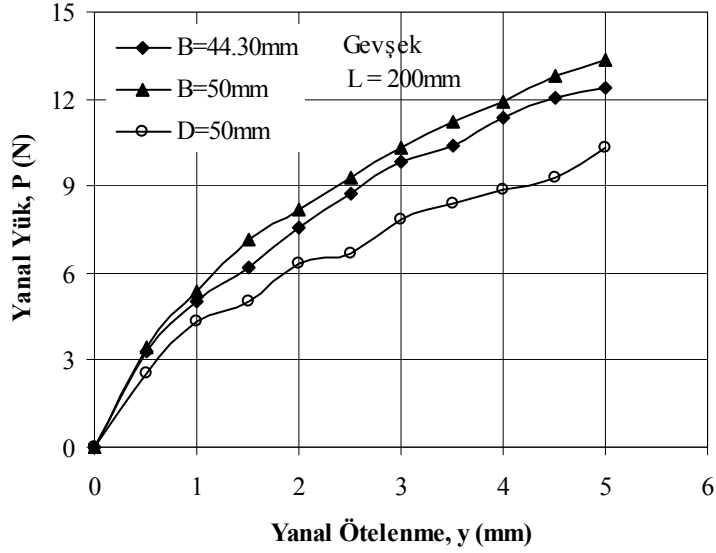
Yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların tasarımı için kullanılan mevcut analitik yöntemler [5,12,13,15]; kazığın dairesel en kesit şekline sahip olduğu ve gerilme-deformasyon ilişkisinin lineer-elastik olduğu esasına dayalı olarak hesaplama yaparlar. Tasarımcılar, farklı en kesit şekline sahip bir kazığın tasarımını mevcut analitik yaklaşımları kullanarak yapmak istediklerinde kazığın en kesit alanını eşdeğer dairesel alana dönüştürerek bu yaklaşımları uygulamaktadırlar [2].

Yanal yüke maruz kazıkların davranışı, üç boyutlu ve non-lineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Kazık-zemin ara yüzey davranışı yanal yük etkisindeki kazıkların reaksiyonları üzerinde önemli bir rol oynamaktadır [1]. Bu yüzden; kazık en kesit şeklinin yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışı üzerindeki etkisi dairesel ve kare en kesitli model kazıklar üzerinde gerçekleştirilmiş bir seri model deney çalışması ile araştırılmıştır. Deneyler hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında; eşdeğer dairesel alan kabulü ve çapa eşdeğer genişlik kabulüne dayalı olarak üç farklı model kazık kullanılmıştır. Eşdeğer dairesel alan kabulü için $B=44.30$ mm genişliğe sahip kare kazık ile $D=50$ mm çapa sahip dairesel kazığın davranışları karşılaştırılırken, çapa eşdeğer genişlik kabulü için $B=50$ mm genişliğinde kare kazık ile $D=50$ mm çapındaki dairesel kazığın davranışları karşılaştırılmıştır. Dolu kesitli çelik model kazıklar $L=200$ mm uzunluğundadır.

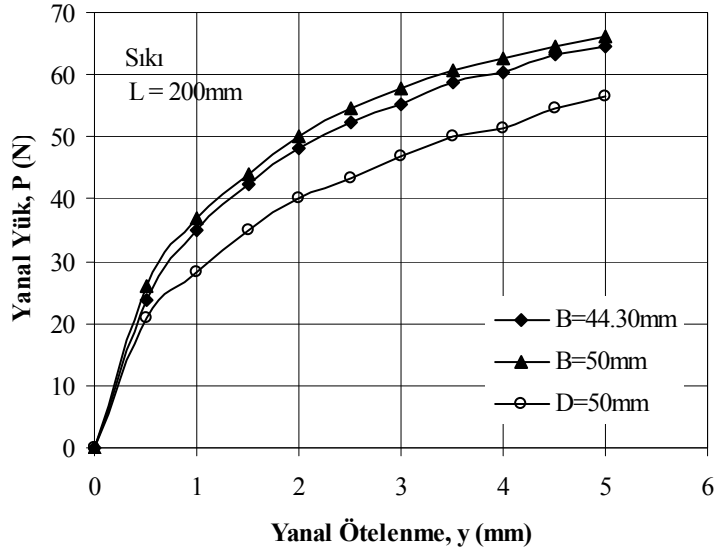
Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumu için yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi şeklinde sırası ile Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi yük-deplasman ilişkileri hem gevşek hem de sıkı kum zeminde doğrusal olmayan bir davranış sergilemekte, bununla birlikte bu doğrusal olmayan ilişki sıkı kum zemin durumunda daha belirgin olmaktadır. Yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi, gevşek kum zeminde 0.50° 'lik dönme açısına kadar sıkı kum zeminde ise 0.25° 'lik dönme

Yanal Yüklü Kısa Kazıkların Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

açısına kadar doğrusal bir davranış sergilemektedir. Yapılan deneyler sonucunda her bir durum için elde edilen dönme noktası derinlikleri, kazık başı dönme açısı değerleri ve yanal yük taşıma kapasiteleri Çizelge 6'da sunulmuştur.



