

STATİK KAZIK YÜKLEME DENEYİNİN FARKLI ZEMİN MODELLERİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ARAZİ BULGULARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

Fatih ÇELİK¹ (ORCID: 0000-0001-9031-1272)*

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye, 51240

Geliş / Received: 11.05.2018

Kabul / Accepted: 09.11.2018

ÖZ

Bu çalışmada, TOKİ tarafından Adana'nın Ceyhan ilçesinde yapılmış 8 katlı (B+Z+6K) konut projesi kapsamında projelendirilmiş fore kazık zemin iyileştirme uygulamasında, tasarım yükünün kontrol edilmesi amacıyla, projenin yapılması planlanmış arazide statik kazık yükleme deney sonuçları elde edilmiştir. Bu deney sonucunda elde edilmiş veriler ışığında tekil kazığın tasarım yükü yeniden belirlenmiştir. İki boyutlu düzlemde sonlu elemanlar yöntemiyle ve yaygın olarak kullanılan iki farklı zemin modeli kullanılarak, yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu killi bir zeminde statik kazık yükleme deneyi bu çalışma kapsamında modellenmiş ve sonuçlar gerçek arazi deney verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında, geoteknik mühendisleri tarafından dünyada yaygın olarak kullanılan Plaxis-2D paket programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlarda statik kazık yükleme deneyini modellemek için kullanılmış zemin modelleri olarak; Pekleşen Zemin Modeli ve Mohr Coulomb zemin modeli seçilmiştir. Arazi deneyi bulguları ve sayısal analiz verileri karşılaştırıldığında; Pekleşen zemin modelinin, Mohr Coulomb zemin modelinden daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; sonlu elemanlar yöntemiyle statik kazık yükleme deneyinin modellenebileceği veriler ışığında sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: statik kazık yükleme deneyi, sonlu elemanlar yöntemi, pekleşen zemin modeli, mohr coulomb zemin modeli, kazıklı temeller.

MODELLING OF PILE LOAD TEST IN DIFFERENT SOIL MODELS WITH FINITE ELEMENT METHOD AND COMPARISON WITH FIELD TEST RESULTS

ABSTRACT

In this study, static pile load test was conducted in the planned site in order to evaluate the results and redesign the project in a pile foundation application that were designed for 8-storey residential project constructed in Ceyhan-Adana by TOKI (Provision of Social Housing in Turkey). The design load of the single pile was corrected according to the results obtained from the static pile load test. The static pile load test was modelled in the concept of this study with using 2D-FEM analysis and two common soil models for a clayey soil under saturated soil condition and their results were compared with field test results. Plaxis-2D commercial software package program that is commonly used by geotechnical engineers in all over the world was used for this study. The selected soil models in order to propose the pile load test in FEM analysis are Hardening Soil Model and Mohr Coulomb soil model. When field test results and numerical models' results are compared with each other, it was observed that Hardening Soil Model gives more accurate results than Mohr Coulomb soil model for this study. As a result that the ability of static pile load test modelling with 2D-FEM analysis were presented with comparison results in this study.

Keywords: static pile load test, finite element method, hardening soil model, mohr coulomb soil model, pile foundation.

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 43 07; e-mail / e-posta: fatihcelik@ohu.du.tr

STATİK KAZIK YÜKLEME DENEYİNİN FARKLI ZEMİN MODELLERİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ARAZİ BULGULARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde üst yapıdan gelen yükün zemine güvenli bir şekilde aktarılması önemli bir yer tutmaktadır. Zeminin üst yapıdan gelen yükü güvenli ve kontrol edilebilir bir şekilde taşıyamaması durumunda, yapıda ciddi kalıcı hasarlar oluşabileceği gibi, geri dönüşü mümkün olmayan can güvenliği problemlerini de beraberinde getirebilmektedir. Bu sebepten, geoteknik mühendisleri tarafından bu tür problemlerin önüne geçmek amacıyla birçok zemin ıslah yöntemleri geliştirilmiştir. Kazıklı derin temeller bu yöntemler içerisinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir.

Yüzeysel temeller genellikle derin temellerden daha ekonomiktirler. Bu sebepten temel tasarımlarında önce yüzeysel temel yapmanın mümkün olup olmayacağı araştırılır. Bu araştırma sırasında zeminin zayıf olup taşıma gücünün aşıldığının saptandığı durumda yüzeysel temeller yeterli olmazlar. Diğer yandan; bir temel taşıma gücü açısından yeterli olabilir ancak izin verilen değerden daha fazla oturmaya maruz kalabilir [1]. Bu durumda, üst yapıdan gelen yükü daha derindeki zeminlere aktarmak ve oturmaların istenen sınırlar içinde kalmasını sağlamak için derin temeller inşa edilir. Üst yapıdan gelen yükler kazıklı temellerle zemine genellikle iki şekilde aktarılır: (1) uç direnciyle ve (2) sürtünme direnciyle [2]. Bu sebepten kazıklı temeller yük aktarım şekillerine göre, uç kazığı ve sürtünme kazığı olarak adlandırılır. Kazıklı temellerin taşıma kapasitelerinin hesaplanmasında yükü hangi şekilde aktardığı önem arz eder. Kazıklar üst yapıdan gelen yükü uç direnciyle, yüzey sürtünme direnciyle ya da her ikisiyle birlikte derin ve sağlam zeminlere aktarabilirler. Kazıklı temellerin taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir [3-7]. Bu yöntemler genel itibarıyla; (1) Basit ampirik hesap yöntemleri [8-10], (2) Karmaşık elastik teoriye bağlı analitik hesap yöntemleri [11-12] ve (3) karmaşık sayısal analiz ve sonlu elemanlar yöntemleri [13-17] olarak sıralanabilir. Bahsedilen bu hesap yöntemleri, analitik ve ampirik hesaplamaları kapsamı sebebiyle ve sonuçları etkileyecek bir çok değişken parametreye bağlı olması sebebiyle, arazi şartlarında oluşacak gerçek durumu doğrudan hesaplayamamaktadır. Bu sebepten geoteknik mühendisleri bu hesap yöntemlerinden direkt elde edilen sonuçlara çok güvenmemekte ve neticesinde güvenlik katsayılarıyla taşıma kapasitesi değerlerini azaltmaktadırlar. Bu durumun sonucunda genellikle yüksek maliyetli projeler ortaya çıkabilmektedir. Projede bir kazığın taşıyabileceği gerçek yükün belirlenmesi ve o yük altında oluşabilecek oturmaların tahmin edilmesi, projenin optimum tasarımının gerçekleşmesini sağlayacak ve proje maliyetinin optimum seviyede oluşmasına imkan verecektir. Bu sebeple, yukarıda bahsedilmiş hesap yöntemleriyle taşıma kapasitesi belirlenen kazıklar, projenin yapılacağı arazide imal edilerek ve proje yükünün 1,5-2,0 katına kadar yüklenerek, nasıl davranış göstereceği belirlenmekte ve bu deney sonucuna göre kazıkların taşıma kapasitesi tekrar hesaplanabilmektedir.

