

# YANAL YÜKLÜ KAZIKLARIN TASARIM YÖNTEMLERİNİN BİRBİRLERİ İLE KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRİLMESİ

Evaluation of Comparison of Laterally Loaded Piles Design Methods

Niyazi U. Terzi<sup>1</sup>

Arş. Gör.

Yıldız Teknik Üni. İnş. Müh. Böl. Geoteknik Anabilim Dalı

E mail: [nuterzi@yildiz.edu.tr](mailto:nuterzi@yildiz.edu.tr) Tel: 0212 259 70 70 /2840 Fax: 0212 259 67 62

Havvanur KILIÇ<sup>2</sup>

Yrd. Doç. Dr.

Yıldız Teknik Üni. İnş. Müh. Böl. Geoteknik Anabilim Dalı

E mail: [kilic@yildiz.edu.tr](mailto:kilic@yildiz.edu.tr) Tel: 0212 259 70 70 /2568 Fax: 0212 259 67 62

Sönmez YILDIRIM<sup>3</sup>

Prof. Dr.

Yıldız Teknik Üni. İnş. Müh. Böl. Geoteknik Anabilim Dalı

## ABSTRACT

In this study, the behavior of the two different lateral loaded piles at the cohesion and cohesionless conditions have been investigated. Using inclinometers and strain gages, displacements at the tip, and bending moments at the pile cross section have been determined.

The results obtained using the most common software in the lateral loaded pile design ,which are ALLPILE 6.0, LPILE 3.0 and CLM 2.0 ( limited education versions), coincided with the test results.

## ÖZET

Bu çalışmada, yanal yüklemeler altında kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde yapılan iki farklı kazığın yanal yüklemeye altındaki davranışı incelenmiştir. Kazık ucuna yerleştirilen inklinometreler ve kazık derinliği boyunca yerleştirilen şekil değiştirme ölçerler yardımı ile yer değiştirmeler ve eğilme momentleri belirlenmiştir. Yanal yüklü kazıkların tasarımında kullanılan üç farklı bilgisayar programı ile mevcut kazıklara ait zemin ve kazık özellikleri girilerek analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları ile ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında ALLPILE 6.0, LPILE 3.0 ve CLM 2.0 programlarının analiz sonuçları ile deneysel verilerin birbirleri ile oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

## GİRİŞ

Kazıklar genel kullanım amacı olarak temellerden gelen düşey yükleri taşıma yönünden zayıf olan zemin tabakalarından daha güçlü tabakalara aktarmak için kullanılırlar. Ancak bazı özel durumlarda kazıklar yanal yüklerin taşınması amacıyla da tasarlanabilir. Özellikle rıhtım, kıyı düzenlemeleri ve iskele türü sanat yapılarında, köprü ayakları kule, vinç dayanma yapılarında temele aktarılan yanal yüklerin güvenle taşınması gerekir. Yanal yüklü kazıkların tasarım aşamasında proje kriterleri, zemin koşulları ve kazık geometrisine göre en önemli iki nokta, kazık üzerinde oluşacak eğilme momentleri ve yük etkisindeki yanal ötelenme miktarlarıdır. Kazık davranışı ise başta zemin özellikleri olmak üzere çok sayıda değişkene bağlıdır. Bu bakımdan farklı kabullere dayanarak tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Tasarım yöntemlerinin gözönüne aldığı kabullere göre göreceli olarak bazı olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Günümüzde yanal yüklü kazıkların davranışına ilişkin bütünüyle kabul görmüş bir hesaplama yöntemi halen bulunmamaktadır.

Yanal yük taşıyan kazıkların davranışı; kazığın yerleştirildiği zeminin içsel sürtünme açısı ve drenajsız kayma mukavemetine, yükleme adımlarına ve yükleme şekline, kazık türüne, kazık geometrisine, kazık başlığının serbest yada tutulu olmasına, kazık çapına ve uzunluğuna bağlıdır. Broms (1964) serbest başlı kazıkların yük altında gösterdikleri deformasyon şekillerini kazıkların göreceli olarak kısa veya uzun kazık olmalarına bağlamıştır. Her iki durumda da kazığın kırılması veya yer değiştirmesi olasılığı birlikte göz önüne alınarak tasarım gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, yanal yüklemeler altında kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde yapılan iki kazığa ait deneysel veriler ile tasarımda kullanılan analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmada yanal yükler altındaki davranışları arazi deneyi ile belirlenen kazıkların matematiksel analizleri CLM ve p-y yöntemleri kullanılarak ALLPILE, LPILE ve CLM 2.0 programlarında yapılmıştır. Deneysel verilerle bilgisayar programı analizlerden elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada incelenen kazıklar uzun kazık sınıfında yer almaktadır.

