

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ



YANAL YÜKLÜ KAZIK DAVRANIŞININ ÜÇ BOYUTLU NON-LİNEER
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Proje No: FBA – 12 - 3918

Normal Araştırma Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:

Erdal UNCUOĞLU

Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü

Eylül 2017

KAYSERİ

TEŞEKKÜR: “Yanal Yüklü Kazık Davranışının Üç Boyutlu Non-Linear Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi” başlıklı ve FBA – 12 – 3918 numaralı Normal Araştırma Projeme katkılarından dolayı Erciyes Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa No |
|---------------------------|----------|
| ÖZET | 1 |
| ABSTRACT | 1 |
| 1. GİRİŞ / AMAÇ VE KAPSAM | 2 |
| 2. GENEL BİLGİLER | 4 |
| 3. GEREÇ VE YÖNTEM | 14 |
| 4. BULGULAR | 19 |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ | 27 |
| 6. KAYNAKLAR | 30 |

ÖZET

Bu proje çalışmasında; yanal yüke maruz tek kazıkların ve kazık gruplarının davranışları sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak analiz yapabilen Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak incelenmiştir. Yanal yüklü kazıkların davranışı kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından idare edilmektedir. Bu nedenle; farklı zemin koşullarının, farklı yükleme koşullarının ve kazık-zemin ara yüzey davranışının kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir seri sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte; sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme modeline ait parametrelerin davranış üzerindeki etkileri yapılan parametrik çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar; kazık geometrisi, zemin özellikleri, yükleme tipi, kazık-zemin ara yüzey davranışının tek kazıkların yanal yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Grup içerisinde yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri grubu oluşturan kazıklar arasındaki etkileşim nedeni tek kazık durumuna göre azalmaktadır. Malzeme modeline ait parametrelerin seçilen değerleri de kazığın yanal yük etkisi altındaki davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir.

Anahtar Kelimeler; yanal yüklü kazık, sonlu elemanlar, plaxis, ara yüzey, Mohr-Coulomb.

ABSTRACT

In this project, the behaviour of the single piles and pile groups subjected to laterally load has been investigated by using Plaxis 3D Foundation program that can perform analysis based on the finite element method. The behaviour of the laterally loaded pile is governed by the interaction between the pile and soil. For that reason, a series of finite element analyses have been performed to consider the effects of the different soil conditions, different loading types and the pile-soil interface behaviour on the lateral load capacity of piles. However; the effects of the parameters belonging to the material model used in the analyses have been evaluated with performing parametric studies. The results obtained reveal that the pile geometry, soil properties, loading type, pile-soil interface behaviour significantly effect the lateral load capacity of single piles. The lateral load capacity of the piles in the pile group decreases with respect to the single pile due to the interaction between piles in the group. The chosen values of the parameters in the material model have important effect on the behaviour of the pile subjected to the lateral.

Keywords; laterally loaded pile, finite elements, plaxis, interface, Mohr-Coulomb.

1. GİRİŞ / AMAÇ VE KAPSAM

Yanal yüklü kazık probleminde yük-transfer mekanizması son derece karmaşık olup hala tam anlamı ile anlaşılammıştır. Bu nedenle; günümüze kadar birçok tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Yanal yüke maruz kazıkların davranışı üç boyutlu ve nonlineer bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir.

Yanal yük etkisine maruz kazıkların davranışlarının araştırılmasında kullanılan mevcut deneysel yöntemler tam ölçekli arazi yükleme deneyleri ve küçük ölçekli laboratuvar model deneyleri olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Laboratuvar model deneyleri de kendi içinde klasik laboratuvar model deneyleri (1g model deneyler) ve centrifuge laboratuvar model deneyleri (Ng model deneyler) olmak üzere ikiye ayrılır.

Arazi deneylerinde, zemin ortamı ve temel sistemi prototip boyutlarında kullanıldığından ve yükleme doğal arazi şartlarında gerçekleştirildiğinden elde edilen sonuçlar son derece güvenilirdir. Arazi yükleme deneylerinde elde edilmiş olan değerler deneyin gerçekleştirildiği zemin durumu ve yükleme koşulları için geçerlidir. Bu yüzden; bazı basitleştirmeler yapılarak, elde edilen sonuçların genelleştirilmesi hatalara yol açabilir. Projenin uygulanacağı her arazide tam ölçekli yükleme deneylerinin yapılarak sistem davranışının tahmin edilmesi en güvenilir ve en doğru yoldur. Ancak; arazi deneylerinin maliyetlerinin yüksek olması, deney sisteminin kurulmasının fazla zaman ve işgücü gerektirmesi, parametrik çalışma yapılabilmesinin zor oluşu, bilgi ve tecrübe yönünden birikimli insanların oluşturduğu iyi bir ekiple gerçekleştirilme zorunluluğu gibi nedenlerden dolayı arazi yükleme deneyleri çok sık yapılamamaktadır.

Küçük ölçekli laboratuvar model deneyleri; deney düzeneğinin sınırlı bir zaman dilimi içerisinde kurulabilmesi, maliyetlerinin arazi deneylerine göre oldukça düşük olması, belirli oranda parametrik çalışma yapılmasına olanak tanınması ve böylelikle sistem davranışının farklı yönlerden ele alınabilmesine imkan vermesi, deney sistemi ve model zemin şartlarının daha hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi gibi avantajları ile arazi yükleme deneylerine alternatif olarak uygulanmaktadır. Ancak; klasik model deney (1g) sonuçlarına dayanılarak prototip boyutlardaki temellerin davranışlarının tahmin edilmesi ölçek etkisinin varlığından dolayı hatalı sonuçlar verebilmektedir. Arazi deneylerinin diğer bir alternatifi konumundaki centrifuge modelleme tekniği ise, prototip ve model arasında gerilme benzerliği sağlayabildiğinden, prototip gerilme seviyeleri altında model deneyler yapılabilmesine imkan

sağlamaktadır. Ancak; düzeneğin dünya genelinde az sayıda araştırma merkezinde bulunuyor olması bu yöntem ile yapılacak çalışmalar ve geliştirilecek çözüm teknikleri için bir sınırlama oluşturmaktadır.

Yanal yüke maruz kazıkların analizi için kullanılan mevcut analitik yöntemlerin çoğunluğu arazi ya da laboratuvar model deneylerinden elde edilen deneysel bilgilere veya basit sayılabilen limit durum yaklaşımlarına dayanmaktadır. Arazi deney sonuçlarının, özellikle, deney yapılan saha ve zemin koşulları için geçerli olması, model deneylerden elde edilen sonuçlarda ölçek etkisinin bulunması bununla birlikte elde edilen deneysel ilişkilerin çoğunlukla homojen zemin koşulları için geçerli olması ve zemin parametrelerinin keyfi seçilmesi gibi nedenlerden dolayı bahsedilen yöntemler çok güvenilir kabul edilmemektedir.

Yanal yüke maruz kazıkların davranışı ile ilgili problemlerde, özellikle son yıllarda, sayısal analiz yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Zemin mekaniği ve temel mühendisliği problemlerinin tasarım ve analizlerinde en yaygın kullanılan sayısal analiz yöntemi sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi; bir sistemin davranışını etkileyebilecek; zeminin sürekliliği, zeminin non-linear gerilme-deformasyon davranışı, kazık-zemin ara yüzey davranışı ve üç boyutlu sınır koşulları gibi çok sayıdaki faktörü göz önüne alarak çözümü yapabilen güçlü bir hesaplama aracıdır.

Kazık özellikleri, zeminin gerilme-deformasyon davranışı ve kazık-zemin ara yüzeyi yanal yüke maruz bir kazığın taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Yanal yüke maruz kazık probleminin çözümü birçok parametrenin dikkate alınmasını gerektirdiğinden problemin çözümü ile ilgili kesin sonuç veren genel bir çözüm tekniği hala geliştirilememiştir.

Zeminin gerilme-deformasyon davranışının non-linear olması ve bu özelliğin non-linear davranış özelliğini tanımlayan malzeme modelleri ile dikkate alınabilmesi sonlu elemanlar yönteminin en önemli avantajlarından birisidir. Bununla birlikte; üç boyutlu sonlu eleman modelleri ile kazığı çevreleyen zemindeki gerilmelerin ve deformasyonların üç boyutlu etkiler göz önüne alınarak hesaplanabilmesi mümkündür. Sonlu eleman analizlerinde senaryo zenginliğinin elimizde olması farklı zemin koşullarının, farklı yükleme tiplerinin ve farklı geometrik özelliklerin bir arada değerlendirilebilmesine imkan sağlayacaktır. Bu tip bir zenginliğin deneysel çalışmalarda elde edilmesi hem zaman hem maliyet hem de her türlü zemin koşulunun oluşturulamayacak olmasından dolayı çok zordur. Bununla birlikte; deneysel çalışmalar sırasında araştırma olanağının bulunmadığı ancak yanal yük taşıma kapasitesi

üzerinde etkileri olan farklı parametrelerin (kohezyon, dilatasyon açısı, zemin-kazık ara yüzey davranışı, zemin elastisite modülünün değişimi vb.) davranış üzerindeki etkilerinin yapılan parametrik çalışmalarla araştırılma olanağı da bulunmaktadır.

Bu proje çalışmasında; PLAXIS 3D Foundation sonlu elemanlar programı kullanılarak yanal yüklü kazık davranışı farklı zemin koşulları, farklı yükleme koşulları ve farklı kazık geometrilerinde hem tek kazık hem de kazık grubu durumu için araştırılmıştır. Bununla birlikte; non-linear zemin davranışının modellenmesinde kullanılan malzeme modellerine ait parametrelerin davranış üzerindeki etkileri de yapılan çalışmalar ile ortaya konmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

Yanal yüklü kazık probleminde yük-transfer mekanizması son derece karmaşık olup hala tam anlamı ile anlaşılamamıştır. Bu nedenle; günümüze kadar birçok tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Yanal yüke maruz kazıkların davranışı üç boyutlu ve nonlinear bir zemin-yapı etkileşimi problemi olup kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edilmektedir. Kazık özellikleri (kazığın eğilme rijitliği, kazığın geometrisi), zeminin gerilme-deformasyon davranışı (kayma mukavemeti, zeminin rijitliği ve dilatasyon özelliği) ve kazık-zemin ara yüzeyi yanal yüke maruz bir kazığın taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir (Fan ve Long, 2005).

Yanal yüke maruz kazık temeller aşağıda sıralanmış olan üç şartı sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır (Duncan ve ark., 1994).