Kazıklı temellerin taşıma kapasitelerini kontrol etmek ve davranışlarının tasarım aşamasındaki kabullerle uyum içerisinde olup olmadığını belirlemek amacıyla yapılan statik kazık yükleme deneyi, geoteknik projelerde yaygın olarak kullanılan, güvenilir bir deney yöntemidir [18]. Statik kazık yükleme deneyi sonucuna göre yapılacak kazık taşıma kapasitesi hesabı, laboratuvar ve arazi deney sonuçlarından elde edilen zemin parametreleri kullanılarak yapılan taşıma gücü hesabına göre gerçeğe daha yakın, güvenli ve ekonomik olacaktır. Bir diğer değişle, tasarımda daha düşük emniyet katsayıları kullanılarak, kazık boyunda ve sayısında önemli ölçüde ekonomik fayda sağlamak mümkün olacaktır [18]. Günümüzde, dar alanlarda çok yüksek yapıların inşa edilmesi gerekliliği, daha az sayıda ve daha yüksek taşıma kapasitesine sahip kazıkların tasarım ve imalatını zorunlu kılmaktadır. Bu tür kazıkların ekonomik olarak tasarlanması göçme yüküne kadar test edilmelerini gerektirmektedir. Kazık yükleme deneylerini göçme yüküne kadar devam ettirmek, reaksiyon ve yük tatbik sisteminin büyüklüğü ve yüksek maliyeti nedeniyle her zaman mümkün olmamaktadır. Yukarıda açıklanan nedenlerle ekonomik bir kazık tasarımının yapılması için yüklemeye deneyinin göçme yüküne ulaşmadan kazığın nihai kapasitesinin belirlenmesi için bir yöntemin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Statik kazık yükleme deneyi sonuçlarına göre literatürde sunulmuş birçok kazık taşıma kapasitesi hesabı mevcuttur [19-21]. Literatürde bahsedilmiş yaygın olarak kullanılan bazı hesap yöntemleri; De Beer yöntemi, Teğet yöntemi, Mazurkiewicz yöntemi, Brinch-Hansen yöntemi, Butler-Hoy yöntemi, Fuller-Hoy yöntemi ve Corp of Engineers yöntemi olarak bilinmektedir.

Yukarıda bahsedilmiş yöntemler yardımıyla statik kazık yükleme deneyi sonuçları kullanılarak, kazığın taşıma kapasitesi, kazığa göçme yükü uygulanmadan gerçeğe çok yakın bir şekilde hesaplanabilmektedir. Fakat kazık yükleme deneylerinin pahalı ve zor bir yöntem olması sebebiyle, projenin maliyetini etkilemektedir. Bu sebepten, statik kazık deneyinin karmaşık sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilerek modellenmesi ve kazık tasarımının bu yöntem dikkate alınarak yapılması proje maliyetini ciddi oranlarda azaltacağı ön görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, statik kazık yükleme deneyi yapılmış bir kazık uygulaması, sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilerek gerçek deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Doğru zemin parametreleri ve uygun zemin şartları ve modelleri belirlendiğinde, sonlu elemanlar yöntemiyle uygulanan kazık yükleme modeli gerçek deney davranışıyla neredeyse aynı sonuçları vermiştir. Bu kapsamda, sonlu elemanlar yöntemiyle kazığın göçme yüküne kadar yüklenmesi sağlanmış ve sonlu elemanlar yönteminden elde edilmiş kazık taşıma kapasitesi

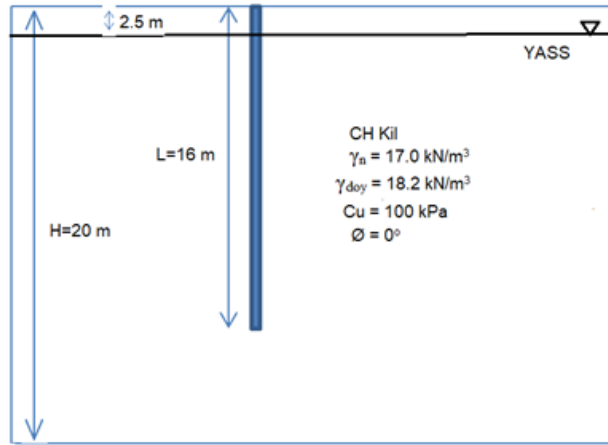
F. ÇELİK

değerleri yaygın olarak kullanılan Mazurkiewicz yöntemi ile elde edilmiş değerlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar göstermiştir ki; pekleşen zemin modelinde sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş kazık yükleme deneyi, arazide yapılmış deney sonuçlarıyla ciddi oranda örtüşmüştür.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Geoteknik Değerlendirme

Bu çalışma kapsamında statik kazık yükleme deneyinin yapıldığı bölge, Adana İli, Ceyhan İlçesi Belediye evleri ve Yar Suvat mahallesi toplu konut alanında yapılmış olan TOKİ Konutlarının inşaatının yapıldığı bölgedir. İnceleme alanında yapılan araştırmalar ve sondajlardan anlaşılacağı üzere inceleme alanında; yüzeyden yaklaşık olarak 0,50 metre tabaka kalınlığında nebati toprak, 0,50-3,00 metre tabaka kalınlığında kahverengi yüksek plastisiteli siltli-kil (CH), 3,00-8,50 metre tabaka kalınlığında bej renkli yüksek plastisiteli kil (CH), 8,50-23,50 metre derinlere inildikçe gri renkli yüksek plastisiteli kil (CH), 23,50-30,00 metre arası ise siltli çakıllı kum (SW-SM) tabakası olarak belirlenmiştir. İnceleme alanında açılan temel sondajlarında yüzeyden 2,50-3,50 metre seviyelerinde yeraltı suyuna rastlanılmıştır. Hesaplamalar için idealize edilmiş zemin profili Şekil 1 de görülmektedir. Depremsellik açısından inşaat sahasının ikinci derece deprem bölgesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 1. İdealize edilmiş zemin profili