## **1) YANAL YÜKLÜ KAZIKLARIN DAVRANIŞLARI**

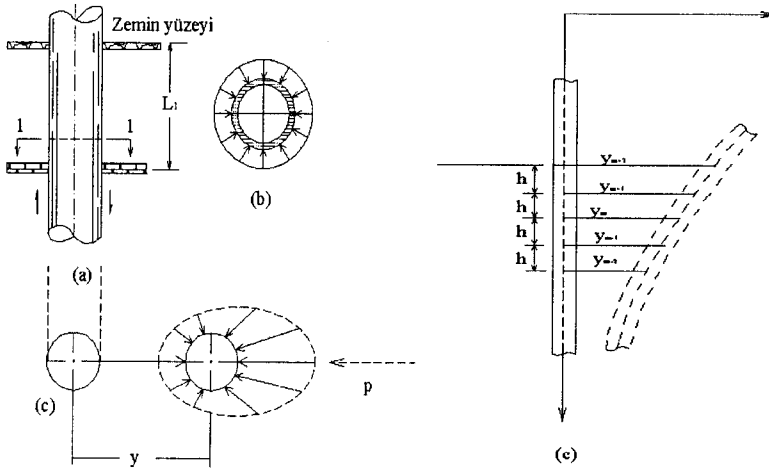
Yanal yük taşıyan kazıkların davranışı; kazığın yerleştirildiği zeminin içsel sürtünme açısı ve drenajsız kayma mukavemetine, yükleme adımlarına ve yükleme şekline, kazık türüne, kazık geometrisine, kazık başlığının serbest yada tutulu olmasına, kazık çapına ve uzunluğuna bağlıdır. Broms (1964) serbest başlı kazıkların yük altında gösterdikleri deformasyon şekillerini kazıkların göreceli olarak kısa veya uzun kazık olmalarına bağlamıştır. Her iki durumda da kazığın kırılması veya yer değiştirmesi olasılığı birlikte göz

önüne alınarak tasarım gerçekleştirilir. Çalışmada incelenen kazıklar uzun kazık sınıfında yer almaktadır.

## 2) YANAL YÜKLÜ KAZIKLARIN DAVRANIŞLARININ ANALİZ YÖNTEMLERİ

### 2.1) P-Y Yöntemi

Kazıkların yanal yüklemeler altındaki davranışlarının belirlenmesinde kullanılan ancak bu çalışmada yer almayan, Yatak Katsayısı Yöntemi, zemini birbirinden bağımsız yaylarla modeller ve yayların tam elastik davranışları ile kazığın düşey bir kiriş gibi şekil değiştirdiğini kabul eder. Ancak zeminin tam elastik yaylarla modellenmesi kuramsal olarak doğru bir yaklaşım değildir. Zeminin elastik özellikleri yanında plastik özelliklerinde çözüme katılması gereklidir. Bu durum ise; Matlock (1967), Reese vd. (1974), Reese ve Welch (1975), ve Brushan vd. (1979) tarafından geliştirilen p-y eğrilerinin oluşturulması ile olanaklıdır. Şekil 1'de dairesel kesitli bir kazığa etkiyen zemin direnci gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Dairesel kesitli bir kazığa etkiyen toprak direncinin oluşumu