- Uygulanan yanal yük, kazığı çevreleyen zeminin nihai yanal yük taşıma kapasitesini aşacağı büyüklükte olmamalıdır.
- Uygulanan yanal yük nedeni ile kazık bünyesinde oluşan eğilme momentleri kazık kesit alanının moment taşıma kapasitesini aşmamalıdır.
- Yanal yük etkisinde meydana gelen yanal ötelenme miktarı üst yapı için izin verilebilir ötelenme değerinden küçük olmalıdır.

Yanal yüklü kazıkların analizi için kullanılan analitik tasarım yöntemleri dört ana grupta toplanabilir. 1-sınır durum yöntemi (limit state method) 2- temel zemini reaksiyon yöntemi (subgrade reaction method) 3- p-y eğri yöntemi 4-elastik analiz yöntemi (Fan ve Long, 2005).

Yanal yük etkisine maruz kazıkların davranışlarının araştırılmasında kullanılan mevcut deneysel yöntemler tam ölçekli arazi yükleme deneyleri ve küçük ölçekli laboratuvar model

deneyleleri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilirler. Laboratuvar model deneyleleri de kendi arasında klasik laboratuvar model deneyleleri (1g model deneyleleri) ve centrifuge laboratuvar model deneyleleri (Ng model deneyleleri) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Bu bölümde; elde edilen deneysel sonuçların sonlu eleman modellerinin kalibrasyonlarında kullanılabilmeleri nedeni ile, sadece, arazi deney çalışmaları ve centrifuge deney çalışmalarını içeren literatür çalışmaları özetlenmiştir. Bununla birlikte; sayısal analiz araştırmalarına dayalı literatür çalışmaları da bu bölüm kapsamında anlatılmıştır.

2.1. Arazi Deneyleleri

Brown ve ark. (1988) yapmış oldukları bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan kazık gruplarının çevrimsel yanal yük etkisi altındaki davranışlarını büyük ölçekli arazi yükleme deneyleleri yaparak araştırmışlardır. Yükleme deneyleleri, karşılaştırma amaçlı olarak tek kazık üzerinde de gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; grup içerisindeki bir kazık başına düşen ortalama yanal yük değerinde grup içerisindeki kazığın yanal ötelenmesinin aynı yanal yük değerine maruz tek kazığın yanal ötelenmesinden oldukça fazla olduğu görülmüştür. Grup yanal yük taşıma kapasitesinin büyük bölümü ön sırada yer alan kazıklar tarafından karşılandığı için herhangi bir yanal yük değerinde maksimum eğilme momentleri de bu sırada yer alan kazıklarda meydana gelir. Kazık gruplarında, ön sırada yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasitesindeki azalma oldukça azdır.

Ruesta ve Townsend (1997) tarafından yapılan bu çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan tek kazık ve kazıklar arasında üç kazık çapı mesafenin bulunduğu 16 kazıktan oluşan 4x4 dizilimindeki bir kazık grubunun yanal yük etkisi altındaki davranışları arazi yükleme deneyleleri yapılarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda donatılmış kazıklardan elde edilmiş olan deformasyon verileri kullanılarak deneysel p-y eğrileri elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmada; mevcut sonlu elemanlar programı FLPIER' in doğrulanması için yük-deplasman-eğilme momenti verilerinin elde edilmesi, kazık grubu için gerekli p-multipliers katsayılarının tanımlanması ve deneysel p-y eğrilerinin elde edilmesinde hangi arazi deneyinin (SPT, CPT, DMT ve PMT) daha efektif olduğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kazık grubunda ön sırada yer alan kazıkların uygulanan yanal yükün büyük bir bölümünü taşıdığı ve tek kazığın davranışına oldukça benzer bir davranış sergilediği görülmüştür. Ayrıca; bir kazık sırasında dış tarafta yer alan kazıkların ortada yer alan kazıklardan daha fazla yanal yük taşıdıkları belirtilmiştir.

Anderson ve ark. (2003) tarafından yapılan bu çalışmada; kazık temeller üzerinde gerçekleştirilen tam ölçekli yanal yükleme deneyleri ile ilgili yedi vaka analizi üzerinde inceleme yapılarak yanal yüke maruz kazık temellerin davranışlarının tahmin edilmesinde hangi arazi deneyinin daha efektif olduğu araştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda; SPT korelasyonlarına dayalı tahminlerin bütün yükleme kademelerinde güvenli tarafta kalan sonuçlar verdiği görülmüştür.

Zhang (2003) tarafından yapılmış olan bu çalışmada; Hong Kong' da iki baret temel üzerinde gerçekleştirilmiş olan tam ölçekli yanal yükleme deneylerine ait sonuçlar aktarılmaktadır. Bu çalışmanın amacı; büyük kesitli baret temellerin yanal yük etkisi altındaki davranışlarının araştırılması, baret temelin imal edildiği malzemeler olan beton ve donatı çeliğinin non-lineer davranış özelliklerinin dikkate alınarak konu edilen iki deney baretinin davranışlarının modellenmesi ve baret temellerin yanal yüke karşı tepkileri üzerinde yükleme doğrultusunun etkisinin araştırılmasıdır. Deney baretlerinin yanal yüke karşı göstermiş olduğu tepkiyi modelleyebilmek için beş farklı yükleme doğrultusu göz önüne alınarak zemin davranışı non-lineer p-y eğrileri ile baret temel davranışı da non-lineer gerilme-deformasyon ilişkileri ile tanımlanmıştır.

Rollins ve Ark. (2005) tarafından yapılmış olan bu çalışmada; yanal yüke maruz kazık grubunun davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için bir seri tam ölçekli yanal yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Tam ölçekli yükleme deneyleri için kil tabakası üzerinde yer alan gevşek ve orta sıkı kum tabakalarının oluşturduğu zemin profili içerisine kazıklar açık uçlu olarak çakılarak 3x3 diziliminde bir kazık grubu oluşturulmuştur. Grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafe kazık çapının 3.30 katı kadardır. Deneysel çalışmalar sırasında; grup içerisinde yer alan her bir kazığın karşıladığı yanal yük miktarı ölçülmüş, her bir kazığın uzunluğu boyunca meydana gelmiş olan eğilme momenti dağılımları da, strain-gauge ler yardımı ile ölçülmüş deformasyon verileri kullanılarak, elde edilmiştir. Karşılaştırma amaçlı olmak üzere tek kazık üzerinde de tam ölçekli yanal yükleme deneyi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kazıkların taşıdığı yanal yük miktarının grup içerisinde buldukları kazık sırasına bağlı olduğu ve ön sırada yer alan kazıkların arka sırada yer alan kazıklara göre çok daha fazla miktarda yanal yük taşıma kapasitesine sahip oldukları görülmüştür.

2.2. Centrifuge Model Deney (Ng) Çalışmaları

Mc Vay ve Ark. (1994) tarafından yapılan çalışmada; centrifuge deney aleti hareket halinde iken model tek kazıkların veya model kazık gruplarının zemine yerleştirilmesi ve yanal olarak yüklenmesi amacı ile tasarlanmış yeni bir centrifuge model deney aparatının kullanımı anlatılmaktadır. Kazıklar arasında üç kazık çapı ve beş kazık çapı mesafenin bulunduğu dokuz kazıktan oluşan iki farklı konfigürasyondaki serbest başlı kazık grupları gevşek ve orta sıkı kum zeminde yanal yük etkisinde deneye tabii tutulmuşlardır. Zemin sıklığı ve grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafenin kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesine ve bu toplam taşıma gücünün kazık sıraları arasındaki paylaşımına etkisi araştırılmıştır. Zeminin sıklığı kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilemektedir. Öyle ki; zemin sıklığının $D_r = \%45$ değerinden $D_r = \%17$ değerine azalması sonucunda kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesinde $\%22$ 'lik bir azalma olduğu gözlenmiştir. Grup içerisinde yer alan kazıklar arasındaki mesafenin artırılmasının kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesini artırdığı belirtilmiştir.

Laman (1995), doymuş kil zemin içerisinde yer alan serbest başlı, kare kesitli rijit kısa kazıkların, zemin yüzeyi üzerinden oldukça yüksekte etkiyen yatay bir yük nedeni ile kazık başında oluşan büyük devirme momentlerine maruz kalmaları durumundaki kısa süreli (drenajsız) tepkilerini araştırmıştır. Bu amaçla centrifuge model deney çalışmaları gerçekleştirmiştir. Deneyler 1/40 ölçeğindeki farklı boyutlara sahip çelikten imal edilmiş model kısa kazıklar üzerinde yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda; doymuşluk derecesi $\%97.50$ ile $\%100$ aralığındaki orta plastisiteli, aşırı konsolide inorganik siltli kil zemin kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; çekme kuvveti uygulama yüksekliğinin ve kazık geometrisinin kısa kazıkların moment taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediği görülmüştür.

Mc Vay ve ark. (1998) ve Zhang ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışmalarda; yanal yük etkisine maruz köprü ayaklarının davranışını gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için köprü yapısı ve temel sistemini birlikte analiz edebilen bir sonlu elemanlar yazılımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Böyle bir yazılımın geliştirilebilmesi ve ortaya konan programın doğruluğunun gösterilebilmesi için, büyük kazık grupları üzerinde yanal yükleme deneylerinin yapılmış olması ve deneysel verilere sahip olunması gerekmektedir. Bu amaçla Florida Üniversitesinde bir araştırma projesi başlatılmıştır. Köprü ayakları altında yer alan kazık grubu temeller genellikle dört, beş, altı veya yedi kazık sırasından oluşan büyük kazık gruplarıdır. Bu yüzden;

öncelikle, hem gevşek hem de orta sıkı kum zemin içerisinde yer alan tek kazıklar ve 3x3, 4x3, 5x3, 6x3 ve 7x3 dizilimlerindeki büyük kazık grupları üzerinde centrifuge deney aletinde yanal yükleme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra; hem gevşek hem de orta sıkı kum zemin içerisinde yer alan tek kazıkların ve büyük kazık gruplarının yanal yük etkisi altındaki davranışları FLPIER sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir.

Dickin ve Nazir (1999) tarafından yapılan bu çalışmada; büyük devirme momentlerine maruz kısa kazık temeller üzerinde gerçekleştirilmiş centrifuge ve laboratuvar model deneyleri anlatılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; zeminin sıklığının, çekme kuvveti uygulama yüksekliğinin, kazık geometrisinin ve zemin yüzeyi profilinin kısa kazıkların moment taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediği görülmüştür.