Zemin grubu C, yerel zemin sınıfı Z3 olarak belirlenmiştir ve zeminin yatak katsayısı zemin cinsinden dolayı $K=1560 \text{ t/m}^3$ olarak alınması önerilmiştir. Sahaya ait zeminlerin cinsi ve tabaka durumunun belirlenmesi için, 20 metre derinliğinde 15 adet ve 30 metre derinliğinde 3 adet temel sondajı yapılmıştır. Zemin etüt raporunda alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin emniyetli taşıma gücü hesaplanmış olup önerilen zemin emniyet gerilmesi değeri $q_{emn} = 13 \text{ t/m}^2$ olarak belirlenmiştir. Betonarme hesaplar sonucu temel altındaki zemine aktarılan gerilme değeri en fazla $13,64 \text{ t/m}^2$ olarak hesaplanmış ve zeminin üst yapıdan gelen bu yükü güvenli bir şekilde taşıyamayacağına karar verilmiştir. Bu sebepten bu proje kapsamında temel altı fore kazık zemin iyileştirme yönteminin yapılması planlanmıştır. Mevcut proje kapsamında yapılmış zemin etüt raporunda düzeltilmiş ortalama SPT-N60 değerinin 8 olarak alınması uygun görülmüştür. Suya doymuş sert katı killi zemin olması sebebiyle hesaplamalar drenajsız durum göz önüne alınarak yapılmış ve drenajsız kayma dayanımı (C_u) değerinin ortalama olarak 100 kPa alınması gerektiği belirtilmiştir. Kohezyonlu zeminlerde inşaat sonrası durum taşıma gücü yönünden daha kritik olduğundan drenajsız durumda içsel sürtünme açısının $\phi_u=0$ olarak alınması uygun görülmüştür [22]. Suya doymuş killerde poisson oranı her ne kadar $0,45-0,50$ değerleri arasında bulunsun da [23], sonlu elemanlarda geri yük çekme ve tekrar yükleme uygulamalarında poisson oranının $0,20$ alınması önerilmektedir [24]. Bu sebepten mevcut çalışma kapsamında statik kazık yükleme deneyi yük çekme ve tekrarlı yükleme aşamalarını içerdiğinden dolayı zeminin drenajsız poisson oranının (ν_{ur}) $0,20$ olarak alınması ön görülmüştür. Plaxis-2D sonlu elemanlar programında hazırlanmış kazık elemanı rijit bir zemin gibi gösterilmiş ve malzeme modeli olarak lineer elastik olarak tanımlanmıştır. Ayrıca kazık modeli geçirimsiz (non-porous) olarak belirlenerek, sadece kazık davranışını sergilemesi açısından elastik modülü ve poisson oranı

STATİK KAZIK YÜKLEME DENEYİNİN FARKLI ZEMİN MODELLERİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ARAZİ BULGULARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

parametreleri tanımlanmıştır. Plaxis-2D sonlu elemanlar programıyla modellenmiş statik kazık yükleme deneyi kapsamında tanımlanmış zemin modelleri ve değişken parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

2.2. Statik Kazık Yükleme Deneyi

TOKİ tarafından yapılan, Adana ili-Ceyhan İlçesi 499 adet konut ve bir adet ticaret merkezi inşaatı ile alt yapı ve çevre düzenleme işi kapsamında bir adet fore kazık test kolonu üzerinde statik kazık yükleme deneyi yapılmıştır. Statik kazık yükleme deneyi $\varnothing=80$ cm çapında ve $L=16$ metre uzunluğunda kazık üzerine maksimum yük olarak, proje tasarım yükü olan 178 ton değerinin 1,5 katı olan 267 ton uygulanmıştır. Deney için hazırlanmış kazığın üst kısmı kırılarak betonarme bir kılavuz başlık elde edilmiştir. Deney başlığı üzerine 500 ton yükleme kapasiteli hidrolik deney krikosu yerleştirilmiştir. Krikonun üzerine 6 metre uzunluğunda 1 adet deney yükleme kirişi yerleştirilmiş ve çekme kazık halatları bağlantı elemanları yardımıyla kirişe sabitlenmiştir. Eksenel yük uygulaması hidrolik kriko ve elektrikli pompa ile gerçekleştirilmiştir. Uygulanan her bir yük manometre okuyucu saatlerden okunarak belirlenmiştir.

Statik yükleme yapılacak kazığın maruz kalacağı oturmaları sağlıklı olarak ölçebilmek için, kazığın hareketten etkilenmeyeceği mesafelere referans kirişler kurulmuştur. Referans kirişlerinin üzerine statik yükleme deneyi yapılacak kazığın maruz kalacağı oturmaların ölçülmesinde kullanılan 0.01 mm hassasiyetli 2 adet mikrometre monte edilmiştir. Deney süresince her iki mikrometreden düzenli okumalar alınmış ve kazığın net oturması olarak bu iki mikrometreden elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Statik kazık yükleme deneyi yapılacak kazığın iki tarafına, 2,30 metre mesafede imalatı gerçekleştirilmiş 2 adet çekme kazığı hazırlanmış ve gerekli reaksiyon kuvvetleri bu çekme kazıkları vasıtasıyla sağlanmıştır. Eksenel yükler deney kazığına çekme kazıkları vasıtasıyla aktarılmıştır. Statik kazık yükleme deneyinde yük artırımı 2 aşamada yapılmıştır. İlk olarak 80 cm çapındaki kazık tasarım yükü olan 178 ton değerine kadar kademeli artırılmış ve her kademede 1 saat beklendikten sonra oturma değerleri okunmuştur. Aynı şekilde kademeli olarak yük kaldırılarak yükleme değeri sıfırlanmıştır. Devamında, yük yine kademeli olarak proje tasarım yükünün 1,5 katı olan 267 ton değerine kadar artırılmış ve kademeli olarak azaltılarak tekrar sıfırlanmıştır.

Tablo 1. Bu çalışmada Plaxis-2D programında kullanılmış zemin modelleri ve parametreler

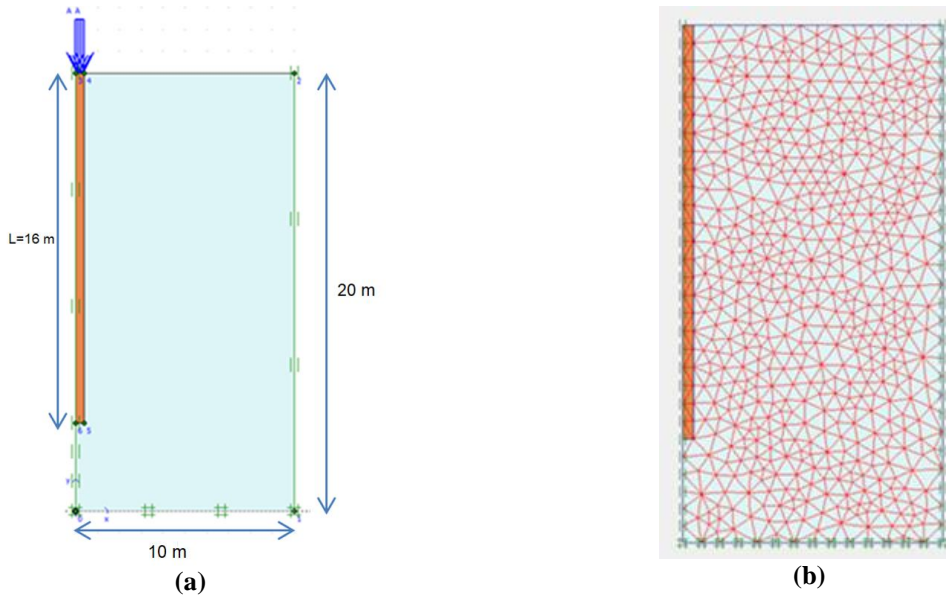
Zemin Parametreleri	Kil	Kil	Fore Kazık
Zemin modelleri	Pekleşen Zemin Modeli	Mohr-Coulomb Model	Lineer-Elastik Model
Malzeme tipi	Drenajsız	Drenajsız	Non-porous
γ , kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	17,0	17,0	24,0
γ_{sat} , doymun birim hacim ağırlık (kN/m ³)	18,2	18,2	-
k_x (m/gün)	1×10^{-3}	1×10^{-3}	-
k_y (m/gün)	1×10^{-3}	1×10^{-3}	-
E_{ref} (kN/m ²)	-	30000	4×10^7
E_{50} (kN/m ²)	30000	-	-
E_{oed} (kN/m ²)	30000	-	-
E_{ur} (kN/m ²)	90000	-	-
Poisson oranı, ν_{ur}	0,20	0,20	0,18
Power (m)	0,5	-	-
Kohezyon, c (kPa)	100	100	-
\varnothing (°), içsel sürtünme açısı	0	0	-
Ψ (psi), dilatasyon açısı	0	0	-