Şekil 2.1.a'da zemin içerisindeki dairesel kesitli bir kazık gösterilmiştir. Yatay yüklemmeden önce kazık etrafındaki zemin reaksiyonu dağılışı Şekil 1.b'de görüldüğü gibi olmaktadır ve birim gerilme üniform şekilde dağılım göstermektedir. Kazığın 'y' yerdeğiştirmesi yapması durumunda, kazık arkasındaki gerilme azalmakta, ön kısmında artmaktadır (Şekil 1c). Bu durumda kazığın birim uzunluğu için "p" kuvveti oluşur ve kuvvet etkisi ile de kazık kesitinde kesme ve eğilme momentleri oluşacaktır. Burada gösterilen "p" ve "y" parametreleri yatay yüklemeye açısından şu anlama gelmektedir; "y", kazığın, yanal yüklenmesiyle yatay yönde oluşan yanal yerdeğiştirme "p" kazığın yerdeğiştirmesi sonucu kazığa karşı zeminde ortaya çıkan ve kazık birim uzunluğuna etkiyen reaksiyon kuvvetidir. Yatay yüklü kazıkların, lineer elastik kiriş gibi davrandığı varsayımının yapıldığı durumun diferansiyel eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0$$

2.1

Burada;

El = kazığın rijitliği,

y = x derinliğindeki kazık yatay yerdeğiştirme,

P = kazık düşey eksenel yükü

p = birim uzunluk için zemin reaksiyonudur:

Kazık davranışı, x ve y ye bağlı olarak (1) eşitliğinin çözümünden elde edilebilir. Zemin davranışının nümerik açıklaması, en iyi şekilde p zemin reaksiyonunun y yerdeğiştirmesinin fonksiyonu olarak eğrilerle olanaklıdır (Reese ve Welch, 1975). Bu eğriler genellikle lineer değildir ve derinlik, zemin direnci ve yük tekrar sayısı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Bu yüzden yatay yüklü kazık probleminin çözümü için p-y eğrilerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Eğer bu eğriler oluşturulursa (1) eşitliği kolayca çözülür ve buna bağlı olarak kazık yerdeğiştirmesi, dönmesi, eğilme

momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu belirlenebilir. p-y eğrilerini kullanarak analiz yapan bir çok bilgisayar programı, arazi ve laboratuvar deney sonuçlarından (SPT, Veyn, Dr,  $\epsilon_{50}$ ) p-y eğrilerini kendisi üretmektedir. İstenildiği durumda ise tasarımcı mühendis tecrübelerinden faydalanarak programa kendi oluşturduğu p-y eğrilerini girebilir.

## 2.2) CLM (Karakteristik Yük) Yöntemi

Bu yöntemde kazığın çap ve eğilme riğitliği ile zeminin mukavemet ve gerilme şekil değiştirme davranışı özelliklerini içeren karakteristik bir yük ve karakteristik bir moment tanımlanmaktadır.

$$P_c = 7.34B^2 (E_p R_1) \left( \frac{S_u}{E_p R_1} \right)^{0.68}$$

$P_c$   $M_c$ : Karakteristik yük ve moment

$$M_c = 3.86B^3 (E_p R_1) \left( \frac{S_u}{E_p R_1} \right)^{0.40}$$

$E_p$  : Kazığın elastisite modülü

$$R_1 = \frac{I_{\text{kazık}}}{I_{\text{daire}}} \text{ (Atalet momenti oranı)}$$

B: Kazık çapı

### 4.1

CLM yöntemi için oluşturulan eğriler kullanılarak verilen bir yük değeri için ötelenmeler ve kesitte oluşan moment değerleri bulunabilir.

## 3 ANALİZLERDE KULLANILAN ZEMİN VE KAZIK PARAMETRELERİ

Bildiriye konu olan kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerdeki iki adet kazığa ait deneysel veriler Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading adlı kitaptan alınmıştır (Lymon C. Reese & William F. Van Impe Rotterdam 2001). Kazıkların yanal yüklemeler altındaki davranışları, kazık ucuna yerleştirilen inklinometreler ve kazık boyunca kazık yüzeyine yapıştırılan şekil değiştirme ölçerler yardımı ile incelenmiştir. Statik yüklemeler ASTM standartlarına bağlı kalınarak belirlenen son yanal yük değerine

kadar aşamalı olarak arttırılmıştır. Her iki kazık'ta serbest başlı olarak deneye tabi tutulmuştur..