Dyson ve Randolph (2001) tarafından yapılan çalışmada kalkerli kum zemin içerisinde yer alan kazıkların yanal yük etkisi altındaki davranışları bir seri centrifuge model deneyi yapılarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda; kazığın zemine yerleştirilme yönteminin, kazık ucu durumunun, drenaj derecesinin (yükleme hızının) ve kazık başındaki sınır şartının kazığın yanal yük etkisi altındaki davranışına etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; geliştirilen p-y eğri modeli kullanılarak elde edilen kazık tepkilerinin deneysel değerler ile oldukça iyi bir uyum sergilediği gözlenmiştir. Önerilen p-y eğri modeli ile elde edilen p-y davranışları silis kumu için geliştirilmiş mevcut p-y eğri modelleri kullanılarak elde edilen p-y davranışları ile karşılaştırıldığında sonuçlar arasında önemli farklılıklar olduğu görülmüştür. Öyle ki; silis kumu için geliştirilmiş mevcut modeller ile kalkerli kum zeminde yer alan kazıkların küçük deplasman değerlerinde çok rijit bir davranış sergilediği bununla birlikte büyük deplasman değerlerindeki yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin olması beklenenden küçük değerlerde tahmin edildiği belirtilmiştir. Bu sonuç; kalkerli kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz kazıkların davranışlarının kalkerli kum için geliştirilmiş p-y eğri modelleri kullanılarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Dickin ve Laman (2003), kum zemin içerisinde yer alan farklı boyutlara sahip dikdörtgen kesitli kısa ayak temeller üzerinde centrifuge model deneyleri yaparak ayak temellerin moment taşıma kapasitesi davranışını araştırmışlardır. Centrifuge model deneylerdeki prototip boyutlar kullanılarak üç boyutlu non-linear sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Dikdörtgen kesitli kısa ayak

temellerin moment taşıma kapasitesi, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, ayak temelin en kesit uzunluğu ve gömülü uzunluğu arttıkça artmaktadır. Zemin sıklığının moment taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediği belirtilmiştir.

Hu ve ark. (2006) tarafından yapılan bu çalışmada; ankastre kollu direk yapılarının (cantilever mast arm/pole structures) temeli olarak görev yapan fore kazıkların yatay yük ve burulma momenti etkisindeki davranışları centrifuge model çalışmaları yapılarak araştırılmıştır. Yapılan deneylerin bir bölümünde kazığın sadece yanal yük etkisi altındaki davranışı incelenirken, geriye kalan deneylerde, hem yanal yük hem de burulma momentinin birlikte etkilediği durumdaki davranışı incelenmiştir. Yapılan deneylerde kazık gömülü uzunluğunun, kum zeminin sıklığının ve yatay yük uygulama noktasının (yatay yükün direk üst noktasında etkimesi, ankastre kolun orta noktasında etkimesi, ankastre kolun uç noktasında etkimesi) kazığın taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri 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. Burulma momentinden dolayı kazığın yanal yük taşıma kapasitesinde gözlenen azalmanın, zeminin sıklığından bağımsız olduğu kazık gömülü uzunluğu ve burulma momenti ile yanal yük arasındaki oranın bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte; kazığın burulma momenti taşıma kapasitesinin yanal yükün varlığından etkilenmediği görülmüştür.

Kong ve Zhang (2006) tarafından yapılan çalışmada; robot manipülatör kullanılarak, centrifuge deney aletinde model kazıklar üzerinde farklı yükleme hızlarında yanal yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Robot manipülatör kullanımının sağladığı en büyük yarar, geoteknik problemlerin centrifuge deney düzeneği deney ivmesinde hareket halinde iken modellenebilmesine olanak tanınmasıdır. Öyle ki; kazığın zemine yerleştirilmesi ve kazıkların yüklenmesi gibi işlemler robot manipülatör kullanımı ile centrifuge deney düzeneği hareket halinde iken gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada; centrifuge deney düzeneği hareket ederken dört model kazık zemin içerisine yerleştirilmiş ve ardından da dört model kazığın her biri farklı yükleme hızlarında art arda yanal olarak yüklenmişlerdir. Bu sayede, farklı zamanlarda gerçekleştirilen yanal yükleme deneylerinde model zeminin hazırlanmasından dolayı oluşabilecek potansiyel hatalar minimuma indirilmiştir. Deneyler hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı yükleme hızları kullanılarak yükleme hızının yanal yüklü kazıkların davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel

çalışmaların sonunda; deneysel çalışmalarda kullanılan yükleme hızı aralığında yükleme hızının yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli derecede bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

2.3. Sayısal Analiz Çalışmaları

Muqtadir ve Desai (1986) tarafından yapılan bu çalışmada; kazık gruplarının analizi için üç boyutlu, non-linear bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Kazık grubu problemi; kazık grubu başlığı, zemin ve kazıklar arasındaki etkileşimleri içeren üç boyutlu bir problemdir. Problemin gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için problemin üç boyutlu geometrisinin, kazık-zemin ara yüzey etkilerinin ve zeminin non-linear davranış özelliklerinin göz önünde bulundurulması gereklidir. Geliştirilen sonlu elemanlar modeli, kazık-zemin ara yüzeyindeki rölatif hareketleri dikkate alabilmekte ve zemin davranışını lineer elastik, non-linear elastik ve elasto-plastik (Von Misses, Drucker-Prager, Critical State) malzeme davranışları ile modelleyebilmektedir. Önerilen sonlu eleman prosedürü, deneye tabi tutulan bir model kazık grubunun modellenmesinde kullanılmış ve sayısal analizler sonucu elde edilen deplasman ve moment değerleri deneysel değerler ile karşılaştırılarak sonuçların yeterli doğrulukta olduğu görülmüştür.

Brown ve Shie (1990) yapmış oldukları çalışmada yanal yüke maruz kazık problemini gerçekçi bir şekilde modelleyebilen bir sonlu eleman modeli geliştirmeye çalışmışlardır. Önerilen model, yanal yüklemeye dolaylı kazığı çevreleyen zemindeki plastik deformasyonların oluşumunu, kazık ile kazığın arka yüzüne temas eden zemin arasındaki boşluk oluşumunu ve kazık-zemin ara yüzeyinde kazık ile zemin arasındaki rölatif kayma davranışını göz önüne alabilen üç boyutlu ve non-linear bir sonlu eleman modelidir. Böyle gerçekçi bir modelin geliştirilmesinin kazıklar arası mesafe, kazık başı tutululuğu ve zemin rijitliği parametrelerinin kazığın yanal yük taşıma kapasitesine olan etkilerini araştırmak için yapılacak parametrik çalışmalar için de bir temel oluşturacağı düşünülmüştür.

Trochanis ve ark. (1991) yapmış oldukları çalışmada; non-linear zemin davranışının monotonik ve çevrimsel yüklemeye maruz kazıkların aksenel ve yanal yük taşıma kapasitelerini ne ölçüde etkilediğini araştırmışlar ve bu amaçla da kazık-zemin-kazık etkileşimini dikkate alabilen bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen üç boyutlu elasto-plastik sonlu eleman modeli kazık-zemin arasında meydana gelen kayma ve ayrılma davranışı gibi etkileri içerdiği ara yüzey elemanları ile temsil edebilmektedir. Zeminin non-

lineer davranış özelliği ve kazık-zemin ara yüzey etkileşimlerinin tek kazık ve kazık gruplarının davranışı üzerindeki etkileri geliştirilmiş olan bu üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile araştırılmıştır.

Laman ve ark. (1999), yapmış oldukları çalışmada, büyük devirme momentlerine ve buna nazaran küçük yatay kuvvetlere maruz ayak (pier) temellerde temel geometrisinin (temelin genişliği, en kesit uzunluğu, temel gömülü uzunluğu) moment taşıma kapasitesine etkisini araştırmak için bir seri üç boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle, sıkı kum zeminde yer alan dairesel bir model ayak temel üzerinde yapılmış olan centrifuge model deneyi PIER3DNL üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sayısal analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak PIER3DNL programının doğruluğu ortaya konmuştur. Ayak temel geometrisinin moment taşıma kapasitesine etkisini araştırmak için yapılan analizler, gevşek ve sıkı kum zeminde yer alan farklı genişlik ve farklı gömülü uzunluk değerlerine sahip kare kesitli ayak temeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ile yanal yük etkisi altındaki ayak temellerde 1° ve 2° 'lik sınır dönme açısı değerlerinde moment taşıma kapasitesi ile temel geometrisini ilişkilendiren deneysel bir ilişki elde edilmiştir. Çalışmada ele alınan boyut aralığında herhangi bir değere sahip kare kesitli ayak temellerin 1° ve 2° 'lik sınır dönme açısı değerlerindeki moment taşıma kapasitelerinin bu deneysel eşitlik ile güvenli bir şekilde hesaplanabileceği belirtilmiştir.

Wakai ve ark. (1999), kazık grubundan oluşan gerçek bir temel sisteminin davranışının üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar modeli ile efektif bir şekilde değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir. Önerilen sonlu eleman yöntemi ile etkili sonuçlar alınabilmesi için zeminin uygun bir yapısal model ile modellenmesi ve bu yapısal modelin gerektirdiği parametrelerin değerlerinin deneysel olarak doğru bir şekilde elde edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Kum zemin içerisinde yer alan ve her biri dokuz kazıktan oluşan, yanal yüklemeye maruz, serbest ya da sabit başlı kazık grupları üzerinde yapılmış olan model deneyler üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar modeli ile analiz edilmiştir. Bununla birlikte; Saito ve ark. (1983) tarafından arazide 3x3 dizilimindeki prototip kazık grubu üzerinde gerçekleştirilmiş olan çevrimsel yanal yükleme deneyleri de üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar modeli ile analiz edilerek elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile son derece uyumlu olduğu ve sunulan üç boyutlu elasto-

plastik sonlu elemanlar modelinin hem model deneyleri hem de arazi yükleme deneylerini iyi bir doğrulukta modelleyebildiği belirtilmiştir.