Şekil 11 - Gevşek kum zeminde yük-deplasman ilişkileri



Şekil 12 - Sıkı kum zeminde yük-deplasman ilişkileri

Çizelge 6'da verilen değerler incelendiğinde; gevşek kum zeminde, eşdeğer dairesel alan kabulü için kare kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin dairesel kazığına göre %20, çapa eşdeğer genişlik kabulü için de %29 daha büyük olduğu görülmektedir. Sıkı kum zemin durumunda ise, kare kazığın yanal yük taşıma kapasitesi değerleri dairesel kazığına göre eşdeğer alan kabulü için %14, çapa eşdeğer genişlik kabulü için de %17 daha fazla elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar; kazık en kesit şeklinin özellikle gevşek kum zemin durumunda yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte; eşdeğer dairesel alan kabulünden 44.30 mm kenar uzunluklu ve çapa eşdeğer genişlik kabulünden de 50 mm kenar uzunluklu kare temeller için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri kendi aralarında karşılaştırıldığında, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda iki farklı kabul için elde edilmiş yanal yük taşıma kapasitesi değerleri arasında önemli sayılabilecek bir farkın oluşmadığı gözlenmiştir. Öyle ki; gevşek kum zemin durumunda, B=50 mm genişliğe sahip kare kazık için elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi B=44.30 mm genişliğe sahip kare kazığına göre %7 daha büyük iken bu oran sıkı kum zemin durumunda %2 olarak elde edilmiştir.

Yanal yüke maruz dairesel bir kazık yük etkisinde zemine yaslandığında ön tarafında yer alan zemin kütlelerinin bir bölümü eğrisel çevre yüzey alanından ötürü yanal yönlere kaçabilmektedir. Kare en kesitli kazıklarda zeminle temas eden yüzeyin düz olması kazık ön yüzünde bulunan zeminin yanlara kaçışını zorlaştıracaktır. Bu nedenle; yanal yük etkisinde aynı miktarda yanal ötelenme göz önüne alındığında, kare kesitli kazığın ön yüzünde etkiyen normal reaksiyon direnci ve buna bağlı olarak da kazığın yanal yük taşıma kapasitesi dairesel kazığına göre daha büyük elde edilecektir. Bununla birlikte; kare en kesitli kazığın yanal yöndeki hareketi ile birlikte zeminin yanlara kaçışı zorlaştığından dönme noktası derinlikleri dairesel kazığına göre zemin yüzeyine doğru kaymakta ve kazık başı dönme açılarının değeri de artmaktadır.

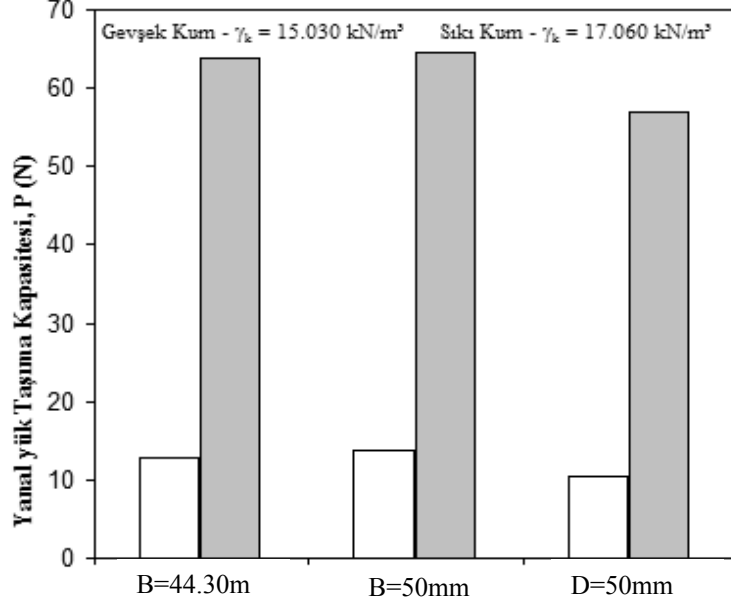
Elde edilen sonuçlar, yaygın olarak kullanılan analitik tasarım yöntemlerinde, eşdeğer dairesel alan yaklaşımının özellikle gevşek kum zeminde yer alan yanal yüke maruz kazıkların tasarımı için güvenilir sonuçlar vermediğini ortaya koymaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda göz önüne alınan kombinasyonların tamamında sıkı kum zeminde elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerleri gevşek kum zeminde elde edilmiş olan değerlerin ortalama 5 katı kadardır. Zemin sıklığının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki bu önemli etkisi Şekil 13'de farklı model kazıklar için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6 - Kazık en kesit şeklinin yanal yük taşıma kapasitesine etkisi