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu çalışma kapsamında, yerinde yapılmış statik kazık yükleme deneyi, dünyada geoteknik mühendisleri tarafından yaygın olarak kullanılan ticari bir sonlu elemanlar analiz programı olan Plaxis-2D programıyla modellenmiştir. Plaxis, geoteknik uygulamaları için hazırlanmış, zemin davranışını zemin modelleri ile çözümleyen bir sonlu elemanlar yazılımıdır [24]. Plaxis yazılımında zemin modellenmesinde kullanılan birçok zemin davranışı yaklaşımı vardır. Plaxis programında bu çalışma kapsamında kullanılmış zemin davranış yaklaşımaları aşağıda özetlenmiştir:

F. ÇELİK

- Lineer elastik model (Linear elastic model) : Bu yaklaşım izotropik lineer elastik malzemelerin davranışlarının Hooke kanununa uygunluğu esasına dayanır. Zeminin davranışını belirleyen başlıca iki parametre vardır. Bunlar E, elastisite modülü ve ν , Poisson oranıdır. Lineer elastik modelin zemin davranışının modellenmesinde kullanımı kısıtlıdır. Genellikle zemin içerisindeki rijit yapıların modellenmesi için kullanılır [24].
- Mohr-Coulomb zemin modeli: Bu yaklaşım zemin davranışının modellenmesinde en sık kullanılan zemin davranışı yaklaşımlarından biridir. Zeminin davranışını belirleyen başlıca 5 parametre vardır. Bunlar (E) elastisite modülü, (ν) Poisson oranı, (ϕ) Kayma mukavemeti açısı, (c) kohezyon ve (ψ) dilatasyon açısıdır [24].
- Hardening soil model (Pekleşen zemin modeli) : Bu yaklaşım sürtünme sertleşmesi plastisitesi formülü çerçevesinde oluşturulmuş hiperbolik ve elastoplastik bir modeldir. İlave olarak bu modelde temel basınç altında kalıcı kompaksiyonun ifade edilmesi için basınç sertleşmesini de içerir. Bu ikinci dereceden model kum, çakıl davranışını yansıtabildiği gibi aşırı konsolide kil ve silt gibi daha yumuşak zeminlerinde davranışını yansıtır [24].



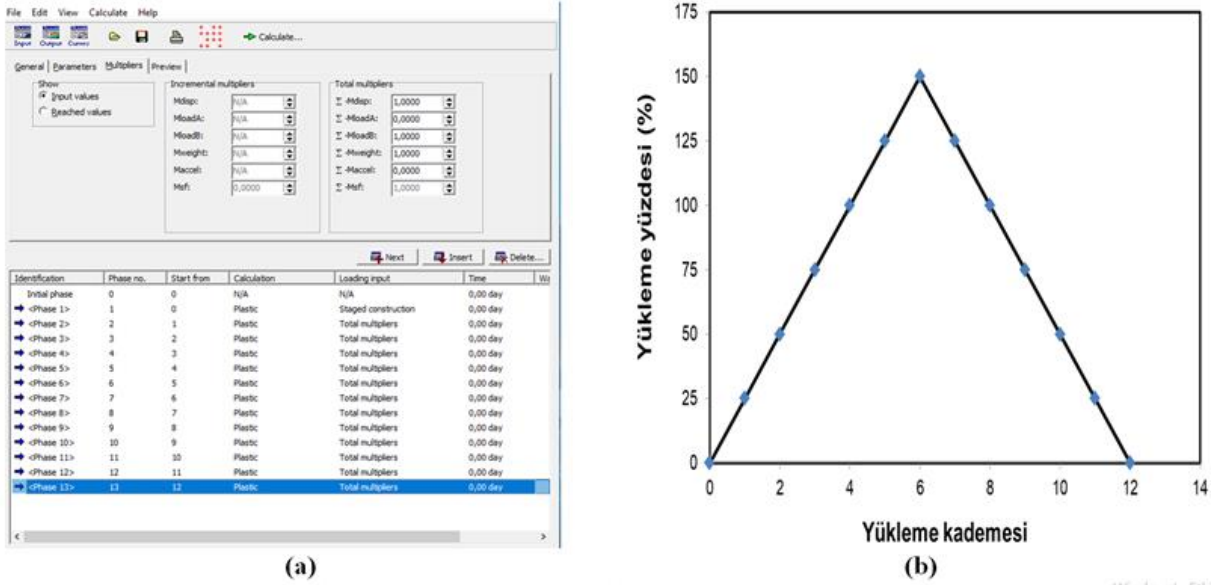
Şekil 2. (a) Sayısal ortamda tanım uzayının sınırları, (b) Üçgen sonlu elemanlar

Bu çalışma kapsamında modellenen deney sistemi, iki farklı zemin davranış modelinde uygulanmıştır. Seçilmiş zemin modelleri, Pekleşen Zemin Modeli ve Mohr-Coulomb Zemin modelleridir. Mevcut zemin parametreleri incelendiğinde, bu iki zemin davranış modelinin zemin şartlarını daha iyi modelleyebileceği düşünülmüştür. Bu sebepten statik kazık yükleme deneyi her iki zemin davranış modelinde de analiz edilmiştir. Statik kazık yükleme deney modeli için Plaxis-2D yazılımında modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde temel bir yaklaşım olması açısından tek bir kazık oluşturulmuş ve üzerlerine düzgün yayılı yükleme yapılmıştır. Kazık simetrik bir eleman olduğu için modellemelerde simetri eksenini (eksenel simetri) özelliği kullanılarak kazığın tek tarafı modellenerek simetrik bir sistem tasarlanmıştır. Sayısal ortamda tanım uzayının sınırları yatay ekseninde yarıçapı kolon çapının 11 katından fazla olacak şekilde 10 metre, düşey ekseninde kolon boyundan itibaren kolon çapının 5 katı olarak (4 metre) belirlenmesi yeterli görülmüştür [25]. Analiz sonuçları belirlenmiş tanım uzayının sınırlarının yeterli olduğunu göstermiştir (Şekil 2a).