Yang ve Jeremic (2003) tarafından yapılan çalışmada; gevşek ve orta sıkı kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz 3x3 ve 4x3 dizilimlerindeki kazık gruplarının tepkisi üç boyutlu sonlu elemanlar programı OpenSees kullanılarak analiz edilmiş ve kazık grubu içerisinde yer alan kazıkların birbirleri ile olan etkileşimleri araştırılmıştır. Analizlerde, uygulanan yükün grup içerisindeki kazıklar tarafından nasıl paylaşıldıkları, her bir kazıkta meydana gelen eğilme momentleri ve kazık grubunun içerisinde yer aldığı zemin kütlelerinde kazık grubunun yanal yüklenmesi sonucu meydana gelen plastik bölgelerin oluşumu incelenmiştir. Analizler sonucu elde edilen eğilme momenti verileri kullanılarak grup içerisindeki her bir kazığa ait p-y eğrileri sayısal olarak elde edilmiş ve kazıkların yük etkisindeki davranışları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Çalışmada kullanılan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli centrifuge deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır.

Chae ve ark. (2004), şev tepesi civarında yer alan yanal yüke maruz kısa rijit kazıklar üzerinde yapılmış model deneyler ile yine şev tepesi civarında yer alan yanal yüke maruz bir keson temel üzerinde gerçekleştirilmiş arazi deneyini üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek analiz etmişlerdir. Elde edilen analiz sonuçlarını deneysel sonuçlar ile karşılaştırarak önerdikleri sonlu elemanlar yönteminin doğruluğunu ortaya koymaya çalışmışlardır.

Fan ve Long (2005) tarafından yapılan bu çalışmada kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz tek kazığın davranışı üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak araştırılmıştır. Kazığı çevreleyen zeminde kazığa yakın konumda bulunan zemin elemanlarında gerilme izlerinin oluşumları incelenmiştir. Kazık özelliklerinin (kazığın eğilme rijitliği ve kazık çapı) ve zemin özelliklerinin (yatay zemin basınç katsayısı ve dilatasyon) zemin direnci üzerindeki etkileri parametrik bir çalışma yapılarak araştırılmıştır. Non-lineer sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar kum zemin içerisindeki yanal yüklenmiş kazıkların nihai zemin dirençlerinin tahmin edilmesinde kullanılan mevcut analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Martin ve Chen (2005), dolgu altında yer alan zayıf ya da sıvılaştırılabilir bir zemin tabakasından dolayı göçen bir şev dolgusunun ötelenme hareketi nedeni ile oluşan yüklemeye maruz kazıkların tepkisini Flac^{3D} programı kullanarak uygulamış oldukları deplasman yöntemi ile

incelemişlerdir. Deplasman yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tam dinamik analizlerden elde edilen eğilme momenti değerlerine çok yakın değerde eğilme momentleri elde edilebilmektedir. Önerilen sayısal modelleme yayımlanmış olan vaka analizlerine ait veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Yang ve Jeremic (2005) tarafından yapılan bu çalışmada; yanal yüke maruz tek kazığın davranışı, kazığın üniform kum zemin, üniform kil zemin, arada kum tabakası içeren kil zemin ve arada kil tabakası içeren kum zemin içerisinde bulunduğu durumlarda üç boyutlu OpenSees sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, dört farklı zemin profili durumu için dört farklı sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Her bir modelden elde edilen p-y eğrileri birbirleri ile karşılaştırılarak iki orta sıkı kum tabakası arasında yer alan yumuşak kil tabakasının kum tabakalarının p-y eğrileri üzerindeki etkileri ve kum tabakalarının arada yer alan yumuşak kil zeminin p-y eğrisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Benzer araştırma, iki yumuşak kil tabakası arasında orta sıkı kum tabakası yer alması durumunda da yapılmıştır. Böylelikle; tabakalı zemin durumunun p-y davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Johnson ve ark. (2006) yapmış oldukları çalışmada kazığın enine kesit şeklinin kazık taşıma kapasitesine etkisini bir seri sonlu eleman analizi yaparak araştırmışlardır. Hem kare hem de dairesel kesitli kazıklar için toplam 24 model analiz edilmiştir. Analizlerde; kum zeminin iki farklı sıklığı (gevşek ve orta-sıkı durum), kazık narinlik oranının (L/d) iki farklı değeri ($L/d=10$ ve $L/d=20$) ve üç farklı yükleme açısı (0° , 45° ve 90°) göz önüne alınmıştır. Her bir analize ait yük-deplasman ilişkisi elde edilerek kazık nihai taşıma gücüne ulaşılmıştır. Çalışma sonucunda; kazığın kesit şeklinin kazığın yanal yük ve eğik yük taşıma kapasiteleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Karthigeyan ve ark. (2006), kazık başına uygulanan düşey yükün kum zemin içerisinde yer alan kazığın yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini bir seri üç boyutlu sonlu eleman analizi yaparak araştırmışlardır. Çalışmada; kum zemin içerisinde yer alan tek kazıkların sadece yatay yük etkimesi durumunda ve hem yatay hem de düşey yükün birlikte etkilediği kombine yükleme durumunda yapılan sonlu eleman analizlerine ait sonuçlar sunulmaktadır. Kombine yükleme durumunda yükleme sırasının, zemin parametrelerinin (içsel sürtünme açısı, dilatasyon açısı, elastisite modülü), kazık başı tutuluğunun ve kazığın narinliğinin (L/B) davranış üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

Karthigeyan ve ark. (2007); homojen kum zemin ve homojen kil zemin içerisinde yer alan düşey kazıkların yanal yük taşıma kapasitesine düşey yüklemenin etkisini araştırmak için bir seri üç boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada ilk olarak; serbest başlı kazığın hem kum zemindeki hem de kil zemindeki nihai düşey yük taşıma kapasitesi tek kazığın düşey yüke maruz olduğu durum için analiz edilerek belirlenmiştir. Daha sonra; kazığın hem kum hem de kil zemindeki yanal yük taşıma kapasitesi kazığın sadece yanal yüke maruz kaldığı durum için analiz yapılarak belirlenmiştir. Kazığın kombine yükleme durumundaki davranışını belirlemek için yapılan analizlerde ise kazığa ilk olarak taşıma kapasitesinin belli bir oranında düşey yük uygulanmış ve uygulanan bu sabit düşey yük etkisinde ikinci adım olarak yatay yükleme yapılmıştır. Kazık narinlik oranının, kazık kombine yükleme etkisinde iken, kazığın yanal yük taşıma kapasitesine etkisi farklı narinlik oranları için yapılan analizlerle irdelenmiştir.

Mroueh ve Shahrour (2008) tarafından yapılmış olan bu çalışmada kombine (yatay ve düşey yönde birlikte etkileyen) çekme yüklemesine maruz eğimli bir kazığın taşıma kapasitesi bir seri üç boyutlu sonlu eleman analizleri yapılarak araştırılmıştır. Kazık-zemin ara yüzeyindeki temas şartlarının kazığın tepkisine olan etkisi de incelenmiştir. Zemin içerisine düşeyle 10°'lik açı yapacak şekilde eğimli olarak yerleştirilen ve kazık-zemin ara yüzeyinde tam bir etkileşimin olduğu kabul edilen durumda kazığa farklı açılarda eğik yükler uygulanmıştır. Sonuçta; uygulanan kombine çekme yükünün kazık düşey eksenine ile yapmış olduğu açının eğimli kazığın yanal ve düşey yük taşıma kapasitesini etkilediği görülmüştür.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Arazi deneylerinde; zemin ortamı ve temel sistemi prototip boyutlarında kullanıldığından ve yükleme doğal arazi şartlarında, gerçek gerilme ve anizotropi koşulları altında gerçekleştirildiğinden elde edilen sonuçlar son derece güvenilirdir. Ancak; Klasik model deney (1g) sonuçlarına dayanılarak prototip boyutlardaki temellerin davranışlarının tahmin edilmesi ölçek etkisinin varlığından dolayı hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bununla birlikte; centrifuge model deneyleri (Ng), prototip ve model arasında gerilme benzerliği sağlayabildiğinden, prototip gerilme seviyeleri altında model deneyler yapılabilmesine imkan sağlamakta ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini de artırmaktadır.

Literatür araştırmaları kapsamında yapılan çalışmalarda iyi dökümente edilmiş deneysel çalışmaların hemen hemen yok denecek kadar az olması dikkat çeken bir ayrıntı olmuştur.

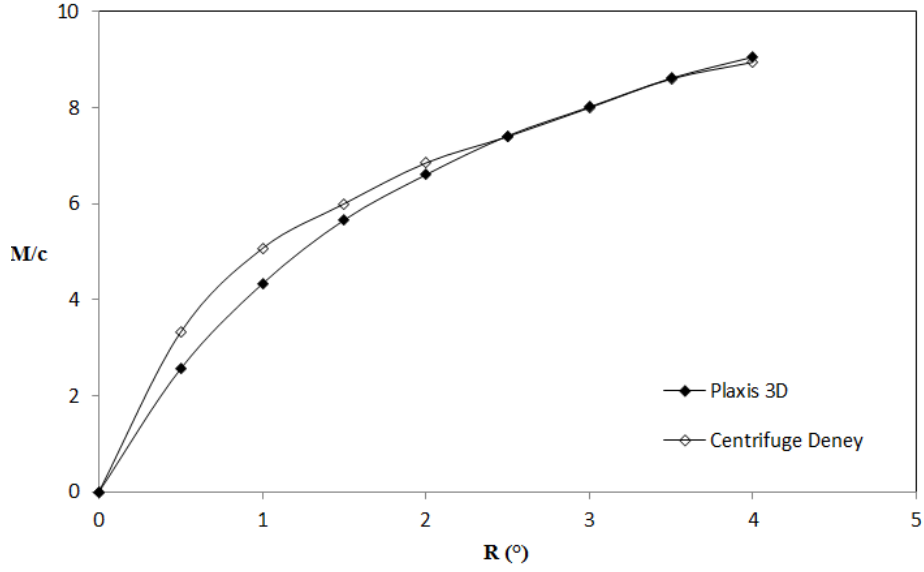
Sonlu eleman analizlerinde; zemin davranışı, kullanılan malzeme modelleri ile değerlendirilmektedir. Sonlu elemanlar modeli, centrifuge deney sonuçları kullanılarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon aşamasında centrifuge deney sonuçlarına en yakın yük-deplasman ilişkisini üreten malzeme modeli parametreleri belirlenmiştir.