### 3.1 Kohezyonlu zeminde çakılan çelik kazık

Kohezyonlu zeminde yapılan yanal yüklü kazık örneği için Auistin Gölü (Texas) kıyısındaki kohezyonlu bir zeminde çakılan boyu  $L=12.8\text{m}$  ve çapı  $D=319\text{mm}$  olan bir çakma kazık üzerinde yapılan yatay kazık yükleme deneyi sonuçları kullanılmıştır. Bu kazığın maksimum kazık eğilme momenti  $31280\text{ kN-m}$ , atalet momenti  $I_{\text{kazık}}=14105.7\text{ cm}^4$  ve Elastisite modülü  $E_{\text{kazık}}=199938\text{ MPa}$ 'dır. Çizelge 1'de çakma kazığa ait özellikler sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre yanal yüklemeler etkisinde çelik kazık; kazık ucunda  $5.3\text{ cm}$  ötelenme ve kazık uzunluğu boyunca  $150\text{ kN-m}$  maksimum eğilme momenti değeri göstermiştir. Çelik kazık için son yanal yük değeri  $100\text{ kN}$  dur.

Çizelge 3.3 Auistin Gölü Kıyısına Çakılan Çelik Kazık Özellikleri

Uzunluk (m)	Çap (cm)	Alan (cm <sup>2</sup> )	Çevre (cm)	$I\text{ cm}^4$	E MPa	Et K. (mm)
12.8	31.9	119.9	100	14105	199938	12.7

Çelik kazığın çakıldığı Auistin Gölü (Texas) kıyısındaki killi zemin ortamından alınan örselenmemiş zemin örnekleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin sonuçları Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Austin Gölü kıyısındaki kohezyonlu zemine ait geoteknik parametreler

Derinlik(m)	Su İçeriği (%)	(S <sub>U</sub> ) (kN/m <sup>2</sup> )
0	29	32.2
1.14	33.5	42.3
3.39	50.1	17.5
3.70	49.6	30.1
4.30	48.3	23.4
5.69	46.1	51.8
7.25	54.5	29.8
9.47	55.5	32.6
15.0	-	32.6

### 3.2 Kohezyonsuz zeminde imal edilen fore kazık

Kohezyonsuz zeminde imal edilen yanal yüklü kazık örneği için Liperpool Garston'ta inşa edilen boyu  $L=12.5\text{m}$  uzunluğunda ve çapı  $D=1.5\text{m}$  olan bir fore kazık üzerinde yatay kazık yükleme deneyi yapılmış ve sonuçları bu çalışmada kullanılmıştır. Fore kazıkta, çekme dayanımı  $425\text{ N/mm}$  olan,  $50\text{ mm}$  çapında 36 adet çelik donatı kullanılmış ve kazığın maksimum eğilme momentinin  $M_{\text{ult}}=15.900\text{ kN-m}$  olması sağlanmıştır. Kazığın Elastisite Modülü  $E_{\text{kazık}}=20683\text{ MPa}$  ve Atalet momenti  $I_{\text{kazık}}=2.48 \times 10^6$  olarak hesaplanmıştır. Fore kazığa ait özellikler Çizelge 3'de sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre yanal yüklemeler etkisinde fore kazıkta; kazık ucunda  $5.15\text{ cm}$  yanal ötelenme ve kazık derinliği boyunca  $8611\text{ kN-m}$  maksimum eğilme momenti değeri ölçülmüştür. Fore Kazık için son yük değeri  $2360\text{ kN}$ 'dur



Çizelge 3.4 Garston (Liverpool ) Zeminine Yerleştirilen Fore Kazık Özellikleri

Uzunluk (m)	Çap (cm)	Alan (cm <sup>2</sup> )	Çevre (cm)	I cm <sup>4</sup>	E MPa
12.5	150	17671	471.2	2.4x10 <sup>6</sup>	20683

Arazide yapılan SPT deneyinden elde edilen sonuçlara göre kumlu çakıllı zemine ait içsel sürtünme açısı ve doğal birim hacim ağırlıkları Çizelge 4’de sunulmuştur.