		B = 44.30mm	B = 50mm	D = 50mm
Gevşek Kum	R _D (%)	72	74	77
	R (°)	1.96	1.92	1.85
	P (N)	12.41	13.34	10.30
Sıkı Kum	R _D (%)	68	62	75
	R (°)	2.09	2.29	1.89
	P (N)	64.60	66.14	56.64

Yanal Yüklü Kısa Kazıkların Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi



Şekil 13 - Zemin sıklığının yanal yük taşıma kapasitesine etkisi

4.4. Kazık Malzemesi

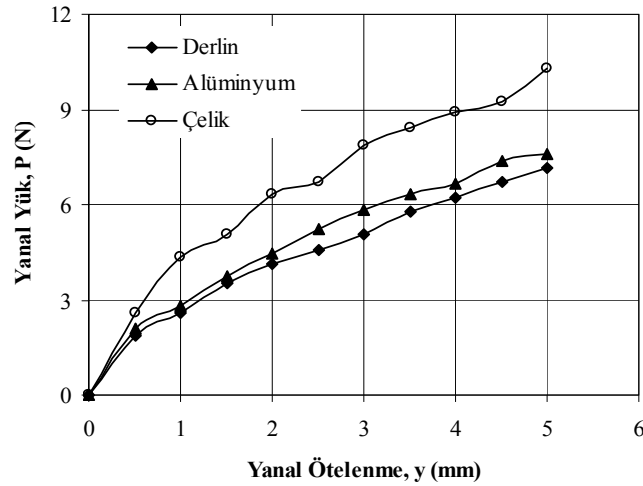
Uzun kazıklar yanal yük etkisinde esnek bir davranış gösterip ötelenme yaparak eğilirler. Kazıkta oluşan maksimum eğilme momentinin kazık kesitinin moment dayanımını aşması ile göçme meydana gelir. Kazığın eğilme rijitliği (EI) kazığın imal edildiği malzemenin elastisite modülüne de bağlı olduğundan uzun kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi kazığın imal edildiği malzemeden etkilenmektedir. Bununla birlikte; rijit kısa kazıklarda tasarım kriteri, genellikle, yanal yük ile yanal yükün uygulandığı noktanın kazık başına olan mesafesinin çarpımı sonucu elde edilen devrilme momentidir. Kısa kazık temel ve desteklediği sistemin toplam ağırlığının değişmesi devrilmeye karşı stabilitesini de etkileyecektir. Kazığın imal edildiği malzeme, zemin-kazık ara yüzey davranışı üzerinde de etkilidir. Ancak, deneysel çalışmalarda pürüzsüz yüzeye sahip model kazıklar kullanıldığından bu etki dikkate alınmamıştır.

Bu bölümde; çelik, alüminyum ve derlin gibi farklı malzemelerden imal edilmiş model kısa kazıklar üzerinde gerçekleştirilen yanal yükleme deneylerine ait sonuçlar sunulmaktadır. Deneylerde model kazık malzemesinden imal edilmiş çekme kolları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılmış olan model kazıkların tamamı dolu kesitli olup D=50 mm çapında ve L=200 mm uzunluğundadır. Çekme kolu yükseklikleri her bir farklı malzeme için 350 mm olup çelik ve alüminyum çekme kolu çubuklarının çapı D=25 mm dir. Buna karşılık; elastisite modülü değeri çelik ve alüminyum malzemelere göre oldukça küçük olan derlin malzemeden imal edilmiş çekme kolu çubuğunun çapı ise D=35 mm olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmış farklı malzemelere ait özellikler Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7 - Farklı kazık malzemelerine ait özellikler