Laman (1995), doymuş kil zemin içerisinde yer alan serbest başlı, kare kesitli rijit kısa kazıkların, zemin yüzeyi üzerinden oldukça yüksekte etkiyen yatay bir yük nedeni ile kazık başında oluşan büyük devirme momentlerine maruz kalmaları durumundaki kısa süreli (drenajsız) tepkilerini araştırmıştır. Bu amaçla centrifuge model deney çalışmaları gerçekleştirmiştir. Deneyler 1/40 ölçeğindeki farklı boyutlara sahip çelikten imal edilmiş model kısa kazıklar üzerinde yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda; doymuşluk derecesi %97.50 ile %100 aralığındaki orta plastisiteli, aşırı konsolide inorganik siltli kil zemin kullanılmıştır.

Laman (1995) tarafından gerçekleştirilmiş olan centrifuge model deney çalışmalarına ait veriler kullanılarak doğrulanmış bir sonlu eleman modeli ve bu model ile elde edilmiş dönme açısı – moment taşıma kapasitesi ilişkisinin deneysel sonuçla karşılaştırılması Şekil 1’ de gösterilmiştir. Şekil 1’ de gösterilen kalibrasyon eğrisi zemin yüzeyinin düz olduğu durumda $B=1.60$ m ve $D=2.40$ m boyutlarındaki yanal yüke maruz kazık için elde edilmiştir.

Şekil 1’ de gösterilen eğri incelendiğinde, uygun model parametreleri kullanılması durumunda Plaxis 3D Foundation programı ile deneysel sonuçların oldukça yakın tahmin edebildiği görülmektedir.

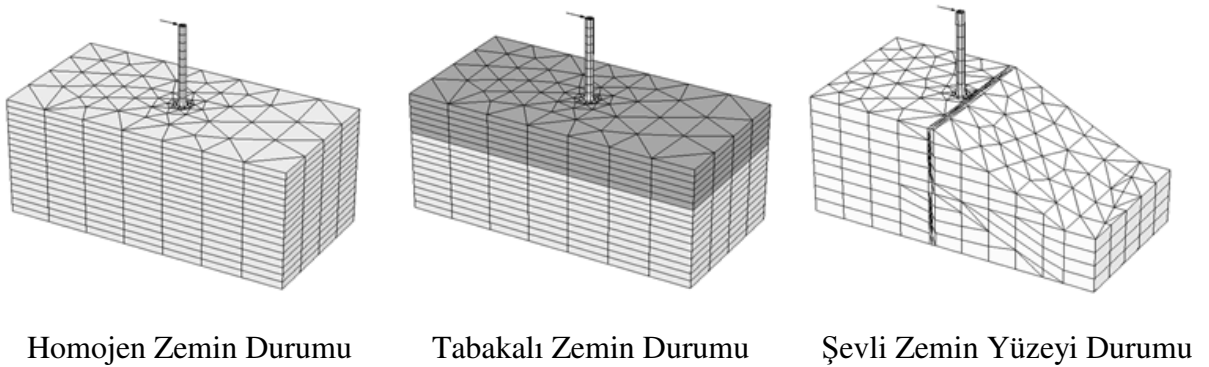
Bu bölümde; sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal analiz çalışmaları yapılırken izlenen yol genel hatları ile özetlenmiş bununla birlikte; malzeme davranışları ve kazık-zemin ara yüzey davranışının nasıl modelleneceği, malzeme modellerinin kullanılabilmesi için gerekli olan model parametrelerinin neler olduğu açıklanmıştır.



Şekil 1. Sonlu Elemanlar Modeline Ait Kalibrasyon (Doğrulama) Eğrisi

Başlangıçta yapılan deneme analizleri ile kazık eleman ve zemin sınırları arasındaki optimum yatay ve düşey mesafeler belirlenmeye çalışılmıştır. Kazık eleman ile model geometrinin kenar sınır uzaklıkları ve taban sınır uzaklıkları elde edilerek, analiz edilen geometrik modelin yanal yüke maruz kazık davranışı üzerindeki sınır etkileri oluşumu önlenmiştir. Böylelikle; analiz sonuçlarını etkilemediği ortaya konan geometrik model çalışma ortamı boyutları elde edilmiştir.

Daha sonra analizlerde kullanılacak uygun sonlu eleman ağı (mesh) yoğunluğunun belirlenmesi amacı ile deneme analizleri yapılmıştır. Böylelikle; problemin güvenilir, doğru ve ekonomik olarak değerlendirileceği sonlu eleman ağının hangi sıklıkta olması gerektiğine karar verilmiştir.



Şekil 2. Farklı Problemlere Ait Sonlu Elemanlar Ağı Örnekleri

Başlangıçta yapılan bu ön çalışmaların sonucunda sayısal analizler aşağıda belirtilen işlem sırası takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

- ✓ Çalışma Ortamının Oluşturulması
- ✓ Kazık Elemanın Oluşturulması
- ✓ Yükün Uygulanması
- ✓ Zemin Profilinin Elde Edilmesi
- ✓ Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması
- ✓ Sınır Koşulları
- ✓ Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması
- ✓ Başlangıç Gerilme Durumunun Tanımlanması
- ✓ Sayısal Analiz
- ✓ Sonuçların Değerlendirilmesi

Çalışmada; zeminin non-linear gerilme-deformasyon davranışı Mohr-Coulomb Malzeme modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Zeminin bu non-linear davranışı kullanılan malzeme modeline bağlı olarak çok yönlü bir şekilde modellenabilir. Kullanılan malzeme modeli için gerekli olan model parametre sayısının artması davranışın modellenmesindeki çok yönlülüğü de etkileyecektir. Geoteknik mühendisliği problemlerinin analizinde zeminlerin davranışı, az sayıda model parametresine ihtiyaç duyulması, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi basit fiziksel özellikler kullanılarak göçme kriteri tanımlama olanağının bulunması, geoteknik mühendislerinin gerekli model parametrelerine aşına olmaları ve zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilecek temel zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile bu parametrelerin kolaylıkla elde edilebiliyor olması ve malzeme modelleri ile ilgili olarak literatürde yapılmış olan çalışmalar sonucunda Mohr-Coulomb gibi izotropik modellerin kullanılmasının yeterli doğrulukta sonuçlara götürdüğünün ortaya konmuş olması nedeni ile yaygın olarak Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak modellenmektedir (Yang ve Jeremic, 2005; Johnson ve ark., 2006; Karthigeyan ve ark., 2006; Karthigeyan ve ark., 2007).

Zeminin gerilme-deformasyon davranışını lineer elastik-tam plastik olarak modelleyen bu malzeme modeli, elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) ve dilatasyon açısı (ψ) olmak üzere beş temel giriş parametresine sahiptir.

İçsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) ve elastisite modülü (E) parametreleri zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile elde edilmiş olup poisson oranı, analizlerde kullanılan zemin cinsi ve zeminin doygunluk derecesine bağlı olarak literatürde tanımlanmış değerlere bağlı olarak belirlenmiştir. Dilatasyon açısı değeri ise Plaxis Manual tarafından yapılmış olan tanımlamaya bağlı alınarak hesaplanmıştır.

Zemin içerisinde yer alan dolu kesitli rijit yapısal elemanların davranışları Lineer Elastik (LE) malzeme modeli kullanılarak yeterli doğrulukta modellenmektedir. Dolu kesitli yapısal elemanlar non-porous davranış biçimi sergilemektedir. Sayılan bu nedenlerden dolayı kazık elemanın davranışı LE malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir.

Ara yüzey elemanının davranışı büyük ölçüde kazığın zemine yerleştirilme yöntemine, kazığın imal edildiği malzemeye ve zeminin sıkılığına bağlıdır. Kazık elemanlar modellenirken ara yüzey davranışının tanımlanmasının modellenmenin doğruluğunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmektedir (Muqtadir ve Desai, 1986; Trochanis ve ark., 1991; Fan ve Long, 2005; Yang ve Jeremic, 2005; Johnson ve ark., 2006; Karthigeyan ve ark., 2006; Karthigeyan ve ark., 2007).

Plaxis 3D Foundation programında kazık ve zemin arasındaki etkileşimin derecesi mukavemet azaltma faktörü R_{inter} kullanılarak modellenir. R_{inter} katsayısı, aşağıda sıralanmış olan kurallara uygun olarak, ara yüzey mukavemetini zeminin mukavemeti ile ilişkilendirmektedir. Ara yüzey elemanında elastik ve plastik davranışlar arasındaki ayırım Coulomb kriterine göre yapılmaktadır. ϕ_i ve c_i parametreleri sırası ile ara yüzey elemanının içsel sürtünme açısı ve kohezyon değeri olmak üzere etkileşimin derecesi göz önüne alınarak aşağıdaki eşitlikler yardımı ile elde edilirler.

$$c_i = R_{inter} c_{zemin} \quad (1)$$

$$\tan\phi_i = R_{inter} \tan\phi_{zemin} \quad (2)$$

$$R_{inter} < 1 \text{ ise } \psi_i = 0 \text{ ve } R_{inter} = 1 \text{ ise } \psi_i = \psi_{zemin} \quad (3)$$

Yapılan analizlerde, kazığın zemine yerleştirilme yönteminin ara yüzey davranışı üzerindeki etkileri dikkate alınmamıştır.

Plaxis 3D Foundation programında zemin davranışının modellenmesi için ileri malzeme modelleri de yer almaktadır. İleri malzeme modelleri, zemin davranışının modellenmesi için

çok daha fazla sayıda model parametresine ihtiyaç duymaktadır. Kullanılan malzeme modeli için gerekli olan model parametre sayısının artması davranışın modellenmesindeki çok yönlülüğü de etkileyecektir. Ancak; bu parametrelerin zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile elde edilmiş olduğu ve bu modellerin kullanılarak analizlerin gerçekleştirildiği çalışma sayısı literatürde yok denecek kadar azdır. Bu çalışma kapsamındaki analizlerde modellenen zemin örnekleri için de ileri malzeme modellerinde kullanılacak parametrelere ait yapılmış deneysel çalışma sonuçlarına ulaşılamamıştır. Literatürde yer alan sayısal analiz çalışmalarının çoğunluğunda zemin davranışı elastik-tam plastik malzeme modelleri kullanılarak modellenmiştir. Bu nedenle; çalışma programı içerisinde yapılması planlanmış olmasına rağmen ileri malzeme modelleri kullanılarak zemin davranışının modellendiği sayısal analiz çalışmaları gerçekleştirilememiştir.

4. BULGULAR

Bu proje çalışması kapsamında; hem tek kazık hem de kazık gruplarının yanal yük etkisindeki davranışlarının incelenmesi amacı ile aşağıda sıralanmış farklı durumlarda sayısal analiz çalışmaları gerçekleştirilerek sonuçları değerlendirilmiştir.