Çizelge 4. Garston (Liverpool) Kumlu Zemin

Derinlik	N <sub>SPT</sub>	$\gamma_n$ kN/m <sup>3</sup>	$\phi$
0-3.5	65	21.5	43
3.5-6.5	30	9.7	37
6.5-9.5 (YASS)	61	11.7	43
9.5-	140	-	-

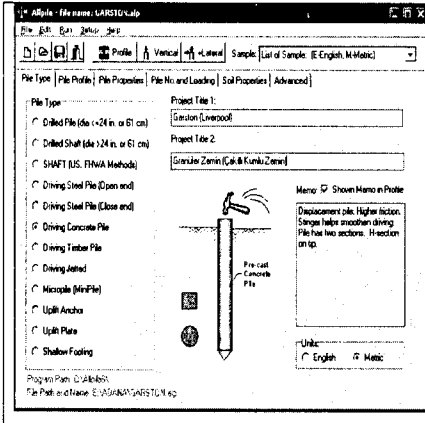
#### 4) ANALİZLERDE KULLANILAN PROGRAMLAR

Yanal yüklü kazıkların nümerik analizleri için tasarımda sıklıkla kullanılan LPILE 3.0, ALLPILE 6.0 ve CLM 2.0 programlarının eğitim amaçlı öğrenci versiyonları kullanılmıştır. ALLPILE 6.0 ve LPILE 3.0 (Vesic – Reese yaklaşımları) programları p-y eğrileri yöntemini kullanarak analiz yapmaktadır. CLM yöntemi içinse CLM 2.0 Excel Makro programı kullanılmıştır.

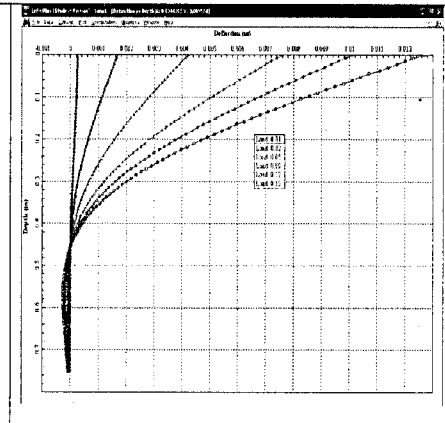
ALLPILE 6.0 programı geoteknik mühendisliğindeki birçok temel türünün modellenebildiği çok yönlü bir programdır. Kazık türü, boyutları, yerleştirme şekli, zemin özellikleri, yükleme koşulları ve kazığın serbestlik

dereceleri programa aktarılarak analizler yapılır. Analiz sonuçları kazık kesiti boyunca yer değiştirme, eğilme momenti, kesme kuvveti dağılımı olarak grafikler halinde elde edilerek ve Excel formatına dönüştürülerek raporlanabilmektedir (Şekil 2 ve Şekil 3).

LPILE 3.0, p-y eğrilerinin kullanıldığı COM 64 programı tabanında geliştirilmiş ve yalnızca yanal yüklü kazıkların analizin yapıldığı bir programdır. CLM 2.0 ise (Characteristic Load Method) programı Virginia Tech. Üniversitesinde hazırlanmış oldukça basit bir veri dönüştürme yazılımıdır ve üzerinde değişikliğe açık Excel Makro dosyasıdır



Şekil 4.1 ALLPILE Programı Ana sayfası



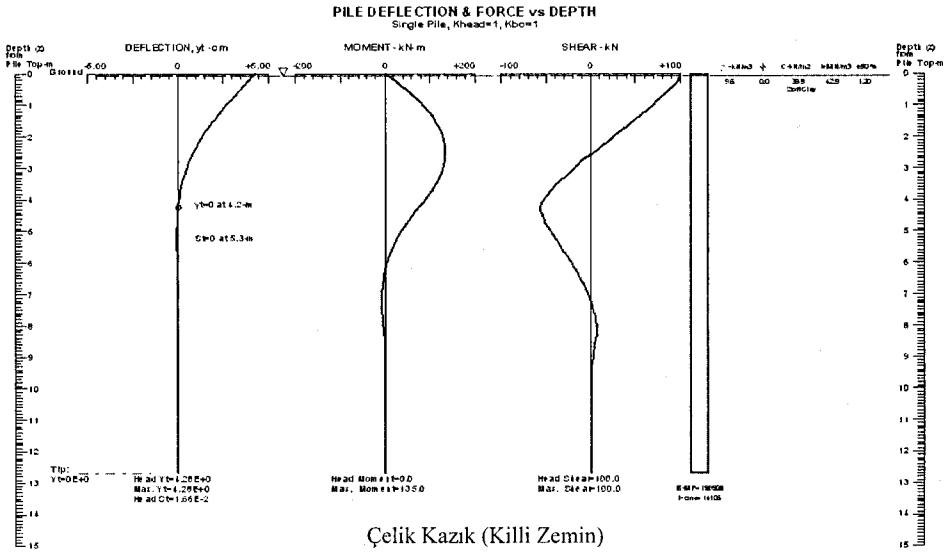
Şekil 4.2 LPILE 3.0 Program Analizi Eğrileri