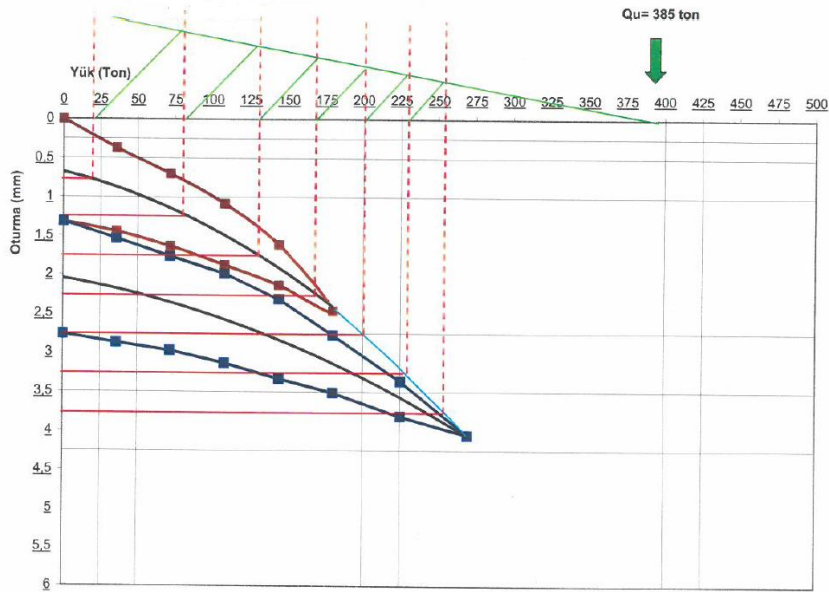
Plaxis-2D paket programı geoteknik uygulamaları için hazırlanmış zemin davranışını zemin modelleri ile taklit eden bir sonlu elemanlar yazılımıdır [24]. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan sayısal analiz yazılımları, oluşturulan modelleri sonlu sayıda parçaya böler ve bu parçaların birbiri ile etkileşimini hesaplayarak ana şeklin davranışını ortaya koyar [24]. Bu nedenle tutarlı bir modelleme için parça sayısını ve boyutunu doğru belirlemek gerekmektedir. Parça sayısını arttırmak yani parça boyutunu küçültmek daha kesin sonuçların ortaya çıkmasını sağlayacaktır [24]. Bu kapsamda, hazırlanmış modeller çok sıkı (very fine mesh) üçgen sonlu elemanlara bölünmüştür. Bu çalışma kapsamında hazırlanmış sonlu eleman modeli ve çok sıkı üçgen sonlu elemanlar Şekil 2b'de görülmektedir.

STATİK KAZIK YÜKLEME DENEYİNİN FARKLI ZEMİN MODELLERİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ARAZİ BULGULARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

Kazık taşıma gücünün tahmini için oluşturulan Plaxis-2D yazılımı modelinde bir statik kazık yükleme deneyi taklit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre hedeflenen taşıma gücü yükü kademe kademe yüklenmiştir. Yükleme kademeleri Plaxis-2D yazılımında Phase olarak adlandırılır ve her kademede yük katsayısı değiştirilerek yük değerleri değiştirilmiştir. Statik kazık yükleme deneyi Plaxis-2D modelinde ilk önce %25'lik artımlarla taşıma gücünün %150'sine denk gelen yük değerine (tasarım yükünün 1,5 katı) ulaşılmış daha sonra bu yük yine %25'lik adımlarla kaldırılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılmış plaxis-2D hesaplama aşamaları ve statik kazık yükleme model Şekil 3 de açıkça görülmektedir. Bu çalışma kapsamında arazi deneyinde 2 kademeli olarak yükleme boşaltma yapılmıştır (Bkz. Şekil-4). Fakat plaxis çözümlerinde 2. kademe yükleme boşaltma yapılırken hesaplamalarda noktaların çakışması sebebiyle yazılım hata vermiştir. Bu sebeple, plaxis çözümlerinde tek kademe yükleme boşaltma uygulanarak eğriler elde edilmiştir. Bunun sonucunda nihai oturmalar elde edilmiştir.



Şekil 3. (a) Plaxis-2D hesaplama aşamaları, (b) Statik kazık yükleme kademeleri



Şekil 4. Statik kazık yükleme deneyi sonucu ve Mazurkiewicz yöntemine göre taşıma gücü hesabı

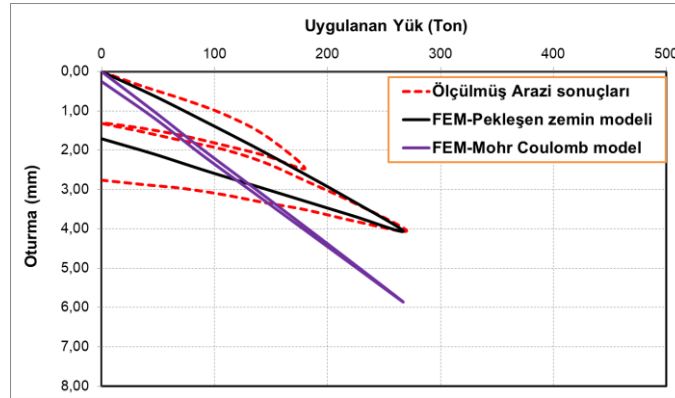
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Arazi Statik Kazık Yükleme Deneyi

Mevcut proje kapsamında, arazide yerinde yapılmış statik kazık yükleme deneyi sonuçları Şekil 4’de verilmiştir. Deney sonucuna göre, 178 ton (tasarım yükü) yükleme sonucunda toplam oturma 2,46 mm olup, kalıcı oturma 1,31 mm olarak belirlenmiştir. Bu durumda oluşan elastik oturma 1,15 mm olarak ölçülmüştür. İkinci yükleme durumunda, proje tasarım yükünün 1,5 katı olan 267 ton yük için, toplam oturma 4,05 mm olup, kalıcı oturma 2,76 mm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde elastik deplasman ise 1,29 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 3’de açıkça görüleceği üzere, Mazurkiewicz tarafından önerilmiş kazık taşıma kapasitesi hesabına göre tekil kazığın taşıma gücü 385 ton olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, proje tasarım yükü 178 ton olarak hesaplanmış tekil kazığın gerçek taşıma gücü 385 ton’dur. Dolayısıyla, proje güvenlik katsayısı $G_s=385/178$ eşitliğinden 2,16 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Mazurkiewicz yöntemine göre belirlenmiş güvenlik katsayısı, proje tasarım yükünün güvenli bir şekilde üst yapıdan gelen yükü zemine aktarabileceğini göstermektedir.