- ✓ Farklı zemin koşullarının (üniform kum zemin, üniform kil zemin, tabakalı kum zemin, düz zemin yüzeyi ve şevli zemin yüzeyi) yanal yüklü kazık davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği sayısal analiz çalışmaları,
- ✓ Farklı yükleme koşulları ve farklı yükleme tipinin yanal yüklü kazık davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği sayısal analiz çalışmaları,
- ✓ Kazık geometrisinin (kazık en kesit şekli, kazık boyu, kazık çapı ya da genişliği) yanal yüklü kazık davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği sayısal analiz çalışmaları,
- ✓ Zemin-kazık ara yüzey davranışının yanal yüklü kazık davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği sayısal analiz çalışmaları,
- ✓ Zemin davranışının modellenmesinde kullanılan malzeme modeline ait çeşitli parametrelerin (içsel sürtünme açısı, elastisite modülü, dilatasyon açısı, kohezyon değeri) yanal yüklü kazık davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği sayısal analiz çalışmaları,
- ✓ Yanal yüke maruz kazık gruplarının davranışının değerlendirildiği sayısal analiz çalışmaları,

Yukarıda sıralanmış olan sayısal analiz çalışmalarından elde edilen genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- ✓ Kazık başındaki yanal ötelenmenin kazık çapının %10'una eşit olduğu andaki yanal yük taşıma kapasitesi değerleri homojen sıkı kum zemin durumunda aynı koşullar altında belirlenen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri ile karşılaştırılmıştır. H, gevşek kum tabakası kalınlığı ve L' de kazık gömülü uzunluğudur.

H/L=0.25 için yanal yük taşıma kapasitesi değeri homojen sıkı kum zemin durumuna göre yaklaşık olarak %12 oranında azalırken bu oran H/L=0.50, 0.75 ve 1.0 için sırası ile %50, %68 ve %80 olarak elde edilmiştir.

Üstte gevşek altta ise sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin durumunda sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri üstte yer alan gevşek kum tabakasının kalınlığının artması ile yanal yük taşıma kapasitesinin azaldığını göstermektedir.

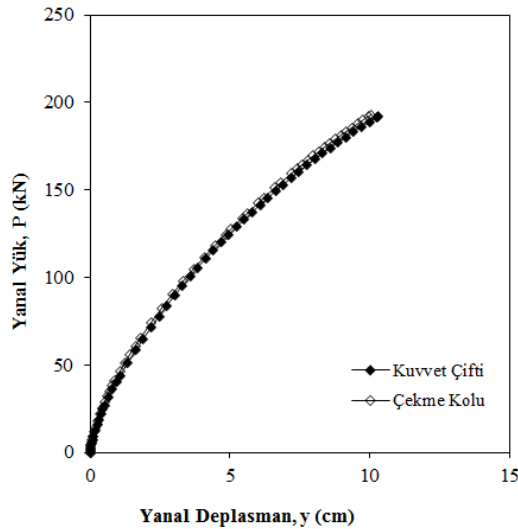
- ✓ Şevlendirilmiş gevşek kum zemin içerisindeki yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde kazığın şev tepesine olan yatay mesafesinin etkisi araştırılmıştır. Yanal yük taşıma kapasitesi oranının (YYTKO) kazığın şev tepesine olan uzaklığı ile ilişkisi elde edilmiştir. Değerlendirme aşamasında; yanal yük taşıma kapasitesi, kazık başındaki yanal ötelenmenin kazık çapının %10'una eşit olduğu andaki yanal yük değeri olarak alınmıştır.

Kazığın şev tepesine olan uzaklığının şev tepesinden itibaren 0.5D olduğu durumda yanal yük taşıma kapasitesi şevsiz durumdakinin %72' si olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde; kazık şev tepesinden 1D uzaklığa yerleştirildiğinde deneysel taşıma gücü şevsiz durumdakinin %75'i değerindedir. Kazığın şev tepesinden itibaren 2D ve 3D mesafelere yerleştirilmesi durumunda elde edilen YYTKO ları iyi bir uyum sergilemektedir. Bununla birlikte; 2D uzaklıkta yanal yük taşıma kapasitesi şevsiz durumdaki yanal yük taşıma kapasitesinin %85' i iken 3D uzaklıkta bu oran %97 olarak elde edilmiştir.

30°'lik şev açısına sahip kum zeminde gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar kazığın şev tepesinden itibaren 3D uzaklığa yerleştirilmesi durumunda şev etkisinin tamamen ortadan kalktığını göstermektedir.

45°'lik şev açısına sahip kil zeminde gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar kazığın şev tepesine olan uzaklığının kazık genişliğinden büyük olması durumunda şev etkisinin büyük oranda ortadan kalktığını göstermektedir. Bununla birlikte; şevli durumda elde yanal yük taşıma kapasitelerinde zemin yüzeyinin düz olduğu duruma göre %10' lara varan azalmalar olduğu görülmüştür.

- ✓ Sayısal analiz çalışmaları sırasında kazıklara etkiyecek yanal yük, pratikte karşılaşılabileceği şekliyle, zemin yüzeyi üzerinden belirli bir yükseklikte etkiyen bir yatay yük olarak (çekme kolu yaklaşımı) ya da kazık başında etkiyen bir kuvvet çifti olarak modellenmektedir. Sayısal analiz çalışmaları öncesinde her iki yükleme tipinin kullanıldığı deneme analizleri yapılmış ve yükün uygulanma şeklinin analiz sonuçlarını değiştirip değiştirmeyeceği incelenmiştir. Deneme analizleri sonucunda aşağıdaki grafikte de gösterildiği gibi yanal yükün uygulamasında seçilecek yaklaşımın sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilebilir seviyelerdedir.



Şekil 3. Yanal Yükün Uygulanma Şekline Bağlı Olarak Elde Edilen Analiz Sonuçları

- ✓ Zeminlerin gerilme-deformasyon davranışları, drenaj koşullarından bağımsız olarak, esas manada efektif gerilmeler tarafından kontrol edilmektedir. Suya doymuş kil zeminlerin kısa dönem davranışlarının tahmin edilmesinde toplam gerilme analizinin kullanılmasının başlıca nedeni ilave boşluk suyu basınçları ve dolayısı ile efektif gerilmelerin tahmin edilmesinden kaçınılmasıdır. Eğer, ilave boşluk suyu basınçları tahmin edilebilirse suya doymuş kil zeminlerin kısa dönem drenajsız davranışını da efektif gerilmeler cinsinden ifade etmek mümkün olacaktır.

Yumuşak zeminler ile ilgili projelerde, genellikle, deneysel çalışmalar ile zemin parametrelerinin drenajsız koşullardaki değerleri elde edilmektedir. Bununla birlikte; drenajsız kayma mukavemeti değeri, efektif kayma mukavemeti parametreleri olan c' ve ϕ' değerlerinin elde edilmesinde de kolaylıkla ve güvenilerek kullanılamaz. Çünkü; drenajsız bir analizde takip edilen efektif gerilme izi pratikte karşılaşılan benzemeyecektir. Bunun yanı sıra, plaxiste drenajsız analizler sırasında hesaplanan boşluk suyu basıncı değerleri de gerçekçi değildir.

Suya doymuş kil zeminlerin drenajsız koşullar altındaki davranışlarını modellemek için Plaxis 3D programında üç farklı seçenek bulunmaktadır. Bunlar; drenajsız parametreler ile toplam gerilme analizi (Undrained A), efektif rijitlik parametreleri ile drenajsız efektif gerilme analizi (Undrained B) ve zeminin non-porous ortam kabul edildiği toplam gerilme analizidir (Undrained C).

Bu analiz tipleri arasında suya doymuş kil zeminlerin drenajsız davranışının, Mohr-Coulomb malzeme modeli ile, en gerçekçi şekilde Undrained (B) tipi analizle modellendiği görülmüştür. Bu şekilde yapılan analizlerde kayma mukavemeti parametrelerinin drenajsız değerleri (c_u ve $\phi_u = 0$) ve rijitlik parametrelerinin efektif değerleri (E' ve ν') kullanılmaktadır.

- ✓ Yanal yüke maruz kazık davranışı, kazık ve zemin arasındaki etkileşim tarafından kontrol edildiğinden kazık en kesit şekli yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu amaçla; kare ve dairesel en kesit geometrisine sahip kazıklar üzerinde yapılan sayısal analiz çalışmaları ile en kesit geometrisinin yanal yük taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır.

Analizlerde; 1.0 m genişliğe sahip kare kazık, 1.0 m çapa sahip dairesel kazık ve 1.128 m çapa sahip dairesel kazıklar kullanılmıştır. 1.128 m çap değeri, 1.0 m genişliğe sahip kare kazık için eşdeğer alan kavramı kullanılarak elde edilmiştir. Analizler, aynı zemin koşullarında ve aynı gömülü uzunluğa sahip kazıklar için gerçekleştirilmiştir.

Kazık ve kazığı çevreleyen zemin arasındaki temas yüzeyinin düz olduğu kare kazıkların aynı koşullarda daha büyük yanal yük taşıma kapasitesine sahip oldukları görülmüştür. Çünkü; eğri temas yüzeyine sahip dairesel kazıklarda, temas edilen zemin yükün uygulanması ile kazık kenarlarından kolayca akabilmektedir. Kare kazıklarda ise, temas yüzeyinin düz olması bu mekanizmanın oluşumunu zorlaştırmaktadır. Bu

yüzden; kazık temas yüzeyine etkiyen normal reaksiyon kuvveti büyümekte ve aynı yanal deplasman değeri için kare kazıklarda daha büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmektedir. Ayrıca; analitik yöntemlerde yapılan eşdeğer kesit alanı kabulünün de uygun bir yaklaşım olmadığı elde edilen sonuçlar ile ortaya konmuştur.