Malzeme	Çap (mm)	Ağırlık (N/m)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Çelik	50	151	210000	0.25
Alüminyum	50	52	70000	0.33
Derlin	50	29	3100	0.35

Çizelge 7’de verilen malzeme ağırlıkları incelendiğinde alüminyumun ağırlığının çeliğin ağırlığının %34’ü kadar, derlinin ağırlığının ise çeliğin ağırlığının %19’u kadar olduğu görülmektedir. Benzer şekilde; derlinin ağırlığı da alüminyumun ağırlığının %55’i kadardır. Malzemelere ait elastisite modülü değerleri incelendiğinde, en rijit malzemenin çelik olduğu bununla birlikte, derlin malzemenin elastisite modülünün çelik ve alüminyumun elastisite modüllerine göre çok küçük olduğu görülmektedir. Derlin malzemenin elastisite modülü oldukça küçük olduğundan, sıkı kum zeminde kazık ve çekme kolundan oluşan temel sisteminin rijit bir bütün olarak davranamayacağı düşülerek kazık malzemesi ile ilgili deneyler sadece gevşek kum zemin durumunda gerçekleştirilmiştir. Gevşek kum zeminde farklı kazık malzemeleri için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri Şekil 14’de sunulmuştur. Farklı kazık malzemeleri için yapılan yanal yükleme deneylerinden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri, kazık başı dönme açıları ve dönme noktası derinlikleri de Çizelge 8’de özetlenmiştir.



Şekil 14 - Gevşek kum zeminde yük-deplasman ilişkileri

Çizelge 8’de verilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırıldığında gevşek kum zemin durumunda, alüminyum model kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin çelik model

Yanal Yüklü Kısa Kazıkların Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

kazığinkinden %26 daha küçük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte; derlin model kazığın yanal yük taşıma kapasitesi de çelik model kazığinkinden %30, alüminyum model kazığinkinden de %6 daha küçük elde edilmiştir. Çizelge 8'de verilen değerler incelendiğinde, kazık ağırlığının artması ile birlikte dönme noktası derinliğinin kazık ucuna doğru hareketlendiği ve buna bağlı olarak da kazık başı dönme açısı değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 8 - Kazık malzemesinin yanal yük taşıma kapasitesine etkisi

		Derlin	Alüminyum	Çelik
Gevşek Kum	R _D (%)	71	74	77
	R (°)	1.97	1.91	1.85
	P (N)	7.16	7.58	10.30

Elde edilen sonuçlar; model deney çalışmalarında kazık malzemesi seçiminin kazığın yanal yük etkisindeki davranışını ve yanal yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte; kazığın imal edildiği malzemenin elastisite modülünün, özellikle, çekme kolunun rijit davranabilmesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Farklı malzemelerden imal edilmiş model kazıklarda kazığın yanal yük taşıma kapasitesi kazık ağırlığından etkilenmekte ancak ağırlıkla orantılı bir değişim göstermemektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların davranışları model deney çalışmaları yapılarak araştırılmıştır. Hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kazık boyu, kazık çapı, kazık en kesit şekli ve kazık malzemesinin yanal yük taşıma kapasitesine etkileri incelenmiştir. Yapılan küçük ölçekli model deney çalışmalarından elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

1. Kazık başı yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri, zeminin gerilme-deformasyon davranışının çok küçük yanal ötelenme değerlerinde dahi non-lineer özelliğe sahip olduğunu göstermektedir.
2. Zemin sıklığı yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Öyle ki; sıkı kum zemin durumunda, gevşek kum durumundaki yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin yaklaşık beş katı büyüklüğünde yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir.
3. L/D oranı ile yanal yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişkiler incelendiğinde L/D oranının kazık boyuna bağlı olarak değişiminin kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde daha önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.
4. Kazık boyu ve kazık çapındaki artış, yanal yüke maruz rijit kısa kazıklar üzerinde etkili olan pasif basınç miktarını etkilediğinden dolayı yanal yük taşıma kapasitesini

artırmaktadır. Ancak; zemin sıklığına bağlı olarak, kazık boyu ile kazık çapındaki değişimin yanıl yük taşıma kapasitesine baskın etkisi de değişiklik göstermektedir. Öyle ki; sıkı kum zemin durumunda, kazık boyunun artırılması yanıl yük taşıma kapasitesine gevşek kum zemin durumundan daha fazla katkı yaparken, gevşek kum zemin durumunda kazık çapının artırılması sıkı kum zemin durumuna göre kazığın yanıl yük taşıma kapasitesini belirgin bir şekilde artırmaktadır.