3.2. Sonlu Elemanlar Metodu ile Statik Kazık Yükleme Deneyi

Mevcut proje kapsamında, arazide yerinde yapılmış statik kazık yükleme deneyi sonuçları ile farklı zemin modellerinde sonlu elemanlar metoduyla yapılmış statik kazık yükleme deney sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Farklı zemin modellerinde sonlu elemanlar metodu ile statik kazık yükleme deneyi sonucu

Plaxis-2D programı yardımıyla yapılmış statik kazık yükleme deneyi kapsamında farklı zemin modelleri olarak, pekleşen zemin modeli ve Mohr coulomb zemin modelinden faydalanılmıştır. Şekilden de açıkça görüldüğü üzere, pekleşen zemin modeliyle elde edilmiş sonuçların, arazide yerinde yapılmış deney sonuçlarına yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, Mohr coulomb zemin modeliyle elde edilmiş sonuçların ise arazideki gerçek durumu tam anlamıyla yansıtmadığı açıkça görülmektedir. Pekleşen zemin modeliyle yapılmış hesaplamada, proje tasarım yükünün 1,5 katı olan 267 ton yük için elde edilmiş toplam oturma 4,06 mm ve kalıcı oturma ise 1,71 mm olarak belirlenmiştir. Bu zemin modelinde hesaplanmış elastik oturma ise 2,35 mm olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde Mohr coulomb zemin modeliyle yapılmış analiz sonucunda elde edilmiş toplam oturma değeri 5,86 mm ve kalıcı oturma ise 0,25 mm olarak belirlenmiştir. Mohr coulomb zemin modelinde hesaplanmış elastik oturma değeri 5,61 mm olarak ölçülmüştür. Karşılaştırmalı oturma sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur.

Pekleşen zemin modeli sürtünme sertleşmesi plastisitesi formülü çerçevesinde oluşturulmuş hiperbolik ve elastoplastik bir sayısal analiz gerçekleştirdiğinden dolayı ve ilave olarak bu modelde temel basınç altında kalıcı deformasyonun ifade edilmesi için basınç sertleşmesini de içerdiğinden dolayı, yük altında oluşması muhtemel zemin davranışını gerçeğe daha yakın analiz edebilmektedir [24]. Bu ikinci dereceden model aşırı konsolide kil ve silt gibi daha yumuşak zeminlerin davranışını daha gerçeğe yakın yansıttığını bu çalışma kapsamında yapılmış analiz sonuçları açıkça göstermektedir. Diğer taraftan, doğrusal bir sayısal analiz gerçekleştiren Mohr coulomb zemin modeli ise, her ne kadar gerçeğe yakın sonuçlar vermiş olsa da bir yük altında zeminin sergileyeceği davranışı doğru olarak yansıtmamaktadır. Analiz sonuçları göstermiştir ki, aşırı konsolide ve suya

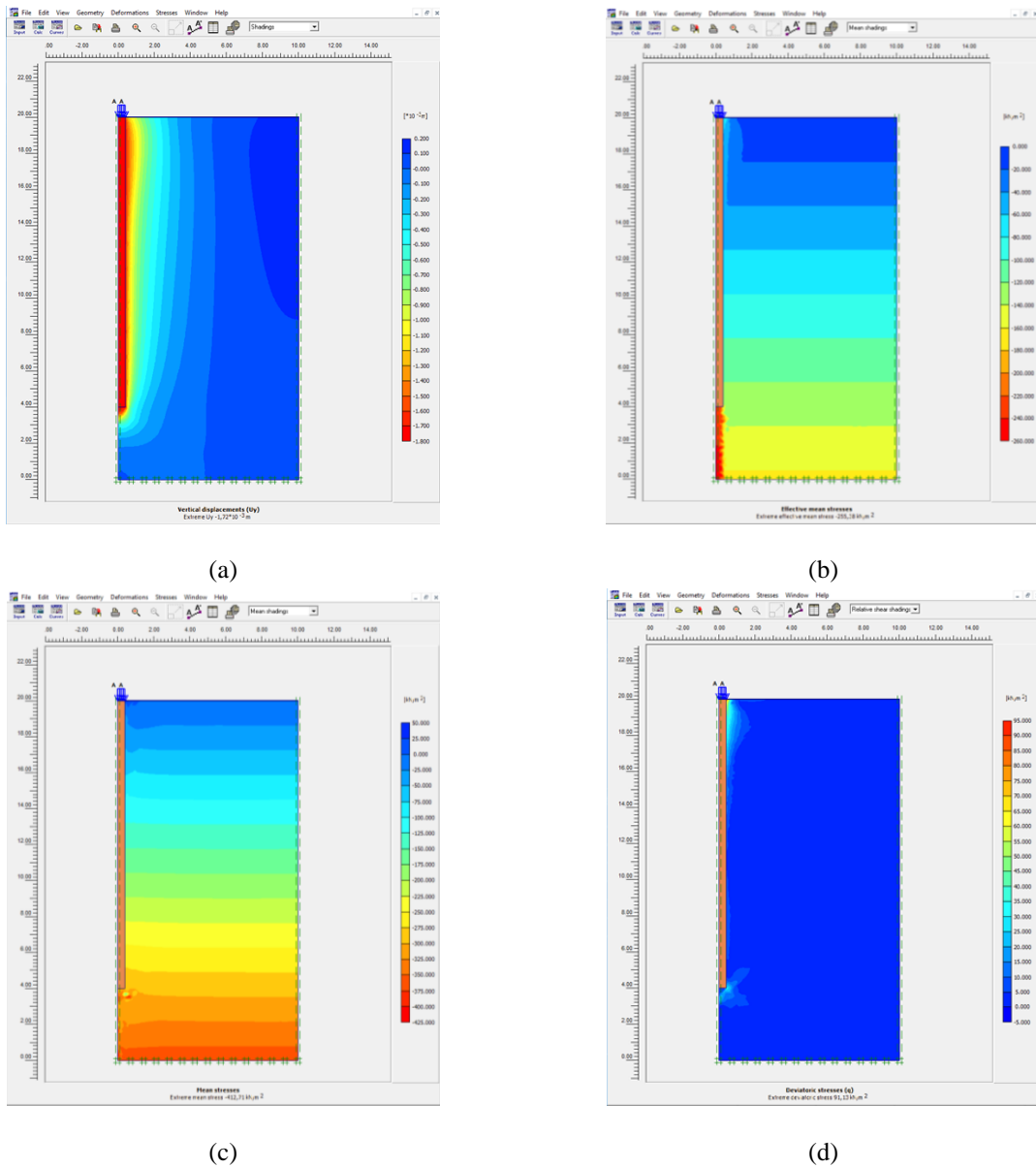
STATİK KAZIK YÜKLEME DENEYİNİN FARKLI ZEMİN MODELLERİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ARAZİ BULGULARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

doğgun killi zeminlerde Mohr coulomb modeliyle tanımlanmış zemin modeli kalıcı deformasyon ve elastik oturma hesaplamalarında gerçek durumu çok yansıtmamaktadır [24].

Tablo 2. Mevcut çalışma kapsamında tekil kazığa yüklenen 267 ton yük için deformasyon değerleri

Analiz tipi	Toplam oturma (mm)	Kalıcı oturma (mm)	Elastik oturma (mm)
Arazi statik kazık yükleme deneyi	4,05	2,76	1,29
2D-SEM Pekleşen zemin modeli	4,06	1,71	2,35
2D-SEM Mohr Coulomb zemin modeli	5,86	0,25	5,61

Mevcut çalışma kapsamında sonlu elemanlar metoduyla pekleşen zemin modeliyle tanımlanmış statik kazık yükleme deneyinin analizi sonucu elde edilmiş tekil kazık üzerinde oluşması muhtemel deformasyon ve gerilme davranışları Şekil 6’da açıkça görülmektedir.