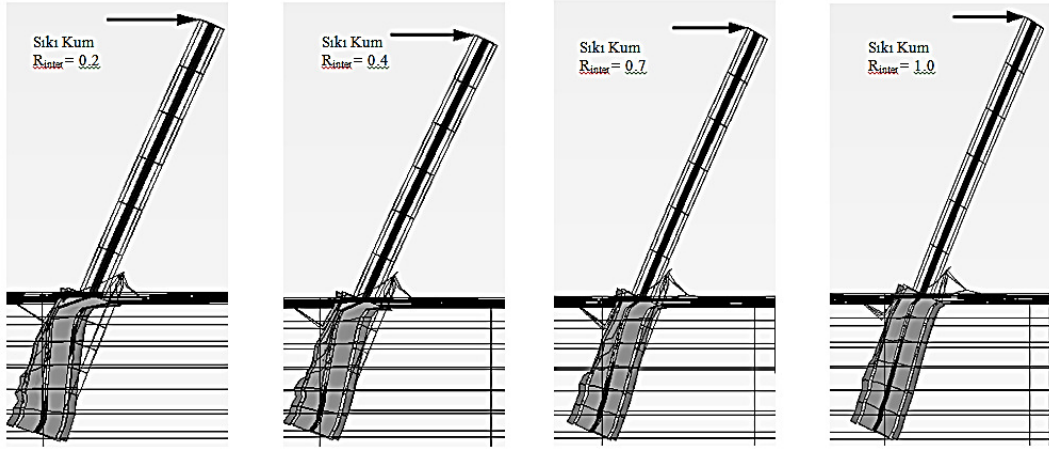
Aynı çapa çapa ancak farklı gömülü uzunluklara sahip kazıklar ile yapılan analizler ile kazık gömülü uzunluğunun yanal yük taşıma kapasitene etkisi incelenirken benzer şekilde aynı kazık gömülü uzunluğuna ve farklı çaplara sahip kazıklar üzerinde yapılan analizlerle de kazık çapının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Yapılan analizlerin sonucunda; kazık gömülü uzunluğu ve kazık çapını içeren kazık geometrisinin kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yanal yük taşıma kapasitesi hem artan kazık gömülü uzunluğu hem de artan çap değerine bağlı olarak artış göstermektedir.

- ✓ Kazık ve zemin arasındaki etkileşimin derecesi mukavemet azaltma faktörü R_{inter} kullanılarak modellenmektedir.

Ara yüzey davranışının kil zemindeki ve gevşek ve sıkı kum zemindeki yanal yüke maruz kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi gerçekleştirilmiş bir seri analiz ile araştırılmıştır.

Gevşek ve sıkı kum zemindeki analizler R_{inter} katsayısının 0.2, 0.4, 0.7 ve 1.0 değerleri için yapılmıştır. Kil zeminlerde yer alan kazıklar için R_{inter} parametresi ile ilgili literatürdeki öneriler genellikle kil zeminin kohezyon değerine bağlı olarak elde edilecek bir adhezyon katsayısı değerine eşit bir R_{inter} katsayısının kullanılması şeklindedir. Plaxis 3D Foundation programı ise R_{inter} katsayısının değerinin 2/3 olarak alınmasını tavsiye etmektedir. 82 kPa değerindeki bir kohezyona karşılık gelen adhezyon katsayısı 0.40 civarındaki iken Plaxis' in önerdiği katsayısı da 0.70 olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 4. R_{inter} Katsayısının Kazık-Zemin Etkileşimine Etkisi

Gevşek ve sıkı kum zeminde yapılan analizler sonucunda R_{inter} değerinin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Öyle ki; gevşek kum zeminde, R_{inter} katsayısının değeri 0.2 olduğu durumda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değeri $R_{inter}=1$ durumunda elde edilmiş olan taşıma kapasitesi değerinin yaklaşık olarak %54'ü kadar iken bu değer sıkı kum zemin durumunda yaklaşık %51 olarak elde edilmiştir. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, R_{inter} katsayısının 0.7 olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile $R_{inter}=1$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi arasındaki fark ihmal edilebilir seviyededir. Hem adhezyon katsayısı değeri hem de Plaxis 3D Foundation tarafından önerilen yaklaşımla kil zeminde yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında ise bu iki değer arasında davranışta önemli sayılabilecek bir değişimin oluşmadığını gözlenmiştir.

- ✓ Zemin sıklığının diğer bir ifade ile içsel sürtünme açısının yanal yüke maruz kazık davranışı üzerindeki etkisi relatif sıklık derecesi $D_r = \%37$ olan gevşek ve relatif sıklık derecesi $D_r = \%85$ olan sıkı kum zeminde gerçekleştirilen sayısal analizler ile incelenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda; sıkı kum zemindeki kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi-yanal ötelenme ilişkilerinin gevşek kum zemin durumundakine göre daha rijit olduğu ve aynı kazık başı yanal ötelenme miktarı için sıkı kum zemin durumunda daha büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edildiği görülmüştür. Gevşek kum zemin durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi, sıkı kum zemin durumunda elde edilen değerin yaklaşık üçte biri oranında olmuştur. Elde edilen bu

sonuçlar, kum zeminin sıklılığının yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

- ✓ Plaxis 3D Foundation programında, kum zeminlerin gerilme-deformasyon davranışları MC malzeme modeli kullanılarak modellendiğinde, elastisite modülü değerinin derinlik boyunca sabit olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte; Plaxis 3D programı, elastisite modülünün derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı bir modelleme seçeneğini de sunmaktadır.

Kum zeminin elastisite modülü değerinin yanal yüke maruz kazık davranışı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacı ile elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu durumda ve derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı durumda olmak üzere iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, kazığın yanal olarak yüklenmesi ile birlikte elastisite modülünde meydana gelebilecek değişimler dikkate alınmamıştır.

Analizler sonucunda, elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu durumda, elastisite modülünün derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı duruma göre yaklaşık %37 oranında daha büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir. Ayrıca; elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu durumda elde edilen yük-deplasman eğrilerinin daha rijit bir davranış sergilediği de grlmştir.

- ✓ Kum zeminlerin kayma mukavemetleri ve gerilme-deformasyon davranışları esas olarak relatif sıklılık derecelerine bağlıdır. Kum zeminin içsel sürtünme açısı, sadece dane temas yüzeylerindeki sürtünmeyi değil aynı zamanda danelerin birbirlerinin hareketini engelleme derecesini de temsil etmektedir. Danelerin birbirlerinin hareketini engelleme derecesi, özellikle sıkı kum zemin durumunda, kum zeminin mukavemeti üzerinde büyük öneme sahiptir. Çünkü; dilatasyon olarak adlandırılan bu özellik sıkı kum zemine ilave bir kayma mukavemeti sağlamaktadır (Craig, 1987; Bolton, 1996). Bu yüzden dilatasyon açısının (ψ) kum zemin içerisinde yer alan yanal yüke maruz rijit kısa kazıkların taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda gerçekleştirilmiş olan bir seri analizle araştırılmıştır.

Gevşek kum zeminde yapılmış olan analizlerde, Plaxis'in dilatasyon açısı için önermiş olduğu $\psi=\phi-30^\circ$ yaklaşımına göre $\psi=8^\circ$ durumunda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değerini $\psi=0^\circ$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerini ile

karşılaştırıldığında $\psi=8^\circ$ durumuna göre yanal yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak %15 azalmaktadır. Sıkı kum zemin için elde edilmiş olan sonuçlar incelendiğinde ise $\psi=14^\circ$ ve $\psi=0^\circ$ için yapılan analizler sonucu elde edilen yanal yük taşıma kapasiteleri arasında $\psi=14^\circ$ durumuna göre yaklaşık olarak %25 değerinde bir azalma olduğu gözlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar, özellikle, sıkı kum zemin durumunda dilatasyon açısının yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte; gevşek ve sıkı kum zemin durumunda elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri incelendiğinde, dilatasyon açısının artması ile zeminin daha rijit bir yük-ötelenme davranışı sergilediği görülmüştür.

- ✓ Kil zeminde yapılan analizlerde malzeme davranış tipi undrained (B) olarak modellenmiştir. Bununla birlikte; drenajsız kohezyon değerinin (c_u) derinlik boyunca sabit olduğu analizlerde zeminin yük-deplasman davranışı elastik-tam plastik bir davranıştan ziyade doğrusal davranışa benzemektedir. Dolayısı ile deneysel davranışta gözlenen elastik-plastik ya da elasto-plastik davranış elde edilememektedir. Ancak; kohezyon değerinin derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı kabulü ile yapılan modellemelerde plastik davranış bölümünün de elde edildiği ve deneysel sonuçlara çok daha yakın olan yük-deplasman eğrilerinin elde edildiği görülmüştür.
- ✓ Yanal yüke maruz kazık gruplarının davranışı konusunda literatür araştırmaları yapıldığında, sonlu eleman modellerinin kalibrasyonu için kullanılacak iyi dökümente edilmiş ayrıntılı centrifuge ya da arazi deney çalışması sonuçlarına ulaşılamamıştır. Bu nedenle; tek kazık durumu için gerçekleştirilen parametrik çalışmalar bu aşamada yapılamamıştır.

Yanal yüke maruz kazık gruplarında; grup etkileşimi nedeni ile grup içerisinde yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin tek kazık durumundaki yanal yük taşıma kapasitelerine göre azaldığı gözlenmiştir. Kazığın grup içerisindeki konumu yanal yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Öyle ki; grup içerisinde arka sırada yer alan kazıkların ön sırada yer alan kazıklara göre çok daha az yanal yük taşıma kapasitesine sahip oldukları görülmüştür.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu proje çalışmasında; PLAXIS 3D Foundation sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmaları sonucunda aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Üstte gevşek altta ise sıkı kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum zemin durumunda sayısal analizlerden elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değerleri üstte yer alan gevşek kum tabakasının kalınlığının artması ile yanal yük taşıma kapasitesinin azaldığını göstermektedir.
- 30°'lik şev açısına sahip kum zeminde gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar kazığın şev tepesinden itibaren 3D uzaklığa yerleştirilmesi durumunda şev etkisinin tamamen ortadan kalktığını göstermektedir.
- 45°'lik şev açısına sahip kil zeminde gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar kazığın şev tepesine olan uzaklığının kazık genişliğinden büyük olması durumunda şev etkisinin büyük oranda ortadan kalktığını göstermektedir. Bununla birlikte; şevli durumda elde yanal yük taşıma kapasitelerinde zemin yüzeyinin düz olduğu duruma göre %10' lara varan azalmalar olduğu görülmüştür.
- Yanal yükün uygulamasında seçilecek yaklaşımın sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilebilir seviyelerdedir.
- Suya doygun kil zeminlerin drenajsız davranışının, Mohr-Coulomb malzeme modeli ile en gerçekçi şekilde Undrained (B) tipi analizle modellendiği görülmüştür.
- Kazık ve kazığı çevreleyen zemin arasındaki temas yüzeyinin düz olduğu kare kazıkların aynı koşullardaki dairesel en kesitli kazıklardan daha büyük yanal yük taşıma kapasitesine sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca; analitik yöntemlerde yapılan eşdeğer kesit alanı kabulünün de uygun bir yaklaşım olmadığı elde edilen sonuçlar ile ortaya konmuştur.
- Kazık gömülü uzunluğu ve kazık çapını içeren kazık geometrisinin kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yanal yük taşıma kapasitesi hem artan kazık gömülü uzunluğu hem de artan çap değerine bağlı olarak artış göstermektedir.