## 5) ANALİZ SONUÇLARI ve DENEYSSEL ÖLÇÜMLERLE KARŞILAŞTIRMASI

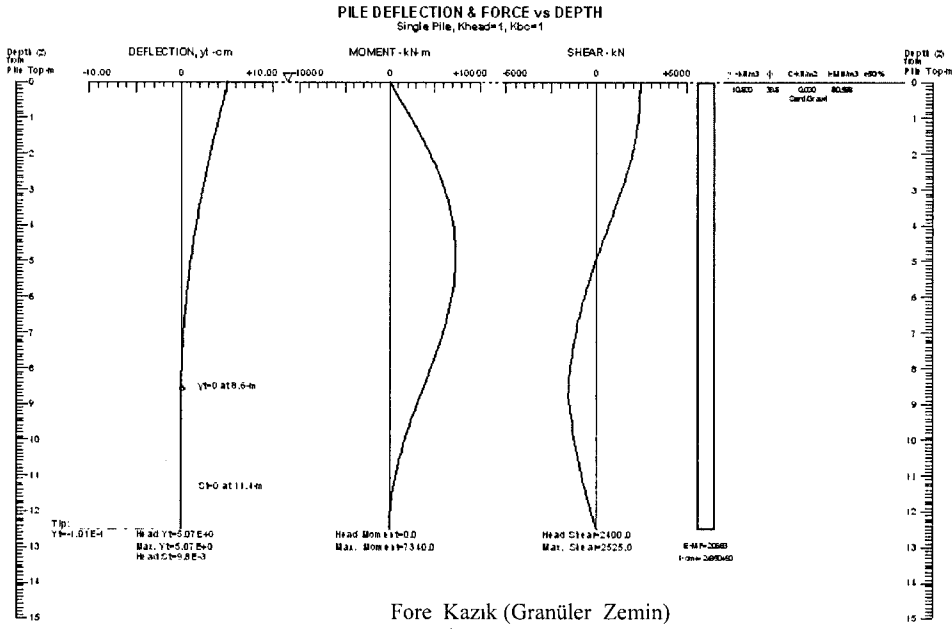
CLM 2.0 LPILE 3.0 ve ALLPILE 6.0 programlarında, fore ve çelik kazıklara ait özellikler ve yerleştirdikleri zemin ortamları da dikkate alınarak analizler yapılmış ve kazık boyunca meydana gelen şekil değiştirmeler ve eğilme momentleri hesaplanmış ve grafiklendirilmiştir.

Analiz sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. ALLPILE 6.0 programından elde edilen analiz sonuçlarına ait grafikler Şekil 4 ve Şekil 5’ de gösterilmiştir.