Şekil 6. (a) Nihai düşey deformasyon, (b) Efektif ortalama gerilme dağılımı, (c) Ortalama gerilme dağılımı, (d) Deviatorik gerilme dağılımı

F. ÇELİK

Şekil 6a'da görüldüğü üzere, Plaxis-2D ile yapılmış statik kazık yükleme sonucu elde edilmiş kalıcı oturma 1,71 mm olarak görülmektedir. Şekilden de açıkça görüleceği üzere, sayısal ortamda tanımlanmış kazık elemanı yükü kazık boyunca taşıyarak zemine aktarmaktadır. Kazık elemanının rijitliğinin doğru tanımlanması hesaplamaların doğruluğu açısından önem arz etmektedir [24]. Rijitliği doğru tanımlanmamış kazık elemanları ile yapılan analizlerde, oturma diye hesaplanan deformasyonların aslında yeterli rijitlikte olmayan kazığın elastik deformasyonu olduğu görülecektir [24]. Yine bu tür kazıklarda yük kazığın belirli bir derinliğine kadar aktarılabilecektir. Bir diğer değişle yük zemine tam anlamıyla aktarılmayacak ve deformasyon ölçümleri aslında kazığın elastik deformasyon değerleri olarak ölçülecektir. Bu durum gerçekte rijit bir yapıya sahip olan betonarme kazıkların sayısal ortamda yanlış değerlendirilmesine sebep olacaktır. Şekil 6a'dan da açıkça görüleceği üzere sayısal ortamda tanımlanmış kazık elemanı bir bütün olarak davranış sergilemekte ve yükü alttaki daha sıkı zemin profiline aktarmaktadır. Şekil 6b'de ortalama efektif gerilme dağılımı görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, maksimum efektif gerilmeler tekil kazığın altında oluşmakta ve maksimum efektif gerilme 255,4 kPa olarak görülmektedir. Aynı şekilde toplam gerilme dağılımı Şekil 6c'de görülmekte ve kazık altında oluşmuş maksimum toplam gerilme 412,7 kPa olarak belirtilmektedir.

Diğer taraftan deviatorik gerilme dağılımı Şekil 6d'de açıkça görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deviatorik gerilmeler kazığın yan yüzeyinde ve hemen altında oluşmaktadır. Bu durum kazığın hem sürtünme hem uç kazığı olarak çalıştığını göstermektedir. Oluşmuş maksimum deviatorik gerilme 91,1 kPa olarak görülmektedir.

3.3. Statik Kazık Yükleme Deneyi ile Taşıma Kapasitesi Hesabı

Mevcut proje kapsamında, arazide yerinde yapılmış statik kazık yükleme deneyi sonuçları ile farklı zemin modellerinde sonlu elemanlar metoduyla yapılmış statik kazık yükleme deney sonuçlarından elde edilmiş taşıma kapasitesi değerleri ve güvenlik katsayıları Tablo 3'de görülmektedir. Bu çalışmada sonlu elemanlarda kazık taşıma kapasitesi, kazığın göçme oluşma anına kadar yüklenmesiyle elde edildi. Bu veriler ışığında tablodan da açıkça görüleceği üzere, pekleşen zemin modeliyle yapılmış sayısal analiz sonucu tekil kazığın taşıma gücü 333 ton olarak belirlenmiş ve proje tasarım yükü olan 178 ton değerine oranla güvenlik katsayısı 1,87 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde, Mohr coulomb zemin modeliyle yapılmış sayısal analiz yönteminde tekil kazığın taşıma kapasitesi 552 ton olarak belirlenmiştir. Bu zemin modelinde güvenlik katsayısı ise 3,10 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; pekleşen zemin modeliyle yapılan taşıma kapasitesi hesabı, gerçek arazi deneylerinden elde edilen değerlere çok yakın çıkmaktadır. Diğer taraftan Mohr coulomb zemin modeliyle yapılmış analizde taşıma kapasitesinin çok yüksek çıktığı ve arazide yapılmış statik kazık yükleme deneyinden elde edilmiş taşıma kapasitesinden çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, suya doymun sert kıvamda olan aşırı konsolide killerde Mohr coulomb zemin modeliyle yapılan analizlerde elde edilecek verilerin çok gerçeği yansıtmayacağı ve taşıma kapasitesini olduğundan fazla göstereceği yapılmış çalışma kapsamında gösterilmiştir.

Tablo 3. Tekil kazığın statik kazık yükleme deneyi sonucu elde edilmiş taşıma kapasitesi ve güvenlik katsayısı değerleri

Analiz tipi	Taşıma Kapasitesi (Ton)	Güvenlik Katsayısı (GS)
Arazi statik kazık yükleme deneyi (Mazurkiewicz yöntemine göre)	385	2,16
2D-SEM Pekleşen zemin modeli	333	1,87
2D-SEM Mohr Coulomb zemin modeli	552	3,10

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, TOKİ tarafından Adana'nın Ceyhan ilçesinde yapılmış 8 katlı (B+Z+6K) konut projesi kapsamında projelendirilmiş fore kazık zemin iyileştirme uygulamasında, tasarım yükünün kontrol edilmesi ve tekrar gözden geçirilmesi amacıyla, projenin yapılması planlanmış arazide statik kazık yükleme deneyi yapılmıştır. Bu statik kazık yükleme deneyi sayısal ortamda sonlu elemanlar metodu yardımıyla farklı zemin modellerinde de analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilmiş sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

STATİK KAZIK YÜKLEME DENEYİNİN FARKLI ZEMİN MODELLERİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ARAZİ BULGULARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