- Gevşek ve sıkı kum zeminde yapılan analizler sonucunda R_{inter} değerinin yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Öyle ki; gevşek kum zeminde, R_{inter} katsayısının değerinin 0.2 olduğu durumda elde edilmiş olan yanal yük taşıma kapasitesi değeri $R_{inter}=1$ durumunda elde edilmiş olan taşıma kapasitesi değerinin yaklaşık olarak %54'ü kadar iken bu değer sıkı kum zemin durumunda yaklaşık %51 olarak elde edilmiştir. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, R_{inter} katsayısının 0.7 olduğu durumda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi değeri ile $R_{inter}=1$ durumunda elde edilen yanal yük taşıma kapasitesi arasındaki fark ihmal edilebilir seviyededir. Hem adhezyon katsayısı değeri hem de Plaxis 3D Foundation tarafından önerilen yaklaşımla kil zeminde yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında ise bu iki değer arasında davranışta önemli sayılabilecek bir değişimin oluşmadığını gözlenmiştir.
- Sıkı kum zemindeki kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi-yanal ötelenme ilişkilerinin gevşek kum zemin durumundakine göre daha rijit olduğu ve aynı kazık başı yanal ötelenme miktarı için sıkı kum zemin durumunda daha büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edildiği görülmüştür.
- Elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu durumda, elastisite modülünün derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı duruma göre yaklaşık %37 oranında daha büyük yanal yük taşıma kapasitesi değerleri elde edilmiştir. Ayrıca; elastisite modülünün derinlik boyunca sabit olduğu durumda elde edilen yük-deplasman eğrilerinin daha rijit bir davranış sergilediği görülmüştür.
- Özellikle, sıkı kum zemin durumunda dilatasyon açısı yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte; gevşek ve sıkı kum zemin durumunda elde edilen yanal yük-yanal ötelenme ilişkileri incelendiğinde, dilatasyon açısının artması ile zeminin daha rijit bir yük-ötelenme davranışı sergilediği görülmüştür.
- Kil zeminde drenajsız kohezyon değerinin (c_u) derinlik boyunca sabit olduğu analizlerde zeminin yük-deplasman davranışı elastik-tam plastik bir davranıştan ziyade doğrusal davranışa benzemektedir. Dolayısı ile deneysel davranışta gözlenen elastik-plastik ya da elasto-plastik davranış elde edilememektedir. Ancak; kohezyon değerinin

derinlik boyunca doğrusal olarak arttığı kabulü ile yapılan modellemelerde plastik davranış bölümünün de elde edildiği ve deneysel sonuçlara çok daha yakın olan yük-deplasman eğrilerinin elde edildiği görülmüştür.

- Yanal yüke maruz kazık gruplarında; grup etkileşimi nedeni ile grup içerisinde yer alan kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin tek kazık durumundaki yanal yük taşıma kapasitelerine göre azaldığı gözlenmiştir. Kazığın grup içerisindeki konumu yanal yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilemektedir.
- Yanal yüke maruz kazık gruplarının davranışı konusunda yapılan literatür araştırmalarında, sonlu eleman modellerinin kalibrasyonu için kullanılabilecek iyi dökümente edilmiş ayrıntılı centrifuge ya da arazi deney çalışması sonuçlarına ulaşılamamıştır. Bu nedenle; tek kazık durumu için gerçekleştirilen parametrik çalışmalar bu aşamada yapılamamıştır.
- İleri malzeme modelleri, zemin davranışının modellenmesi için çok daha fazla sayıda model parametresine ihtiyaç duymaktadır. Kullanılan malzeme modeli için gerekli olan model parametre sayısının artması davranışın modellenmesindeki çok yönlülüğü de etkileyecektir. Ancak; bu parametrelerin zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile elde edilmiş olduğu ve bu modellerin kullanılarak analizlerin gerçekleştirildiği çalışma sayısı literatürde yok denecek kadar azdır. Bu çalışma kapsamındaki analizlerde modellenen zemin örnekleri için de ileri malzeme modellerinde kullanılacak parametrelere ait yapılmış deneysel çalışma sonuçlarına ulaşılamamıştır. Bu nedenle; çalışma programı içerisinde yapılması planlanmış olmasına rağmen ileri malzeme modelleri kullanılarak zemin davranışının modellendiği sayısal analiz çalışmaları gerçekleştirilememiştir.

6. KAYNAKLAR

- FAN, C.C. and LONG, J.H., 2005. Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of Laterally Loaded Piles in Sand. *Computers and Geotechnics*, 32: 274-289.
- DUNCAN, J. M., EVANS, L. T. and OOI, P. S. K., 1994. Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (5):1018-1033.
- BROWN, D.A., MORRISON, C. and REESE, L.C., 1988. Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114 (11): 1261-1276.
- RUESTA, P.F. and TOWNSEND, F.C., 1997. Evaluation of Laterally Loaded Pile Group at Roosevelt Bridge. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (12): 1153-1161.
- ANDERSON, J. B., TOWNSEND, F. C. and GRAJALES, B., 2003. Case History Evaluation of Laterally Loaded Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (3):187-196.
- ZHANG, L.M., 2003. Behavior of Laterally Loaded Large-Section Barrettes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (7): 639-648.
- ROLLINS, K. M., LANE, J. D. and GERBER, T. M., 2005. Measured and Computed Lateral Response of a Pile Group in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (1): 103-114.
- MCVAY, M., BLOOMQUIST, D., VANDERLINDE, D. and CLAUSEN, J., 1994. Centrifuge Modelling of Laterally Loaded Pile Groups in Sands. *Geotechnical Testing Journal*, 17 (2): 129-137.
- LAMAN, M., 1995. The Moment Carrying Capacity of Short Pier Foundations in Clay. Ph.D. Thesis, University of Liverpool, U.K., 176p.
- MCVAY, M., ZHANG, L., MOLNIT, T. and LAI, P., 1998. Centrifuge Testing of Large Laterally Loaded Pile Groups in Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (10): 1016-1026.

- ZHANG, L., MCVAY, M.C. and LAI, P., 1999. Numerical Analyses of Laterally Loaded 3x3 to 7x3 Pile Groups in Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (11): 936-946.
- DICKIN, E.A. and NAZIR, R., 1999. Moment-Carrying Capacity of Short Pile Foundations in Cohesionless Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125 (1)**: 1–10.
- DYSON, G. J. and RANDOLPH, M. F., 2001. Monotonic Lateral Loading of Piles in Calcareous Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (4): 346-352.
- DICKIN, E.A. and LAMAN, M., 2003. Moment Response of Short Rectangular Piers in Sand. *Computers and Structures*, 81: 2717-2729.
- HU, Z., MCVAY, M., BLOOMQUIST, D., HERRERA, R., and LAI, P., 2006. Influence of Torque on Lateral Capacity of Drilled Shafts in Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (4): 456-464.
- KONG, L.G. and ZHANG, L.M., 2006. Rate-Controlled Lateral-Load Pile Tests Using A Robotic Manipulator in Centrifuge. *Geotechnical Testing Journal*, 30 (3): 1-10.
- MUQTADIR, A. and DESAI, C.S., 1986. Three-Dimensional Analysis of A Pile-Group Foundation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 10: 41-58.
- BROWN, D.A. and SHIE, C.F., 1990. Three-Dimensional Finite Element Model of Laterally Loaded Piles. *Computers and Geotechnics*, 10: 59-79.
- TROCHANIS, A.M., BIELAK, J. and CHRISTIANO, P., 1991. Three-Dimensional Nonlinear Study of Piles. *Journal of Geotechnical Engineering*, **117 (3)**: 429–447.
- LAMAN, M., KING, G.J.W. and DICKIN, E.A., 1999. Three-Dimensional Finite Element Studies of the Moment-Carrying Capacity of Short Pier Foundations in Cohesionless Soil. *Computers and Geotechnics*, 25: 141-155.
- WAKAI, A., GOSE, S. and UGAI, K., 1999. 3-D Elasto-Plastic Finite Element Analyses of Pile Foundations Subjected to Lateral Loading. *Soils and Foundations*, 39 (1): 97-111.

- YANG, Z. and JEREMIC, B., 2003. Numerical Study of Group Effects for Pile Groups in Sands. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27: 1255-1276.
- CHAE, K.S., UGAI, K. and WAKAI, A., 2004. Lateral Resistance of Short Single Piles and Pile Groups Located Near Slopes. *International Journal of Geomechanics*, 4 (2): 93-103.
- MARTIN, G.R. and CHEN, C.Y., 2005. Response of Piles due to Lateral Slope Movement. *Computers and Structures*, 83: 588-598.
- YANG, Z. and JEREMIC, B., 2005. Study of Soil Layering Effects on Lateral Loading Behavior of Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (6): 762-770.
- JOHNSON, K., LEMCKE, P., KARUNASENA, W. and SIVAKUGAN, N., 2006. Modelling the Load-Deformation Response of Deep Foundations Under Oblique Loading. *Environmental Modelling and Software*, 21: 1375-1380.
- KARTHIGEYAN, S., RAMAKRISHNA, V.V.G.S.T. and RAJAGOPAL, K., 2006. Influence of Vertical Load on the Lateral Response of Piles in Sand. *Computers and Geotechnics*, 33: 121-131.
- KARTHIGEYAN, S., RAMAKRISHNA, V.V.G.S.T. and RAJAGOPAL, K., 2007. Numerical Investigation of the Effect of Vertical Load on the Lateral Response of Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (5): 512-521.
- CRAIG, R.F., 1987. *Soil Mechanics* (4th edn), ELBS (English Language Book Society) / Van Nostrand Reinhold (International): London, 410p.
- BOLTON, M.D., 1996. Geotechnical Design of Retaining Walls. *The Structural Engineer*, 74 (21/5): 365-369.
- PLAXIS 3D Foundation, 2012. *Manuals*. Delft University of Technology & PLAXIS bv., The Netherlands.