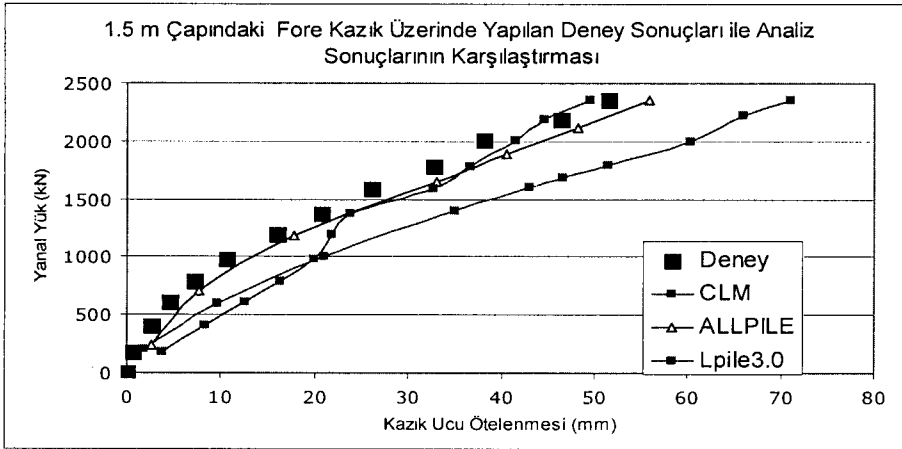
Şekil 6’da fore kazık için analizlerden elde edilen kazık ucu ötelenmesi değerleri ile yanal kazık yükleme deneyinden belirlenen ötelenme değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 7’de fore kazık için analizlerden elde edilen kazık ucundaki maksimum eğilme momentinin karşılaştırılması verilmiştir. Benzer şekilde Şekil 8 ve Şekil 9’da çelik kazık için sırasıyla kazık ucu ötelenmesi ve kazık ucundaki maksimum eğilme momentinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’dan da görüldüğü gibi analiz sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçları birbiri ile oldukça uyumlu çıkmıştır.



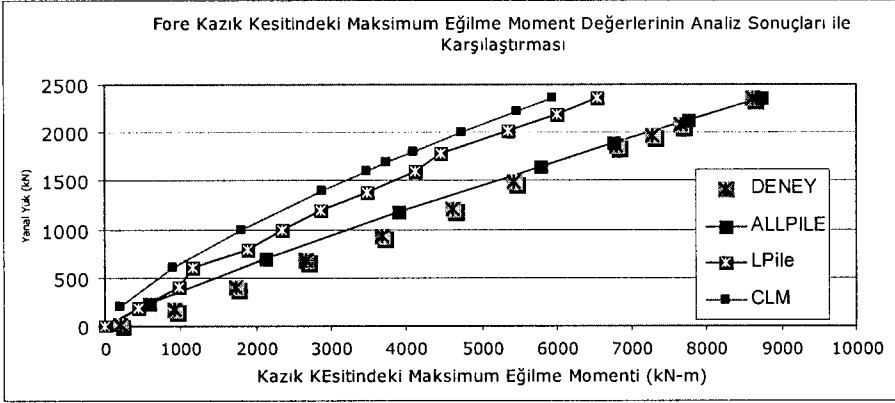
Şekil 6.1 0.32 m çapındaki Çelik Kazığa ait ALPILE 6.0 programı analiz grafikleri



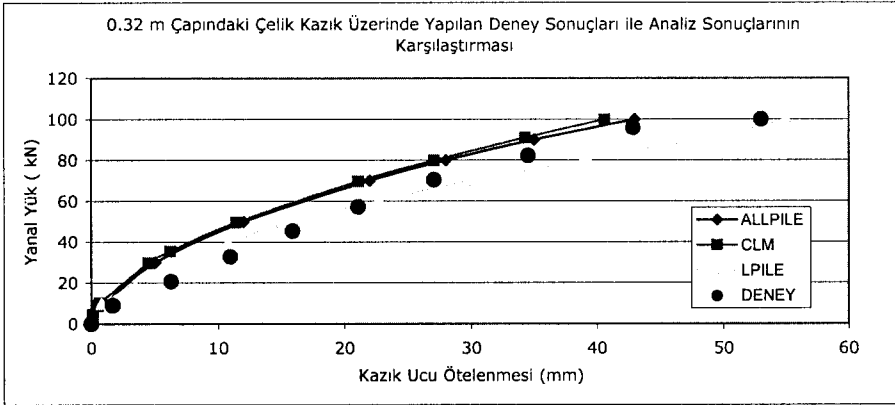
Şekil 6.2 1.5 m çapındaki Fore Kazığa ait ALPILE 6.0 programı analiz grafikleri