5. Kazık en kesit şekli, özellikle, gevşek kum zemin durumunda yanıl yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilemektedir. Yaygın olarak kullanılan analitik tasarım yöntemlerinde, eşdeğer dairesel alan yaklaşımının özellikle gevşek kum zeminde yer alan yanıl yüke maruz kazıkların tasarımı için güvenilir sonuçlar vermediği görülmüştür.
6. Model deney çalışmalarında kazık malzemesinin seçimi kazığın yanıl yük etkisindeki davranışını ve yanıl yük taşıma kapasitesini etkilemektedir. Farklı malzemelerden imal edilmiş model kazıklar üzerinde yapılan deneylerde kazığın yanıl yük taşıma kapasitesi kazık ağırlığından etkilenmekte ancak ağırlıkla orantılı bir değişim göstermemektedir.

Semboller

D	: Kazık çapı,
L	: Kazık boyu,
γ	: Birim hacim ağırlık,
E	: Elastisite modülü,
ν	: Poisson oranı,
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı,
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık,
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı,
EI	: Kazığın eğilme rijitliği.

Teşekkür

Sunulan çalışma kapsamında yer alan deneyler MMF2006D2 proje numarası ile Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Fan, C.C., Long, J.H., Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of Laterally Loaded Piles in Sand. Computers and Geotechnics, 32, 274-289, 2005.
- [2] Johnson, K., Lemcke, P., Karunasena, W., Sivakugan, N., Modelling the Load-Deformation Response of Deep Foundations Under Oblique Loading. Environmental Modelling and Software, 21, 1375-1380, 2006.

- [3] Shen, C.K., Bang, S., Desalvatore, M., Poran, C.J., Laterally Loaded Cast-in-Drilled-Hole Piles. *Transportation Research Record*, 1191, 155-165, 1988.
- [4] Yalcin, A.S., Meyerhof, G.G., The Effect of Installation on the Ultimate Resistance of Rigid Piles Under Inclined Loads in Layered Sand. *Soils and Foundations*, 30 (3), 37-52, 1990.
- [5] Prasad, Y.V.S.N., Chari, T.R., Lateral Capacity of Model Rigid Piles in Cohesionless Soils. *Soils and Foundations*, 39 (2), 21-29, 1999.
- [6] Dickin, E.A., Nazir, R., Moment-Carrying Capacity of Short Pile Foundations in Cohesionless Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (1), 1-10, 1999.
- [7] Dickin, E.A., Laman, M., Moment Response of Short Rectangular Piers in Sand. *Computers and Structures*, 81, 2717-2729, 2003.
- [8] Sawwaf, M. E., Lateral Resistance of Single Pile Located Near Geosynthetic Reinforced Slope. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (10), 1336-1345, 2006.
- [9] Hu, Z., McVay, M., Bloomquist, D., Herrera, R., Lai, P., Influence of Torque on Lateral Capacity of Drilled Shafts in Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (4), 456-464, 2006.
- [10] Laman, M., Uncuoglu, E., Prediction of the Moment Capacity of Pier Foundations in Clay Using Neural Networks. *Kuwait Journal of Science and Engineering*, 36 (1B), 1-20, 2009.
- [11] Uncuoglu, E., Laman, M., Numerical Modelling of Short Pile Behaviour Subjected to Lateral Load. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16:2, 204-235, 2012.
- [12] Brinch-Hansen, J., The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces. *Geoteknisk Institute (The Danish Geotechnical Institute)*, 12, 5-9, 1961.
- [13] Meyerhof, G.G., Mathur, S.K., Valsangkar, A.J., Lateral Resistance and Deflection of Rigid Walls and Piles in Layered Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 18, 159-170 1981.
- [14] Karayolu Trafik Güvenliğinin Sağlanması Yönünden, Yolun Yapısında Yapılacak Her Türlü Çalışmalarda Alınacak Tedbirlerle Karayolu Dışında, Kenarında veya Üzerindeki Diğer Levhalar, Işıklar ve İşaretlemeler Hakkında Yönetmelik, 1985. <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/KanunYonetmelikler.aspx>.
- [15] Broms, B.B., Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90 (3), 123-156, 1964.
- [16] Matlock, H., Reese, L.C., Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles. *Journal of the Soil Mechanics and foundations Division*, 86 (5), 63-91, 1960.
- [17] Yang, K., Liang, R., Numerical Solution for Laterally Loaded Piles in a Two-Layer Soil Profile. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (11), 1436-1143, 2006.