- 1) Statik kazık yükleme deneyi $\varnothing=80$ cm çapında ve $L=16$ metre uzunluğunda kazık üzerine maksimum yük olarak, proje tasarım yükü olan 178 ton değerinin 1,5 katı olan 267 ton uygulanmıştır.
- 2) Bu çalışma kapsamında modellenen deney sistemi, iki farklı zemin davranış modelinde uygulanmıştır. Seçilmiş zemin modelleri, Pekleşen Zemin Modeli ve Mohr-Coulomb Zemin modelleridir.
- 3) Arazide yapılmış statik kazık yükleme deneyinde 178 ton (tasarım yükü) yükleme sonucunda toplam deformasyon 2,46 mm olup, kalıcı deformasyon 1,31 mm olarak belirlenmiştir. Bu durumda oluşan elastik deformasyon 1,15 mm olarak ölçülmüştür. İkinci yükleme durumunda, proje tasarım yükünün 1,5 katı olan 267 ton yük için, toplam deformasyon 4,05 mm olup, kalıcı deformasyon 2,76 mm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde elastik deformasyon ise 1,29 mm olarak ölçülmüştür.
- 4) Pekleşen zemin modeliyle elde edilmiş sonuçlar, arazide yerinde yapılmış deney sonuçlarıyla neredeyse bire bir örtüşmüştür. Diğer taraftan, Mohr coulomb zemin modeliyle elde edilmiş sonuçların ise arazideki gerçek durumu tam anlamıyla yansıtmadığı görülmüştür.
- 5) Pekleşen zemin modeli hiperbolik ve elastoplastik bir sayısal analiz gerçekleştirdiğinden dolayı ve ilave olarak bu modelde gerilme altında kalıcı deformasyon oluşturduğu için, yük altında oluşması muhtemel zemin davranışını gerçeğe daha yakın analiz edebilmiştir.
- 6) Bu doğrusal olmayan zemin modeli aşırı konsolide kil ve silt gibi daha yumuşak zeminlerin davranışını daha gerçeğe yakın yansıttığını bu çalışma kapsamında yapılmış analiz sonuçları açıkça göstermiştir.
- 7) Diğer taraftan, doğrusal bir sayısal analiz gerçekleştiren Mohr coulomb zemin modeli ise, her ne kadar gerçeğe yakın sonuçlar vermiş olsa da bir yük altında zeminin sergileyeceği davranışı doğru olarak yansıtamamıştır.
- 8) Analiz sonuçları göstermiştir ki, aşırı konsolide ve suya doymun killi zeminlerde Mohr coulomb modeliyle tanımlanmış zemin modeli kalıcı oturma ve elastik oturma hesaplamalarında gerçek durumu çok yansıtmamaktadır.
- 9) Sonuçlar göstermiştir ki; pekleşen zemin modeliyle yapılan taşıma kapasitesi hesabı, gerçek arazi deneylerinden elde edilen değerlere çok yakın çıkmaktadır. Diğer taraftan Mohr coulomb zemin modeliyle yapılmış analizde taşıma kapasitesinin çok yüksek çıktığı ve arazide yapılmış statik kazık yükleme deneyinden elde edilmiş taşıma kapasitesinden çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, suya doymun sert kıvamda olan aşırı konsolide killerde Mohr coulomb zemin modeliyle yapılan analizlerde elde edilecek verilerin çok gerçeği yansıtmayacağı ve taşıma kapasitesini olduğundan fazla göstereceği yapılmış çalışma kapsamında gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında faydalanılmış, arazide yerinde yapılmış statik kazık yükleme deney sonuçları ve geoteknik değerlendirme raporu, Zemar Sondajcılık firması tarafından sağlanmıştır. Yazar, ilgili firmaya göstermiş olduğu yardımdan dolayı teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] KATZENBACH, R., "Combined Pile-Raft Foundations", International CPRF Guideline, 2012.
- [2] TOĞROL, E., TAN, O., Kazıklı Temeller, (birinci baskı), Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [3] RANDOLPH, M.F., WROTH, C.P., "Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 104(12): 1465-1488, 1978.
- [4] POULOS, H.G., DAVIS, E.H., "The Settlement Behaviour of Single Axially-Loaded Incompressible Piles And Piers", Geotechnique, 18(3): 351-371, 1968.
- [5] FLEMING, W.G.K., WELTMAN, A.J., RANDOLPH, M.F., ELSON, W.K., Piling Engineering, (2nd Ed.), Surrey University Press., Guildford, United Kingdom, 1992.
- [6] BUTTERFIELD, R., BANERJEE, P.K., "The Elastic Analysis of Compressible Piles And Pile Groups", Geotechnique, 21(1): 43-60, 1971.
- [7] TOMLINSON, M.J., Foundation Design And Construction, (7th Ed.), Prentice Hall, New Jersey, USA, 2001.
- [8] RANDOLPH, M.F., Design Methods For Pile Groups and Piled Rafts, S.O.A report, 13 ICSMFE, New Delphi, 5: 61-82, 1994.
- [9] BURLAND, J.B., "Piles As Settlement Reducers", Proceedings of the 18th Italian Congress on Soil Mechanics, Pavia, Italy, 1995.

F. ÇELİK

- [10]POULOS, H.G., DAVIS, E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, (4th Ed.), New York Wiley- Series, USA, 1980.
- [11]POULOS, H.G., “An Approximate Numerical Analysis of Pile Raft Interaction”, *Int. J. Numer. Anal. Method Geomech.*, 18:73–92, 1994.
- [12]CLANCY, P., RANDOLPH, M.F., “An Approximate Analysis Procedure For Piled Raft Foundations”, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 17:849–869, 1993.
- [13]HAIN, S.J., LEE, I.K., “The Analysis of Flexible Pile–Raft Systems”, *Geotechnique*, 28(I):65–83, 1978.
- [14]CHOW, H.S.W., SMALL, J.C., “Behaviour of Piled Rafts With Piles of Different Lengths and Diameters Under Vertical Loading”, *GSP 132 Advances in Deep Foundations*, ASCE. doi.org/10.1061/40778(157)20, 2005.
- [15]SMALL, J.C., POULOS, H.G., “Non-Linear Analysis of Piled Raft Foundations”, *GSP 158 Contemporary Issues in Deep Foundations*, ASCE. doi.org/10.1061/40902(221)14, 2007.
- [16]VÁSQUEZ, L.G., WANG, S.T., ISENHOWER, W.M., “Estimation of The Capacity of Pile–Raft Foundations By Three-Dimensional Non-Linear Finite Element Analysis”, *Geo Congress*, ASCE, doi.org/10.1061/40803(187)211, 2006.
- [17]REUL, O., RANDOLPH, M.F., “Design Strategies for Piled Rafts Subjected to Nonuniform Vertical Loading”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(1):1-13, 2004.
- [18]DÜZCEER, İ.R., “Kazık Yükleme Deneyleri İle Nihai Kazık Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma”, *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 2002.
- [19]FELLENİUS, B.H., “Test Loading Of Piles New Proof Testing Procedure”, *Journal of Geotechnical and Enviromental Engineering*, ASCE, 101:855-869, 1975.
- [20]HIRANY, A., KULHAWY, F.H., “Conduct and Interpretation of Load Tests on Drilled Shaft Foundations: Detailed Guidelines”, *Report EL-5915, Vol. 1, EPRI, Palo Alto*, 1988.
- [21]KYFOR, Z.G., SCHNORE, A.R., CARLO, T.A., BAILY, P.F., “Static Testing of Deep Foundations”, *Final Report FHWA-SA-91-042, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA*, 174, 1992.
- [22]CODUTO, D.P., *Geotechnical Engineering: Principles & Practices*, (2nd Ed.), Prentice Hall press, New Jersey, USA, 2010.
- [23]ERDİL. B, “Jetgrout Kolonu Tasarım Taşıma Gücü Hesabı”, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 2008.
- [24]PLAXIS-2D USER MANUAL, “Plaxis 2D Version 8 Material Models Manual”, 2002.
- [25]ZMUDZINSKI, Z., MOTAK E., “Computational Assessment Of Bearing Capacity Of Jetgrouting Piles (in Polish)”, *Monograph 194, Kraków*, 1995a, 351–362.