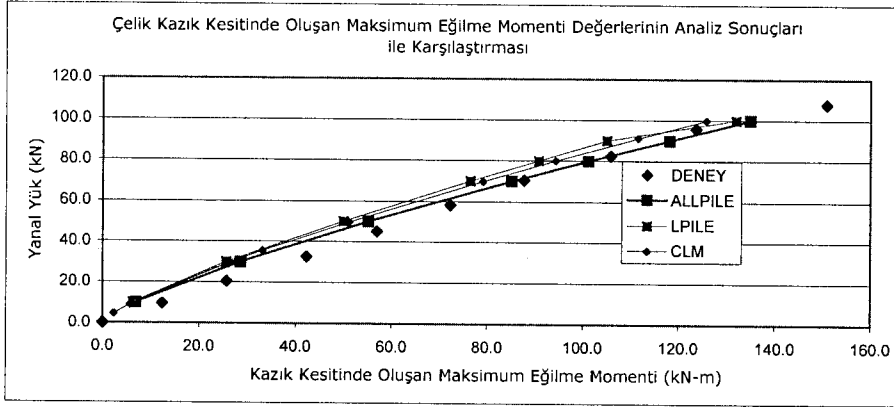
Şekil 6.3 Fore Kazık Üzerinde Yapılan Deney ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 6.4 Fore Kazık Üzerinde Yapılan Deneysel ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 6.5 Çelik Kazık Üzerinde Yapılan Deneysel ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 6.6 Çelik Kazık Üzerinde Yapılan Deney ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

## SONUÇLAR

Bu bildiriye siltli-killi ve kumlu-çakıllı zeminlere yerleştirilmiş iki farklı kazığın yanal yükleme altındaki davranışı incelenmiştir. Yanal yüklü kazıkların tasarımında kullanılan üç farklı bilgisayar programında mevcut kazıklara ait zemin ve kazık özellikleri girilerek analizler yapılmıştır. Kazık ucuna yerleştirilen inklinometreler ve kazık derinliği boyunca ölçüm yerleştirilen şekil değiştirme ölçerler yardımı ile elde edilen yer değiştirme ve eğilme momentleri, yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ile ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında ALLPILE 6.0, LPILE 3.0 ve CLM 2.0 programlarının analiz sonuçları ile deneysel verilerin birbirleri ile oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer yandan, analiz yöntemleri bakımından p-y metodu ile CLM metotlarının yanal yüklemeler etkisinde kazık yer değiştirme ve eğilme momentlerinin tahmininde birbirleri ile oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. p-y eğrileri yardımı ile yanal yüklü kazıkların analizlerinin yapılmasında tasarımcıların özel bilgisayar programlarına ve yazılımlara ihtiyaçları olduğu göz önüne alındığında, Excel ortamında çalışabilen CLM yönteminin tasarımcılar için

oldukça kolay, hızlı ve ucuz bir ön tasarım yöntemi olduğu belirlenmiştir. İleride yapılacak çalışmalarla, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak analiz sonuçları da eklenerek yanal yüklü kazıkların davranışları çok yönlü olarak incelenecektir.

## KAYNAKLAR

Duncan J. Evans, Jr L. T. And Ooi, S K. (1994) “Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts” J. Geotech Eng Div ASCE, Vol 20, No 5, pp . 1018-1033

Matlock, h. , (1970) “Correlation for Desing of Laterally Loaded Piles in Soft Clay” Proceeding Offshore Technology Conference Papaer No. OTC 1204 Houston

Poulos H. G., and Madhav M. R. (1971) “Analysis of Movement of Battered Piles” Proceeding Australian – New Zeland Conference on Geomechanics pp 268-275 Melbourene Australia

Reese, L. C. Cox W. R. and Koop, F. D., (1974) “Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand” Proceeding Offshore Technology Conference Paper No. OTC 2080 pp 473-480 Houston

Reese L. C. Matlock H., and Wang S. T (1986) “Method of Analysis of Piles under Lateral Loading” Marine Geotechnology and Nearshore/Offshore Structure ASTM STP 923 R. C. Chaney and H. Y. Fang Ed. Pp 199-200

Gültekin Sami. “ Yatay Yüklü Düşey Kazıkların Labaratuvar Koşullarında Modellenmesi ve Hesap Esasları” Yüksek Lisans Tezi YTÜ Fen Bilimleri Enst. (2001) İstanbul

Yıldırım Sönmez., “Kazıklı Temellerin Tasarımı” (2005) Birsen Yayınları., İstanbul.

